



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση της Απόδοσης των Κρυσταλλικών
Φωτοβολταϊκών στις Κλιματικές Συνθήκες της Ελλάδας.
Περίπτωση Εφαρμογής σε Κτίρια**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΑΘΗΝΑΣ Γ. ΓΑΓΛΙΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
SCHOOL OF ELECTRICAL
AND COMPUTER ENGINEERING
DIVISION OF ELECTRIC POWER

**Modeling of Crystalline Photovoltaic Performance in the
Climate Conditions of Greece.
Case Study in Buildings**

DOCTORAL DISSERTATION

ATHINA G. GAGLIA

Mechanical Engineering NTUA

Athens, June 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση της Απόδοσης των Κρυσταλλικών
Φωτοβολταϊκών στις Κλιματικές Συνθήκες της Ελλάδας.
Περίπτωση Εφαρμογής σε Κτίρια**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της ΑΘΗΝΑΣ Γ. ΓΑΓΛΙΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική Επιτροπή :

Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Σταύρος Παπαθανασίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή στις 28 Ιουνίου 2019

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή


Ευάγγελος Διαλυνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


Αθανάσιος Αργυρίου
Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πατρών


Παύλος Γεωργιλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.


Φραγκίσκος Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


Έλενα Φλόκα
Καθηγήτρια Εθνικού και
Καποδιστριακού Πανεπιστημίου
Αθηνών

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Αθηνά Γ. Γαγλία

Υπ. Διδάκτωρ, Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθηνά Γ. Γαγλία, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στους ανθρώπους που έχουν τη θέληση να δημιουργούν...
Στην οικογένειά μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ευάγγελου Διαλυνά.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου, είχα την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση του Καθηγητή κ. Ευάγγελου Διαλυνά, όσον αφορά το ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής, καθώς και τη μακρόχρονη περίοδο εκπόνησης. Η συνεργασία μου με τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Διαλυνά ήταν ιδιαίτερα εποικοδομητική και δημιουργική, γεγονός που με ώθησε στην ολοκλήρωση αυτού του ερευνητικού έργου, το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό και περιβαλλοντικό ενδιαφέρον, καθώς αφορά την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, μέσω φωτοβολταϊκών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, καθώς και δεδομένα πειραματικών Φ/Β μονάδων από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και το Γαλλικό Κέντρο Ατομικής και Εναλλακτικής Ενέργειας στο Κανταράς της Γαλλίας (CEA - Atomic Energy and Alternative Energy Commission of France CEA Cadarache), τα οποία συνέβαλαν ουσιαστικά στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Αθανάσιο Αργυρίου, πρώην ερευνητή του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τον Δρα. Antoine Guérin de Montgareuil για τα πειραματικά δεδομένα των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) μονάδων που μου παραχώρησαν. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλους τους φίλους και συναδέλφους μηχανικούς, για τις μετρήσεις των Φ/Β πάρκων που μου διέθεσαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Επιτροπής μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου και κ. Σταύρο Παπαθανασίου, καθώς επίσης και τους Καθηγητές κ. Αθανάσιο Αργυρίου, κ. Παύλο Γεωργιλάκη, κ. Φραγκίσκο Τοπαλή και κα. Έλενα Φλόκα, για τη στήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις τους επί της διατριβής.

Τέλος, είμαι ευγνώμων σε όσους στην πορεία αυτής της προσπάθειας με ενθάρρυναν και υποστήριξαν την εκπόνηση αυτού του έργου, ο καθένας με τον δικό του ιδιαίτερο τρόπο, στην οικογένειά μου, στους συνεργάτες μου, στους φίλους μου και ιδιαίτερω στη Μαρίνα Βασιλοπούλου που έφυγε νωρίς.

Αθηνά Γαγλία,
Ιούνιος 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή έχει ως στόχο την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς / απόδοσης των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών (Φ/Β), κατά τη λειτουργία τους σε συνθήκες περιβάλλοντος και ειδικότερα στις κλιματικές συνθήκες των ελληνικών περιοχών. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκαν κατάλληλες αναλυτικές σχέσεις που μοντελοποιούν / παραμετροποιούν τον υπολογισμό:

- α) της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο, για κάθε μήνα και για κάθε ελληνική περιοχή. Οι αναλυτικές σχέσεις βασίστηκαν κυρίως σε κλιματικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) για τις ελληνικές περιοχές, σε σχετικές επιστημονικές εργασίες, καθώς και σε εμπειρικά και θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας.
- β) της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης ωριαίας θερμοκρασία του αέρα, για κάθε μήνα και κάθε ελληνική περιοχή. Οι αναλυτικές σχέσεις βασίστηκαν σε κλιματικά δεδομένα της ΕΜΥ για τις ελληνικές περιοχές.
- γ) της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) σε συνάρτηση με τις κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν την ενεργειακή τους συμπεριφορά, καθώς και με τα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά των κρυσταλλικών Φ/Β. Οι αναλυτικές σχέσεις προέκυψαν από την αξιολόγηση μετρήσεων από δύο πειραματικές μονάδες Φ/Β, εγκατεστημένες σε εξωτερικό περιβάλλον.
- δ) της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά απορροφάται από τη συλλεκτική επιφάνεια των Φ/Β και αξιοποιείται, σε συνάρτηση με τη θέση του ήλιου κάθε χρονική στιγμή (ηλιακές γωνίες), τη γωνία πρόσπτωσης, τη διαπερατότητα του καλύμματος του Φ/Β, την απορροφητικότητα της συλλεκτικής επιφάνειας, καθώς και το ποσοστό διάχυτης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η πραγματική ενεργειακή απόδοση των Φ/Β (%) παρουσιάζει έντονη διακύμανση στη διάρκεια μιας μέρας ανά εποχή και η μέση μηνιαία απόκλιση από την ονομαστική ενεργειακή απόδοση των Φ/Β, που δίνει ο κατασκευαστής, μπορεί να κυμαίνεται από 9% έως και 40%, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β. Οι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την ποσοστιαία διακύμανση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β είναι κυρίως η θερμοκρασία του Φ/Β και η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β. Η θερμοκρασία του Φ/Β επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, και δευτερεύοντος από την ένταση του ανέμου και την υγρασία.

Η μέση ετήσια ποσοστιαία μείωση του βαθμού απόδοσης λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειάς των κρυσταλλικών Φ/Β, κυμαίνεται από 6% έως και 20%, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β, για τις κλιματικές συνθήκες των Ελληνικών περιοχών. Αντίστοιχα η συνολική μέση ετήσια ποσοστιαία μείωση του βαθμού απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β,

κυμαίνεται από 20% έως και 35%, ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β και τις κλιματικές συνθήκες των επιμέρους Ελληνικών περιοχών.

Η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και η ποιοτική σύστασή της σε άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη για διαφορετικές συνθήκες αιθριότητας, μεταβάλλουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ του Φ/Β. Στις περιοχές με αυξημένη νέφωση, τα κρυσταλλικά Φ/Β με σύστημα παρακολούθησης του ήλιου (δύο αξόνων) έχουν λιγότερο ενεργειακό όφελος από το αναμενόμενο κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες ηλιοφάνειας, λόγω του χαμηλότερου ποσοστού άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι αναλυτικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, εφαρμόστηκαν για τη μελέτη εγκατάστασης Φ/Β συστημάτων σε κτίρια κατοικιών. Αναλύθηκε και αξιολογήθηκε η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β συστημάτων και η βιωσιμότητά τους από οικονομικής απόψεως, με στόχο τα κτίρια κατοικιών στις διάφορες ελληνικές περιοχές να καταστούν ενεργειακά αυτόνομα ή να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες μέσω συμψηφισμού ενέργειας, σε σύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής μπορούν να εφαρμοστούν και σε κτίρια του τριτογενή τομέα (γραφεία, καταστήματα, εκπαίδευσης, νοσοκομεία, ξενοδοχεία κτλ), καθώς οι υπολογισμοί είναι ανά μονάδα εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος των Φ/Β συστημάτων ή ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Η χρήση Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις είναι μια εφαρμογή που φαίνεται να είναι πλέον μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση για τις ελληνικές περιοχές, ειδικά όσον αφορά τη διαδικασία συμψηφισμού ενέργειας, σε σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς το κόστος των Φ/Β στην Ελλάδα έχει περιοριστεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ενώ το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς. Αντίθετα, η χρήση Φ/Β ως η μόνη πηγή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου δεν φαίνεται ακόμα να είναι μια ελκυστική επένδυση, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους συσσωρευτών και λοιπού εξοπλισμού. Ωστόσο, στην περίπτωση κτιρίων απομακρυσμένων από το ηλεκτρικό δίκτυο, η επένδυση μιας Φ/Β εγκατάστασης που λειτουργεί αυτόνομα, σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις γίνεται οικονομικά ελκυστική.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to assess the energy output performance (efficiency) of crystalline photovoltaic panels operating in outdoor conditions, under different climate characteristics pertaining in various Greek regions. In this framework, empirical models were developed, using appropriate analytical relationships, in order to estimate:

- a) The average hourly solar radiation per month for each Greek region. Correlation equations were obtained based on a dataset by the Hellenic National Meteorological Service (abbreviated as EMY in Greek) for different Greek locations, using empirical as well as theoretical estimation models of solar radiation.
- b) The average, maximum and minimum hourly outdoor air temperature, for each month in each different Greek region/location. Correlation equations were obtained based on the Hellenic National Meteorological Service datasets for different Greek locations.
- c) The actual energy performance (capability) of crystalline photovoltaic (PV) systems (electricity production), according to climate conditions that influence their energy performance, as well as to the specific technical characteristics of crystalline photovoltaic panels. Correlation equations were obtained through the analysis of the data drawn from two experimental PV systems installed outdoors.
- d) The solar radiation transmitted through the PV glazing and impinging on the PV module and finally utilized, according to sun position (solar angles), to the incidence angle of solar radiation, to the transmittance of PV glass cover, to the absorptance of PV plate, as well as the degree of direct and diffuse solar radiation.

The actual energy performance (%) of PV systems varies greatly within a day in a given season. The average monthly deviation of actual energy performance from the nominal energy performance (STC) provided by the manufacturer may vary from 9% to 40%, depending on the climate conditions in each region and on the technical characteristics of the photovoltaic systems. Parameters influencing the variance of actual energy performance (%), in relation to nominal performance, are mainly the PV temperature and the incidence angle of solar radiation on the PV plate. The PV surface temperature is influenced mainly by the outdoor air temperature and the solar radiation, whereas to a smaller extent by the air velocity and humidity. The average annual percentage decrease of the PV nominal energy performance, due to the PV temperature, varies from 6% up to 20%, depending on the technical characteristics of the PV system, in different climate conditions of the Greek regions. In addition, the total average annual percentage decrease of the PV nominal energy performance varies from 20% up to 35%, depending on the technical characteristics of the PV system, in different climate conditions of the Greek regions.

The solar radiation variation, as well as its qualitative differentiation as of beam, diffuse and ground-reflected components, under different climate conditions influences the expected energy efficiency (and power generation) of crystalline PV systems. In regions characterized by intense cloudiness, the crystalline PV, with a two-axes sun following system, have lower energy power

performance than that achieved under clear sky conditions, in the morning and in the afternoon, due to the lower percentage of direct solar radiation.

The empirical models, that were development in the framework of this thesis, were applied in a study of PV systems in residential buildings. Energy efficiency and energy production as well as its financial feasibility were analyzed and evaluated, in order to estimate how residential buildings in different Greek regions could become energy autonomous and/or cover part of their energy demands, through to a net-metering system in connection to the regional power supply network. Results obtained through this analysis can also be applied in buildings of the tertiary sector (i.e. in offices, hotels, schools, hospitals), as the results of estimates are per output PV power unit (kW) or electricity unit (kWh).

Usage of photovoltaic panels in buildings appears to be financially viable in Greek regions, especially through the application of a net-metering system connected to the regional power network, as the cost of PV systems on one hand has decreased substantially in Greece during the last few years, whereas the electric power cost is constantly rising. Nonetheless, the usage of autonomous PV systems (no available power network) has not been established yet as a financially viable solution due to the high cost of batteries (storage cell). However, in the cases of buildings located far from the main electricity network, the application of an autonomous (stand-alone) PV system is becoming more and more attractive in comparison to alternative power supply solutions.

Κατάλογος Συντημήσεων

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
ΕΞ-ΕΝ	Εξοικονόμηση Ενέργειας
ΕΣΥΕ	Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας
ΕΣΑ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΗΑ	Ηλιακή Ακτινοβολία
ΗΕ	Ηλιακή Ενέργεια
LED	Οπτική Δίοδος
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
STC	Standard Test Conditions (Συνθήκες Ελέγχου Εργαστηρίου)
NOCT	Συνθήκες λειτουργίας στην ονομαστική θερμοκρασία Φ/Β (Nominal Operating Cell Temperature)

Κατάλογος Παραμέτρων και Δεικτών

λ	Μήκος κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
ν	Συχνότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
c_0	Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό
c	Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω υλικών
G_{sc}	Ηλιακή σταθερά (Solar Constant) 1367 W/m ²
AM	Αέρια Μάζα
ϕ	Γεωγραφικό πλάτος
L	Γεωγραφικό μήκος
A	Υψόμετρο περιοχής
δ	Ηλιακή απόκλιση
γ_s	Αζιμούθια γωνία ήλιου
γ	Αζιμούθια γωνία επιφάνειας
β	Κλίση επιφάνειας (Φ/Β κτλ)
θ	Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια
θ_z	Ζενιθιακή γωνία ήλιου
α	Ηλιακό ύψος
G_{on}	Μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου (W/m ²)
G_o	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στο όριο της ατμόσφαιρας (W/m ²)
E_o	Διορθωτικός συντελεστής για την εκκεντρότητα τη γης
G_c	Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη (W/m ²), σε συνθήκες καθαρού ουρανού (c)
G_{cb}	Ένταση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη (W/m ²), σε συνθήκες καθαρού ουρανού (c)
G_{cd}	Ένταση διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη (W/m ²), σε συνθήκες καθαρού ουρανού (c)
τ_b	Συντελεστής μεταφοράς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

T_d	Λόγος της έντασης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη προς την ένταση της διάχυτης σε οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας
G_b	Ένταση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη (W/m^2)
G_d	Ένταση διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια στη Γη (W/m^2)
G	Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (W/m^2)
G_T	Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (W/m^2)
ω	Ωριαία γωνία ήλιου
ω_s	Ωριαία γωνία δύσης του ήλιου
D	Αριθμός ημέρας του χρόνου
H_X	Ηλιακός χρόνος (hr)
T_X	Τοπικός χρόνος (hr)
L_{ST}	Γεωγραφικό μήκος του σταθερού μεσημβρινού της περιοχής
L_T	Γεωγραφικό μήκος του τοπικού μεσημβρινού της περιοχής
I_o	Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (kWh/m^2)
H_o	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (kWh/m^2)
\overline{H}_o	Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (kWh/m^2)
I	Ολική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
H	Ολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
\overline{H}	Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
kt	Συντελεστής αιθριότητας
Kt	Μέσος ημερήσιος συντελεστής αιθριότητας
\overline{K}_t	Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας
K_d	Ποσοστό διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας ως προς την συνολική σε οριζόντια επιφάνεια
T_b	Συντελεστής μεταφοράς άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από το όριο της ατμόσφαιρας στην επιφάνεια της γης
I_d	Ωριαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
\overline{H}_d	Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
I_β	Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
I_b	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
$I_{b\beta}$	Άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
r_b	Γεωμετρικός παράγοντας. Εκφράζει το λόγο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση στο οριζόντιο επίπεδο.
I_d	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο
$I_{d\beta}$	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο
$I_{r\beta}$	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο από ανάκλαση
$I_{s\beta}$	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο από σκέδαση στον ουράνιο θόλο
\overline{H}_d	Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
\overline{H}_T	Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης (kWh/m^2)
\overline{R}_b	Μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας. Ο λόγος της μέσης μηνιαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την μέση μηνιαία άμεση στο οριζόντιο επίπεδο.
ρ	Ανακλαστικότητα του εδάφους
ω_{ss}	Ωριαία γωνία δύσης του ήλιου σε μια κεκλιμένη επιφάνεια
ω_{sr}	Ωριαία γωνία ανατολής του ήλιου σε μια κεκλιμένη επιφάνεια
I	Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος Φ/Β (Ampere)

V	Τάση ηλεκτρικού ρεύματος Φ/Β (Volt)
P_{pv}	Ηλεκτρική ισχύς Φ/Β (Watt)
I_{sc}	Ρεύμα βραχυκυκλώσεως Φ/Β
V_{oc}	Τάση ανοικτού κυκλώματος Φ/Β
R_{Load}	Αντίσταση φορτίου στο κύκλωμα του Φ/Β
P_m	Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς Φ/Β (Watt), σε συνθήκες SCT
I_{mp}	Ένταση ρεύματος Φ/Β στο σημείο μέγιστης ισχύος
V_{mp}	Τάση ρεύματος Φ/Β στο σημείο μέγιστης ισχύος
FF	Συντελεστής πλήρωσης Φ/Β
η_{pv}	Βαθμός απόδοσης Φ/Β (%)
η_{Tref}	Ονομαστικός βαθμός απόδοσης Φ/Β (%) για θερμοκρασία αναφοράς Φ/Β T_{ref}
T_{pv}	Θερμοκρασία στην επιφάνεια του Φ/Β ($^{\circ}C$)
T_{ref}	Θερμοκρασία αναφοράς στην επιφάνεια του Φ/Β ($25^{\circ}C$) για συνθήκες εργαστηρίου (STC)
β_{ref}	Συντελεστής θερμοκρασίας Φ/Β
G_{Tref}	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ($1000 W/m^2$) για συνθήκες εργαστηρίου (STC)
S_{pv}	Η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά αξιοποιείται από τα Φ/Β, Εξίσωση 2.2.14
A_{pv}	Επιφάνεια Φ/Β (m^2)
$\tau\alpha(\theta)_{av}$	Μέσος συντελεστής (γινόμενο) της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) της διαφανούς επιφάνειας του Φ/Β, για γωνία θ
$\tau\alpha(\theta)_b$	Γινόμενο της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) της διαφανούς επιφάνειας του Φ/Β για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία
$\tau\alpha(\theta)_d$	Γινόμενο της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) της διαφανούς επιφάνειας του Φ/Β για τη διάχυτη (από σκέδαση) ηλιακή ακτινοβολία
$\tau\alpha(\theta)_r$	Γινόμενο της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) της διαφανούς επιφάνειας του Φ/Β για την ανακλώμενη (από έδαφος, νέφωση κτλ) ηλιακή ακτινοβολία
θ_r	Γωνία διάθλασης της διαφανούς επιφάνειας του Φ/Β
V_w	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
T_{air}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα ($^{\circ}C$)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1.	ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	3
1.2.	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	7
1.3.	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	14
1.3.1.	Ηλιακή Ενέργεια στην Ελλάδα.....	16
1.3.2.	Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	18
1.4.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	24
2.	ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ– ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	27
2.1.	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	27
2.1.1.	Ηλιακή Ακτινοβολία σε Οριζόντιες Επιφάνειες.....	30
2.1.2.	Ηλιακή Ακτινοβολία σε Κεκλιμένες Επιφάνειες.....	35
2.1.3.	Αέρια Μάζα.....	39
2.1.4.	Ατμοσφαιρικά Μοντέλα Υπολογισμού Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	40
2.1.5.	Βέλτιστη Κλίση Επιφάνειας για Ηλιακές Εφαρμογές.....	40
2.2.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	43
2.2.1.	Βασικές Αρχές Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών.....	43
2.2.2.	Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κρυσταλλικών Φωτοβολταϊκών Πυριτίου.....	45
2.2.3.	Λειτουργία Φωτοβολταϊκών Σε Συνθήκες Εξωτερικού Περιβάλλοντος – Θεωρητικά και Εμπειρικά Μοντέλα Υπολογισμού.....	49
3.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	62
3.1.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	62
3.2.	ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	64
3.2.1.	Μέση Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια.....	64
3.2.2.	Μέση Μηνιαία Ωριαία Ηλιακή Ενέργεια.....	66
3.2.3.	Μέση Μηνιαία Ωριαία Ηλιακή Ενέργεια – Συνθήκες Καθαρού Ουρανού.....	72
3.2.4.	Βέλτιστη Κλίση Επιφάνειας (β) για Μέγιστη Ετήσια Ηλιακή Αξιοποίηση.....	73
3.2.5.	Παράμετροι που Επηρεάζουν τη Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια μιας Περιοχής.....	75
3.3.	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ.....	77
3.3.1.	Ανάλυση Μετρήσεων Θερμοκρασίας Αέρα.....	78
3.3.2.	Αναλυτικές Σχέσεις Υπολογισμού της Μέσης Ωριαίας Θερμοκρασίας Αέρα.....	81
4.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	86
4.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ Φ/Β.....	86
4.1.1.	Πειραματική Μονάδα Αστεροσκοπείου.....	86
4.1.2.	Πειραματική Μονάδα στο CEA-Cadarache, στη Γαλλία.....	89
4.2.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ Φ/Β ΜΟΝΑΔΩΝ.....	90
4.2.1.	Δεδομένα Πειραματικής Μονάδας Αστεροσκοπείου.....	90
4.2.2.	Δεδομένα Πειραματικής Μονάδας CEN-Cadarache.....	92
4.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β.....	93
4.3.1.	Γεωμετρικοί Παράγοντες Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	93

4.3.2.	Παράμετροι και Φυσικά Μεγέθη Λειτουργίας Φ/Β	96
4.3.3.	Λειτουργία Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος Παρόμοιες με τις Πρότυπες Συνθήκες Εργαστηρίου (Standard Test Conditions - STC)	105
4.4.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Φ/Β από ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΝΤΕΛΗΣ	109
4.4.1.	Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/Β.....	109
4.4.2.	Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος	111
4.4.3.	Ισχύς Εξόδου Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος	112
4.5.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ από ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΝΤΕΛΗΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	114
4.6.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΓΑΛΛΙΑ.....	116
4.6.1.	Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/Β.....	116
4.6.2.	Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος	116
4.6.3.	Ισχύς Εξόδου Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος	123
4.7.	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	126
5.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ Φ/Β ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	128
5.1.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β.....	128
5.1.1.	Νέφωση και Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια στην Επιφάνεια Φ/Β	129
5.1.2.	Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/Β και Ενεργειακή Απόδοση.....	133
5.2.	ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β	143
5.2.1.	Θέση Επιφάνειας Φ/Β και Ενεργειακή Απόδοση.....	143
5.2.2.	Φυσικά και Τεχνητά Εμπόδια Ηλιασμού	147
5.2.3.	Φ/Β Μεταβαλλόμενου Προσανατολισμού και Κλίσης – Ενεργειακό Όφελος.....	150
5.3.	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	153
5.3.1.	Διακύμανση Ενεργειακής Απόδοσης Φ/Β – Θεωρητική Προσέγγιση	155
5.3.2.	Διακύμανση Ενεργειακής Απόδοσης Φ/Β – Εφαρμογή Εμπειρικών Μοντέλων	157
6.	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ Φ/Β ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ	160
6.1.	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ	161
6.1.1.	Ηλεκτρικά Φορτία Κτιρίων Κατοικιών.....	165
6.2.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ	168
6.2.1.	Δεδομένα Μελέτης.....	168
6.2.2.	Ηλιακή Ενέργεια προς Αξιοποίηση από Φ/Β.....	169
6.2.3.	Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β	171
6.2.4.	Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιφάνεια Φ/Β	175
6.2.5.	Οικονομοτεχνική Ανάλυση Επένδυσης.....	180
6.3.	ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ/Β ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ.....	186
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	188
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	192
A.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΡΩΤΟ	201
B.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	212
Γ.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΤΡΙΤΟ.....	220

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας Νο.	Σελίδα
Πίνακας 1.2.1: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργεια στις κατοικίες για τα έτη 1980, 2001 και 2010 [19,20]	12
Πίνακας 1.2.2: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργεια στα κτίρια του τριτογενούς τομέα για τα έτη 1980, 2001 και 2010 [19,21]	13
Πίνακας 2.1.1: Μέση τιμές αέριας μάζας (AM) στην επιφάνεια της Γης	39
Πίνακας 2.1.2: Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια για τις βέλτιστες γωνίες κλίσης β των Φ/Β (kWh/m ² /mo), και βέλτιστη κλίση σε ετήσια (E) βάση, χειμερινή (X) και θερινή (Θ) περίοδο, για διάφορες περιοχές της Ελλάδας[44,31].....	42
Πίνακας 2.2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείου, υπό συνθήκες εργαστηρίου (STC)	45
Πίνακας 2.2.2: Συντελεστές a_0 έως a_4 υπολογισμού του παράγοντα μετατροπής αέριας μάζας (M)	54
Πίνακας 2.2.3: Συντελεστής k (παράμετρος Ross) (K.m ² /W)	55
Πίνακας 2.2.4: Συντελεστής θερμοκρασίας β_{ref} για κρυσταλλικά Φ/Β	57
Πίνακας 2.2.5: Συντελεστές αδιάστατων παραμέτρων της εμπειρικής Εξίσωσης Durisch W, Bitnar B, Mayor J, Kiess H, Lam K and Close J.[87]	57
Πίνακας 2.2.6: Συντελεστές παραμέτρων της πολυωνυμικής Εξίσωσης PVUSA [101-102]	59
Πίνακας 2.2.7: Συντελεστές παραμέτρων της πολυωνυμικής Εξίσωσης 2.2.27	59
Πίνακας 3.1.1: Διαχωρισμός της ελληνικής επικράτειας σε κλιματικές ζώνες κατά νομούς	63
Πίνακας 3.2.1: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια (kWh/m ² /hr) στο κεκλιμένο επίπεδο για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα)	67
Πίνακας 3.2.2: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (I)	69
Πίνακας 3.2.3: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής), της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (I_{β}) με βέλτιστη κλίση β (μέγιστη ετήσια αξιοποίηση).....	70
Πίνακας 3.2.4: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής), της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη απορροφητική επιφάνεια του Φ/Β ($I_{\beta-\tau(\theta)}$) με βέλτιστη κλίση β (μέγιστη ετήσια αξιοποίηση)	71
Πίνακας 3.3.1: Ελληνικές πόλεις με μετρήσεις της EMY για τη διακύμανση της θερμοκρασία του αέρα ...	77
Πίνακας 3.3.2: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής) για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα από τις εξισώσεις 3.3.1 και 3.3.2, για κάθε μήνα για την περιοχή της Αθήνα	80
Πίνακας 3.3.3: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο 6:00 πμ έως 21:00 μμ τοπική ώρα Ελλάδος.	83
Πίνακας 3.3.4: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της μέγιστης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο 6:00 πμ έως 21:00 μμ τοπική ώρα Ελλάδος.	84
Πίνακας 3.3.5: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της ελάχιστης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες	

Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (φ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο 6:00 πμ έως 21:00 μμ τοπική ώρα Ελλάδος.	85
Πίνακας 4.1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β μονάδων (Αστεροσκοπείου) για STC.....	87
Πίνακας 4.1.2: Συμβολισμοί και μονάδες μετρήσεων οργάνων πειραματικής διάταξης Φ/Β	88
Πίνακας 4.1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (CEN-Cadarache) για STC.....	90
Πίνακας 4.2.1: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο.....	91
Πίνακας 4.2.2: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων στη Φ/Β εγκατάσταση CEN-Cadarache	91
Πίνακας 4.2.3: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων στη Φ/Β εγκατάσταση CEN-Cadarache	92
Πίνακας 4.3.1: Ποσοστιαία κατανομή (%) των τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β που υπολογίστηκαν βάσει των μετρήσεων, κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο, στην Παλαιά Πεντέλη	93
Πίνακας 4.6.1: Σταθεροί συντελεστές και τυπικά σφάλματα της Εξίσωσης 4.4.1, για τις μετρήσεις σε Πεντέλη και Cadarache	116
Πίνακας 4.6.2: Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης (%) των Φ/Β. Τιμές σταθερών συντελεστών και τυπικά σφάλματα για την περιοχή της Πεντέλης και του Cadarache.....	117
Πίνακας 4.6.3: Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ισχύος εξόδου των Φ/Β. Τιμές σταθερών συντελεστών και τυπικά σφάλματα για την περιοχή της Πεντέλης και του Cadarache.....	123
Πίνακας 5.1.1: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.2, για τον υπολογισμό του λόγου S_{pv}/I_{β}	132
Πίνακας 5.1.2: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,02$ (Φ/Β ελεύθερα εγκατεστημένα, εκτεθειμένα στον άνεμο).....	134
Πίνακας 5.1.3: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,035$ (Φ/Β ελεύθερα εγκατεστημένα με ανεμοπροστασία).....	135
Πίνακας 5.1.4: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,055$ (Φ/Β ενσωματωμένα σε επιφάνειες, π.χ. κεκλιμένη στέγη).....	136
Πίνακας 5.1.5: Ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}) του Φ/Β, σε επτά Ελληνικές περιοχές για συντελεστή Ross $k=0,02$, λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β	139
Πίνακας 5.1.6: Συντελεστές Εξίσωσης 5.1.5 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β	140
Πίνακας 5.2.1: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.2.1, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαία διακύμανσης (%) του ονομαστικού απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}) λόγω γωνίας πρόσπτωσης (θ).....	146
Πίνακας 5.3.1: Συντελεστές Εξίσωσης 5.3.4 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης της ονομαστικής απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}), λόγω β_{ref} και $\tau_a(\theta)_{av}$	155
Πίνακας 5.3.2: Συντελεστές Εξίσωσης 5.3.4 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης της ονομαστικής απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}). Εφαρμογή εμπειρικού μοντέλου..	158
Πίνακας 6.1.1: Ποσοστό κτιρίων (%) ανά αριθμό κατοικιών και κλιματική ζώνη, το 2011	161
Πίνακας 6.1.2: Αριθμός μόνιμων κατοικιών και συνολική επιφάνεια ανά κατηγορία κτιρίου για το 2011..	161
Πίνακας 6.1.3: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κλιματική ζώνη, για το 2011	162
Πίνακας 6.1.4: Ποσοστό μόνιμων κατοικιών (%) ανά πηγή ενέργειας για θέρμανση χώρων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, και κλιματική ζώνη για το 2015	163
Πίνακας 6.1.5: Μέση πραγματική κατανάλωση ενέργειας στις κατοικίες ανά κλιματική ζώνη το 2011.....	163

Πίνακας 6.1.6: Ηλεκτρικός εξοπλισμός 4-μελούς κατοικίας και ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση	167
Πίνακας 6.2.1: Ηλεκτρικός εξοπλισμός κατοικίας και ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση.....	168
Πίνακας 6.2.2: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 6.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαία διακύμανσης (%) του ονομαστικού απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειάς τους. Ισχύουν για $k=0,035$ και $\beta_{ref}=-0,006$	173

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα Νο.	Σελίδα
Σχήμα 1.2.1: Εξέλιξη της ετήσιας κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ανά τομέα χρήση.....	7
Σχήμα 1.2.2: Κατανομή εγχώριας πρωτογενούς ενέργειας ανά καύσιμο στην Ελλάδα για το 2015	8
Σχήμα 1.2.3: Κατανομή ακαθάριστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο, για το 2015	8
Σχήμα 1.2.4: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	8
Σχήμα 1.2.5: Εξέλιξη της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ελλάδα (1990-2016)	9
Σχήμα 1.2.6: Εξέλιξη του συντελεστή πρωτογενούς ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα κατά την περίοδο (1990-2016)	9
Σχήμα 1.2.7: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα, στην ΕΕ-28 και στην Ελλάδα, για το 2015	10
Σχήμα 1.2.8: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο για τον οικιακό τομέα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, για το 2015.....	10
Σχήμα 1.2.9: Διακύμανση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο στις Ελληνικές κατοικίες κατά την περίοδο 2007 έως 2015.....	11
Σχήμα 1.2.10: Διακύμανση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο στις Ελληνικά κτίρια το τριτογενή τομέα κατά την περίοδο 2007 έως 2015	11
Σχήμα 1.2.11: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής, θερμικής και συνολικής ενέργειας (KWh/m ² /yr) στις ελληνικές κατοικίες, ανάλογα με την επιφάνεια δαπέδου, (περίοδος 1987-1988).....	12
Σχήμα 1.3.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε Ελληνικές περιοχές	16
Σχήμα 1.3.2: Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ενέργειας. Ημερήσια ηλιακή ενέργεια για τον χειρότερο μήνα (kWh/m ² /day). http://www.matthewb.id.au/	17
Σχήμα 1.3.3: Χάρτης ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα. Μέση ετήσια ολική ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο (kWh/m ² /yr). http://www.atmosphere-upatras.gr	17
Σχήμα 1.3.4: Φ/Β με κρυστάλλους πυριτίου (α), Φ/Β άμορφου πυριτίου (μεμβράνες ή κοινώς «λεπτού φιλμ») (β).....	19
Σχήμα 1.3.5: Μικροσίπ τριπλής μεμβράνης (Spectrolab) [35]	20
Σχήμα 1.3.6: Απόδοση Φ/Β τριπλής επαφής αξιοποίησης μεγάλου φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας	20
Σχήμα 1.3.7: Φ/Β τριπλής επαφής με συγκεντρωτικούς φακούς και διπλό άξονα περιστροφής. www.Sol3g.com	21
Σχήμα 1.3.8: Εξέλιξη της τεχνολογίας των Φ/Β. Πηγή http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg	22
Σχήμα 2.1.1: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα (AMO – ASTM E490) και στην επιφάνεια της Γης (AM1.5 - ASTMG173.).....	28
Σχήμα 2.1.2: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας ανά είδος ακτινοβολίας	28
Σχήμα 2.1.3: Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα	29
Σχήμα 2.1.4: Θέση ήλιου σε σχέση με μια κεκλιμένη επιφάνεια	29
Σχήμα 2.1.5: Ένταση (πυκνότητα) ηλιακής ακτινοβολίας (W/m ²) για κεκλιμένη και οριζόντια επιφάνεια. ...	35
Σχήμα 2.2.1: Ενεργειακό κατώφλι (Bandgap) ενεργοποίησης φωτονίων για διάφορα υλικά Φ/Β[30]	44
Σχήμα 2.2.2: Απόδοση (%) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορα υλικά Φ/Β[30]	44
Σχήμα 2.2.3: Μεταβολή του ρεύματος (I _{sc}) βραχυκυκλώσεως και της τάσης ανοικτού κυκλώματος (U _{oc}) σε συνάρτηση με την ένταση της πηγής, π.χ. ηλιακή ακτινοβολία (G).....	46
Σχήμα 2.2.4: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β	46
Σχήμα 2.2.5: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β, Τάσης – Έντασης και Τάσης -Ισχύος	47

Σχήμα 2.2.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/Β, (I-V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας	48
Σχήμα 2.2.7: Διάγραμμα (P-V) Φ/Β για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (G).....	48
Σχήμα 2.2.8: Βαθμός απόδοσης Φ/Β, (η-V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας	49
Σχήμα 2.2.9: Διακύμανση της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας (kWh/m ² /yr), σε επιφάνειες με κλίση (β), για την περιοχή της Αθήνας	50
Σχήμα 2.2.10: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας ηλιακής ενέργειας (kWh/m ² /mo), σε επιφάνειες με κλίση (β), για κάθε μήνα για την περιοχή της Αθήνας	51
Σχήμα 2.2.11: Συντελεστής μετατροπής K _{τα} (Incidence angle, modifier) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) [41,60-62].....	53
Σχήμα 2.2.12: Μη-αναλογικός συντελεστής απόδοσης [109].....	60
Σχήμα 3.1.1: Σχηματική απεικόνιση των κλιματικών ζωνών της ελληνικής επικράτειας.....	62
Σχήμα 3.1.2: Μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές τάσεις (°C / δεκαετία), για την περίοδο 1960-2004. Τα ακατέργαστα δεδομένα απεικονίζονται αριστερά, τα ομογενοποιημένα με MASH στη μέση, και τα που ομογενοποιημένα με Climatol στα δεξιά. Οι κύκλοι απεικονίζουν στατιστικά σημαντικές τάσεις (περίπου 95%) και τα ορθογώνια μη σημαντικές τάσεις	63
Σχήμα 3.2.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, στις Ελληνικές περιοχές, 1960-2004 ..65	
Σχήμα 3.2.2: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, στις Ελληνικές περιοχές, για την περίοδο 1960-1978	65
Σχήμα 3.2.3: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια για οριζόντιες επιφάνειες (Εξίσωση 3.2.1)	66
Σχήμα 3.2.4: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια (Wh/m ² /hr) για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα, σε επιφάνεια με βέλτιστη κλίση, στην Αθήνα	67
Σχήμα 3.2.5: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας για αξιοποίηση της μέγιστης ετήσιας ηλιακής ενέργειας	73
Σχήμα 3.2.6: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας για μέγιστη ετήσια αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας, από ανάλυση μετρήσεων (κόκκινη απόχρωση), από αναλυτική Εξίσωση 3.2.2 (γκρι απόχρωση)	74
Σχήμα 3.2.7: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια για κεκλιμένες επιφάνειες, με βέλτιστη κλίση (β).....	75
Σχήμα 3.2.8: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια (kWh/m ² /hr) για τη μέση ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα).....	76
Σχήμα 3.2.9: Ωριαία διακύμανση της ζενιθιακής γωνίας (θ _z) για τη μέση ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα).	76
Σχήμα 3.3.1: Μέση ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας.	79
Σχήμα 3.3.2: Μέγιστη ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας ..81	
Σχήμα 3.3.3: Ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας.....81	
Σχήμα 4.1.1: Φ/Β πλαίσια στην Πεντέλη. Στο αριστερό πλαίσιο φαίνεται το πυρανόμετρο	87
Σχήμα 4.1.2: Ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (αριστερά) και αντίσταση εκτροπής ρεύματος για μετρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος	88
Σχήμα 4.1.3: Φ/Β πλαίσια στο CEA-Cadarache.....	89
Σχήμα 4.3.1: Γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β, στη διάρκεια της ημέρα, κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινη καμπύλη) και τη χειμερινή (μπλε καμπύλη).....	94
Σχήμα 4.3.2: Ηλιακή ακτινοβολία (G) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) στην επιφάνεια Φ/Β ..94	
Σχήμα 4.3.3: Συντελεστής τα(θ) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (θ)	95
Σχήμα 4.3.4: Συντελεστής τα(θ) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (G)	95
Σχήμα 4.3.5: Θερμοκρασία Φ/Β (T _{ρν}) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αέρα (T _{air}), κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινα σημεία) και τη χειμερινή (μπλε σημεία).....	96
Σχήμα 4.3.6: Θερμοκρασία Φ/Β (T _{ρν}) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (G), κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινα σημεία) και τη χειμερινή (μπλε σημεία).....	97

Σχήμα 4.3.7: Πτώση τάσης συναρτήσει Θερμοκρασία Φ/Β, σύμφωνα με STC (κόκκινα σημεία) και σύμφωνα με μετρήσεις (μπλε σημεία)	97
Σχήμα 4.3.8: Διακύμανση απόδοσης Φ/Β συναρτήσει της πτώσης τάσης ΔV , διαφορά μετρούμενης με αναμενόμενη ονομαστική (STC), χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα).....	98
Σχήμα 4.3.9: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β.....	99
Σχήμα 4.3.10: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία	99
Σχήμα 4.3.11: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (θ)	100
Σχήμα 4.3.12: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τον τοπικό χρόνο (hrs).....	100
Σχήμα 4.3.13: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W) στην έξοδο του Φ/Β (μπλε χρώμα καμπύλης), και αναμενόμενη θεωρητική ηλεκτρική ισχύς (κόκκινο χρώμα καμπύλη) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)	101
Σχήμα 4.3.14: Απόκλιση της παραγόμενη στην έξοδο του Φ/Β και της αναμενόμενης θεωρητικής ηλεκτρικής ισχύος σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)	101
Σχήμα 4.3.15: Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο του Φ/Β (I_{pv-act}) σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2), χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα).....	102
Σχήμα 4.3.16: Τάση ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο του Φ/Β (V_{pv-act}) σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (α) και την θερμοκρασία του Φ/Β (β). Χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα).....	102
Σχήμα 4.3.17: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W) στην έξοδο από τη διάταξη του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και του ανορθωτή (inverter), σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)	103
Σχήμα 4.3.18: Βαθμός απόδοσης διάταξης ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και ανορθωτή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αέρα.....	103
Σχήμα 4.3.19: Βαθμός απόδοσης ανιχνευτή μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (α), την ισχύ εξόδου από το Φ/Β (β) και την ισχύ εξόδου από το inverter (γ)	104
Σχήμα 4.3.20: Βαθμός απόδοσης Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $1000W/m^2$	106
Σχήμα 4.3.21: Ηλεκτρική ισχύς Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $1000 W/m^2$	106
Σχήμα 4.3.22: Βαθμός απόδοσης Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $1000W/m^2$, για τη Φ/Β μονάδα στη περιοχή του Cadarache	107
Σχήμα 4.3.23: Ηλεκτρική ισχύς Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $1000 W/m^2$, για τη Φ/Β μονάδα στη περιοχή του Cadarache	108
Σχήμα 4.4.1: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β (Πεντέλη).....	110
Σχήμα 4.4.2: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (Πεντέλη).....	110
Σχήμα 4.4.3: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της διαφοράς $T_{pv}-T_{air}$ και G_T (Πεντέλη)	110
Σχήμα 4.4.4: Διαφορά της θεωρητικής και πραγματικής τιμής ισχύος εξόδου του Φ/Β (Πεντέλη).....	112
Σχήμα 4.5.1: Διακύμανση του συντελεστή θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου $1000 W/m^2$, (τιμές από Πεντέλη).....	114
Σχήμα 4.6.1: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/Β, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (πράσινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{ref}=15,0\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=746,4kW$). Μέση απόκλιση τιμών 3% (μέγιστη διακύμανση -20% έως 21%).....	121

Σχήμα 4.6.2: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/B, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (πορτοκαλί χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($n_{ref}=15,7\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=5,87kW$). Μέση απόκλιση τιμών 6% (μέγιστη διακύμανση -22% έως 25%).....	121
Σχήμα 4.6.3: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/B, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (κόκκινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($n_{ref}=15,54\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=497kW$). Μέση απόκλιση τιμών 1% (μέγιστη διακύμανση από -12% έως 14%).....	122
Σχήμα 4.6.4: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/B, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (κόκκινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($n_{ref}=16,2\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=5,985kW$). Μέση απόκλιση τιμών 2% (μέγιστη διακύμανση από -18% έως 22%).....	122
Σχήμα 4.7.1: Ημερήσια διακύμανση της ενεργειακής απόδοσης του Φ/B (Πεντέλη).....	126
Σχήμα 4.7.2: Ημερήσια διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/B (Πεντέλη).....	126
Σχήμα 4.7.3: Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του Φ/B (Πεντέλη).....	127
Σχήμα 4.7.4: Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας (αριστερά) και του βαθμού απόδοσης του Φ/B (δεξιά), από μετρήσεις Πεντέλης.....	127
Σχήμα 5.1.1: Διακύμανση θερμοκρασίας Φ/B στη διάρκεια μια τυπικής ημέρας ανά μήνα στην Αθήνα ..	128
Σχήμα 5.1.2: Μέσος ωριαίος συντελεστής αιθριότητας για κάθε μήνα (μετρήσεις Πεντέλη).....	129
Σχήμα 5.1.3: Μέγιστος ωριαίος συντελεστής αιθριότητας για κάθε μήνα (μετρήσεις Πεντέλη).....	129
Σχήμα 5.1.4: Ωριαίος συντελεστής αιθριότητας (kt) για τους τέσσερις μήνες (μετρήσεις Πεντέλη).....	130
Σχήμα 5.1.5: Συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το συντελεστή αιθριότητας (kt), από μετρήσεις ενός έτους στην Πεντέλη (αριστερά), όπως προκύπτει από την αναλυτική Εξίσωση 5.1.1 (δεξιά).....	131
Σχήμα 5.1.6: Μέσος ωριαίος (αριστερά) και μέγιστος (δεξιά) συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τον ηλιακό χρόνο (μετρήσεις ενός έτους στην περιοχή Πεντέλη).....	131
Σχήμα 5.1.7: Λόγος S_{pv}/I_{β} σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (I_{β}) στη γυάλινη επιφάνεια του Φ/B (αριστερά) και τη γωνία πρόσπτωσης (θ) (δεξιά).....	133
Σχήμα 5.1.8: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/B, λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για μέσες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$).....	137
Σχήμα 5.1.9: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/B, λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$).....	138
Σχήμα 5.1.10: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/B, λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$).....	138
Σχήμα 5.1.11: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για συντελεστή Ross, $k=0,02$	141
Σχήμα 5.1.12: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για συντελεστή Ross, $k=0,055$	141
Σχήμα 5.1.13: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/B με περιστρεφόμενη βάση, λόγω της θερμοκρασίας Φ/B, για μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$).....	142
Σχήμα 5.2.1: Μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί και στη διακύμανση της απόδοσης Φ/B λόγω της γωνία πρόσπτωσης, για σταθερή γωνία κλίσης ($\beta=constant$) Φ/B, για την περιοχή της Αθήνα.....	144
Σχήμα 5.2.2: Λόγος $S_{pv}/(I_{\beta} \cdot \tau_a(\theta)_b)$ για βέλτιστη γωνία κλίσης Φ/B, για την περιοχή της Αθήνας.....	144
Σχήμα 5.2.3: Μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί και στη διακύμανση της απόδοσης Φ/B λόγω της γωνία πρόσπτωσης, για μεταβλητή γωνία κλίσης ($\beta=acos(\theta_z)$) Φ/B (περιοχή Αθήνα).....	145
Σχήμα 5.2.4: Ποσοστό μείωσης της ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (I_{β}) λόγω φυσικού εμποδίου ανατολικά του Φ/B (β , βέλτιστο για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=38^\circ$).....	147

Σχήμα 5.2.5: Ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (S_{pv}) στο Φ/Β, λόγω φυσικού εμποδίου ανατολικά του Φ/Β (β , βέλτιστο για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=38^\circ$)	148
Σχήμα 5.2.6: Βέλτιστη αζιμούθια γωνία Φ/Β (με $\beta =$ βέλτιστο και $\varphi=38^\circ$) για εμπόδιο ανατολικά του Φ/Β (αριστερά) και ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (I_β), για διαφορετική αζιμούθια γωνία (γ) του εμποδίου και $\theta_z =50^\circ$	148
Σχήμα 5.2.7: Τοποθέτηση Φ/Β σε απόσταση.....	149
Σχήμα 5.2.8: Τοποθέτηση Φ/Β σε απόσταση πάνω σε κεκλιμένο έδαφος ή στέγη	149
Σχήμα 5.2.9: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια Φ/Β με σταθερή ετήσια γωνία β (κόκκινα σημεία) και περιστρεφόμενη δύο αξόνων (μπλε σημεία)	150
Σχήμα 5.2.10: Αύξηση ηλιακής ενέργειας στην περίπτωση περιστρεφόμενης επιφάνειας Φ/Β δύο αξόνων ($\beta=\text{acos}(\theta_z)$), σε σχέση με κεκλιμένη επιφάνεια σταθερής ετήσιας γωνίας κλίσης ($\beta=\text{const}$).....	151
Σχήμα 5.2.11: Μέσος ωριαίος συντελεστής αύξησης τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας στην περίπτωση περιστρεφόμενης επιφάνειας Φ/Β δύο αξόνων ($\beta=\text{acos}(\theta_z)$), σε σχέση με κεκλιμένη επιφάνεια σταθερής ετήσιας γωνίας κλίσης ($\beta=\text{const}$), για την περιοχή της Αθήνας.....	151
Σχήμα 5.2.12: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια Φ/Β με σταθερή ετήσια γωνίας β (κόκκινα σημεία) και με σταθερή μηνιαία γωνία δύο αξόνων (μπλε σημεία)	152
Σχήμα 5.3.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια S_{pv} ,σε επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστη κλίση (β), για τις Ελληνικές περιοχές γεωγραφικού πλάτους φ , από μετρήσεις (γαλάζιο χρώμα), από Εξίσωση 5.3.1 (ροζ χρώμα)	153
Σχήμα 5.3.2: Μέσος συντελεστής $\tau(\theta)_{av}$ για επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστες κλίσεις (β), για τις Ελληνικές περιοχές, γεωγραφικού πλάτους φ (ανάλυση μετρήσεων).....	154
Σχήμα 5.3.3: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), $k=0,02$	156
Σχήμα 5.3.4: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), για $k=0,055$	156
Σχήμα 5.3.5: Διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης Φ/Β n_{ref} λόγω του συντελεστή $\tau(\theta)_{av}$ και της θερμοκρασίας του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος των ελληνικών περιοχών.....	157
Σχήμα 5.3.6: Ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), $k=0,02$	159
Σχήμα 5.3.7: Ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), για $k=0,055$	159
Σχήμα 6.1.1: Διάταξη συστημάτων Φ/Β εγκατάστασης για αυτόνομη ή μη λειτουργία	164
Σχήμα 6.1.2: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου σε 4-μελής κατοικίες, για δύο καθημερινές ημέρες το χειμώνα και το καλοκαίρι, με ή χωρίς παρουσία χρηστών κατά τη χρονική περίοδο 9:00 έως 16:00	165
Σχήμα 6.1.3: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου σε 4-μελής κατοικία, για καθημερινή μέρα, για Σαββατοκύριακο, χειμώνα και καλοκαίρι	166
Σχήμα 6.1.4: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου για δύο 4-μελείς και δύο μονομελείς κατοικίες, για μια καθημερινή μέρα, με ή χωρίς παρουσία χρηστών κατά τη χρονική περίοδο 9:00 έως 16:00	166
Σχήμα 6.2.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια S_{pv} ,σε επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστη κλίση (β), για τις Ελληνικές περιοχές γεωγραφικού πλάτους φ , από μετρήσεις (γαλάζιο χρώμα), από Εξίσωση 6.2.1 (ροζ χρώμα)	170
Σχήμα 6.2.2: Μέσος συντελεστής $\tau(\theta)_{av}$ για επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστες κλίσεις (β), για τις Ελληνικές περιοχές, γεωγραφικού πλάτους φ (ανάλυση μετρήσεων).....	170
Σχήμα 6.2.3: Μέση ετήσια διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για $\beta_{ref}=-0,006$ και $k=0,035$	171
Σχήμα 6.2.4: Μέση ετήσια διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για $\beta_{ref}=-0,006$ και $k=0,055$	171

Σχήμα 6.2.5: Μέσο ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης λόγω της θερμοκρασία του Φ/Β και συντελεστή τα(θ) _{av} , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για β _{ref} =-0,006 και κ=0,035.....	172
Σχήμα 6.2.6: Ποσοστό (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης σύμφωνα με την Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για β _{ref} =0,006 και κ=0,035	174
Σχήμα 6.2.7: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _d), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) των Ελληνικών περιοχών	176
Σχήμα 6.2.8: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _d), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H _β).....	176
Σχήμα 6.2.9: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _d), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) των Ελληνικών περιοχών, βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2	177
Σχήμα 6.2.10: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _d), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H _β), βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2	177
Σχήμα 6.2.11: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _a), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) των Ελληνικών περιοχών	178
Σχήμα 6.2.12: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _a), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H _β).....	179
Σχήμα 6.2.13: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _a), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) των Ελληνικών περιοχών, βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2	179
Σχήμα 6.2.14: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A _{pν}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L _a), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H _β), βάσει της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2.....	180
Σχήμα 6.2.15: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H _β και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 15 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%.....	182
Σχήμα 6.2.16: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H _β και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 10 και 20 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%	182
Σχήμα 6.2.17: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H _β και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 15 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2	183
Σχήμα 6.2.18: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H _β και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 10 και 20 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2	183
Σχήμα 6.2.19: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής των Φ/Β σε συνάρτηση με την τελική ηλιακή ενέργεια προς αξιοποίηση, για επιτόκιο 3%	184
Σχήμα 6.2.20: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής των Φ/Β σε συνάρτηση με την τελική ηλιακή ενέργεια προς αξιοποίηση, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2.....	185

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια είναι ένα πολύτιμο αγαθό, το οποίο εξυπηρετεί πλέον όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες καθώς και τις κοινωνικές και αναπτυξιακές ανάγκες του ανθρώπου σε όλα τα αναπτυγμένα κράτη. Η ζήτηση για ενέργεια αυξάνεται συνεχώς λόγω της βελτίωσης των συνθηκών διαβίωσης και της μηχανοποίησης και αυτοματοποίησης μεγάλου αριθμού των ανθρώπινων δραστηριοτήτων/εργασιών. Η αύξηση αυτή εμφανίζεται με μεγαλύτερους ρυθμούς στις υπό ανάπτυξη χώρες, με εμφανείς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η προστασία του περιβάλλοντος και η βιώσιμη ανάπτυξη (ανάπτυξη με ταυτόχρονη βελτίωση της οικονομίας, της κοινωνίας και του περιβάλλοντος), αποτελούν πλέον μεγάλη ανάγκη και προτεραιότητα σε διεθνές επίπεδο. Για το λόγο αυτό αναζητούνται διεθνώς πολιτικές αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών προβλημάτων και της κλιματικής αλλαγής, με πρωταρχικό στόχο τον περιορισμό των συμβατικών πηγών ενέργειας (πετρέλαιο, λιγνίτης κτλ), την ορθολογική χρήση της κατανάλωσης ενέργειας και την αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αιολική, ηλιακή, γεωθερμική κτλ. Κυρίως τα ανεπτυγμένα κράτη κατευθύνονται πλέον από την «εποχή του άνθρακα» σε μια σύγχρονη ενεργειακή επανάσταση. Όμως, οι προσδοκίες είναι μικρές καθώς οι κλιματικές αλλαγές είναι πλέον ένα έντονο φαινόμενο που δημιουργεί σοβαρά προβλήματα. Τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με τις μονάδες παραγωγής ενέργειας, αλλά και με την κατανάλωση ενέργειας, είναι:

- η ατμοσφαιρική ρύπανση (στερεές, υγρές ή αέριες ουσίες) από την καύση ορυκτών καυσίμων σε τοπικό (κατοικίες) ή κεντρικό επίπεδο (μονάδες ηλεκτροπαραγωγής),
- η θερμική ρύπανση από τους θερμικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, που επιδρά και στην αλλαγή του μικροκλίματος. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου οφείλεται επίσης στην θερμική ρύπανση, αλλά και στην έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων που παράγονται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων.
- η αλλαγή της μορφολογίας μιας περιοχής από την εγκατάσταση μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας όπως για παράδειγμα των υδροηλεκτρικών έργων, η οποία επιδρά επίσης στην αλλαγή μικροκλίματος,
- η μείωση των δασικών και καλλιεργήσιμων περιοχών, λόγω αλλαγής χρήσης (π.χ. εγκατάσταση Φ/Β μονάδας) ή παράνομης χρήσης δασικής βιομάζας,
- η ρύπανση του νερού από αέριους ρύπους, όξινη βροχή, ψύξη μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, ραδιενεργά ή/μη απόβλητα, κτλ.
- η οπτική και ακουστική ρύπανση λόγω θορύβου.

Το 1997 ολοκληρώθηκαν οι πρώτες διεθνείς συμφωνίες με την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο, που στόχευαν στον περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων του θερμοκηπίου μέχρι το έτος 2012[1]. Η Ελλάδα δεσμεύτηκε ώστε η αύξηση των εκλυόμενων ρύπων του θερμοκηπίου μέχρι το 2012 να μην υπερβαίνει το 25% σε σχέση με το έτος αναφοράς. Η επίτευξη του στόχου αυτού για τη χώρα μας δεν ήταν εφικτή, αφού δεν είχαν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα. Ωστόσο, η οικονομική κρίση στην Ελλάδα μετά το 2009, φαίνεται να συνέβαλε σημαντικά στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, μειώνοντας όμως ταυτόχρονα την ποιότητα των συνθηκών διαβίωσης για μεγάλο αριθμό πολιτών.

Η διεθνής κοινότητα συνέχισε τις διαπραγματεύσεις για το περιορισμό των εκλυόμενων ρύπων και μετά το έτος 2012. Το Δεκέμβριο του 2009 στην Κοπεγχάγη, ολοκληρώθηκε ακόμα μία διεθνής συνάντηση, με στόχο μια ουσιαστική συμφωνία μεταξύ κρατών για τη μείωση των εκλυόμενων ρύπων σε παγκόσμιο επίπεδο. Η συμφωνία αυτή δεν είχε το αναμενόμενο αποτέλεσμα, αφού, οι χώρες που θεωρούνται ως οι μεγάλοι ρυπαντές για ακόμα μια φορά δεν ανέλαβαν τις ευθύνες τους.

Παράλληλα με τις διεθνείς συμφωνίες του Κιότο και της Κοπεγχάγης, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναλάβει ένα πρωτοποριακό ρόλο στην προσπάθεια άμβλυσης της κλιματικής αλλαγής. Ειδικότερα, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο αρχικά είχε θέσει την Ευρωπαϊκή στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη έως το έτος 2020 για την Ευρώπη[1,2]. Η στρατηγική αποκαλείται και ως «πακέτο 20-20-20» που σημαίνει παραγωγή του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (2009/28 ΕΚ), 20% μείωση των εκλυόμενων ρύπων (2009/29 ΕΚ) και 20% εξοικονόμηση ενέργειας (27/2012 ΕΚ) και τα οποία αφορούν στο σύνολο των Ευρωπαϊκών χωρών. Τα ποσοστά αυτά διαφοροποιούνται για κάθε χώρα. Η γενική κατεύθυνση της στρατηγικής αυτής περιλάμβανε επίσης και την τροποποίηση του συστήματος εμπορίας ρύπων, θέτοντας πιο αυστηρούς όρους και ιδιαίτερα όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή. Στην εμπορία ρύπων δικαίωμα συμμετοχής έχουν οι κλάδοι της βαριάς βιομηχανίας και οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Με βάση την Ευρωπαϊκή στρατηγική για το 2020, για την Ελλάδα μέχρι στιγμής ισχύουν τα εξής:

- Το 18% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας για το 2020 να προέρχεται από ΑΠΕ.
- Για τους κλάδους που δεν υπάγονται στην εμπορία ρύπων, το ποσοστό μείωσης ρύπων ανέρχεται στο -4% σε σχέση με το έτος αναφοράς 2005 (απόφαση 406/2009). Οι κλάδοι αυτοί είναι ο οικιακός τομέας, ο τριτογενής, οι μεταφορές και η ελαφριά βιομηχανία.
- Για τους κλάδους που υπάγονται στην εμπορία ρύπων, περιορίζεται το δικαίωμα τους στην εκπομπή ρύπων και θα πρέπει να λάβουν μέτρα αντιμετώπισης όπως, η εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και απορρύπανσης, καθώς και η πραγματοποίηση έργων εξοικονόμησης ενέργειας σε τρίτες υπό ανάπτυξη χώρες.

Ωστόσο η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη διαμορφώσει νέο πλαίσιο για το κλίμα και την ενέργεια και το οποίο ανακοίνωσε στις 22 Ιανουαρίου 2014. Συγκεκριμένα καθορίζεται το πλαίσιο για τις πολιτικές της ΕΕ που αφορούν το κλίμα και την ενέργεια κατά την περίοδο 2020-2030 και τον τρόπο προώθησης αυτών των πολιτικών στο τέλος του υφιστάμενου πλαισίου για το 2020. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο συμφώνησε με το πλαίσιο αυτό στις 23 Οκτωβρίου 2014. Το πλαίσιο 2030 προτείνει νέους στόχους και μέτρα για να καταστούν η οικονομία και το ενεργειακό σύστημα της ΕΕ περισσότερο ανταγωνιστικά, ασφαλή και βιώσιμα. Περιλαμβάνει στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και την αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ και προτείνει νέο σύστημα διακυβέρνησης και δείκτες επιδόσεων. Μεταξύ άλλων προτείνει τα εξής:

- δέσμευση για τη συνέχιση της μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, ορίζοντας ένα στόχο μείωσης κατά 40 % μέχρι το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.
- στόχο που συνίσταται στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά ποσοστό 27% τουλάχιστον της κατανάλωσης ενέργειας, με παροχή ευελιξίας στα κράτη μέλη για τον καθορισμό εθνικών στόχων.
- βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέσω ενδεχόμενων τροποποιήσεων της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση.
- μεταρρύθμιση του συστήματος εμπορίας εκπομπών της ΕΕ ώστε να συμπεριληφθεί ένα αποθεματικό για τη σταθερότητα της αγοράς.
- βασικούς δείκτες - σχετικά με τις ενεργειακές τιμές, τη διαφοροποίηση των πηγών εφοδιασμού, τις διασυνδέσεις μεταξύ των κρατών μελών και τις τεχνολογικές εξελίξεις - για τη μέτρηση της προόδου προς την κατεύθυνση ενός πιο ανταγωνιστικού, ασφαλούς και βιώσιμου ενεργειακού συστήματος.

(<http://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>),

Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη έχουν εκδοθεί μια σειρά από Ευρωπαϊκές Οδηγίες που σχετίζονται με την ενέργεια.

Η οδηγία 2009/28/ΕΚ «Σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ» θεσπίζει ένα κοινό πλαίσιο για την προώθηση της ενέργειας που παράγεται από συστήματα ΑΠΕ. Θέτει υποχρεωτικούς εθνικούς στόχους για το συνολικό μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας και το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές. Μεταξύ άλλων, καθορίζει κανόνες για τη μεταβίβαση μεταξύ κρατών μελών και κοινά έργα και με τρίτες χώρες, τις εγγυήσεις προέλευσης, τις διοικητικές διαδικασίες, την πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για ενέργεια από ΑΠΕ. Ταυτόχρονα καθιερώνει κριτήρια αειφορίας του περιβάλλοντος για τα βιοκαύσιμα και τα βιορευστά.

Η οδηγία 2009/72/ΕΚ «Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και για την κατάργηση της οδηγίας 2003/54/ΕΚ» θεσπίζει κοινούς κανόνες που αφορούν την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και την προστασία των καταναλωτών, με στόχο τη βελτίωση και την ολοκλήρωση ανταγωνιστικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Ορίζει τους κανόνες για την οργάνωση και τη λειτουργία του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, την ανοικτή πρόσβαση στην αγορά, τα κριτήρια και τις διαδικασίες που ισχύουν για τις προσκλήσεις προς υποβολή προσφορών και τη χορήγηση αδειών καθώς και για την εκμετάλλευση των δικτύων. Θεσπίζει επίσης τα δικαιώματα των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας και αποσαφηνίζει τις υποχρεώσεις του ανταγωνισμού.

Η οδηγία 2009/73/ΕΚ «Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά Φυσικού Αερίου (Φ.Α.) και την κατάργηση της οδηγίας 2003/55/ΕΚ» θεσπίζει κοινούς κανόνες που αφορούν στη μεταφορά, στη διανομή, στην προμήθεια και στην αποθήκευση Φ.Α. Ορίζει κανόνες σχετικά με την οργάνωση και λειτουργία του τομέα του Φ.Α., την πρόσβαση στην αγορά, τα κριτήρια και τις διαδικασίες χορήγησης αδειών για τη μεταφορά, τη διανομή, την προμήθεια και την αποθήκευση Φ.Α. και για την εκμετάλλευση των δικτύων. Οι κανόνες που θεσπίζονται για το φυσικό αέριο, συμπεριλαμβανομένου του υδροποιημένου φυσικού αερίου (ΥΦΑ), ισχύουν αδιακρίτως και για το βιοαέριο και το αέριο που παράγεται από βιομάζα ή άλλα είδη αερίου.

Η οδηγία 2012/27/ΕΚ «για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ» θεσπίζει κοινό πλαίσιο μέτρων για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης προκειμένου να διασφαλίσει την επίτευξη του πρωταρχικού στόχου 2020 για 20 % στην ενεργειακή απόδοση και να προετοιμάσει το έδαφος για περαιτέρω βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης. Επίσης θεσπίζει κανόνες που αποσκοπούν στην υπερνίκηση των αδυναμιών της αγοράς που παρεμποδίζουν την απόδοση στον εφοδιασμό και τη χρήση ενέργειας. Οι απαιτήσεις που καθορίζονται στην παρούσα οδηγία συνιστούν ελάχιστες απαιτήσεις και δεν εμποδίζουν τα κράτη μέλη να διατηρούν ή να λαμβάνουν αυστηρότερα μέτρα.

1.1. ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι κύριες δράσεις της ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής, του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση του απαιτούμενου θεσμικού πλαισίου για το καθεστώς της αγοράς ενέργειας, την εκπλήρωση των δεσμεύσεων της χώρας μας που σχετίζονται με την ενέργεια και το περιβάλλον, οι οποίοι θα εκπληρωθούν από την προώθηση των συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), της Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) και της Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞ-ΕΝ), καθώς και των

μεγάλων έργων διεθνών ενεργειακών διασυνδέσεων. Μεταξύ άλλων οι κύριοι στόχοι και άξονες της ενεργειακής πολιτικής στη χώρα μας είναι:

- Η ασφαλής ενεργειακή τροφοδοσία της αγοράς, με υψηλής ποιότητας προϊόντα στο βέλτιστο κόστος. Απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου.
- Η ενίσχυση και βελτίωση του συστήματος παραγωγής, καθώς και των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και της επέκτασης και ανάπτυξης νέων.
- Η αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ, των βιοκαυσίμων και άλλων τεχνολογιών υψηλής απόδοσης στο ενεργειακό σύστημα. Υλοποίηση νέων ενεργειακών υποδομών και ιδιωτικών ενεργειακών επενδύσεων, μέσω χρηματοδοτικών εργαλείων.
- Η ενίσχυση διεθνών διασυνδέσεων της χώρας στους τομείς του φυσικού αερίου, του πετρελαίου και του ηλεκτρισμού, με σκοπό να καταστεί η Ελλάδα σύγχρονο διεθνές διαμετακομιστικό κέντρο ενέργειας.

Το 1999 με τον ν. 2773 (ΦΕΚ Α΄ 286/1999) θεσμοθετήθηκε το πλαίσιο απελευθέρωσης της ελληνικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου για την ενσωμάτωση της οδηγίας 96/92/ΕΚ στο εθνικό δίκαιο. Ο ν. 2773 τροποποιήθηκε με το ν. 2837/2000, το ν. 2491/2001 και το ν. 3175/2003, προκειμένου να γίνει προσαρμογή στα νέα δεδομένα της ενεργειακής αγοράς και να διασφαλισθεί η επάρκεια ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα η οδηγία 96/92/ΕΚ αντικαταστάθηκε από την οδηγία 2003/54/ΕΚ επιδιώκοντας τη δημιουργία μιας απολύτως λειτουργικής και ανταγωνιστικής εσωτερικής αγοράς και περιέχει ρυθμίσεις για την οργάνωση της πρόσβασης στα δίκτυα, για τη διαχείριση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, καθώς και για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των Διαχειριστών του Συστήματος Μεταφοράς και Δικτύου Διανομής από τις δραστηριότητες της παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας. Η εναρμόνιση της Ελλάδας με την οδηγία 2003/54/ΕΚ πραγματοποιήθηκε μέσω του ν. 3426/2005 «Επιτάχυνση της Διαδικασίας για την Απελευθέρωση της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», όπως τροποποιήθηκε και ισχύει.

Η οδηγία 2003/54/ΕΚ καταργήθηκε στη συνέχεια από την οδηγία 2009/72/ΕΚ «Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και για την κατάργηση της οδηγίας 2003/54/ΕΚ» και ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο με το ν. 4001/2011 (ΦΕΚ Α 179) «Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις», όπως τροποποιήθηκε και ισχύει από τους νόμους 4389 (ΦΕΚ 94 Α 2016), 4425 (ΦΕΚ 185 Α 2016), 4512 (ΦΕΚ 5 Α 2018) και 4513 (ΦΕΚ 9 Α 2018).

Ο ν. 3468/2006 «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και λοιπές διατάξεις» (ΦΕΚ 129 Α .2006), όπως τροποποιήθηκε και ισχύει, αναδιάρθρωσε το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο αδειοδότησης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ. Συγκεκριμένα, εισήγαγε ρυθμίσεις που αφορούν στην απλοποίηση και επιτάχυνση της διαδικασίας αδειοδότησης των έργων αυτών, καθώς και το κόστος αγοράς της παραγόμενης ενέργειας από τα συστήματα αυτά.

Στη συνέχεια ο νόμος 3851/2010, καθόρισε τους εθνικούς στόχους για τις ΑΠΕ σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/ΕΚ, και οι οποίοι είναι 20% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στην παραγωγή θερμότητας-ψύξης και 10% στις μεταφορές. Ταυτόχρονα, τροποποιεί τον ν. 3468/2006, όσον αφορά στις διαδικασίες αδειοδότησης των έργων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ, ενώ ταυτόχρονα αναπροσαρμόζει τις τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και κυρίως την ενέργεια από φωτοβολταϊκούς (Φ/Β) σταθμούς. Η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Φ/Β σταθμούς αναπροσαρμόζεται εκ νέου με το νόμο ν. 4254 (ΦΕΚ 185 Α 2014), συμπεριλαμβανομένων των

Φ/Β μικρής ηλεκτρικής ισχύος μέχρι και 10kWp, τα οποία εγκαθίστανται κυρίως στον οικιακό τομέα και σε μικρές επιχειρήσεις.

Ο ν. 4062/2012 (ΦΕΚ Α' 70) «Αξιοποίηση του πρώην Αεροδρομίου Ελληνικού – Πρόγραμμα ΗΛΙΟΣ – Προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/28/ΕΚ) – Κριτήρια Αειφορίας Βιοκαυσίμων και Βιορευστών (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/30/ΕΚ)», όπως τροποποιήθηκε και ισχύει, θεσπίζει επιπλέον μέτρα για την ενσωμάτωση της οδηγίας 2009/28/ΕΚ και τροποποιεί τις σχετικές με την οδηγία διατάξεις του ν. 3468/2006.

Επιπλέον, με το νόμο 4513 (ΦΕΚ 9 Α 2018) θεσπίστηκαν μέτρα για τη λειτουργία των Ενεργειακών Κοινοτήτων που είναι αστικοί συνεταιρισμοί αποκλειστικού σκοπού με στόχο, μεταξύ άλλων, την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας, καθώς και της καινοτομίας στον ενεργειακό τομέα, την αντιμετώπιση της ενεργειακής ένδειας και την προαγωγή της ενεργειακής αειφορίας, την παραγωγή, αποθήκευση, ιδιοκατανάλωση, διανομή και προμήθεια ενέργειας, την ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και ασφάλειας σε νησιωτικούς δήμους, καθώς και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην τελική χρήση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, μέσω της δραστηριοποίησης στους τομείς των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α.), της ορθολογικής χρήσης ενέργειας, της ενεργειακής αποδοτικότητας, των βιώσιμων μεταφορών, της διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής, διανομής και προμήθειας ενέργειας.

Τον Ιούλιο του 2009 εφαρμόστηκε το «Ειδικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε κτίρια, & ιδίως δώματα & στέγες κτιρίων» ή κοινώς πρόγραμμα «Φωτοβολταϊκά στις στέγες», μέσω της υ.α. 12323 (ΦΕΚ Β' 1079/4.6.2009), όπως τροποποιήθηκε και ισχύει από τις υ.α.18513 (ΦΕΚ Β' 1557/22.9.2010) και κ.υ.α. Α.Π.Ε./Φ1/2302/16934 (ΦΕΚ Β' 2317/10.8.2012). Το πρόγραμμα ανάπτυξης αφορά στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων μέχρι 10 kWp, σε κτιριακές εγκαταστάσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για κατοικία ή στέγαση πολύ μικρών επιχειρήσεων. Η διάρκεια του προγράμματος είναι έως την 31.12.2019 σύμφωνα με το άρθρο 1 της ως άνω υπουργικής απόφασης.

Το πρόγραμμα αφορά σε σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα για παραγωγή ενέργειας που εγχέεται στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης, τα οποία εγκαθίστανται στο δώμα ή τη στέγη νομίμως υφιστάμενου κτιρίου, σε στέγαστρα, στις όψεις και την κύρια όψη του κτιρίου και σε χώρους βοηθητικής χρήσης, όπως αποθήκες και χώροι στάθμευσης, καθώς και σε σκιάστρα, όπως αυτά ορίζονται στο άρθρο 1 και 2 του ν. 4067/2012. Η ανωτέρω εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιτρέπεται εφόσον δεν αντίκειται στις διατάξεις του Νέου Οικοδομικού Κανονισμού και σε ειδικότερους όρους δόμησης που ισχύουν για την εκάστοτε περιοχή. Επίσης κατά την εφαρμογή του προγράμματος θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα οριζόμενα στην υπουργική απόφαση υπ' αριθ. 9154 (ΦΕΚ Β' 583/14.4.2001) που αφορά στις τροποποιήσεις ειδικών όρων για την εγκατάσταση Φ/Β και Ηλιακών Συστημάτων σε γήπεδα, οικόπεδα και κτίρια.

Το Πρόγραμμα αφορά όλη την ελληνική επικράτεια. Στο πλαίσιο του προγράμματος, η μέγιστη επιτρεπόμενη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά εγκατάσταση ορίζεται,

- α) για την ηπειρωτική χώρα, τα Διασυνδεδεμένα με το Σύστημα νησιά και την Κρήτη τα 10kWp και
- β) για τα λοιπά Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά τα 5kWp.

Οι βασικές προϋποθέσεις ένταξης στο πρόγραμμα είναι:

- η ύπαρξη ενεργής σύνδεσης κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος στο όνομα του κυρίου του φωτοβολταϊκού στο κτίριο όπου το σύστημα εγκαθίσταται.

- η κάλυψη μέρους των θερμικών αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης της ιδιοκτησίας του κυρίου του φωτοβολταϊκού, εφόσον αυτή χρησιμοποιείται για κατοικία, με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ενδεικτικά ηλιοθερμικά, ηλιακοί θερμοσίφωνες κτλ. Για τη τήρηση της προϋπόθεσης αυτής ευθύνη φέρουν τόσο ο μηχανικός που συντάσσει την τεχνική έκθεση η οποία υποβάλλεται στη ΔΕΗ προκειμένου για τη σύνδεση της Φ/Β εγκατάστασης, όσο και ο κύριος (ιδιοκτήτης) του φωτοβολταϊκού συστήματος.».
- η μη ύπαρξη δημόσιας ενίσχυσης της Φ/Β εγκατάστασης, στο πλαίσιο του Αναπτυξιακού-Επενδυτικού νόμου, όπως κάθε φορά ισχύει, των συγχρηματοδοτούμενων από την Ευρωπαϊκή Ένωση δράσεων χρηματοδότησης (πχ. στο πλαίσιο ΕΠ του ΕΣΠΑ) και γενικότερα οποιουδήποτε άλλου προγράμματος χρηματοδότησης.

Η τιμή αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που εγχέεται στο δίκτυο από Φ/Β συστήματα που εντάσσονται στο ως άνω πρόγραμμα, είναι κλιμακωτά μειούμενη με το χρόνο και ορίζεται στις σχετικές διατάξεις όπως αναφέρονται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι τιμές αυτές αναπροσαρμόστηκαν για ορισμένες περιπτώσεις από την Παράγραφο ΙΓ1 του νόμου 4254 (ΦΕΚ 185 Α 2014).

Μήνας / Έτος	Τιμή (ευρώ/MWh)	Μήνας / Έτος	Τιμή (ευρώ/MWh)
Φεβρουάριος 2013	125,0	Αύγουστος 2016	110,0
Αύγουστος 2013	125,0	Φεβρουάριος 2017	105,0
Φεβρουάριος 2014	120,0	Αύγουστος 2017	100,0
Αύγουστος 2014	120,0	Φεβρουάριος 2018	95,0
Φεβρουάριος 2015	115,0	Αύγουστος 2018	90,0
Αύγουστος 2015	115,0	Φεβρουάριος 2019	85,0
Φεβρουάριος 2016	110,0	Αύγουστος 2019	80,0

Το Φ/Β σύστημα συνδέεται στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Για τη σύνδεση η ΔΕΗ ΑΕ ως Διαχειριστής του Δικτύου, κάνει χρήση της παροχής μέσω της οποίας τροφοδοτούνται οι καταναλώσεις της ιδιοκτησίας του κυρίου όπου εγκαθίσταται το Φ/Β σύστημα, όταν αυτό είναι τεχνικά δυνατό.

Μετά από υποβολή σχετικής αίτησης συνοδευόμενη με τα απαιτούμενα στοιχεία – δικαιολογητικά, η ΔΕΗ ΑΕ ως Διαχειριστής του Δικτύου, εξετάζει το αίτημα κατά προτεραιότητα και προβαίνει εντός είκοσι (20) ημερών σε διατύπωση Προσφοράς Σύνδεσης προς τον ενδιαφερόμενο κύριο του Φ/Β που περιλαμβάνει την περιγραφή και τη δαπάνη των έργων σύνδεσης, η οποία ισχύει για τρεις (3) μήνες από την ημερομηνία έκδοσης της.

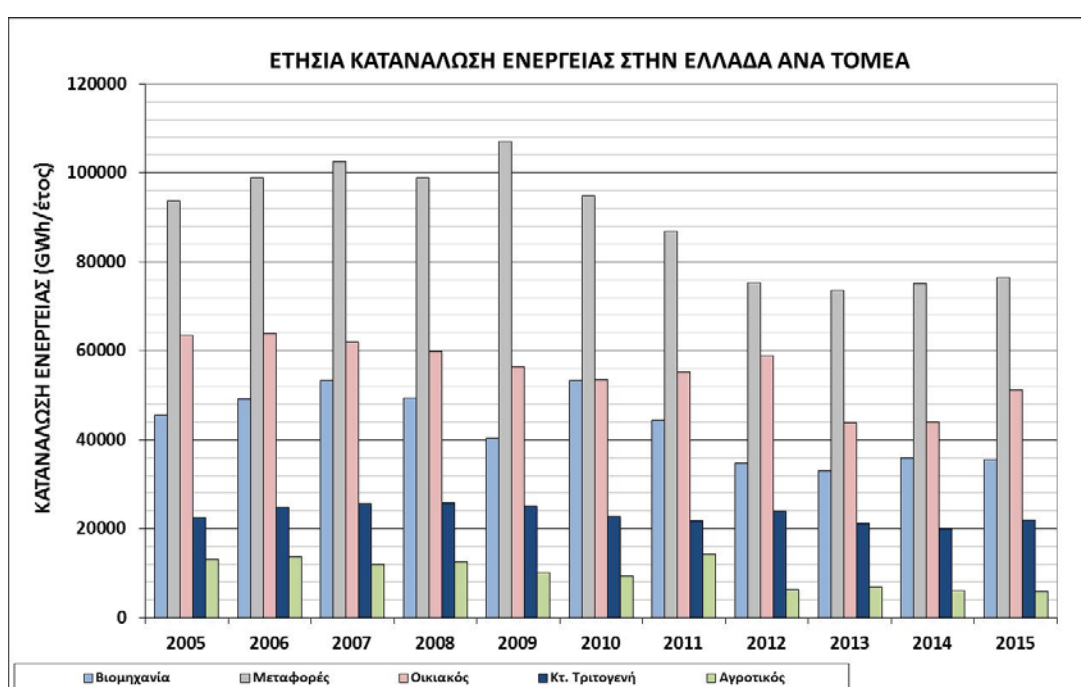
Μετά την υπογραφή της Σύμβασης Σύνδεσης υποβάλλεται αίτηση για τη σύναψη Σύμβασης Συμψηφισμού προς τη ΔΕΗ ΑΕ (Τοπική Υπηρεσία Εμπορίας) ή άλλο προμηθευτή που ηλεκτροδοτεί τις καταναλώσεις της ιδιοκτησίας του κυρίου όπου εγκαθίσταται το Φ/Β σύστημα. Η ανωτέρω διαδικασία ολοκληρώνεται εντός δεκαπέντε (15) ημερών από την παραλαβή του αιτήματος.

Για τον ενεργειακό συμψηφισμό της παραγόμενης από το Φ/Β σύστημα ενέργειας εφαρμόζεται η υπ' αριθ. ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382/19 (ΦΕΚ 759 Β 2019), στην οποία καθορίζονται οι όροι και οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή ενεργειακού συμψηφισμού, σε αντικατάσταση των προηγούμενων σχετικών αποφάσεων, καθώς και του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού.

1.2. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα η κατανάλωση συνολικής ενέργειας ανά κάτοικο ανέρχεται περίπου στις 26.119 kWh/cap (2,25 ΤΙΠ/cap), ενώ αντίστοιχα η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο ανέρχεται περίπου στις 4.677 kWh/cap (0,40 ΤΙΠ/cap), για το έτος 2015 [15]. Για το ίδιο έτος στα 28 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ-28), η κατανάλωση συνολικής ενέργειας ανά κάτοικο ανέρχεται σε 37.197 MWh/cap (3,20 ΤΙΠ/cap), ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο ανέρχεται περίπου στις 5.395 kWh/cap (0,46 ΤΙΠ/cap) αντίστοιχα [16-17].

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης κατανάλωσης ενέργειας στην Ελλάδα για τη χρονική περίοδο 1990-2009 (20ετία) ανέρχεται περίπου στο 2,0%. Το αντίστοιχο ποσοστό για τον κτηριακό τομέα ήταν 6,0%, σχεδόν τριπλάσιο. Ωστόσο, μετά το 2009 η κατανάλωση ενέργειας, λόγω και της οικονομικής κρίσης, παρουσιάζει σταδιακή πτώση, η οποία για τη χρονική περίοδο 2009-2015 ανέρχεται στο σύνολό της σε ποσοστό 20% (Σχήμα 1.2.1)[15].

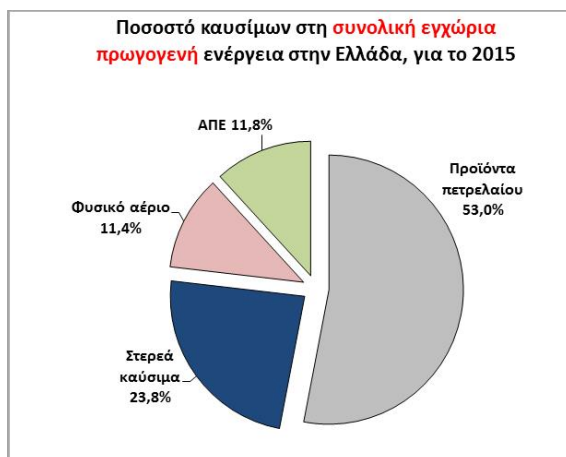


Σχήμα 1.2.1: Εξέλιξη της ετήσιας κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ανά τομέα χρήση

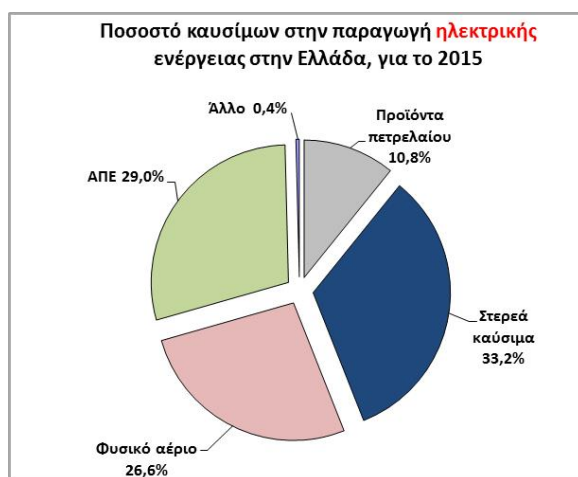
Το 2015 στη χώρα μας, το μεγαλύτερο ποσοστό στην πρωτογενή ενέργεια καταλαμβάνουν τα προϊόντα πετρελαίου με ποσοστό 53,0%, ακολουθούν τα στερεά καύσιμα με ποσοστό 23,8%, το φυσικό αέριο με 11,4% και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) με ποσοστό 11,8% (Σχήμα 1.2.2)[15]. Το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην συνολική ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας ήταν 8,0% για το 2007 και 11,3% για το 2015. Ο στόχος είναι το 18% για το 2020.[17]

Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για το 2015, το μεγαλύτερο ποσοστό προέρχεται από τα στερεά καύσιμα με ποσοστό 33,2%, ακολουθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) με ποσοστό 29,0%, το φυσικό αέριο με 26,6% και τα προϊόντα πετρελαίου με ποσοστό 10,8% (Σχήμα 1.2.3) [16-17]. Η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Σχήμα 1.2.4) για ηλεκτροπαραγωγή το 2001 ήταν 3370 MW και το 2015 ήταν 8087 MW αντίστοιχα[16].

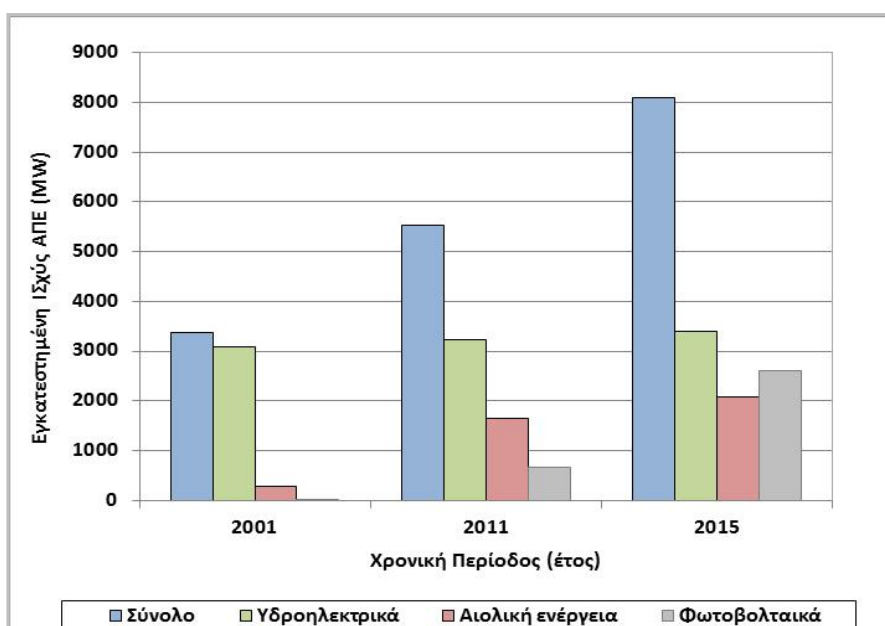
Η συνεχής αύξηση των ανανεώσιμων πηγών στο μίγμα των καυσίμων ηλεκτροπαραγωγής, (Σχήμα 1.2.5) έχει μειώσει σημαντικά και τον συντελεστή μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας (Σχήμα 1.2.6), όπως προκύπτει από τα στοιχεία καταναλώσεων που δίνει η Eurostat[15-16].



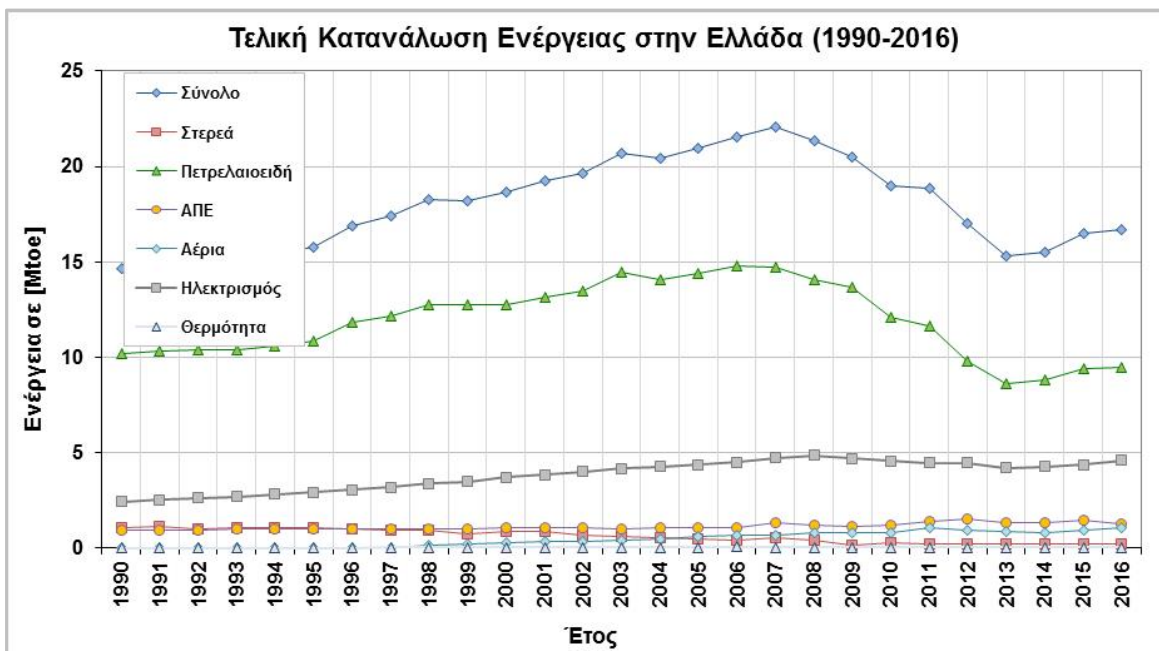
Σχήμα 1.2.2: Κατανομή εγχώριας πρωτογενούς ενέργειας ανά καύσιμο στην Ελλάδα για το 2015



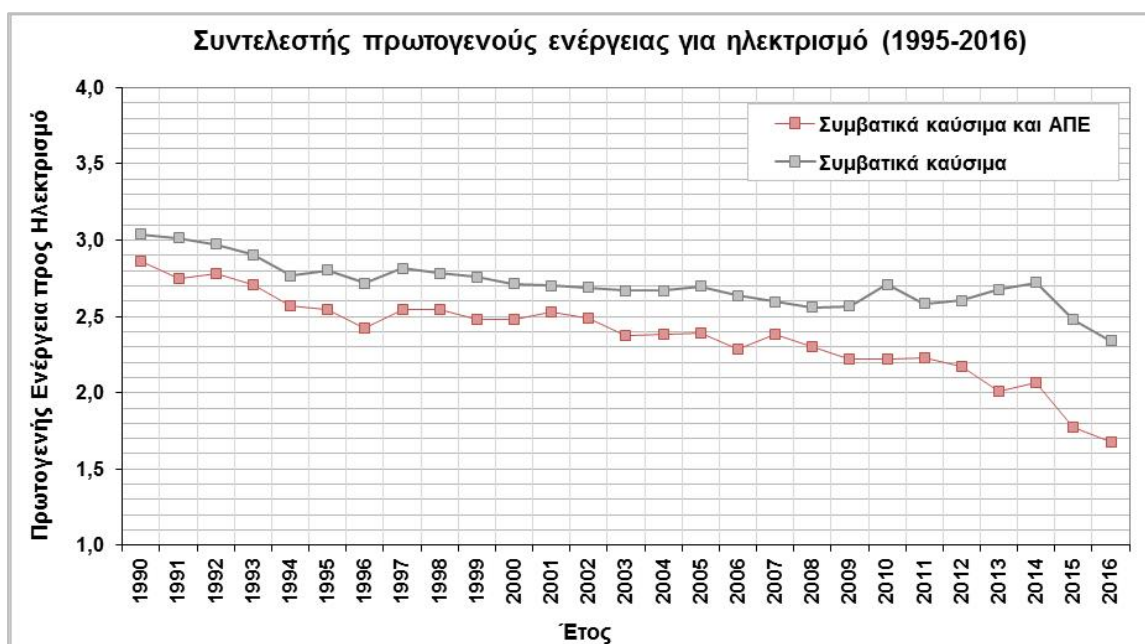
Σχήμα 1.2.3: Κατανομή ακαθάριστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο, για το 2015



Σχήμα 1.2.4: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.2.5: Εξέλιξη της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ελλάδα (1990-2016)

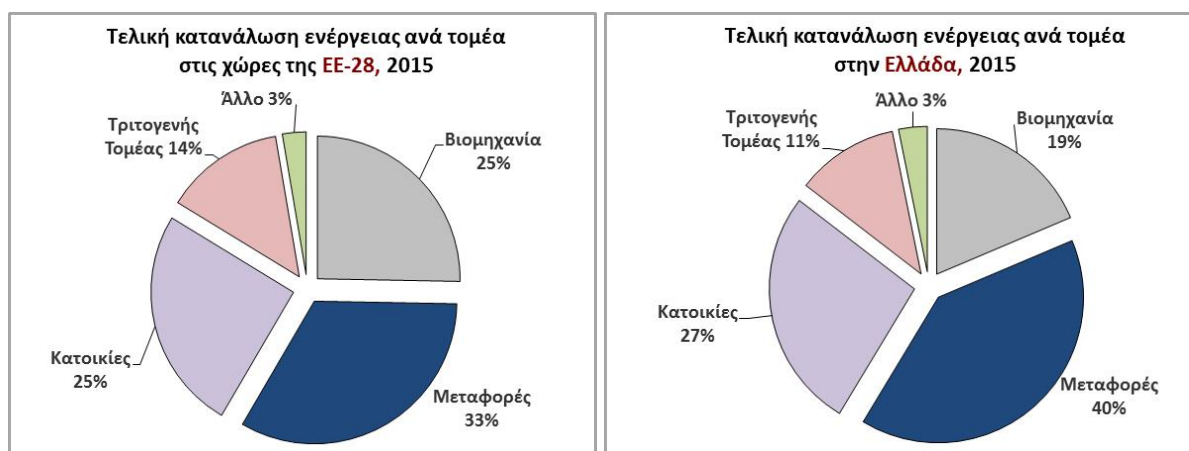


Σχήμα 1.2.6: Εξέλιξη του συντελεστή πρωτογενούς ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα κατά την περίοδο (1990-2016)

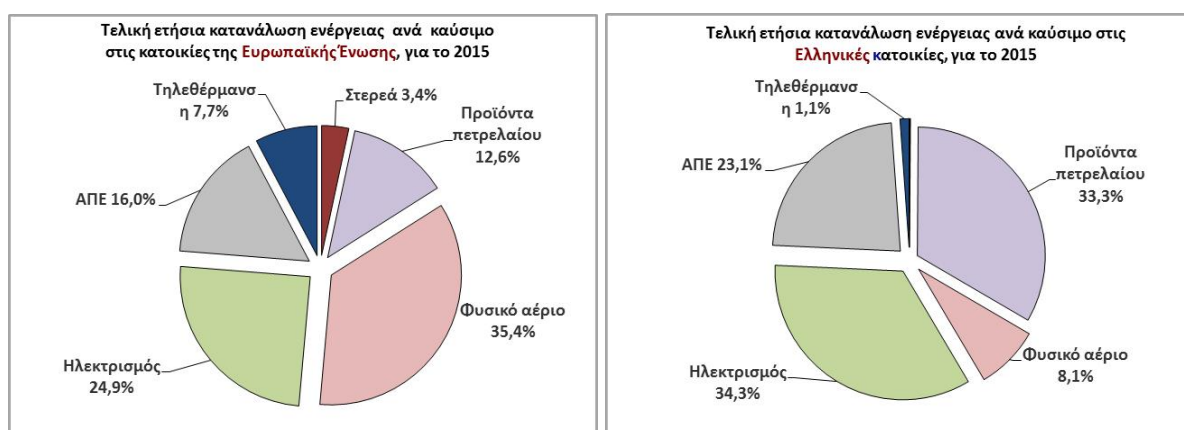
Τα κτίρια συμμετέχουν με ένα σημαντικό ποσοστό στο ισοζύγιο τελικής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και στους εκλυόμενους ρύπους, τόσο στο σύνολο των Ευρωπαϊκών χωρών, όσο και στην Ελλάδα (Σχήμα 1.2.7). Για το 2015 το ποσοστό αυτό για τα 28 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ-28) ανέρχεται στο 39%, ενώ για την Ελλάδα ανέρχεται στο 38%. Τα αντίστοιχα ποσοστά για τα κτίρια κατοικιών για το ίδιο έτος είναι 25% για τις χώρες της Ευρώπης και 27% για την Ελλάδα [17].

Το 2015, η κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα ήταν κυρίως πετρέλαιο σε ποσοστό 33,3% & ηλεκτρισμός σε ποσοστό 34,3% (Σχήμα 1.2.8). Αντιστοίχως η κατανάλωση καυσίμων

στον οικιακό τομέα για τις ΕΕ-28 είναι κυρίως φυσικό αέριο σε ποσοστό 35,4% και ηλεκτρισμός σε ποσοστό 24,9%. Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στις ελληνικές κατοικίες ανέρχεται περίπου στο 23,1% και είναι κυρίως βιομάζα [17]. Αντιστοίχως, στις κατοικίες των ΕΕ-28 η συμμετοχή των ΑΠΕ είναι 16%.



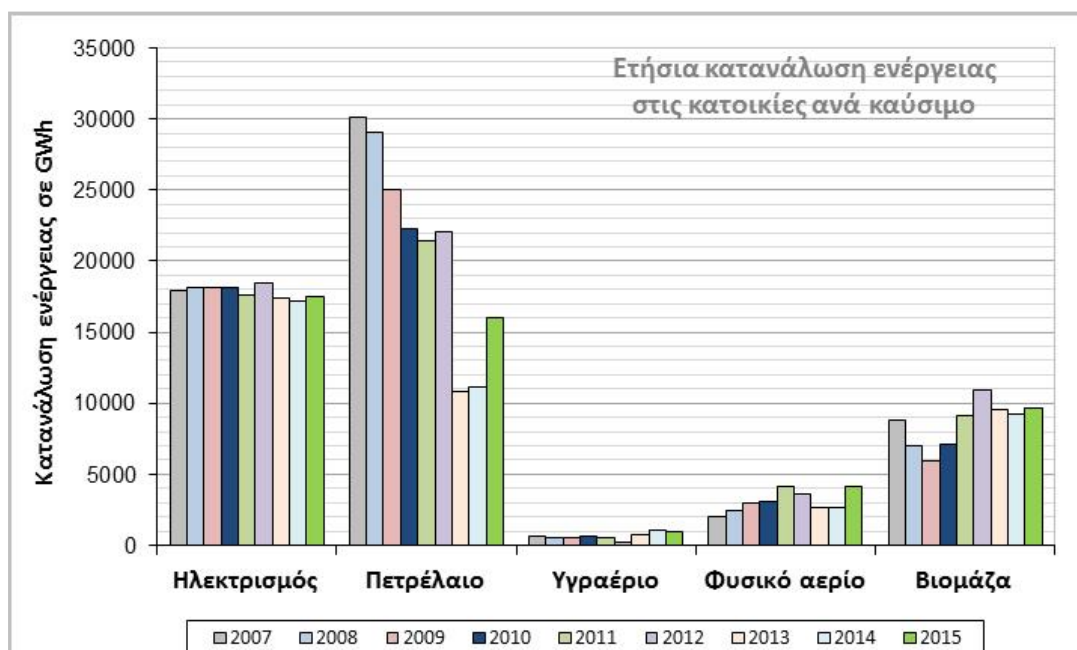
Σχήμα 1.2.7: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά τομέα, στην ΕΕ-28 και στην Ελλάδα, για το 2015



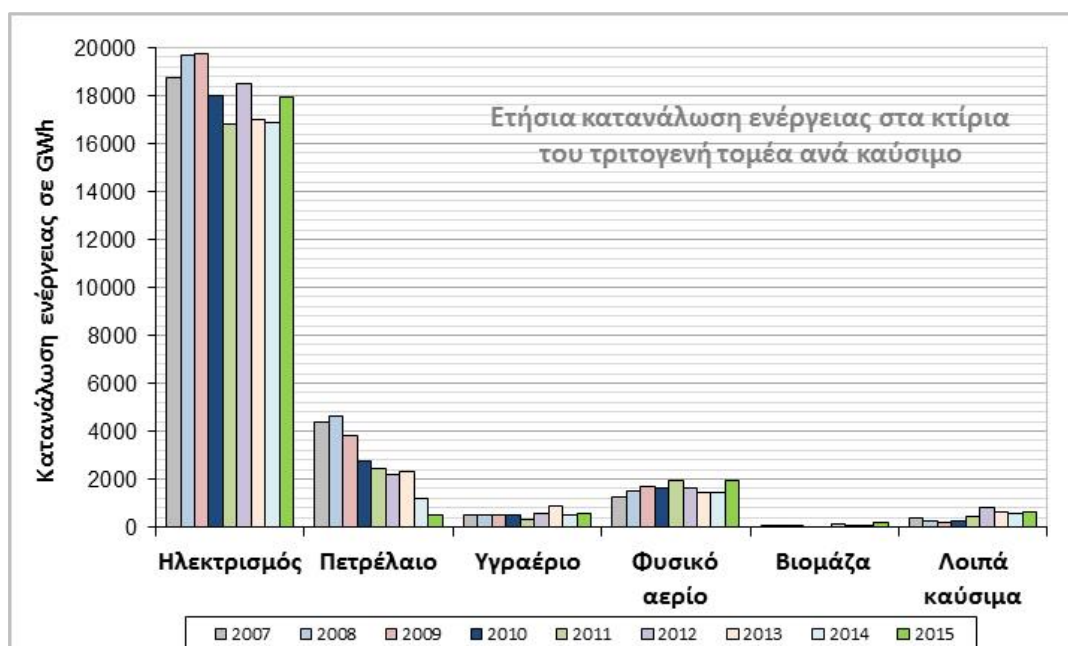
Σχήμα 1.2.8: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο για τον οικιακό τομέα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση και στην Ελλάδα, για το 2015

Κατά την περίοδο 2000-2015 τα ελληνικά κτίρια κατανάλωσαν περίπου το 67% της συνολικής ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής. Το 2015, η κατανάλωση ενέργειας στα ελληνικά κτίρια ήταν 73092 GWh, δηλαδή το 41,4% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της Ελλάδας. Οι 51180 GWh καταναλώθηκαν στα κτίρια κατοικιών (70%) και οι 21913 GWh στα κτίρια του τριτογενή τομέα (30%), εκτός γεωργικών χρήσεων. Το αντίστοιχο ποσοστό συμμετοχής των Ελληνικών κτιρίων στην τελική κατανάλωση ενέργειας το 2011 ήταν 39%, το 2007 ήταν 34%, το 2000 ήταν 30%, το 1990 ήταν 26% και το 1980 μόλις 20% [15].

Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα στην Ελλάδα μειώθηκε από τις 59.569 GWh το 2007 στις 48.311 GWh το 2015, μείωση που αντιστοιχεί σε ποσοστό 19%. Αυτή η μείωση παρουσιάστηκε λόγω της οικονομικής κρίσης στη χώρα και αφορά κυρίως στο πετρέλαιο, του οποίου η κατανάλωση μειώθηκε περίπου κατά 47% (Σχήμα 1.2.9). Αντιθέτως, η κατανάλωση φυσικού αερίου και βιομάζας στον οικιακό τομέα παρουσιάζει μικρή αύξηση για την ίδια χρονική περίοδο, η οποία στο σύνολο της είναι κατά πολύ μικρότερη από τη μείωση του πετρελαίου[15]. Τέλος η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις κατοικίες διατηρείται σε σταθερά επίπεδα και κυμαίνεται για την περίοδο 2007-2015 κατά μέσο όρο στις 17.840 GWh.



Σχήμα 1.2.9: Διακύμανση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο στις Ελληνικές κατοικίες κατά την περίοδο 2007 έως 2015

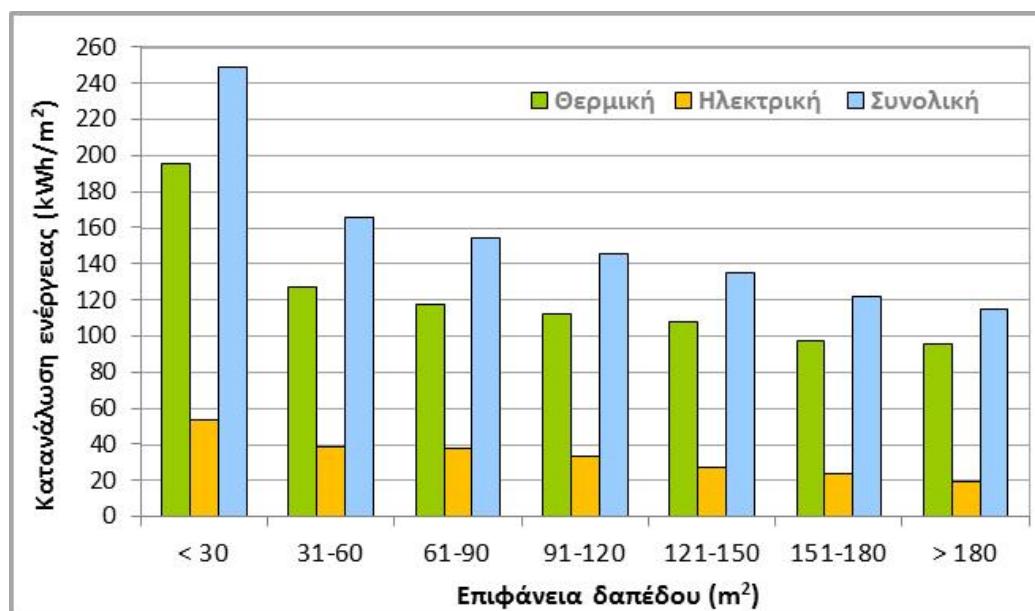


Σχήμα 1.2.10: Διακύμανση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά καύσιμο στις Ελληνικά κτίρια του τριτογενή τομέα κατά την περίοδο 2007 έως 2015

Αντίστοιχα η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια του τριτογενή τομέα στην Ελλάδα μειώθηκε από τις 25.520 GWh το 2007 στις 21.913 GWh το 2015, μείωση που αντιστοιχεί σε ποσοστό 14%. Αυτή η μείωση παρουσιάστηκε λόγω της οικονομικής κρίσης στη χώρα και αφορά κυρίως στο πετρέλαιο, του οποίου η κατανάλωση μειώθηκε περίπου κατά 87% (εικόνα 1.2.10) και τον ηλεκτρισμό που μειώθηκε την περίοδο 2007-2015 μεταξύ 1700-1900 GWh για τα έτη 2011, 2013 και 2014 σε σχέση με το 2007, ενώ το 2017 η μείωση περιορίστηκε στις 845 GWh [15-16], σε σχέση με το 2007.

Για την ενεργειακή κατάταξη των κτιρίων χρησιμοποιείται η ειδική ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh/m²/yr), θερμική ή ηλεκτρική. Αυτό βοηθάει στη συγκριτική αξιολόγηση των κτιρίων της

ίδιας χρήσης (κατοικίες, γραφεία, νοσοκομεία, σχολεία κτλ.). Το 1987-1988, πραγματοποιήθηκε από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας (ΕΣΥΕ) έρευνα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στις ελληνικές κατοικίες [18]. Σ' αυτή την έρευνα καταγράφηκαν περίπου 6.600 νοικοκυριά με γενικό κλάσμα δειγματοληψίας περίπου 0,21%. Η μέση τιμή της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας εκτιμήθηκε στις 149,4 kWh/m²/yr, από τις οποίες οι 115,2 kWh/m²/yr αντιστοιχούν στη θερμική και οι 34,2 kWh/m²/yr στην ηλεκτρική ενέργεια αντίστοιχα (Σχήμα 1.2.11) [18].



Σχήμα 1.2.11: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής, θερμικής και συνολικής ενέργειας (kWh/m²/yr) στις ελληνικές κατοικίες, ανάλογα με την επιφάνεια δαπέδου, (περίοδος 1987-1988)

Την περίοδο 2002-2003 στο πλαίσιο μελέτης του Υ.Πε.Χω.Δε. (Δ/ση Οικιστικής Πολιτικής & Κατοικίας), εκτιμήθηκε η μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ενέργειας (kWh/m²/yr) στο σύνολο του κτιριακού αποθέματος στην Ελλάδα, όπως διαμορφώνεται κατά τα έτη 1980, 2001 και όπως αναμενόταν για το 2010 βάσει της εξέλιξης στην ποιότητα κατασκευής των κτιρίων [19-21]. Η εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας για τις κατοικίες έγινε ανά κλιματική ζώνη και ανά είδος κτιρίου (Σχήματα 1.2.1 και 1.2.2). Η μέση πραγματική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τα κτίρια κατοικιών κυμαίνεται από 27 έως 41 (kWh/m²/yr), ανάλογα με τον τύπο κτιρίου, και την κλιματική ζώνη (Πίνακας 1.2.1), ενώ η αντίστοιχη μέση θερμική κατανάλωση ενέργειας από 75 έως 140 (kWh/m²/yr).

Πίνακας 1.2.1: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργεια στις κατοικίες για τα έτη 1980, 2001 και 2010 [19,20]

	Ηλεκτρική ενέργεια (kWh _e /m ² /yr)						Θερμική ενέργεια (kWh _{th} /m ² /yr)					
	Μονοκατοικίες			Πολυκατοικίες			Μονοκατοικίες			Πολυκατοικίες		
	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ζώνη Α	22,5	29,6	27,3	24,6	31,2	28,5	94	89	67	65	62	52
Ζώνη Β	28,3	42,3	41,7	31,5	46,8	45,8	134	115	88	94	91	71
Ζώνη Γ	24,1	35,0	33,7	25,8	37,0	35,4	159	145	108	111	109	90
Ζώνη Δ	25,4	34,6	32,6	28,1	36,6	34,2	187	176	129	130	125	115
Μέση τιμή για Ελλάδα	27,6	38,7	37,5	28,1	40,6	39,2	140	123	92	96	95	75

Πίνακας 1.2.2: Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στα κτίρια του τριτογενούς τομέα για τα έτη 1980, 2001 και 2010 [19,21]

Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση <u>ηλεκτρικής</u> ενέργειας (kWh _e /m ² /yr)												
Κλιματική ζώνη	Γραφεία – Καταστήματα			Ξενοδοχεία			Σχολικά κτίρια			Νοσοκομεία		
	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ζώνη Α	48	67	88	77	122	145	23	23	24	102	124	139
Ζώνη Β	43	57	72	66	104	123	21	21	22	92	97	102
Ζώνη Γ	39	51	64	54	86	102	18	19	20	82	94	104
Ζώνη Δ	36	48	63	46	73	87	17	17	18	77	84	91
Μέση τιμή για Ελλάδα	42	56	71	70	110	130	20	20	21	90	99	107
Μέση ετήσια ειδική κατανάλωση <u>θερμικής</u> ενέργειας (kWh _{th} /m ² /yr)												
Κλιματική ζώνη	Γραφεία – Καταστήματα			Ξενοδοχεία			Σχολικά κτίρια			Νοσοκομεία		
	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010	1980	2001	2010
Ζώνη Α	67	52	48	71	62	58	24	23	23	96	75	69
Ζώνη Β	85	69	65	90	78	73	29	29	28	136	129	126
Ζώνη Γ	107	89	83	113	99	92	37	36	36	188	168	160
Ζώνη Δ	134	110	103	142	124	115	46	46	45	252	237	231
Μέση τιμή για Ελλάδα	93	75	70	90	80	75	32	31	31	145	134	129

1.3. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η χρήση συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) ή αλλιώς Ήπιων Μορφών Ενέργειας (ΗΜΕ) ή Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας είναι η πλέον αξιόλογη και αποδοτική εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας, με παράλληλη μείωση των εκλυόμενων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ο χαρακτηρισμός τους ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οφείλεται στο ότι η διαθεσιμότητα τους είναι διαχρονική και ανεξάντλητη, χωρίς όρια αποθεμάτων. Αντίστοιχα ο χαρακτηρισμός τους ως Ήπιες Μορφές Ενέργειας οφείλεται στο ότι, η χρήση τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με κάποια μορφή ρύπων όπως η χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας (ορυκτά καύσιμα κτλ). Παράλληλα, η αξιοποίηση των ΑΠΕ αποτελεί μια εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρική ή θερμική), αντί της χρήσης συστημάτων που λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα. Οι κύριες πηγές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι εξής [22,23].

Ηλιακή Ενέργεια: Η Ηλιακή Ενέργεια αξιοποιείται με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (μέσω αμμοστροβίλων) και με τη χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλιακό δυναμικό στη χώρα μας διαφοροποιείται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και κυμαίνεται ετησίως από 1400 έως 1800 (KWh/m²/yr) περίπου, ενώ σε ορισμένες περιοχές είναι ακόμα μεγαλύτερο.

Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ΑΠΕ, κυρίως για την παραγωγή θερμικής ενέργειας (ζεστό νερό) στα κτίρια. Ιδιαίτερα οι νέες κατοικίες, στην πλειοψηφία τους διαθέτουν όλες την απαιτούμενη υποδομή για την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών. Η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών στα κτίρια, για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, θεωρείται ως μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση στη χώρα μας.

Τα Φ/Β είναι μια τεχνολογία αρκετά δαπανηρή, κυρίως αν απαιτείται και σύστημα αποθήκευσης (συσσωρευτές) της ηλιακής ενέργειας και για τον λόγο αυτό η χρήση τους στην Ελλάδα ήταν περιορισμένη τις προηγούμενες δεκαετίες. Σήμερα, το κόστος αγοράς Φ/Β έχει μειωθεί σημαντικά και σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, φαίνεται ότι σύντομα θα είναι μια ανταγωνιστική επένδυση και λύση για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αιολική Ενέργεια: Η Αιολική Ενέργεια αξιοποιείται κυρίως με τη χρήση ανεμογεννητριών (Α/Γ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διοχέτευση της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στον κτηριακό τομέα έχουν γίνει ορισμένες εφαρμογές κυρίως σε κτίρια κατοικιών που βρίσκονται σε απομονωμένες περιοχές ή σε νησιωτικές περιοχές που δεν έχουν πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ιδιαίτερα στα νησιά του Αιγαίου όπου το αιολικό δυναμικό είναι αρκετά υψηλό, μέση ταχύτητα ανέμου περίπου 11 [m/sec], η εγκατάσταση μιας Α/Γ μικρής ηλεκτρικής ισχύος 3-5 [kW] σε μια κατοικία, μπορεί να υπερκαλύψει τις βασικές ενεργειακές ανάγκες για ηλεκτρισμό[24].

Σήμερα οι τεχνολογίες Α/Γ αστικού περιβάλλοντος διαθέτουν όλες τις απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές για εφαρμογές σε κτίρια. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι η λειτουργία τους σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων αέρα από 3÷28 [m/sec]. Το κόστος τους είναι ακόμα ιδιαίτερα υψηλό, και οι αποδόσεις τους εξαρτώνται από το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της εκάστοτε περιοχής εγκατάστασης. Μέχρι σήμερα οι εφαρμογές Α/Γ αστικού περιβάλλοντος στη χώρα μας είναι περιορισμένες.

Βιομάζα: Η Βιομάζα προέρχεται από την επεξεργασία φυτικών, ζωικών και δασικών προϊόντων και υπολειμμάτων, καθώς επίσης και των αστικών λυμάτων και απορριμμάτων. Η αξιοποίηση της γίνεται μέσω της καύσης της, με τη χρήση κατάλληλης ανά περίπτωση τεχνολογίας. Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας από βιομάζας χρησιμοποιούνται στον κτηριακό τομέα (θέρμανση χώρων, παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, μαγείρεμα κτλ), στα μέσα μεταφοράς

(βιοντήζελ, κ.λ.π.), στη βιομηχανία, στην γεωργία κ.ά. Η βιομάζα χρησιμοποιείται ακόμα και στα συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας ΣΗΘ.

Στα κτίρια ο πιο κοινός παραδοσιακός τρόπος αξιοποίησης βιομάζας είναι μέσω της καύσης στερεής βιομάζας σε παραδοσιακές ανοιχτές εστίες (τζάκια), οι οποίες έχουν πολύ χαμηλή απόδοση, λόγω των υψηλών απωλειών θερμικής ενέργειας μέσω των καπναερίων.

Γεωθερμία: Η Γεωθερμική Ενέργεια προέρχεται από την αξιοποίηση των διαθέσιμων γεωθερμικών πεδίων υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας, καθώς και της θερμοκρασίας του υπεδάφους, των υπόγειων και θαλασσίων υδάτων.

Στην Ελλάδα, η αξιοποίηση γεωθερμικών πεδίων γίνεται κυρίως για την κάλυψη θερμικών φορτίων σε κτίρια (π.χ. μέσω τηλεθέρμανσης) ή σε άλλες εφαρμογές κυρίως στη γεωργία όπως σε εγκαταστάσεις θερμοκηπίων. Επίσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλης ή μικρής ισχύος μονάδες αμμοστρόβιλων. Αντίστοιχα, η αξιοποίηση της γεωθερμίας του εδάφους και των υπόγειων υδάτων γίνεται κυρίως για την κάλυψη θερμικών ή ψυκτικών φορτίων σε κτίρια μέσω της χρήσης αντλιών θερμότητας.

Τα συστήματα αξιοποίησης της γεωθερμίας εδάφους έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται σε κτηριακές εγκαταστάσεις την τελευταία δεκαετία. Επίσης η γεωθερμία εδάφους αξιοποιείται άμεσα με την κατασκευή τμημάτων ή ολόκληρου του κτιρίου σε επαφή ή μέσα στο υπέδαφος.

Υδροηλεκτρική Ενέργεια: Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια παράγεται μέσω υδροστροβίλων, οι οποίοι αξιοποιούν την υδραυλική ενέργεια των τρεχούμενων υδάτων. Στη χώρα μας οι υδροστροβίλοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, μέχρι και πριν από μερικές δεκαετίες, στις αγροτικές περιοχές της χώρας μας γινόταν χρήση νερόμυλων σε διάφορες αγροτικές δραστηριότητες, προκειμένου για τη μεταφορά ή/και κίνηση εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα οι μολόπετρες για το άλεσμα σιτηρών.

Η κατασκευή αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών με παράλληλη χρήση ανεμογεννητριών, δίνει τη δυνατότητα μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε υδραυλική και την αξιοποίησης της όταν υπάρχει απαίτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια μετατρέπεται και αποθηκεύεται ως υδραυλική ενέργεια, με τη μεταφορά (ανύψωση) των διαθέσιμων υδάτινων πόρων από μία δεξαμενή αποθήκευσης σε μία άλλη μεγαλύτερου υψομέτρου.

Κυματική Ενέργεια: Η Κυματική Ενέργεια αξιοποιείται μέσω ειδικών εγκαταστάσεων και εφαρμόζεται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν προς το παρόν τέτοιες εφαρμογές. Ωστόσο, η ιδιαιτερότητα της χώρας μας, όσον αφορά τον μεγάλο αριθμό νησιών, καθώς και τη διαμόρφωση των ακτογραμμών και των ελληνικών πελάγων, συντελεί στη διαθεσιμότητα κυματικής ενέργειας περιορισμένου ύψους και μήκους σε σχέση με αυτή των ωκεανών, γεγονός που παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας με περιορισμένα τεχνικά προβλήματα. Οι εγκαταστάσεις αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας έχουν πολύ υψηλό κόστος, τόσο λόγω της υψηλής και ειδικής τεχνολογίας που χρησιμοποιείται, όσο και της υψηλής ασφάλειας που απαιτείται κατά τη λειτουργία τους.

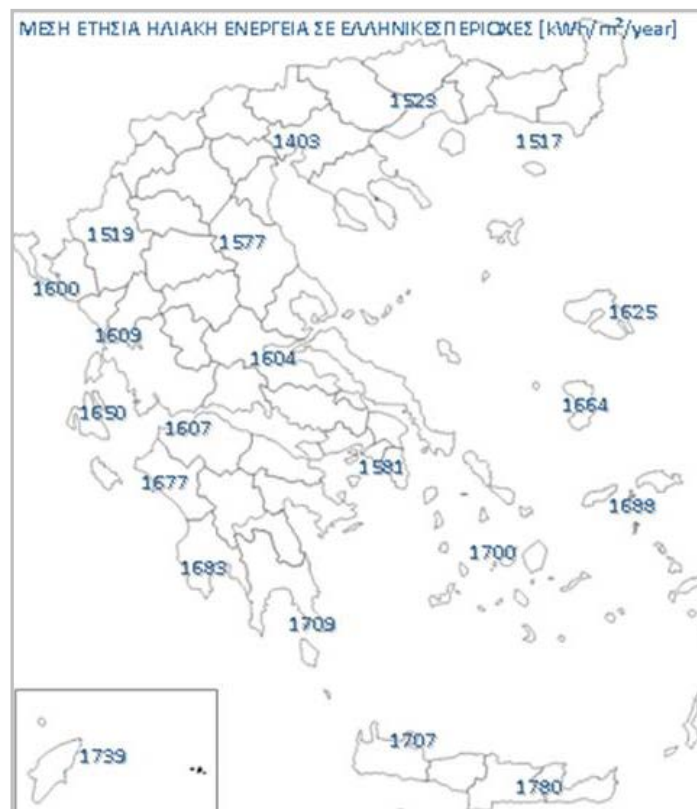
Τα βασικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, είναι η παραγωγή ενέργειας από μια πηγή που είναι ανεξάντλητη και δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, αν εξαιρέσει κανείς την καύση βιομάζας. Παράλληλα, τα συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και για τον λόγο αυτό είναι κατάλληλα σε απομονωμένες περιοχές χωρίς κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Η χρήση των συστημάτων ΑΠΕ μειώνει την εξάρτηση μιας χώρας από τα συμβατικά καύσιμα και εξοικονομεί συνάλλαγμα.

Αντίθετα τα μειονεκτήματα των συστημάτων ΑΠΕ, είναι κυρίως το υψηλό κόστος κατασκευής και εγκατάστασης, καθώς και η διακύμανση της διαθεσιμότητάς των ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια κ.ά.), η οποία εξαρτάται από τα φυσικά και κλιματικά φαινόμενα. Το υψηλό κόστος οφείλεται στην υψηλή τεχνολογία κατασκευής τους, αλλά και στην χαμηλή απόδοση ορισμένων

από αυτά (π.χ. φωτοβολταϊκά). Το κόστος των συστημάτων ΑΠΕ αυξάνεται σημαντικά όταν εγκαθιστάτε παράλληλα με συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συσσωρευτές (μπαταρίες) ή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με θερμοαντήρες/δεξαμενές.

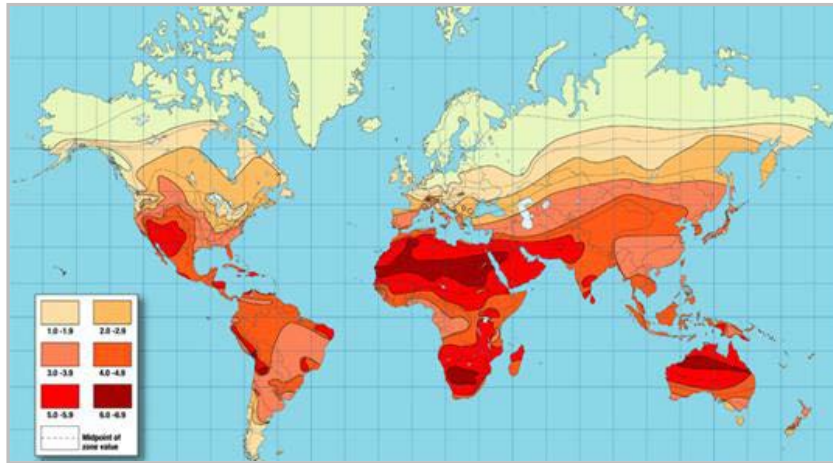
1.3.1. Ηλιακή Ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό (περίπου 1.400-1.800 kWh/m²/yr), ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία (W/m²) είναι μια μορφή ενέργειας που μπορεί να προβλεφθεί με αρκετή ακρίβεια στη διάρκεια της ημέρας και κυρίως σε αίθριες καιρικές συνθήκες, σε κάθε εποχή του χρόνου. Παρουσιάζει τη μέγιστη ημερήσια ένταση της κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεσημεριού (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και τη χειμερινή περίοδο. Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η συνολική ημερήσια ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο σε κάθε ημισφαίριο (βόρειο ή νότιο), λόγω της μείωσης της γωνίας ηλιακής πρόσπτωσης, της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας και της μείωσης των νεφοσκεπών ημερών.

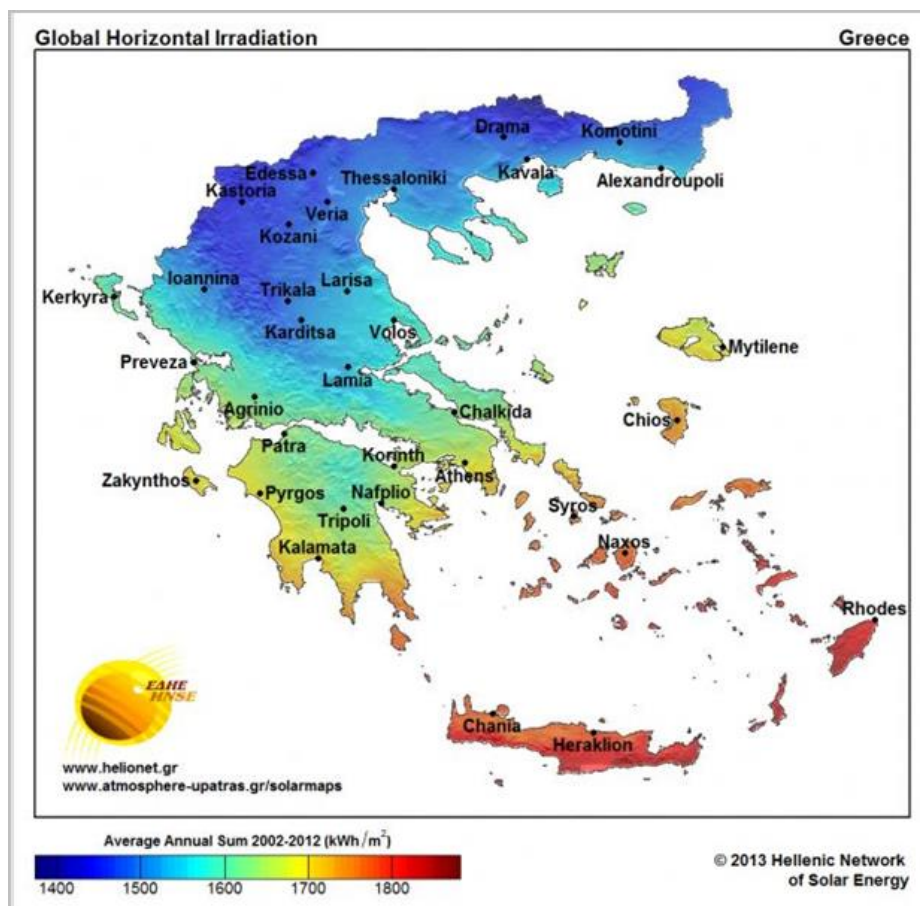


Σχήμα 1.3.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε Ελληνικές περιοχές

Η ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης παρουσιάζει μέγιστες τιμές στις περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ) από 0° (ισημερινός) έως 10°, καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παραμένει σε υψηλά επίπεδα τόσο κατά τη θερινή όσο και τη χειμερινή περίοδο. Η διαφοροποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές με ίδιο γεωγραφικό πλάτος, οφείλεται κυρίως στις τοπικές κλιματικές συνθήκες, οι οποίες διαμορφώνονται ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους και κυρίως τη βλάστηση της περιοχής, η οποία συμβάλει στη δημιουργία νεφών και κατ' επέκταση βροχής. Η ηλιακή ενέργεια αποτυπώνεται σε ηλιακούς χάρτες, σε ημερήσιες, μηνιαίες ή ετήσιες τιμές της ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 1.3.2 [23]).



Σχήμα 1.3.2: Παγκόσμιος χάρτης ηλιακής ενέργειας. Ημερήσια ηλιακή ενέργεια για τον χειρότερο μήνα ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$). <http://www.matthewb.id.au/>



Σχήμα 1.3.3: Χάρτης ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα. Μέση ετήσια ολική ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο ($\text{kWh/m}^2/\text{yr}$). <http://www.atmosphere-upatras.gr>

Ηλιακοί χάρτες, με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο ($\text{kWh/m}^2/\text{yr}$), υπάρχουν και για την περιοχή της Ελλάδας (Σχήμα 1.3.3 Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Πανεπιστήμιο Πάτρας www.atmosphere-upatras.gr). Η Κρήτη, τα Δωδεκάνησα και οι Κυκλάδες είναι οι Ελληνικές περιοχές με τις μεγαλύτερες τιμές ετήσιας ηλιακής ενέργειας.

1.3.2. Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Στην Ελλάδα, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας το 2015 προέρχεται κυρίως από εγκαταστάσεις συμβατικών καυσίμων, τα οποία καλύπτουν το 57,3% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 18.942 MW [16,25]. Η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή καλύπτει το 42,3% (8.087 MW), κυρίως λόγω των συστημάτων υδροηλεκτρικής ενέργειας 17,9%, ενώ ακολουθούν τα συστήματα αξιοποίησης αιολικής ενέργειας με 11,0% και ηλιακής ενέργειας (Φ/Β) με 13,7%. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2015 στην Ελλάδα ανήλθε στις 51,9 TWh, εκ των οποίων το 29,0% προήλθε από ΑΠΕ. Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το 2015, είναι πρωτίστως από υδροηλεκτρικά 11,7%, ακολουθούν τα αιολικά με 8,9%, τα ηλιακά (Φ/Β) με 7,5% και μόνο 0,4% από βιομάζα.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β στην Ελλάδα ξεκίνησε περίπου τη δεκαετία του 1990. Μετά από περίπου μια δεκαετία αργής ανάπτυξης, λόγω των εγγενών εμποδίων στην αγορά ενέργειας, της καθυστέρησης διαμόρφωσης και σταθεροποίησης του σχετικού θεσμικού πλαισίου, το χαμηλό κόστος αγοράς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το υψηλό κόστος αγοράς Φ/Β και την έλλειψη οικονομικών κινήτρων, η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς από Φ/Β, ανήλθε το 2006 μόλις στα 6,7 MW, εκ των οποίων το μεγαλύτερο ποσοστό αποτελείται από αυτόνομα συστήματα. Το 2006, εκδόθηκαν μια σειρά από κανονιστικές διατάξεις για την αξιοποίηση των ΑΠΕ, βάσει των οποίων δόθηκαν σημαντικά οικονομικά κίνητρα (επιδοτήσεις, μείωση φόρων, κ.λ.π.) στους επενδυτές για την εγκατάσταση Φ/Β [26], συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης μικρής ισχύος Φ/Β (μέχρι 10 kW) σε κατοικίες και επιχειρήσεις (συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο), καθώς και μεγάλης ισχύος Φ/Β μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Η αλλαγή του θεσμικού πλαισίου ώθησε σημαντικά την αύξηση των Φ/Β[27], φτάνοντας το 2015 τα 2604 MW περίπου, δηλαδή το 2,7% από τα 95 GW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β στα 28 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης[25]. Σημειώνεται ότι, η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς στην Ελλάδα για το 2015 εκτιμάται στα 18,9 GW που αντιστοιχούν μόλις στο 1,9% της συνολικής εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στα 28 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία εκτιμάται στα 981,8 GW. Σύμφωνα με το υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, τα Φ/Β παράγαγαν το 2015 περίπου 3,9 TWh [28]. Επιπλέον, σύμφωνα με στοιχεία του 2014, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β, τα οποία είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο, έφτασαν τα 2596 MW, εκ των οποίων περίπου το 14% αφορά τις μικρής ισχύος εγκαταστάσεις (μέχρι 10 kW) σε κατοικίες και επιχειρήσεις.

Στην χώρα μας υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες αξιοποίησης της Φ/Β τεχνολογίας, δεδομένου του υψηλού ηλιακού δυναμικού σχεδόν σε όλη τη χώρα. Με περισσότερα από 2,6 GW εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος, η Ελλάδα θα μπορούσε να διαδραματίσει ηγετικό ρόλο στην ανάπτυξη των Φ/Β. Ωστόσο, δεδομένης της συνεχιζόμενης οικονομικής και χρηματοπιστωτικής κρίσης στην Ελλάδα, της συνεχής διακύμανσης των τιμολογίων αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, την εξαιρετικά σκληρή ύφεση, την αναδρομική φορολόγηση και τη συνολική καθυστέρηση για τις πληρωμές των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται η ανάπτυξη της αγοράς Φ/Β να επιβραδυνθεί. Οι εφαρμογές Φ/Β στοιχείων είναι πάρα πολλές και κυρίως στην νησιωτική Ελλάδα. Αρκετοί από τους ελληνικούς φάρους ηλεκτροδοτούνται ακόμα και σήμερα μέσω Φ/Β διατάξεων με συστήματα αποθήκευσης, συσσωρευτές. Η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει πολλές μονάδες Φ/Β σε βραχονησίδες ή περιοχές με λίγους κατοίκους για την ηλεκτροδότησή τους. Η δημοτικός φωτισμός δρόμων είναι επίσης μια συνήθης εφαρμογή Φ/Β.

Σε κάθε περίπτωση, για την οικονομική βιωσιμότητα των Φ/Β επενδύσεων, είναι απαραίτητη η ακριβής εκτίμηση της πραγματικής απόδοσης Φ/Β σε πραγματικές εξωτερικές κλιματικές συνθήκες. Η σχέση κόστους-απόδοσης των Φ/Β εξαρτάται από την μακροχρόνια αξιοπιστία (διάρκεια ζωής) και την ανθεκτικότητα των Φ/Β μονάδων, η οποία εξαρτάται από τις πιθανές μεταβολές των τεχνικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων που οδηγούν σε μια χαμηλότερη

ενεργειακή απόδοση. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές υποβάλλουν τα Φ/Β σε δοκιμές και ελέγχους αντοχής στις καιρικές συνθήκες, προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα αντοχής των υλικών. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν συνήθως: τη διακύμανση της θερμοκρασίας και υγρασίας, θερμικό σοκ, τη συνεχή ψύξη και απόψυξη των Φ/Β, τη διακύμανση της ηλιακή ακτινοβολία, τη βροχή ή την άμμο και τη σκόνη. Επίσης τα Φ/Β υπόκειται σε υψηλά τεστ αντοχής (επιταχυνόμενη πίεσης κ.λ.π.), δοκιμές επιταχυνόμενης διάρκειας ζωής, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές αστοχίες τους. Ειδικότερα, για τον ποιοτικό έλεγχο των Φ/Β μονάδων και τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων, τα Φ/Β είναι πιστοποιημένα βάσει διεθνών προτύπων [29]. Η πιστοποίηση των Φ/Β εξασφαλίζει ότι πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις και ότι έχουν λιγότερες πιθανότητες να εμφανίσουν αστοχίες και χαμηλή απόδοση.

Οι τεχνολογίες Φ/Β που υπάρχουν διαθέσιμες στην αγορά σήμερα είναι κυρίως από πυρίτιο (Si), κρυσταλλικής δομής (μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά) σε μορφή πλακιδίων και άμορφα σε μορφή μεμβράνης ή κοινώς λεπτού υμένα (thin film - λεπτού φιλμ) (Σχήμα 1.3.4.(α,β)) [30]. Σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιείται για την κατασκευή Φ/Β το γερμάνιο (Ge). Τα Φ/Β πυριτίου έχουν επικρατήσει στην αγορά, λόγω της αφθονίας του στη φύση και των καλών ημιαγωγικών χαρακτηριστικών τους, που προβλέπεται να δώσουν τεχνολογίες ακόμα καλύτερης ενεργειακής απόδοσης μελλοντικά, αλλά και λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς που έχουν σήμερα, το οποίο οφείλεται στο χαμηλό κόστος της πρώτης ύλης και παραγωγής τους.

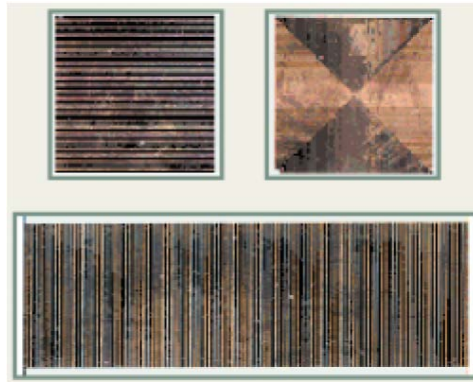


Σχήμα 1.3.4: Φ/Β με κρυστάλλους πυριτίου (α), Φ/Β άμορφου πυριτίου (μεμβράνες ή κοινώς «λεπτού φιλμ») (β)

Οι αποδόσεις των Φ/Β πυριτίου διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία και κυμαίνονται για το άμορφο πυρίτιο (μεμβράνες – λεπτοί υμένες) περίπου στο 7% ως 11% και για τα μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά (μονής ή διπλής όψης) στο 14% έως 22%. Τα μονοκρυσταλλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση αλλά το κόστος κατασκευής τους είναι μεγαλύτερο από αυτό των πολυκρυσταλλικών. Το καθαρό (ενεργό) πάχος των πλακιδίων των κρυσταλλικών Φ/Β πυριτίου, χωρίς τις μεταλλικές επαφές, κυμαίνεται συνήθως από 200 έως 450μm. Αντίστοιχα, τα Φ/Β άμορφου πυριτίου «λεπτού υμένα» είναι στοιχεία πολύ μικρότερου πάχους (συνήθως 1 έως 5μm), τα οποία έχουν χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση αλλά και χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

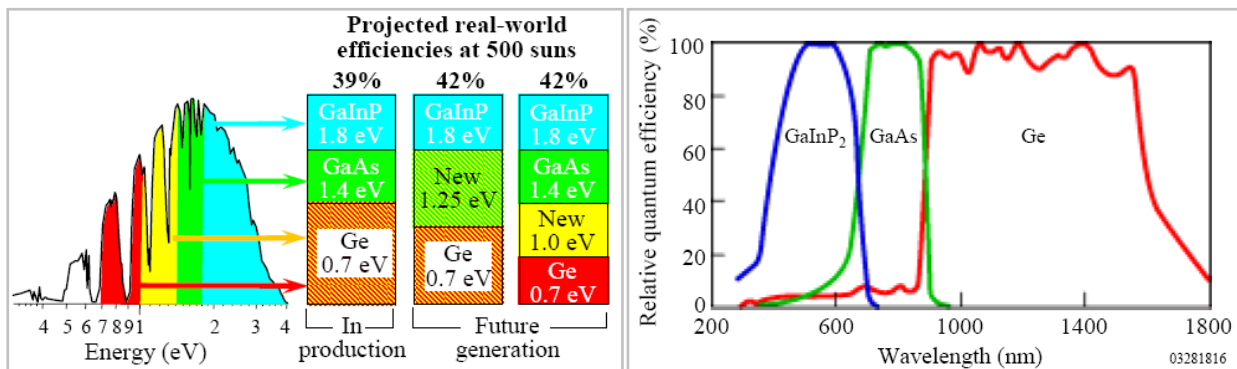
Η εγκατάσταση κρυσταλλικών Φ/Β πυριτίου στην Ελλάδα, τα οποία τοποθετούνται υπό βέλτιστη γωνία κλίσης κατά περίπτωση, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής, εκτιμάται ότι δίνουν τελική ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια από 140 έως 270 kWh/m²/yr, ή αλλιώς 1100 έως 1300 kWh/kWp/year [31]. Τα Φ/Β πυριτίου έχουν συνήθως εγγυημένη διάρκεια ζωής για 25 χρόνια [32, 33], με μέγιστη σταδιακή πτώση της ενεργειακής τους απόδοσης περίπου 0,8%. Σύμφωνα με διεθνή αναφορά στα διαθέσιμα τεστ Φ/Β μονάδων, η ενεργειακή απόδοση παρουσιάζει μέγιστη τιμή σταδιακής μείωσης ετησίως 0,8% και μέση τιμή ετησίως 0,5% [34].

Μια νεώτερη τεχνολογία είναι τα Φ/Β πολλαπλής επαφής (διπλής, τριπλής κ.λ.π.), τα οποία παρουσιάζουν σήμερα ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή απόδοση άνω του 25% έως 40%. Εργαστηριακά η απόδοση έχει ξεπεράσει το 60%. Στο μέλλον τα Φ/Β πολλαπλής επαφής που χρησιμοποιούνται στην αγορά αναμένεται να φτάσουν σε ενεργειακή απόδοση πάνω από το 50% [35,36].



Σχήμα 1.3.5: Μικροσίπ τριπλής μεμβράνης (Spectrolab) [35]

Τα Φ/Β πολλαπλής επαφής αποτελούνται από εφαπτόμενες μεμβράνες, «λεπτού φιλμ» ή «λεπτού υμενίου», διαφορετικής σύστασης η κάθε μία με δυνατότητα αξιοποίησης διαφορετικού φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται, το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που αξιοποιείται και κατά συνέπεια η ενεργειακή τους απόδοση ανά μονάδα επιφανείας Φ/Β. Επισημαίνεται ότι, η λειτουργία αυτής της τεχνολογίας προϋποθέτει ότι, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας υπερβαίνει τους 200 ήλιους (200 kW/m^2), το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση συγκεντρωτικών φακών.



Σχήμα 1.3.6: Απόδοση Φ/Β τριπλής επαφής αξιοποίησης μεγάλου φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 3.1.6 [30,35] παρουσιάζεται η σχετική ενεργειακή απόδοση των μεμβρανών του Φ/Β τριπλής επαφής (Relative quantum efficiency %), υπό ένταση ακτινοβολίας 500 Suns, της εταιρείας Spectrolab. Το Φ/Β αποτελείται από τρεις επιφάνειες (μεμβράνες) διαφορετικής σύστασης GaInP (γάλλιο, ίνδιο και φώσφορο), GaAs (γάλλιο και αρσένιο) και Ge (γερμάνιο), οι οποίες αξιοποιούν διαφορετικό μήκος κύματος από το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα πολλαπλής επαφής Φ/Β αποτελούνται από συνδυασμό μεμβρανών «λεπτού φιλμ», οι οποίες κατασκευάζονται με ημιαγώγιμα υλικά όπως το γάλλιο-αρσενικό (GaAs), κάδμιο-τελλούριο (CdTe), χαλκός-ίνδιο (CuIn), χαλκός-ίνδιο-σελήνιο (CuInSe_2) και κάδμιο-θείο (CdS) που είναι και τα πιο γνωστά σε επίπεδο εφαρμογών. Επίσης χρησιμοποιούνται και πιο σύνθετα στοιχεία όπως το γάλλιο-αλουμίνιο-αρσενικό (GaAlAs), γάλλιο-ίνδιο-φώσφορος (GaInP₂), γάλλιο-ίνδιο-αρσενικό-φώσφορος (GaInAsP), γάλλιο-αντιμόνιο (GaSb), ίνδιο-αντιμόνιο (InSb) και ίνδιο-φώσφορος (InP). Ο συνδυασμός και ταυτόχρονη χρήση των μεμβρανών αυτών

Στην αγορά υπάρχουν ήδη διαθέσιμα Φ/Β με μεμβράνες πολλαπλής επαφής και συγκεντρωτικούς φακούς. Για την απόδοση τους απαιτείται να υπάρχει σύστημα παρακολούθησης του ήλιου με άξονα διπλής περιστροφής, ώστε να μεγιστοποιείται η ένταση

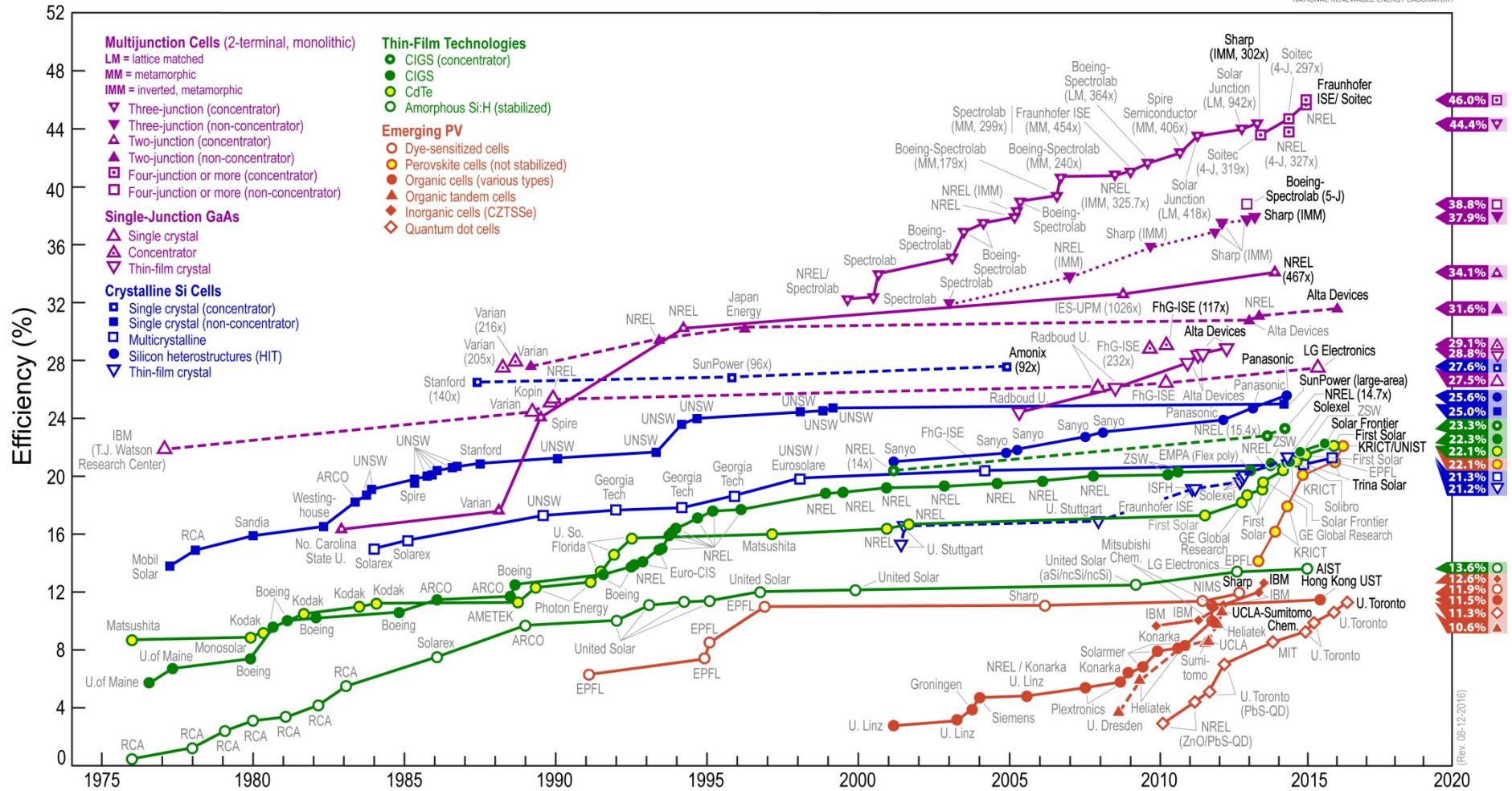
της ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου να λαμβάνεται η ελάχιστη ένταση ακτινοβολίας για τη λειτουργία τους άνω των 200 suns (Σχήμα 3.1.7).



Σχήμα 1.3.7: Φ/Β τριπλής επαφής με συγκεντρωτικούς φακούς και διπλό άξονα περιστροφής.

www.Sol3g.com

Best Research-Cell Efficiencies



Σχήμα 1.3.8: Εξέλιξη της τεχνολογίας των Φ/Β. Πηγή http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

Μια νέα τεχνολογία Φ/Β είναι και τα θερμοφωτονικά συστήματα (thermophotonic systems). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από δύο οπτικές διόδους (LED), οι οποίες τοποθετούνται ώστε να έχουν οπτική επαφή, είναι θερμικά απομονωμένες και συνδέονται με ένα ηλεκτρικό φορτίο (αντίσταση R). Η μία διόδος διατηρείται σε υψηλή θερμοκρασία και η άλλη σε χαμηλότερη, οπότε εμφανίζεται μεταφορά φωτονίων από τη μία πλευρά στην άλλη, με τη μορφή σχεδόν μονοχρωματικής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος μέσω του φορτίου. Η απόδοση της διάταξης αυτής εξαρτάται από τις θερμοκρασίες των διόδων.

Σε ερευνητικό επίπεδο εξελίσσονται και άλλες τεχνολογίες Φ/Β στοιχείων (Σχήμα 1.3.8). Οι πιο σημαντικές από αυτές οι οποίες είναι η δημιουργία πολλαπλών ζευγών ηλεκτρονίου-οπής από κάθε προσπίπτον στον ημιαγωγό φωτόνιο, μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες, η δημιουργία Φ/Β στοιχείων πολλαπλών ενεργειακών ταινιών, με έγχυση προσμίξεων σπάνιων στοιχείων της φύσης που θα αυξάνουν τη μεταφορά ηλεκτρονίων στο εσωτερικό των ημιαγωγών και η κατασκευή «χρωμο-ευαίσθητων» {Dye-sensitized} Φ/Β στοιχείων «λεπτού υμένα», στοιχεία που χρησιμοποιούν ημιαγωγό οξειδίου (π.χ. TiO_2) και εμφανίζουν ικανοποιητική απόδοση (%) με χαμηλά επίπεδα έντασης ηλιακής ακτινοβολίας [37].

Ωστόσο, για τα επόμενα έτη, το μεγαλύτερο ποσοστό των εμπορικών εφαρμογών θα βασίζεται σε Φ/Β κατασκευασμένα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Si) λεπτού υμένα, καθώς έχει το μεγάλο πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους κατασκευής. Ταυτόχρονα η εξέλιξη της τεχνολογίας των υλικών αυτών αναμένεται να ανεβάσει σταδιακά την ενεργειακή τους απόδοση σε τιμές 20-30%.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των Φ/Β είναι τα εξής: [23, 38, 39]

- Δεν απαιτείται η κατανάλωση άλλης συμβατικής μορφής ενέργειας, πρωτογενή ή μη, για τη λειτουργία τους, παρά μόνο κατά τη διαδικασία παρασκευής τους.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους, καθώς δεν εκλύουν καμία μορφή ρύπων στην ατμόσφαιρα.
- Δεν αφήνουν κατάλοιπα, με εξαίρεση τα αυτόνομα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν συσσωρευτές (μπαταρίες) ως αποθηκευτικό μέσο,
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε απομονωμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχει κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης ή άλλη πηγή ηλεκτροδότησης,
- Παρουσιάζουν απλότητα κατά τη λειτουργία τους, καθώς δεν διαθέτουν κινητά μέρη και τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα, εφόσον εγκατασταθούν σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, συσσωρευτές, κ.λ.π. Σε περίπτωση χρήσης περιστρεφόμενης βάσης παρακολούθησης του ήλιου, το Φ/Β σύστημα γίνεται πιο πολύπλοκο και απαιτεί συστηματική παρακολούθηση κατά τη λειτουργία του.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής που εκτιμάται πάνω από 30 χρόνια, με αποδοτική λειτουργία, σύμφωνα με τις μέχρι σήμερα καταγραφές και υπάρχουσες εγκαταστάσεις.
- Έχουν χαμηλή αναλογία βάρους αποδιδόμενης ισχύος (kg/Watt),
- Έχουν περιορισμένες απαιτήσεις συντήρησης, κυρίως στις περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειψη κινητών μερών.
- Το βασικό υλικό παραγωγής του μεγαλύτερου ποσοστού Φ/Β, τα οποία διατίθεται μέχρι σήμερα στην αγορά, είναι το πυρίτιο (Si), υλικό που αφθονεί στον πλανήτη μας.

1.4. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο την παραμετροποίηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κρυσταλλικών Φ/Β σε συνθήκες περιβάλλοντος, μέσω της ανάπτυξης ενός υπολογιστικού μοντέλου (αναλυτικές σχέσεις), που θα λαμβάνει υπόψη κυρίως τις κλιματικές συνθήκες των ελληνικών περιοχών. Η ανάπτυξη του μοντέλου θα βασίζεται, εκτός από τις κλιματικές παραμέτρους (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία αέρα κ.λ.π.) και τεχνικές παραμέτρους που αφορούν στη θέση εγκατάστασης των Φ/Β (κλίση επιφάνειας, έκθεση στον άνεμο κ.λ.π.), στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τη δυνατότητα ηλιασμού λόγω φυσικών ή τεχνικών εμποδίων κ.ά. Στις επόμενες παραγράφους δίνεται μια σύντομη περιγραφή για το αντικείμενο και τα περιεχόμενα της διατριβής, πέραν από το παρόν **πρώτο** Κεφάλαιο που έγινε αναφορά στη ελληνική νομοθεσία για την ηλεκτροπαραγωγή και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, καθώς και στην εξέλιξη της ενεργειακή κατανάλωσης στην Ελλάδα.

Στο **δεύτερο** Κεφάλαιο της διατριβής γίνεται ανασκόπηση της διεθνούς και εθνικής βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την ενεργειακή συμπεριφορά των Φ/Β, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ειδικότερα, γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε θεωρητικές και εμπειρικές σχέσεις (υπολογιστικά μοντέλα, μεθοδολογίες) για την εκτίμηση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στις Ελληνικές περιοχές, καθώς και της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Τα υπολογιστικά μοντέλα αυτά έχουν αναπτυχθεί και βασίζονται σε θεωρητικές γνώσεις, παραδοχές και δεδομένα αλλά και σε πειραματικές μετρήσεις και έχουν επικρατήσει διεθνώς λόγω της αξιοπιστίας και επαλήθευσής τους μέσω και άλλων πειραματικών μετρήσεων.

Στο **τρίτο** κεφάλαιο γίνεται επεξεργασία και ανάλυση των κλιματικών δεδομένων που παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) για τον σκοπό της παρούσας διατριβής και αφορούν κυρίως την ηλιοφάνεια και την ηλιακή ενέργεια, καθώς και τη θερμοκρασία του αέρα σε εξήντα Ελληνικές περιοχές. Από την επεξεργασία / ανάλυση των δεδομένων αναπτύχθηκαν οι απαιτούμενες εμπειρικές σχέσεις:

α) για την εκτίμηση της διαθέσιμης μέσης ωριαίας ηλιακής ενέργειας στη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας κάθε ελληνικής περιοχής, με δεδομένο το γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και υψόμετρο, των περιοχών αυτών,

β) για την εκτίμηση της αναμενόμενης μέσης, μέγιστης και ελάχιστης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας, για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα, στις Ελληνικές περιοχές.

Στο **τέταρτο** Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής γίνεται ανάλυση και αξιολόγηση μετρήσεων δύο πειραματικών μονάδων κρυσταλλικών Φ/Β, που είναι εγκατεστημένες η μία στο Αστεροσκοπείο Αθηνών στην Παλαιά Πεντέλη και η άλλη στο εργαστήριο ηλιακών συστημάτων (INES/CEA - LITEN/DTS Laboratory for Solar Systems) του Κέντρου Ατομικής Ενέργειας και Εναλλακτικών Ενεργειών (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) στο St-Paul-lez-Durance της Γαλλίας. ανάλυση των μετρήσεων έγινε προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση ορισμένων παραμέτρων στην ενεργειακή συμπεριφορά των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται κυρίως με τις διάφορες κλιματικές συνθήκες, ηλιακή ενέργεια (νεφοσκεπείς και αίθριες συνθήκες), θερμοκρασία αέρα, ηλιακή γεωμετρία (γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, αέρια μάζα κ.λ.π.), αλλά και τα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικών των Φ/Β. Από την ανάλυση και αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν εμπειρικές σχέσεις προσέγγισης (μοντελοποίηση) της ενεργειακής απόδοσης (%) των Φ/Β, καθώς και της ισχύος εξόδου (Watt) σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος.

Στο **πέμπτο** Κεφάλαιο αναπτύσσεται μεθοδολογία υπολογισμού και ποσοτικοποίησης της επιμέρους επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στην τελική διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, καθώς στην ενεργειακή απόδοση των κρυσταλλικών Φ/Β στις Ελληνικές περιοχές. Οι αναλυτικές

σχέσεις προέκυψαν, λαμβάνοντας υπόψη πειραματικές μετρήσεις, τα κλιματικά δεδομένα των ελληνικών περιοχών, καθώς και τα διαθέσιμα θεωρητικά ή εμπειρικά υπολογιστικά μοντέλα, και υπολογίζουν για δεδομένη χρονική περίοδο:

α) το ποσοστό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας (k_d) στη συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια (I_β), για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (αίθριες μέρες ή νεφελώδεις) στις Ελληνικές περιοχές,

β) το λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που αξιοποιείται τελικά από τη συλλεκτική επιφάνεια ενός Φ/Β, προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει αρχικά πάνω στην κεκλιμένη γυάλινη επιφάνεια του (S_{pv}/I_β),

γ) τη θερμοκρασία του Φ/Β, βάσει των μέσων ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, τη θέση εγκατάστασης (ελεύθερα ή ενσωματωμένα σε επιφάνειες), καθώς και των ονομαστικών τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β σε συνθήκες εργαστηρίου – Standard Test Conditions (STC),

δ) τη μέση ωριαία ποσοστιαία διακύμανση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης Φ/Β, ανά μήνα, μόνο λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειάς τους, καθώς και τη μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση, δεδομένου των κλιματικών συνθηκών στις Ελληνικές περιοχές,

ε) τη μέση ωριαία και μέση μηνιαία ποσοστιαία διακύμανση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β, μόνο λόγω της γωνιακής τους θέσης ως προς τον ήλιο, δηλαδή του συντελεστή διαπερατότητας-απορροφητικότητας, στις διάφορες Ελληνικές περιοχές,

στ) τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που τελικά αξιοποιείται από ένα Φ/Β στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό μήκος, πλάτος και υψόμετρο της περιοχής, και το μέσο ετήσιο συντελεστή αισθηρότητας της περιοχής ή τη γωνιακή θέση του Φ/Β ως προς τον ήλιο, κλίση Φ/Β,

ζ) τον μέσο ετήσιο συντελεστή διαπερατότητας-απορροφητικότητας των κρυσταλλικών Φ/Β για τις Ελληνικές περιοχές, συναρτήσει της γωνιακής θέσης του Φ/Β ως προς τον ήλιο (γωνία κλίσης) και των επιμέρους συντελεστών διαπερατότητας-απορροφητικότητας για τη μέση ωριαία άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ενέργεια στις Ελληνικές περιοχές, όπως εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις της EMY,

η) τη συνολική μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης Φ/Β, λόγω της θερμοκρασίας και της γωνιακής τους θέσης ως προς τον ήλιο, δηλαδή του συντελεστή διαπερατότητας-απορροφητικότητας, που υπολογίστηκε βάσει των μέσων ωριαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες Ελληνικές περιοχές. Θεωρητική προσέγγιση υπολογισμού.

θ) τη συνολική μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β, στις διάφορες Ελληνικές περιοχές. Εφαρμογή των εμπειρικών αναλυτικών σχέσεων που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων (τέταρτο Κεφάλαιο) των Φ/Β μονάδων και τη χρήση των μέσων ωριαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες Ελληνικές περιοχές.

Η μεθοδολογία (αναλυτικές σχέσεις) που αναπτύσσεται στο πέμπτο Κεφάλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διαστασιολόγησης Φ/Β μονάδων στις Ελληνικές περιοχές, καθώς και στην εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος Φ/Β μονάδων, για δεδομένη χρονική στιγμή, στην περίπτωση πρόγνωσης των αναμενόμενων κλιματικών συνθηκών.

Στο **έκτο** Κεφάλαιο μελετάται η περίπτωση εφαρμογής της μεθοδολογίας και των αναλυτικών εμπειρικών σχέσεων, τα οποία αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, σε κτίρια κατοικιών, προκειμένου για τη μερική ή ολική κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων τους. Ειδικότερα, αναλύεται με τεchnοοικονομικά κριτήρια, η δυνατότητα χρήσης Φ/Β μονάδων, τόσο αυτόνομης λειτουργίας με τη χρήση διατάξεων αποθήκευσης (συσσωρευτές) όσο και διασυνδεδεμένα με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κτίρια

του τριτογενή τομέα (γραφεία, ξενοδοχεία, κτίρια εκπαίδευσης κ.λ.π.), καθώς είναι ανηγμένα ανά μονάδα εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος. Στο ίδιο Κεφάλαιο παρατίθεται και δεδομένα για την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων και κυρίως των κτιρίων κατοικιών, ανά κλιματική περιοχή στην Ελλάδα. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα κτίρια, προκειμένου να μειωθεί η τελική κατανάλωση συμβατικής ενέργειας, είναι από τους πρωταρχικούς στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης και μεθοδεύεται, μέσω της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 31/2010, με το σχεδιασμό κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης.

Τέλος, στο **έβδομο** Κεφάλαιο δίνεται μια σύνοψη με τα συμπεράσματα της διατριβής και της συμβολής της.

2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ– ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Στο Κεφάλαιο αυτό αναφέρεται η βασική θεωρία σχετικά με τον προσδιορισμό της ηλιακής ενέργειας, καθώς και την ενεργειακή συμπεριφορά των κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών (Φ/Β). Τα κρυσταλλικά Φ/Β είναι η πιο διαδομένη τεχνολογία Φ/Β, κυρίως λόγω της οικονομικά βιώσιμης λειτουργίας τους μέχρι στιγμής. Ειδικότερα, γίνεται αναφορά στα εμπειρικά και θεωρητικά μοντέλα υπολογισμούς της διακύμανσης της ηλιακής ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας, καθώς είναι η βασική πηγή ενέργειας και παράμετρος για τον προσδιορισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μια Φ/Β εγκατάσταση. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις βασικές συναρτήσεις και μοντέλα υπολογισμού της ενεργειακή απόδοσης των Φ/Β, τα οποία έχουν προκύψει από θεωρητικές ή ημι-εμπειρικές προσεγγίσεις, κυρίως πειραματικών διεργασιών.

2.1. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ηλιακή ακτινοβολία (ΗΑ) αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας, καθώς εκτιμάται ότι, κάθε χρονική στιγμή διασχίζουν τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας περίπου 174×10^{15} W ηλιακής ισχύος (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία)[40]. Οι περισσότερες κατοικημένες περιοχές του πλανήτη δέχονται ημερησίως περίπου 3,5 έως 7 kWh/m² οριζόντιας επιφάνειας, ανάλογα με την εποχή και τις καιρικές συνθήκες [40,41].

Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα, τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Για τον λόγο αυτό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή, καθώς ο ήλιος κατά τη θερινή περίοδο βλέπει κάθετα τις περιοχές του αντίστοιχου ημισφαιρίου. Γενικότερα, όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μια επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η έντασή της.

Για την εφαρμογή οποιασδήποτε τεχνολογίας αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε μια περιοχή, είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια της ημέρας και κατά συνέπεια της ηλιακής ενέργειας, στην υπό μελέτη περιοχή της εφαρμογής. Προκειμένου όμως για τον υπολογισμό ή την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, πρωταρχικά, είναι απαραίτητος ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης του ήλιου σε σχέση με μια επιφάνεια πάνω στη Γη, μέσω της οποίας θα αξιοποιηθεί η ηλιακή ακτινοβολία (ηλιακός συλλέκτης, φωτοβολταϊκά κ.λ.π.). Η επιφάνεια αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας δέχεται συγκεκριμένη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²), ανάλογα με τη θέση του ήλιου, τον προσανατολισμό της επιφάνειας ως προς τον νότο της περιοχής, την κλίση της επιφάνειας και άλλες γεωμετρικές και τεχνικές παραμέτρους [42-45].

Η ηλιακή ακτινοβολία (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) κατανέμεται σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος (λ). Το φάσμα αυτό μοιάζει με το φάσμα μαύρου σώματος θερμοκρασίας 5777 K [41]. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γενικά διαχωρίζεται και χαρακτηρίζεται κυρίως από το μήκος κύματος (λ) και σπανιότερα από τη συχνότητα (ν) και τον αριθμό κύματος (n). Η συχνότητα (ν) ορίζεται ως:

$$\nu = \frac{c_0}{\lambda_{\text{κενό}}} = \frac{c}{\lambda_{\text{υλικού}}}$$

όπου c_0 , c είναι οι ταχύτητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό και σε κάποιο υλικό αντίστοιχα. Για το κενό $c_0=2,998 \times 10^8$ m/s.

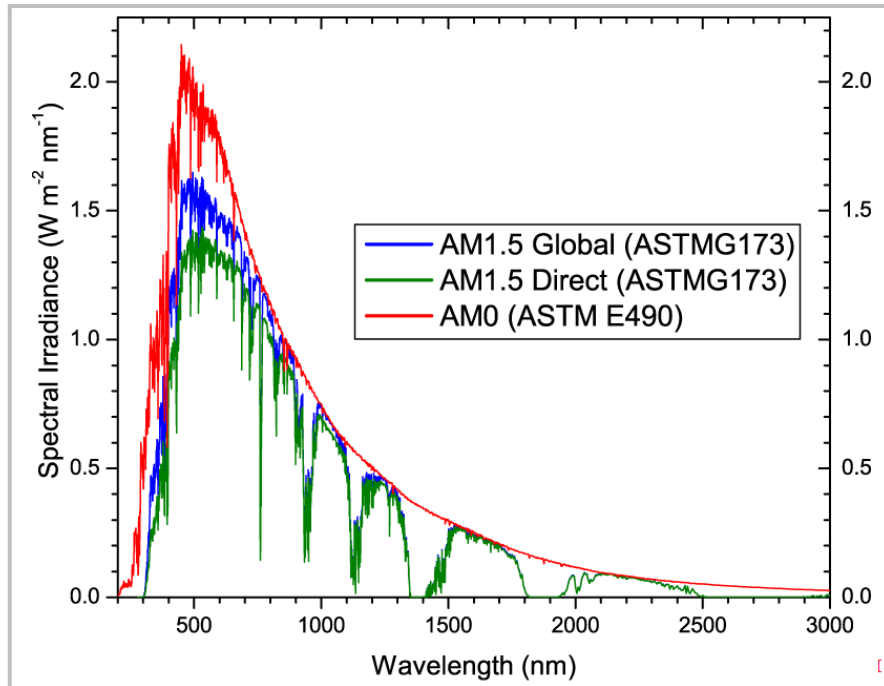
Η ταχύτητα μέσα σε ένα υλικό καθορίζεται από τον δείκτη διάθλασης (n) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος c_0/c (για τον αέρα μπορεί πρακτικά να θεωρηθεί ότι $n=1$).

Επίσης, ο κυματαριθμός (k) ορίζεται ως $k = 1/\lambda$, δηλαδή ο αριθμός κυμάτων ανά μονάδα μήκους της ακτινοβολίας. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται συνήθως για το μήκος κύματος (λ) είναι:

micrometer (μικρό) $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$

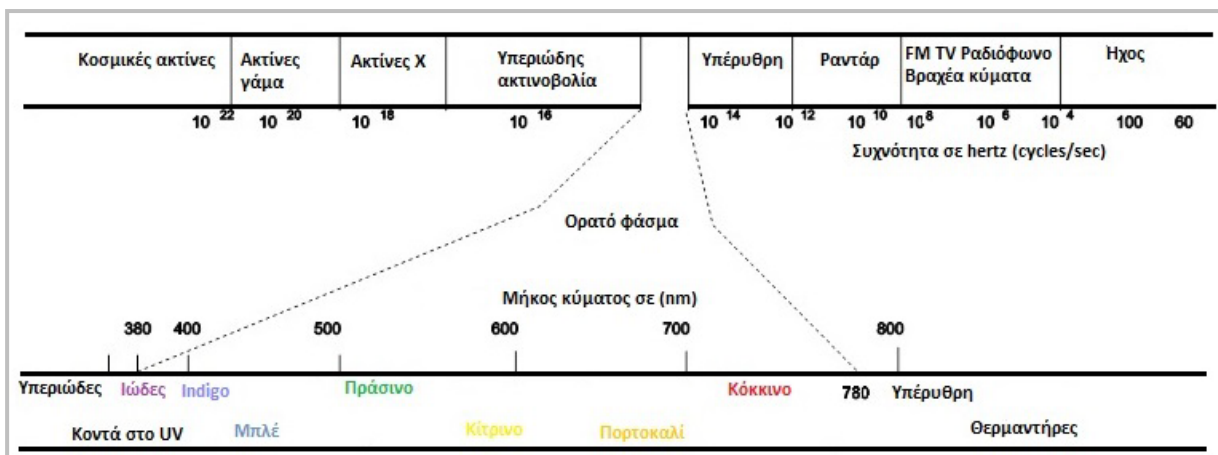
nanometer $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$

Angström $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m} = 10^{-4}\mu\text{m}$



Σχήμα 2.1.1: Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα (AM0 – ASTM E490) και στην επιφάνεια της Γης (AM1.5 - ASTMG173.)

Πηγή: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>

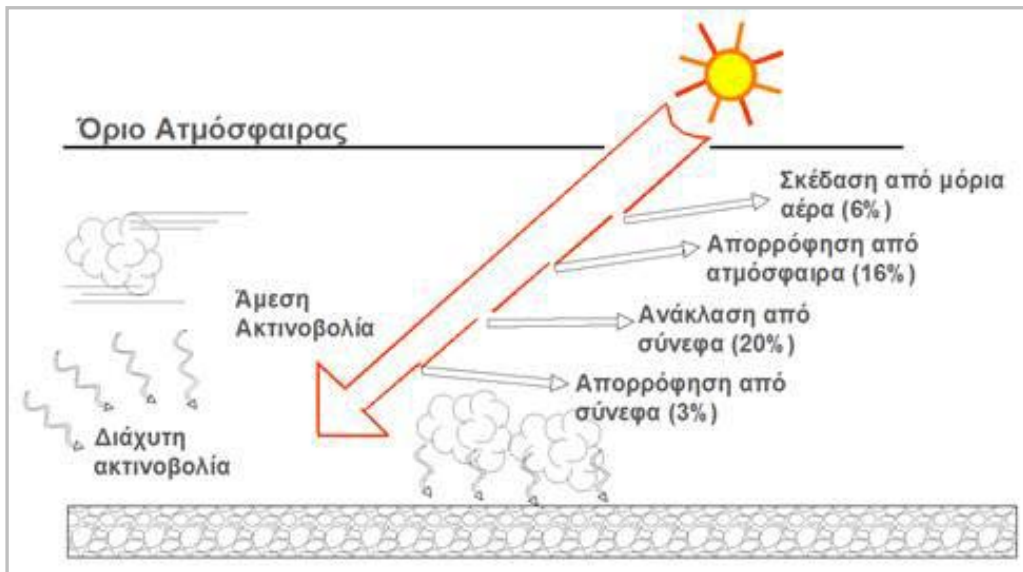


Σχήμα 2.1.2: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας ανά είδος ακτινοβολίας

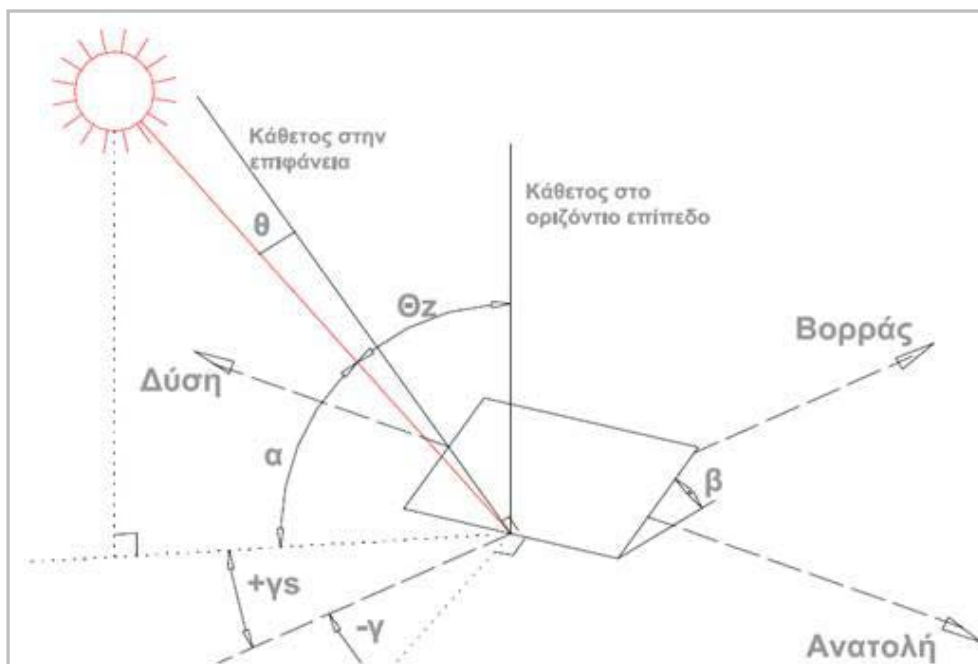
Η ηλιακή ακτινοβολία, που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας της Γης, αποτελείται κατά 6,4% από υπεριώδη ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda < 0,38\mu\text{m}$, κατά 48,0% από ηλιακή ακτινοβολία στο ορατό φάσμα με $\lambda = 0,38 \div 0,78\mu\text{m}$ και κατά 45,6% από υπέρυθη ακτινοβολία ($\lambda > 0,78$

μm) [41-42]. Εκτιμάται ότι το 99% της ηλιακής ακτινοβολίας (ενέργειας) περιλαμβάνεται σε μήκη κύματος από 0,25 μm έως 4 μm.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) που προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ακτινοβολίας (W/m^2), στη μέση απόσταση μεταξύ Γης και ήλιου (μια αστρονομική μονάδα = $1,495 \times 10^{11}$ km), η οποία βρίσκεται στο όριο της ατμόσφαιρας ονομάζεται ηλιακή σταθερά G_{sc} (Solar Constant) [41]. Μέχρι σήμερα, στα πλαίσια έρευνας, έχουν γίνει πολλές πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ηλιακής σταθεράς, ωστόσο, η επικρατέστερη τιμή της ηλιακής σταθεράς, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας, είναι $G_{sc}=1367$ W/m^2 [41]. Η τιμή αυτή παρουσιάζει μικρή διακύμανση στη διάρκεια του χρόνου, λόγω της έκκεντρης περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο.



Σχήμα 2.1.3: Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα



Σχήμα 2.1.4: Θέση ήλιου σε σχέση με μια κεκλιμένη επιφάνεια

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω σε μια κεκλιμένη ή οριζόντια επιφάνεια πάνω στη γη, αποτελείται από την άμεση και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία.

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει κατ' ευθείαν σε οποιαδήποτε επιφάνεια στη Γη χωρίς σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης / διασκορπισμός) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα (Σχήμα 2.1.3 [42-43]). Εξαρτάται από την απόσταση ήλιου-γης, την ηλιακή απόκλιση (δ), το ηλιακό ύψος (α), το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (φ) (Σχήμα 2.1.4 [41,43]), το υψόμετρο του τόπου (A), την κλίση του εδάφους (β), καθώς και την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που φτάνει έμμεσα στην επιφάνεια της γης, μετά από ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα (λόγω σωματιδίων, μορίων κ.λ.π.), αλλά και ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος (α), το υψόμετρο του τόπου (A), τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία των σωματιδίων και αερίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα[41].

Η ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) στο οριζόντιο επίπεδο μιας περιοχής μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς μεταβάλλονται δυναμικά οι περισσότεροι από τους ως άνω παράγοντες που επηρεάζουν την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Η ημερήσια διακύμανση είναι σχεδόν συμμετρική ως προς ηλιακό μεσημέρι. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια αίθρια ημέρα καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κατά το ηλιακό μεσημέρι.

2.1.1. Ηλιακή Ακτινοβολία σε Οριζόντιες Επιφάνειες

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο ή τυχαίο προσανατολισμό υπολογίζεται με τη χρήση θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί και βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο της υπό μελέτη περιοχής. Τα μοντέλα αυτά συνυπολογίζουν και γεωμετρικούς παράγοντες που σχετίζονται με την τροχιά του ήλιου, την περιοχή και την εποχή του χρόνου.

Για την Ελλάδα υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) για διάφορες Ελληνικές πόλεις. Υπάρχουν επίσης διαθέσιμες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν καταγραφεί από την NASA μέσω δορυφόρου, για διάφορες γεωγραφικές συντεταγμένες των ελληνικών περιοχών.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια (οριζόντια ή κεκλιμένη) διαφοροποιείται ανάλογα με την εποχή, την ηλιακή απόκλιση (δ), το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (φ), την αέρια μάζα (AM) της δεδομένης χρονικής στιγμής, την κλίση της επιφάνειας (β), τον προσανατολισμό (γ), το ηλιακό ύψος (α), το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s), τη γωνία πρόσπτωσης (θ), τη ζενιθιακή γωνία (θ_z) και γενικότερα την πιθανή νέφωση της περιοχής. Σημαντική επίσης παράμετρος είναι η καθαρότητα του ορίζοντα και τα τυχόν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια που υπάρχουν γύρω από την επιφάνεια πρόσπτωσης.

Ο προσδιορισμός της θέσης του ήλιου ως προς μία επιφάνεια (οριζόντια ή κεκλιμένη), είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης η θέση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο και ο προσανατολισμός της είναι εξίσου σημαντική παράμετρος. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται ανάλυση των γεωμετρικών και φυσικών παραγόντων που επιδρούν στη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια.

Ηλιακή Ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας

Η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου G_{on} (W/m^2) μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση μεταξύ Γης και ήλιου, λόγω της έκκεντρης περιστροφής της Γης γύρω από τον ήλιο, και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$G_{on} = G_{sc} \cdot E_o \quad (2.1.1)$$

όπου E_o είναι ο διορθωτικός συντελεστής για την εκκεντρότητα τη Γης και $G_{sc} = 1367W/m^2$, είναι η ηλιακή σταθερά.

Αντίστοιχα η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας G_o [W/m^2], για δεδομένη χρονική στιγμή (ω) και εποχή (δ), και η οποία υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$G_o = G_{sc} \cdot E_o \cdot \cos(\theta_z) = G_{sc} \cdot E_o \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \quad (2.1.2)$$

όπου η ηλιακή απόκλιση (δ) υπολογίζεται από την Εξίσωση Cooper: $\delta = 23,45 \cdot \sin\left[\frac{360(D + 284)}{365}\right]$

Η ωριαία γωνία του ήλιου υπολογίζεται από την Εξίσωση : $\omega = 15^\circ \cdot (HX - 12 : 00)$, όπου (HX) είναι η ηλιακός χρόνος και υπολογίζεται βάσει του τοπικού χρόνου (TX) μιας περιοχής, του σταθερού μεσημβρινού ($L_{στ}$, γεωγραφικό μήκος σταθερού μεσημβρινού), του τοπικού μεσημβρινού (L_T γεωγραφικό μήκος τοπικού μεσημβρινού) και της εξίσωσης του χρόνου (E_t) από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$HX = TX \pm 4 \cdot (L_{στ} - L_T) + E_t.$$

όπου, το (+) είναι για το δυτικό ημισφαίριο και (-) το ανατολικό ημισφαίριο, $L_{στ}$ είναι ο σταθερός μεσημβρινός για τη ζώνη χρόνου της περιοχής, L_T είναι ο τοπικός μεσημβρινός και E_t είναι η εξίσωση του χρόνου, σε λεπτά, που υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση του Watt:

$$E_t = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \text{ και } B = 360(D - 81)/364,$$

όπου (D) ο αριθμός της ημέρας.

Και τέλος η ζενιθιακή γωνία (θ_z) υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση για γεωγραφικό πλάτος (φ):

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

Η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας H_o , υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της Εξίσωσης 2.1.2. για χρονική περίοδο από την ανατολή έως τη δύση του ήλιου. Με την ηλιακή σταθερά G_{sc} σε (W/m^2) η ακόλουθη Εξίσωση υπολογίζει την H_o σε (J/m^2).

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot D}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \right] \quad (2.1.3)$$

όπου ω_s είναι η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου για την υπό εξέταση περιοχή και υπολογίζεται από την Εξίσωση : $\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))$

Η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας I_o , υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της Εξίσωσης 2.1.2, για μια χρονική περίοδο μιας ώρας ω_1 έως ω_2 , με $\omega_2 > \omega_1$. Με την ηλιακή σταθερά G_{sc} σε (W/m^2) η ακόλουθη Εξίσωση υπολογίζει την I_o σε (J/m^2).

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} [1 + 0,033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot D}{365})] \cdot [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi)] \quad (2.1.4)$$

Το χρονικό διάστημα ω_1 έως ω_2 , μπορεί να είναι μια περίοδος μεγαλύτερη της μίας ώρας και κατά συνέπεια και η υπολογιζόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Ηλιακή Ακτινοβολία στην Επιφάνεια της Γης

Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας σε μια υπό εξέταση περιοχή είναι σημαντική πληροφορία για τη διαστασιολόγηση ενός ηλιακού συστήματος. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για την ηλιακή ακτινοβολία, τότε η εκτίμηση της διαθέσιμη ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να γίνει με τη χρήση διαφόρων εμπειρικών ή ατμοσφαιρικών υπολογιστικών μοντέλων.

Κατά σύμβαση στη βιβλιογραφία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) συμβολίζεται με το γράμμα G , η ωριαία ηλιακή ενέργεια ($kWh/m^2/hr$) συμβολίζεται με I , ενώ η ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ενέργεια συμβολίζεται με H και με μονάδες ($kWh/m^2/day$) και ($kWh/m^2/mo$) αντίστοιχα. Οι μέσες τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας συμβολίζονται συνήθως με \bar{H} . Περαιτέρω συμβολισμοί της ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται με δείκτες, όπου ο δείκτης (b) αφορά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία/ενέργεια, ο δείκτης (d) την διάχυτη και ο δείκτης (o) την ολική αντίστοιχα. Επιπλέον ο δείκτης (β) αφορά την ηλιακή ακτινοβολία / ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια και ο δείκτης (γ) σε επιφάνεια με τυχαίο προσανατολισμό.

Η ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (W/m^2) υπολογίζεται με αρκετή ακρίβεια από τις σχέσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο η ολική ηλιακή ακτινοβολία (I) που φτάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια στην γη, αντιπροσωπεύει μόνο ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας σε μια οριζόντια επιφάνεια, ανάλογα με την εποχή και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν (νέφωση, υγρασία κ.λ.π.). Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια στην επιφάνεια της Γης σε σχέση με αυτή σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας, ονομάζεται συντελεστής αιθριότητας (k_t) και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (2.1.5)$$

Ο μέσος ημερήσιος συντελεστής αιθριότητας (K_t) υπολογίζεται από το λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια στη Γη (H) προς την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (H_o) και υπολογίζεται από την Εξίσωση :

$$K_t = \frac{H}{H_o} \quad (2.1.6)$$

Επιπλέον ο μέσος συντελεστής αιθριότητας υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση με τους αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης και στο όριο της ατμόσφαιρας.

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (2.1.7)$$

Αντίστοιχα, το ποσοστό διάχυτης (K_d), ορίζεται σαν το πηλίκο της ωριαίας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία και υπολογίζεται από τη ακόλουθη Εξίσωση :

$$K_d = \frac{I_d}{I} \quad (2.1.8)$$

Το μοντέλο των «Erbs, Klein and Duffie» (1982) υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια το λόγο της διάχυτης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την συνολική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (Εξίσωση 2.1.9). Για την ανάπτυξη του εμπειρικού αυτού μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις από πολλές περιοχές και βασίζεται στον συντελεστή αιθριότητας. Ένας μέσος ωριαίος συντελεστής αιθριότητας 0,5 μπορεί να αντιπροσωπεύει τα επίπεδα ηλιακής ενέργειας στην περίοδο μιας ώρα με το ουρανό να καλύπτεται από λεπτά άσπρα σύννεφα. Η ίδια τιμή του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας, μπορεί να αντιπροσωπεύει το μέσο όρο στην περίοδο μιας ώρας, όπου για κάποια χρονική περίοδο καταγράφηκε αίθριος ουρανός και για την υπόλοιπη έντονη νεφοκάλυψη με βαριά σύννεφα[41].

Erbs, Klein and Duffie

$$k_d = \frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09 \cdot k_t & k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,160 \cdot k_t + 4,388 \cdot k_t^2 - 16,638 \cdot k_t^3 + 12,336 \cdot k_t^4 & \text{για } 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & k_t > 0,80 \end{cases} \quad (2.1.9)$$

Orgill and Hollands

$$k_d = \frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,249 \cdot k_t & k_t < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 \cdot k_t & 0,35 < k_t < 0,75 \\ 0,177 & k_t > 0,75 \end{cases}$$

Ένα αντίστοιχο πιο απλοποιημένο μοντέλο αναπτύχθηκε από τους «Orgill and Hollands» (1977) που υπολογίζει το λόγο διάχυτης προς ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, συναρτήσει του k_t , και το οποίο βασίστηκε σε μετρήσεις ενός Καναδικού σταθμού (Εξίσωση 2.1.9). Το μοντέλο αυτό δίνει ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή k_d , σε σχέση με το μοντέλο «Erbs, Klein and Duffie»[41]. Η θεώρηση χαμηλής τιμής του συντελεστή k_d σε περίπτωση που το k_t λαμβάνει υψηλές τιμές, αρκετές φορές στην πράξη δεν ισχύει, καθώς σε έναν νεφοσκεπή ουρανό με τον ουράνιο δίσκο να είναι ορατός κάποιες στιγμές στο σημείο μέτρησης, δίνει υψηλό k_t και k_d αντίστοιχα.

Αντίστοιχα το εμπειρικό μοντέλο «Stauter-Klein» (1979), υπολογίζει το ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας προς τη συνολική σε οριζόντιο επίπεδο, βάσει του λόγου της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (I) προς την ολική σε συνθήκες καθαρού ουρανού (I_c) σε μια οριζόντια επιφάνεια. Το μοντέλο αναπτύχθηκε από μετρήσεις που έγιναν σε πέντε (5) αμερικάνικες περιοχές.

$$k_d = \frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,1 \cdot (I/I_c) & 0 < (I/I_c) < 0,48 \\ 1,1 - 0,0396 \cdot (I/I_c) - 0,789(I/I_c)^2 & 0,48 < (I/I_c) < 1,1 \\ 0,2 & 1,1 < (I/I_c) \end{cases} \quad (2.1.10)$$

Η μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (H_d) στο οριζόντιο επίπεδο, μπορεί να εκτιμηθεί από την Εξίσωση των Collares-Pereira & Rabl [46], η οποία αναφέρεται στον λόγο της διάχυτης προς την ολική μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,004555 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos[115 \cdot K_t - 103] \quad (2.1.11)$$

όπου, (ω_s) είναι η ωριαία γωνία δύσης για μια αντιπροσωπευτική μέρα του μήνα (D), για τον εκάστοτε μήνα του έτους σε μια περιοχή και (K_t) είναι ο μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας

κατά περίπτωση. Η ίδια Εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το υπολογισμό της μέσης ημερήσιας μηνιαίας διάχυτης ακτινοβολίας, όταν είναι γνωστή η αντίστοιχη ολική.

Συνθήκες Καθαρού Ουρανού – Το Μοντέλο του Hottel

Σε περίπτωση συνθηκών καθαρού ουρανού, το μοντέλο του «Hottel» [50], υπολογίζει με αρκετή ακρίβεια την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια στη Γη υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$G_{cb} = G_{on} \cdot \tau_b \cdot \cos(\theta_z) \quad (2.1.12)$$

όπου, G_{on} είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας η οποία προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου (W/m^2), και τ_b , είναι ο συντελεστής μεταφοράς άμεσης ακτινοβολίας, και εκφράζει το ποσοστό της έντασης της άμεσης ηλιακής που φτάνει σε μια οριζόντια επιφάνεια στην επιφάνεια της Γης με αυτή που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας. Ο συντελεστής μεταφοράς της άμεσης ακτινοβολίας υπολογίζεται από την Εξίσωση :

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \exp[-k / \cos(\theta_z)] \quad (2.1.13)$$

όπου, $\alpha_0 = r_0 \cdot \alpha_2$, $\alpha_1 = r_1 \cdot \alpha_3$, $k = r_k \cdot k_1$,

$$\alpha_2 = 0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2,$$

$$\alpha_3 = 0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2,$$

$$k_1 = 0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2,$$

A είναι το υψόμετρο της περιοχής σε (km).

Οι διορθωτικοί συντελεστές, επιλέγονται ανάλογα με την περιοχή, την εποχή και το γεωγραφικό πλάτος, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

Για τροπικά κλίματα:	$r_0=0,95$	$r_1=0,98$ $r_k=1,02$
Για μέσα πλάτη – θερινή περίοδος:	$r_0=0,97$	$r_1=0,99$ $r_k=1,02$
Για βόρεια πλάτη – θερινή περίοδος:	$r_0=0,99$	$r_1=0,99$ $r_k=1,01$
Για μέσα πλάτη – χειμερινή περίοδος:	$r_0=1,03$	$r_1=1,01$ $r_k=1,00$

Αντίστοιχα η ένταση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας G_{cd} (W/m^2) μπορεί να υπολογιστεί από ακόλουθη Εξίσωση, η οποία εκφράζει το λόγο της έντασης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια στην επιφάνεια της Γης (G_{cd}) (W/m^2) προς την ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (G_o) (W/m^2).

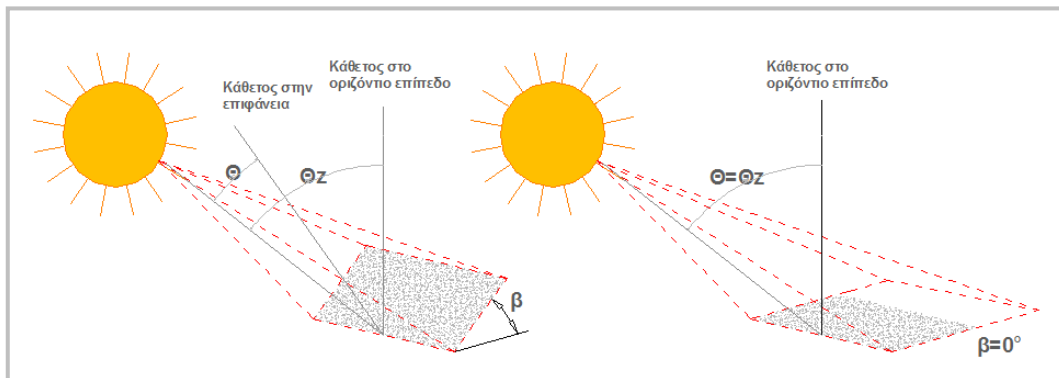
$$\tau_d = G_{cd} / G_o = (0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_b) \quad (2.1.14)$$

Οι πιο πάνω σχέσεις αφορούν στην ένταση ηλιακής ακτινοβολία, δηλαδή στιγμιαίες τιμές (W/m^2). Παρόμοιοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν για περιόδους μιας ώρας ή και για όλη τη διάρκεια της ημέρας προκειμένου να υπολογιστεί η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m^2) σε συνθήκες καθαρού ουρανού H_c .

2.1.2. Ηλιακή Ακτινοβολία σε Κεκλιμένες Επιφάνειες

Η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) που προσπίπτει πάνω σε μια επιφάνεια, παίρνει τη μέγιστη τιμή της για γωνία πρόσπτωσης $\theta=0^\circ$, δηλαδή όταν η επιφάνεια, στην οποία προσπίπτουν οι ακτίνες του ήλιου, βρίσκεται κάθετα στις ακτίνες [41,42].

Στο Σχήμα 2.1.5 απεικονίζεται η ένταση της ακτινοβολίας (W/m^2), δηλαδή η πυκνότητα της για μια δεδομένη χρονική στιγμή σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta \neq 0^\circ$) που έχει γωνία πρόσπτωσης ($\theta < \theta_z$) μικρότερη από τη ζενιθιακή και μια οριζόντια με ($\theta = \theta_z$). Η ίδια δέσμη (ποσότητα) ηλιακού φωτός καλύπτει μεγαλύτερης έκτασης επιφάνεια στην περίπτωση μηδενικής κλίσης, σε σύγκριση με μια κεκλιμένη επιφάνεια πιο κάθετη στις ακτίνες του ήλιου.



Σχήμα 2.1.5: Ένταση (πυκνότητα) ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) για κεκλιμένη και οριζόντια επιφάνεια.

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες μπορεί να εκτιμηθεί από τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη, ολικής), στο οριζόντιο επίπεδο, με τη χρήση των κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων.

Η τιμή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m^2) σε ένα κεκλιμένο επίπεδο ($I_{b,\beta}$) με νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0^\circ$) μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (I_b), μέσω του γεωμετρικού παράγοντα (r_b), ο οποίος εκφράζει το λόγο της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο, ή αλλιώς το λόγο της γωνίας πρόσπτωσης (θ) προς την ζενιθιακή (θ_z). Υπενθυμίζεται ότι, η ζενιθιακή γωνία θ_z είναι η γωνία πρόσπτωσης για οριζόντιες επιφάνειες. Ο γεωμετρικός παράγοντας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (r_b) σε κεκλιμένη επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό δίνεται από την Εξίσωση :

$$r_b = \frac{I_{b,\beta}}{I_b} = \frac{I_{bn} \cdot \cos(\theta)}{I_{bn} \cdot \cos(\theta_z)} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} = \frac{[\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)]}{[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)]} \quad (2.1.15)$$

Στην περίπτωση κεκλιμένης επιφάνειας ($\beta \neq 0^\circ$) με τυχαίο προσανατολισμό ($\gamma \neq 0^\circ$), το $\cos(\theta)$ διαφοροποιείται και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

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

Αντίστοιχα, η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία ($I_{d,\beta}$), που προσπίπτει πάνω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, μπορεί να εκτιμηθεί με αρκετή ακρίβεια, γνωρίζοντας τη διάχυτη (I_d) και ολική (I_o) ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο της περιοχής. Η πιο απλοποιημένη προσέγγιση είναι να θεωρηθεί ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισοτροπική, δηλαδή διαχέεται ομοιόμορφα μέσα στον ουράνιο θόλο και ανακλάται ομοιόμορφα μετά την πρόσπτωσή της πάνω στην επιφάνεια της γης.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διάχυτη ακτινοβολία, που προσπίπτει πάνω σε ένα κεκλιμένο

επίπεδο, προέρχεται από τα ποσά της ηλιακής ακτινοβολίας που διαχέονται στην ατμόσφαιρα (διάχυτη ακτινοβολία από τον ουράνιο θόλο), και τα ποσοστά της άμεσης ακτινοβολίας που ανακλώνται όταν προσπέσουν στην επιφάνεια της Γης και διαχέονται στον ουράνιο θόλο για να φτάσουν ξανά στην γη ως διάχυτη ακτινοβολία. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) σε ένα κεκλιμένο επίπεδο ($I_{d\beta}$) είναι το άθροισμα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από ανάκλαση ($I_{r\beta}$) και από σκέδαση ($I_{s\beta}$) στον ουράνιο θόλο.

$$I_{d\beta} = I_{s\beta} + I_{r\beta} \quad (2.1.16)$$

Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το έδαφος ($I_{r\beta}$) υπολογίζεται με σχετικά καλή ακρίβεια, θεωρώντας ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισοτροπική, δηλαδή το έδαφος είναι μια επιφάνεια που διαχέει πλήρως και ομοιόμορφα την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (π.χ. επίπεδη επιφάνεια). Στην περίπτωση αυτή η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία ($I_{r\beta}$) υπολογίζεται από την Εξίσωση :

$$I_{r\beta} = 0,5 \cdot I \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta) \quad (2.1.17)$$

όπου (ρ) είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία (λευκαύγεια ή albedo) και λαμβάνει τιμές, $\rho=0,15 \div 0,2$ για το έδαφος και $\rho=0,7$ για το χιόνι.

Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από σκέδαση στον ουράνιο θόλο (I_s), μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται ομοιόμορφα από όλο τον ουρανό (ισοτροπικά) και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$I_{s\beta} = 0,5 \cdot I_d \cdot (1 + \cos \beta) \quad (2.1.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες εξισώσεις, η ένταση της ολικής (I_β) ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta \neq 0^\circ$), η οποία είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$I_\beta = I_{b,\beta} + I_{s,\beta} + I_{r,\beta} = I_b \cdot r_b + I_d \cdot 0,5 \cdot (1 + \cos \beta) + 0,5 \cdot I \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta) \quad (2.1.19)$$

Μέση Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια σε Κεκλιμένο Επίπεδο

Η μέση ολική μηνιαία (H_T) ηλιακή ενέργεια ($kWh/m^2/mo$) που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο με νότιο προσανατολισμό, υπολογίζεται βάσει του ισοτροπικού μοντέλου των Liu, Jordan [41, 47] & Klein [41,48], από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$\bar{H}_T = (\bar{H} - \bar{H}_d) \cdot \bar{R}_b + 0,5 \cdot \bar{H}_d \cdot (1 + \cos \beta) + 0,5 \cdot \rho \cdot \bar{H} \cdot (1 - \cos \beta) \quad (2.1.20)$$

όπου, ρ , είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους η οποία θεωρείται ίση με 0.15,

β , είναι η κλίση της επιφάνειας,

H , είναι η μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο,

H_d , είναι η μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο,

και R_b , είναι μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας για νότιο προσανατολισμό. Ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας R_b είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ενέργειας (ακτινοβολίας) στο κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ηλιακή ενέργεια (ακτινοβολία) στο οριζόντιο επίπεδο και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$\bar{R}_b = \frac{\left[\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta) \right]}{\left[\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s) + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \right]} \quad (2.1.21)$$

όπου, ω_s είναι η ωριαία γωνία δύσης για μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta \neq 0^\circ$) με νότιο προσανατολισμό ($\gamma = 0^\circ$) για μια μέση αντιπροσωπευτική ημέρα (δ) του μήνα και δεδομένη περιοχή (φ).

Με την Εξίσωση 2.1.20 υπολογίζεται η μέση μηνιαία ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένο επίπεδο ($\beta \neq 0^\circ$), και με νότιο προσανατολισμό ($\gamma = 0^\circ$). Οι τιμές της μέσης ηλιακής ενέργειας, αφορούν επιφάνειες που βλέπουν σε καθαρό ορίζοντα, χωρίς δηλαδή φυσικά ή τεχνητά εμπόδια στον περιβάλλοντα χώρο (ορεινοί όγκοι, κτίρια κ.λ.π.). Σε περίπτωση που υπάρχουν περιμετρικά φυσικά ή τεχνητά εμπόδια η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια (ακτινοβολία) μειώνεται, ανάλογα τον όγκο και τη θέση των εμποδίων, και κατά τον υπολογισμό απαιτείται περαιτέρω ανάλυση.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η μέση μηνιαία ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένο επίπεδο ($\text{kWh/m}^2/\text{μο}$), για διάφορες κλίσεις ($\beta \neq 0^\circ$) και τυχαίο προσανατολισμό ($\gamma \neq 0^\circ$), χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο μέσο μηνιαίο γεωμετρικό παράγοντα R_b για επιφάνειες με τυχαίο προσανατολισμό.

$$\bar{R}_b = \frac{\sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) \cdot (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cdot (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cdot (\sin(\omega_{ss}) - \sin(\omega_{sr})) + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cdot (\sin(\omega_{ss}) - \sin(\omega_{sr})) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \cdot (\sin(\omega_{ss}) - \sin(\omega_{sr}))}{2 \cdot \left[\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_{ss}) + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot \sin(\varphi) \sin(\delta) \sin(\omega_{sr}) \right]} \quad (2.1.22)$$

όπου, (ω_{ss}) και (ω_{sr}) είναι οι ωριαίες γωνίες ανατολής και δύσης για μια κεκλιμένη επιφάνεια με τυχαίο προσανατολισμό ($\gamma \neq 0$), για τη μέση αντιπροσωπευτική ημέρα (D) του μήνα και δεδομένη περιοχή και υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις, οι οποίες ισχύουν για αζιμούθιο επιφάνειας $-90^\circ < \gamma < 90^\circ$ [41]. Επισημαίνεται ότι:

α) για επιφάνειες με δυτικό προσανατολισμό: αζιμούθιο (γ) από 0 μέχρι και 90° . Για $\gamma \geq 90^\circ$ οι σχέσεις δεν δίνουν σωστά αποτελέσματα.

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)), \cos^{-1} \left(\frac{A \cdot B + \sqrt{(A^2 - B^2 + 1)}}{A^2 + 1} \right) \right\}$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)), \cos^{-1} \left(\frac{A \cdot B - \sqrt{(A^2 - B^2 + 1)}}{A^2 + 1} \right) \right\}$$

β) για επιφάνειες με ανατολικό προσανατολισμό: αζιμούθιο (γ) από 0 μέχρι και -90° . Για $\gamma \leq -90^\circ$ οι σχέσεις δεν δίνουν σωστά αποτελέσματα.

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)), \cos^{-1} \left(\frac{A \cdot B - \sqrt{(A^2 - B^2 + 1)}}{A^2 + 1} \right) \right\}$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)), \cos^{-1} \left(\frac{A \cdot B + \sqrt{(A^2 - B^2 + 1)}}{A^2 + 1} \right) \right\}$$

$$\text{όπου } A = \frac{\cos(\varphi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} + \frac{\sin(\varphi)}{\tan(\gamma)} \text{ και } B = \tan(\delta) \cdot \left[\frac{\cos(\varphi)}{\tan(\gamma)} - \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\gamma) \cdot \tan(\beta)} \right]$$

Ωριαία Ηλιακή Ενέργεια σε Κεκλιμένο Επίπεδο

Η γνώση της διακύμανση της ωριαίας ηλιακής ενέργειας σε μια περιοχή είναι ένα χρήσιμο μέγεθος για τον ακριβή σχεδιασμό και την εκτίμηση της ενέργειας που θα αποδώσει μια ηλιακή εφαρμογή (π.χ. Φ/Β). Η διακύμανση της μέσης τιμής της ηλιακής ενέργειας, στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας (D) του μήνα, μπορεί να υπολογιστεί από τα αντίστοιχα εμπειρικά μοντέλα υπολογισμών των Collares-Pereira & Rabl [46], αλλά και το ισοτροπικό μοντέλο. Τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν τις ωριαίες τιμές της ολικής, άμεσης και διάχυτης ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο. Η ολική ωριαία ηλιακή ενέργεια I (kWh/m²/hr) στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση, όταν είναι γνωστή η αντίστοιχη μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο H (kWh/m²/day)[46].

$$\frac{\bar{I}}{H} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{(a + b \cdot \cos(\omega)) \cdot (\cos(\omega) - \cos(\omega_{ss}))}{(\sin(\omega_{ss}) - \frac{2\pi \cdot \omega_{ss}}{360} \cdot \cos(\omega_{ss}))} \quad (2.1.23)$$

όπου, ω είναι η μέση ωριαία γωνία του ήλιου για δεδομένη ώρα της ημέρας, ενώ και a και b γεωμετρικοί παράμετροι που υπολογίζονται βάσει της ωριαίας γωνίας δύσης της υπό μελέτη περιοχής.

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60)$$

Αντίστοιχα, η μέση διάχυτη ωριαία ηλιακή ενέργεια I_d (kWh/m²/hr) που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση Liu & Jordan [49], όταν είναι γνωστή η αντίστοιχη μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο H_d (kWh/m²/day).

$$\frac{\bar{I}_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{(\cos(\omega) - \cos(\omega_{ss}))}{(\sin(\omega_{ss}) - \frac{2\pi \cdot \omega_{ss}}{360} \cdot \cos(\omega_{ss}))} \quad (2.1.24)$$

Η μέση ωριαία ηλιακή ενέργεια I_β , που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση (β) και τυχαίο προσανατολισμό (γ), υπολογίζεται, κατά την Εξίσωση 2.1.19 (ισοτροπικό μοντέλο), ως ακολούθως[47]:

$$\bar{I}_\beta = I \cdot \left[\left(1 - \frac{I_d}{I}\right) \cdot R_b + 0,5 \cdot \frac{I_d}{I} \cdot (1 + \cos(\beta)) + 0,5 \cdot \rho \cdot (1 - \cos(\beta)) \right] \quad (2.1.25)$$

όπου, R_b είναι ο γεωμετρικός παράγοντας που εκφράζει τον λόγο της άμεσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς αυτή στο οριζόντιο επίπεδο και υπολογίζεται από την Εξίσωση :

$$R_b = \frac{\sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (2.1.26)$$

Τα ανισοτροπικά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια κεκλιμένη επιφάνεια δίνουν, στην πλειοψηφία τους, μεγαλύτερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (7% έως και 17%)[41] σε σχέση με το ισοτροπικό μοντέλο. Οι τιμές που προκύπτουν από τα ανισοτροπικά μοντέλα συνήθως αποκλίνουν αρκετά και από τις πειραματικά μετρούμενες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένα επίπεδο.

2.1.3. Αέρια Μάζα

Η αέρια μάζα, την οποία πρέπει να διατρέξει η ηλιακή ακτινοβολία κατά την πορεία της μέσα από την ατμόσφαιρα, είναι μια σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Η αέρια μάζα (m ή AM) είναι το πηλίκο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας διαμέσου του οποίου περνά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία ως προς το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ ($\theta_z=0^\circ$) [41-42,51].

Εάν υποθέσουμε ότι η Γη είναι ένα επίπεδο, με μια ομοιογενή και με χωρίς διάθλαση ατμόσφαιρα, τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε την αέρια μάζα σε σχέση με τη ζενιθιακή γωνία (θ_z) ή το ύψος του ήλιου (α) από την ακόλουθη Εξίσωση 2.1.27. Το σφάλμα της εξίσωσης είναι πολύ χαμηλό 0,25 % για $\theta_z < 60^\circ$ και μέχρι και 10 % για $\theta_z = 85^\circ$ [41-42]. Για μεγαλύτερες τιμές της ζενιθιακής γωνίας $\theta_z > 85^\circ$, δηλαδή χαμηλό ηλιακό ύψος (α), όπου η καμπυλότητα της ατμόσφαιρας γίνεται μεγάλη, ο υπολογισμός της αέριας μάζας (m) είναι πιο πολύπλοκος.

$$AM = m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} = \frac{1}{\sin(\alpha)} \quad (2.1.27)$$

Η αέρια μάζα έχει εκτιμηθεί με ακρίβεια από πολλές επιστημονικές εργασίες. Στον Πίνακα 2.1.1 [51-53] δίνονται τιμές της αέριας μάζας (AM), στην περίπτωση που η Γη ήταν επίπεδη (Εξίσωση 2.1.27), στην περίπτωση που η Γη ήταν ομοιόμορφα σφαιρική (Εξίσωση 2.1.28) και σύμφωνα με την εμπειρική Εξίσωση (2.1.29) των Kasten & Young (1989) που δίνει καλά αποτελέσματα και για μεγάλες τιμές της ζενιθιακής γωνίας ($\theta_z > 60^\circ$), αλλά και για διαφορετικά υψόμετρα.

Πίνακας 2.1.1: Μέση τιμές αέριας μάζας (AM) στην επιφάνεια της Γης

θ_z	Για επίπεδη επιφάνεια της γης	Εξίσωση Kasten & Young	Για σφαιρική επιφάνεια της γης
0°	1.0	1.0	1.0
60°	2.0	2.0	2.0
70°	2.9	2.9	2.9
75°	3.9	3.8	3.8
80°	5.8	5.6	5.6
85°	11.5	10.3	10.6
88°	28.7	19.4	20.3
90°		37.9	37.6

$$AM = \sqrt{(r \cdot \cos(\theta_z))^2 + 2r + 1} - r \cdot \cos(\theta_z) \quad (2.1.28)$$

όπου $r = R_e/y_{atm}$, $R_e = 6371$ (km) είναι η ακτίνα της Γης και $y_{atm} = 9$ (km) είναι το ενεργό πάχος της ατμόσφαιρας.

$$AM = \frac{\exp(-0,0001184 \cdot A)}{\cos(\theta_z) + 0,5057 \cdot (96,080 - \theta_z)^{-1,634}} \quad (2.1.29)$$

όπου A είναι το υψόμετρο της περιοχής σε μέτρα (m).

2.1.4. Ατμοσφαιρικά Μοντέλα Υπολογισμού Ηλιακής Ακτινοβολίας

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα υπολογίζουν την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα διάφορες κλιματολογικές παραμέτρους όπως υγρασία, θερμοκρασία, πίεση, θόλωση, νέφωση, ποσότητες ατμοσφαιρικού όζοντος και CO₂ στην ατμόσφαιρα κ.λ.π. Χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τα μοντέλα για συνθήκες καθαρού ουρανού και αυτά για νεφελώδη ουρανό [41-42].

Συνθήκες καθαρού ουρανού: Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, στην περίπτωση καθαρού ουρανού που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο, αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την διάχυτη ακτινοβολία, με εξαίρεση τις ώρες μικρού ηλιακού ύψους, δηλαδή τις πρωινές και απογευματινές ώρες.

Συνθήκες νέφωσης (νεφελώδης ουρανό): Τα ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας, άμεσης και διάχυτης, είναι διαφορετικά στην περίπτωση νεφελώδη ουρανού. Η άμεση ακτινοβολία μειώνεται από την παρουσία των νεφών, τα οποία συναντά κατά την πορεία της μέσα από την ατμόσφαιρα, καθώς βέβαια και από άλλους παράγοντες, οι οποίοι αναλύθηκαν και εξετάστηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Η μείωση της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από το είδος των νεφών, τη πυκνότητά τους, το σχήμα τους κ.λ.π.

Η διάχυτη ακτινοβολία, που προσπίπτει σε μια επιφάνεια στη γη, αποτελείται από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει μέσω σκέδασης από τον ουράνιο θόλο και από την ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία. Ένα μέρος της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, που φτάνει από τον ουράνιο θόλο, προκαλείται από τη διάχυση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από τα μόρια του αέρα και τα αεροζόλ. Δηλαδή, τα νέφη αρχικά περιορίζουν την άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, ενώ ταυτόχρονα είναι η αιτία αύξησης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη, μέρος της διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης και αντανακλάται από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα, επανανακλάται από τα σύννεφα πίσω στην επιφάνεια της Γης και έχουμε τη λεγόμενη πολλαπλή αντανακλώμενη ακτινοβολία.

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης διαφοροποιείται ανά εποχή, και εξαρτάται τόσο από το βαθμό νέφωσης του ουράνιου θόλου, όσο και από τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα.

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα, με τη βοήθεια των σύγχρονων υπολογιστικών μεθοδολογιών (μέσω ηλεκτρονικών λογισμικών), καθώς και τη δυνατότητα λήψης ατμοσφαιρικών δεδομένων (μέσω δορυφόρου) ως δεδομένα αναφοράς (input data), θεωρούνται σήμερα ιδιαίτερα αξιόπιστα για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μια περιοχή.

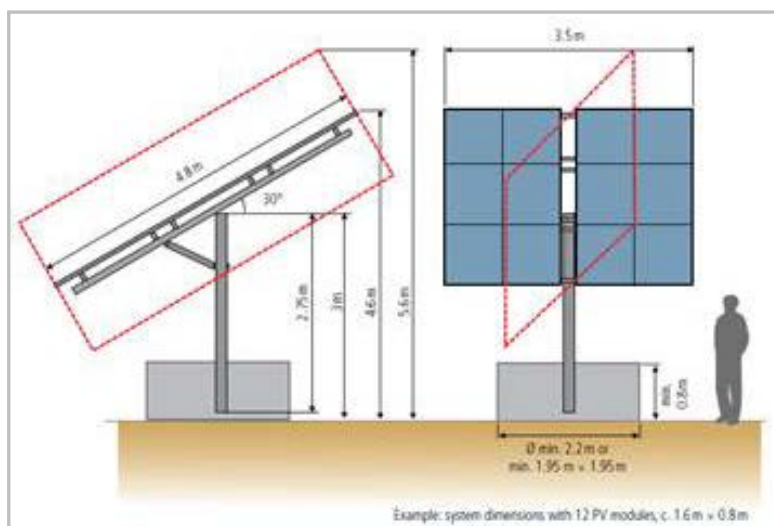
2.1.5. Βέλτιστη Κλίση Επιφάνειας για Ηλιακές Εφαρμογές

Με τη δυνατότητα εκτίμησης της μέσης ωριαίας ηλιακής ενέργειας I_{β} (kWh/m²/hr) σε κεκλιμένη επιφάνεια, εύκολα υπολογίζεται η συνολική διακύμανση της ηλιακής ενέργειας (kWh/m²/day) στη διάρκεια της τυπικής ημέρας (D) κάθε μήνα. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της έντασης της ηλιακής ενέργειας στη διάρκεια της ημέρας εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες και κυρίως τη νέφωση.

Τα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως είναι οι ηλιακοί συλλέκτες και τα Φ/Β, έχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης της μέγιστης διαθέσιμη προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ή τμήμα αυτής, ανάλογα τη θέση τοποθέτησης τους. Δηλαδή μπορούν να τοποθετηθούν πάνω σε μια βάση σταθερής κλίσης (β) ή μεταβαλλόμενης κλίσης, ή

περιστρεφόμενης βάσης όπου μεταβάλλεται και ο προσανατολισμός του συστήματος. Αναλόγως με την τεχνολογία του συστήματος, το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που αξιοποιείται, είναι διαφορετικό.

Ειδικότερα, τα συστήματα περιστρεφόμενων βάσεων που υπάρχουν διαθέσιμα είναι ενός ή δύο αξόνων. Οι βάσεις με έναν άξονα περιστροφής διατηρούν την συλλεκτική επιφάνεια ενός ηλιακού συστήματος σε σταθερή κλίση αλλά με προσανατολισμό ίσο με το ηλιακό αζιμούθιο ($\gamma = \gamma_s$), δηλαδή ακολουθεί την κίνηση του ηλίου. Οι βάσεις με δύο άξονες περιστροφής μετακινούν την συλλεκτική επιφάνεια του συστήματος σε κλίση (β) ίση με ζενιθιακή γωνία (θ_z) και με προσανατολισμό (γ) ίσο με το ηλιακό αζιμούθιο ($\gamma = \gamma_s$).



www.lorentz.de

Η βέλτιστη ετήσια σταθερή γωνία κλίσης (β) ενός ηλιακού συστήματος, εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, την περίοδο ηλιοφάνειας, τη μορφολογία της περιοχής εγκατάστασης και τα φυσικά εμπόδια (ορεινοί όγκοι, δένδρα, κτιριακές εγκαταστάσεις, κ.ά.). Τα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια μπορεί να περιορίζουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται ως προς τα ηλιακά συστήματα. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε μια επιφάνεια με σταθερή βάση, μπορεί να αυξηθεί (4 ÷ 6%) με τη μηνιαία μεταβολή της κλίσης (β) ανά μήνα ή ανά εποχή.

Για τις Ελληνικές περιοχές, η μεταβολή της κλίσης της επιφάνειας ενός ηλιακού συστήματος σε εποχική βάση (χειμώνα – καλοκαίρι), αυξάνει την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια κατά περίπου 5 % ως προς την προσπίπτουσα σε σύστημα σταθερής ετήσιας κλίσης, ενώ η μεταβολή της κλίσης σε μηνιαία βάση δίνει αύξηση περίπου 6 % [44]. Αντίστοιχα, στα ηλιακά συστήματα με περιστρεφόμενες βάσεις ενός άξονα (μεταβολή της αζιμούθιας γωνίας) προσπίπτει 23÷25% περισσότερη ηλιακή ενέργεια σε σχέση με την προσπίπτουσα σε σύστημα σταθερής ετήσιας κλίσης, ενώ στην περίπτωση περιστρεφόμενων βάσεων δύο αξόνων (μεταβολή της αζιμούθιας γωνίας και της κλίσης του Φ/Β) η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται κατά 28 ÷ 30 % [44].

Στον Πίνακα 2.1.2, δίνονται τιμές της προσπίπτουσας μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας ($\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{mo})$) σε κεκλιμένες επιφάνειες για τις βέλτιστες κλίσεις εγκατάστασης ηλιακού συστήματος (β), για εννέα περιοχές της Ελλάδας [31]. Οι τιμές της βέλτιστης κλίσης δίνονται σε ετήσια (Ε) βάση, σε χειμερινή (Χ) βάση και θερινή (Θ) βάση. Οι τιμές βέλτιστης κλίσης (β) είναι σχεδόν ίδιες για περιοχές με ίδιο γεωγραφικό πλάτος.

Πίνακας 2.1.2: Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια για τις βέλτιστες γωνίες κλίσης β των Φ/B (kWh/m²/mo), και βέλτιστη κλίση σε ετήσια (Ε) βάση, χειμερινή (Χ) και θερινή (Θ) περίοδο, για διάφορες περιοχές της Ελλάδας[44,31]

Κλίση β (°)	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Ε	Χ	Θ
Αθήνα ($\varphi=37,96^\circ$, $L=23,92^\circ$)															
7-14	70	84	118	151	190	201	217	206	158	117	84	67	1664	540	1124
23-33	86	97	126	151	181	188	204	202	166	133	104	85	1724	649	1092
42-52	98	103	124	137	154	156	171	178	159	140	118	99	1637	682	955
Ηράκλειο ($\varphi=35,33^\circ$, $L=25,15^\circ$)															
5-12	73	90	133	175	211	216	221	207	173	129	94	73	1794	637	1203
20-30	87	101	140	174	202	203	210	203	180	143	112	89	1844	703	1172
38-48	96	107	140	163	180	177	185	186	176	151	124	101	1787	732	1067
Θεσσαλονίκη ($\varphi=40,63^\circ$, $L=22,93^\circ$)															
9-16	62	75	105	140	174	183	203	182	141	101	69	58	1495	510	1024
25-35	77	87	111	139	166	171	191	178	148	114	85	74	1543	574	994
45-55	86	92	110	130	148	150	168	163	144	119	94	85	1490	597	903
Ιωάννινα ($\varphi=39,67^\circ$, $L=20,83^\circ$)															
9-16	63	76	118	148	189	200	215	199	154	118	77	57	1614	539	1105
24-34	75	86	125	148	181	188	204	196	161	132	92	70	1659	596	1079
44-54	86	91	125	137	159	162	177	178	157	140	104	81	1596	624	969
Καλαμάτα ($\varphi=36,07^\circ$, $L=22,12^\circ$)															
6-13	79	90	136	158	209	214	220	204	166	128	93	68	1766	624	1172
22-32	94	102	145	158	201	202	208	201	173	143	111	83	1820	692	1142
40-50	107	109	144	146	176	172	180	181	168	151	126	95	1754	726	1022
Κομοτηνή ($\varphi=41,13^\circ$, $L=25,42^\circ$)															
10-17	67	79	117	151	188	205	212	198	160	120	77	63	1638	555	1114
26-36	80	89	124	151	180	192	201	195	166	134	92	78	1681	614	1084
46-56	91	95	123	139	157	164	173	175	161	142	104	90	1612	642	968
Λάρισα ($\varphi=39,63^\circ$, $L=22,42^\circ$)															
9-16	59	78	121	160	203	210	218	202	160	114	79	57	1662	555	1154
24-34	75	92	131	160	193	194	203	198	170	132	101	76	1726	636	1118
44-54	83	96	131	151	175	173	182	184	167	138	112	85	1676	658	1032
Μυτιλήνη ($\varphi=39,10^\circ$, $L=26,53^\circ$)															
9-16	63	80	122	161	209	216	222	205	167	124	81	62	1713	569	1180
24-34	80	94	132	161	198	199	207	201	177	145	104	82	1778	652	1142
43-53	87	99	131	152	179	177	185	186	173	152	114	92	1727	675	1052
Πάτρα ($\varphi=38,25^\circ$, $L=21,73^\circ$)															
7-14	66	82	134	151	200	212	216	201	163	121	79	66	1692	578	1144
23-33	83	96	145	150	189	195	201	196	172	140	100	86	1753	660	1102
42-52	91	100	145	141	170	173	180	181	168	146	109	96	1699	682	1013

2.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πυριτίου είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία Φ/Β απευθείας μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια (συνεχές ρεύμα DC) και κυρίως τα κρυσταλλικά Φ/Β πυριτίου. Η άμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας καθιστά τα Φ/Β την καταλληλότερη τεχνολογία, για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων περιοχών. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα ή να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές. Το συνεχές ρεύμα (DC) μπορεί μέσω ενός μετατροπέα να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο (AC), το οποίο χρησιμοποιούν οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές. Ωστόσο, η απόδοση των Φ/Β συστημάτων που είναι διαθέσιμα στην αγορά είναι ακόμα και σήμερα αρκετά χαμηλή πλησιάζοντας σε εργαστηριακές συνθήκες το 40 % για τα Φ/Β πολλαπλών επαφών και το 23 % για Φ/Β πυριτίου, αποδόσεις που κάτω από πραγματικές συνθήκες είναι πολύ χαμηλότερες[30].

Θεωρητικά, τα Φ/Β έχουν διάρκεια ζωής όση και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται και σε περίπτωση βλάβης κάποιου στοιχείου η επισκευή γίνεται άμεσα. Οι μπαταρίες (συσσωρευτές) εξελίσσονται συνεχώς και οι νέες τεχνολογίες υπόσχονται άνω των 15 ετών διάρκεια ζωής. Τα φωτοβολταϊκά θεωρούνται ως μια αξιόπιστη τεχνολογία και η συχνότητα διακοπής λειτουργίας τους ετησίως είναι πολύ μικρή (π.χ. για συντήρηση ή μεγάλης διάρκειας νεφοσκεπών ημερών). Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα κρυσταλλικά Φ/Β τους εκτιμάται στις 800 με 1300 kWh/kWp κατά μέσο όρο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής ενώ μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα φορτία αιχμής που παρουσιάζονται κατά της διάρκειας της ημέρας.

2.2.1. Βασικές Αρχές Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών

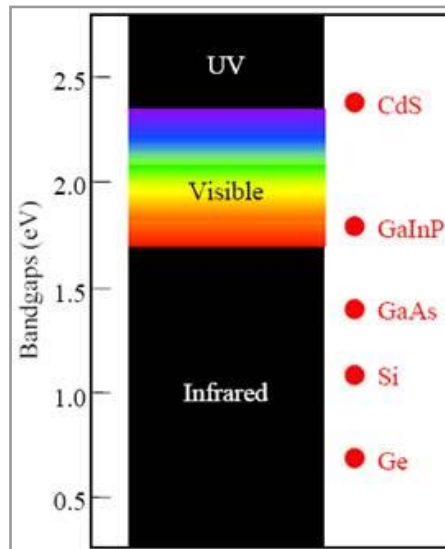
Τα Φ/Β αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του φαινομένου της φωτοαγωγιμότητας. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια που έχουν μήκη κύματος από 0,25 έως 4 μm περίπου και κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. Η ενέργεια που έχει ένα φωτόνιο συχνότητας ν δίνεται από την Εξίσωση του Planck: [41]

$$E = h \cdot \nu \quad (2.2.1)$$

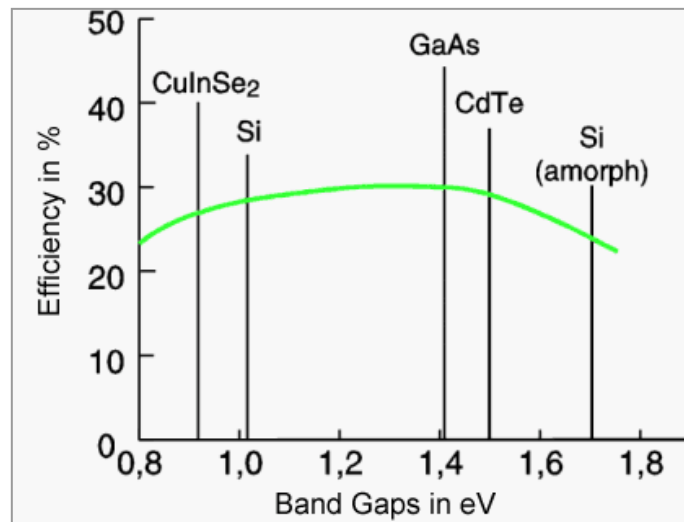
όπου $h = 6,6255 \times 10^{-34}$ (J.s), η σταθερά του Planck. Από την Εξίσωση αυτή προκύπτει ότι, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος ($\lambda = 1/\nu$) και μεγαλύτερη η συχνότητα (ν) των φωτονίων, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια διαθέτουν[41].

Κάθε ένα φωτόνιο που φτάνει στη Γη έχει την ίδια ενέργεια που είχε κατά την εκπομπή του από την επιφάνεια του ήλιου, περίπου 8,5 λεπτά της ώρας νωρίτερα. Η απαιτούμενη ελάχιστη ενέργεια των φωτονίων για την ενεργοποίηση των ηλεκτρονίων στην δομή ενός Φ/Β (ημιαγωγού) εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του Φ/Β. Η ελάχιστη ενέργεια (eV) που χρειάζεται να έχει ένα φωτόνιο για την ενεργοποίηση ενός ηλεκτρονίου λέγεται ενεργειακό κατώφλι «Bandgap»[42]. Το ενεργειακό κατώφλι διαφοροποιείται για διάφορα υλικά Φ/Β στοιχείων (Σχήμα 2.2.1).

Το πυρίτιο (Σχήμα 2.2.2), που είναι σήμερα το πιο κοινό υλικό για την κατασκευή των Φ/Β στοιχείων, μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από φωτόνια τα οποία έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από 1,08 eV, δηλαδή σχεδόν από τα φωτόνια όλου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας και με μέγιστο μήκος κύματος $\lambda = 1,15 \mu\text{m}$ [41]. Ωστόσο, κάθε φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει και να ελευθερώσει μόνο ένα ηλεκτρόνιο από την επιφάνεια των Φ/Β.



Σχήμα 2.2.1: Ενεργειακό κατώφλι (Bandgap) ενεργοποίησης φωτονίων για διάφορα υλικά Φ/Β[30]



Σχήμα 2.2.2: Απόδοση (%) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορα υλικά Φ/Β[30]

Τα φωτόνια με περισσότερη ενέργεια από την ελάχιστη που απαιτείται για την ενεργοποίηση ενός ηλεκτρονίου, αποδίδουν την υπολειπόμενη ενέργεια ως θερμότητα μέσα στο ίδιο το υλικό. Τα Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου αξιοποιούν κυρίως το ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να έχουν τη δυνατότητα μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια, μόνο ένα μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, που αποτελείται κυρίως από υπέρυθρη (θερμική) και λιγότερο από υπεριώδη ακτινοβολία, δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλές τιμές απόδοσης των Φ/Β πυριτίου, οι οποίες ανέρχονται θεωρητικά έως 23%[41]. Η χαμηλή απόδοση των Φ/Β οφείλεται και σε άλλες παραμέτρους όπως η ανομοιογένεια των υλικών, η αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνειά τους, οι απώλειες λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια των Φ/Β, το μεταλλικό δίκτυο ένωσης (contact grid) των Φ/Β κυψελών, την ηλεκτρική αντίσταση των μεταλλικών συνδέσεων, κ.ά.[30, 41-42, 54-55].

2.2.2. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κρυσταλλικών Φωτοβολταϊκών Πυριτίου

Κάθε Φ/Β συνοδεύεται από τεχνικές προδιαγραφές, τις οποίες παρέχει ο κατασκευαστής και αφορούν στη λειτουργία του υπό συγκεκριμένες συνθήκες εντός εργαστηρίου. Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς (P), η απόδοση (η), καθώς και η πτώση τάσης και η απόδοση ανάλογα με τη θερμοκρασία (T_{pv}) της επιφάνειας του Φ/Β, είναι οι βασικές παράμετροι που είναι απαραίτητες για την επιλογή της σωστής τεχνολογίας Φ/Β, για μια δεδομένη εφαρμογή. Οι καθορισμένες πρότυπες συνθήκες εργαστηρίου (Standard Test Conditions STC), κάτω από τις οποίες δοκιμάζονται τα Φ/Β, είναι για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_{Tref}=1000 \text{ W/m}^2$, θερμοκρασία επιφανείας Φ/Β στοιχείου $25 \text{ }^\circ\text{C}$, και αέρια μάζα ($air\ mass=1/\cos \theta_z$), ίση με 1,5. Οι πρότυπες συνθήκες εργαστηριακής δοκιμής των Φ/Β ακολουθούν το πρότυπο IEC 60904[56], ενώ η πιστοποίηση της απόδοσης τους και η εξέταση τύπου των Φ/Β γίνεται βάσει ξεχωριστού προτύπου για κάθε τύπο Φ/Β και τα κρυσταλλικά Φ/Β πυριτίου σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61245[57].

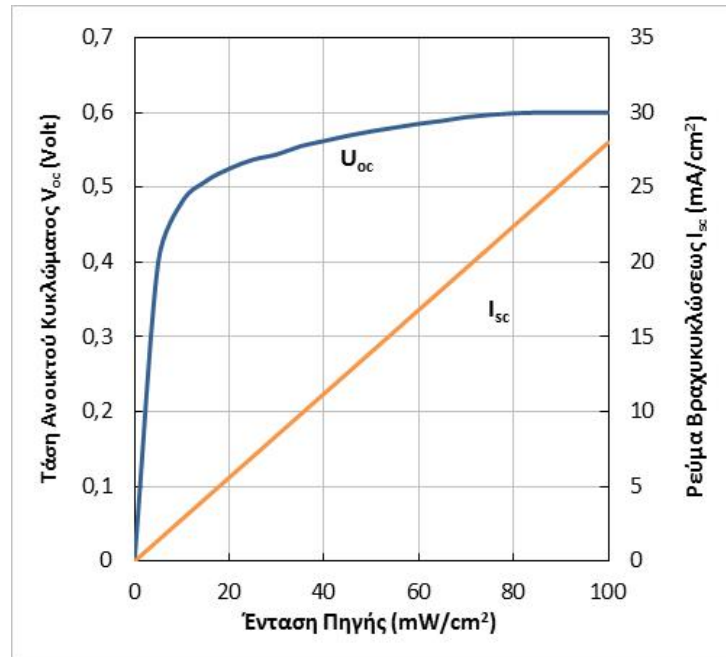
Ωστόσο, οι δοκιμές για την απόδοση των Φ/Β μπορεί να γίνονται και για διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (συνήθως $G_T=800 \text{ W/m}^2$), καθώς και για άλλες θερμοκρασίες Φ/Β, όπως $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ή/και $60 \text{ }^\circ\text{C}$, θερμοκρασίες που συνήθως αναπτύσσονται πάνω στην επιφάνεια ενός Φ/Β (Πίνακας 2.2.1).

Πίνακας 2.2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείου, υπό συνθήκες εργαστηρίου (STC)

Θερμοκρασία επιφάνειας ($^\circ\text{C}$)	25	45	60
Μέγιστη ισχύς P_{mp} (Wp)	49	44,8	41,5
Τάση στην μέγιστη ισχύ V_{mp} (V)	17	15,44	14,27
Ένταση στην μέγιστη ισχύ I_{mp} (A)	2,88	2,9	2,91
Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (V)	21,6	20	18,86
Ένταση βραχυκυκλώσεως I_{sc} (A)	3,15	3,17	3,18
Βαθμός απόδοσης η (%)	11,31	10,34	9,58
Μεταβολή χαρακτηριστικών $0,95 \text{ (mA/}^\circ\text{C)}$, $-79 \text{ (mV/}^\circ\text{C)}$, $-0,43 \text{ (%/}^\circ\text{C)}$			

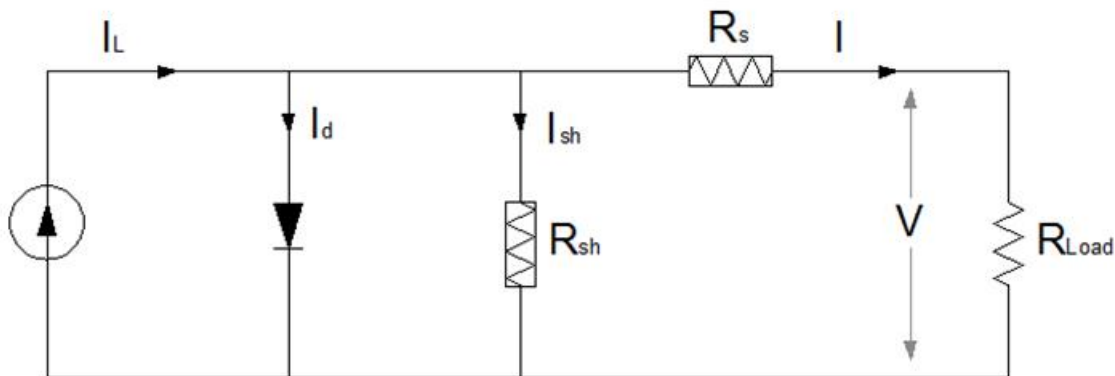
Τα Φ/Β στοιχεία αποτελούνται από δύο πλάκες ημιαγωγών (δίοδοι p-n), που τοποθετούνται σε επαφή. Η πάνω πλάκα (n) είναι εμπλουτισμένη με μερικά μόρια ενός στοιχείου με ένα παραπάνω ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στιβάδα, π.χ. αρσενικό (As) σε σχέση με το βασικό υλικό του ημιαγωγού, π.χ. πυρίτιο (Si). Η κάτω πλάκα (p) είναι εμπλουτισμένη με μερικά μόρια ενός στοιχείου με ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο στην εξωτερική στιβάδα του, π.χ. μόρια βόριου (B), από το υλικό του ημιαγωγού. Η πάνω πλάκα με τα επιπλέον ηλεκτρόνια ονομάζεται ημιαγωγός τύπου (n) (negative- αρνητικό φορτίο ηλεκτρονίων), ενώ η κάτω πλάκα με τα λιγότερα ηλεκτρόνια είναι ημιαγωγός τύπου (p), (positive- θετικό φορτίο οπών)[41].

Η τάση που δημιουργείται από την επαφή των δύο πλακών (n-p), ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (ανοικτοκυκλώσεως) και εξαρτάται κυρίως από το υλικό κατασκευής των Φ/Β κυψελών. Η τιμή της τάσης (V_{oc}) είναι χαμηλή και αυξάνεται απότομα για πολύ μικρές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) παραμένει σχεδόν σταθερή από μια ορισμένη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και πάνω, (Σχήμα 2.2.3.), η οποία συνήθως κυμαίνεται για μια Φ/Β κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου σε τιμές από 0,52 έως 0,6 Volt[38,42]. Μια κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου με στοιχειώδη επιφάνεια 1 cm^2 και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1.000 W/m^2 , παρουσιάζει τάση ανοικτού κυκλώματος με $V_{oc} = 0,6 \text{ Volt}$ [41]. Αντίστοιχα για τα Φ/Β άμορφου πυριτίου η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) είναι μεγαλύτερη και κυμαίνεται σε τιμές από 0,6 έως 0,9 Volt[58].



Σχήμα 2.2.3: Μεταβολή του ρεύματος (I_{sc}) βραχυκυκλώσεως και της τάσης ανοικτού κυκλώματος (U_{oc}) σε συνάρτηση με την ένταση της πηγής, π.χ. ηλιακή ακτινοβολία (G)

Το ρεύμα (I) που παράγει μια Φ/Β κυψέλη είναι ανάλογο με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνειά της (εισερχόμενος αριθμός φωτονίων). Η ένταση (I) του ρεύματος αυξάνεται ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και με την επιφάνεια της Φ/Β κυψέλης. Σε κλειστό κύκλωμα χωρίς φορτίο ($R=0$), η ένταση του ρεύματος είναι σταθερή και ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} . Το ρεύμα (I) μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, (Σχήμα 2.2.3).



Σχήμα 2.2.4: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β

Στο Σχήμα 2.2.4 απεικονίζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας Φ/Β κυψέλης (PV cell), σε μια απλοποιημένη μορφή. Στο κύκλωμα η Φ/Β κυψέλη φαίνεται ως μία πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία ελέγχεται από μια διόδο (p-n) μέσω της οποίας διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα I_d , ενώ οι δύο ωμικές αντιστάσεις, μία εν σειρά αντίσταση (R_s) με τιμή $< 5\Omega$ που αντιπροσωπεύει τις ηλεκτρικές επαφές και τους αγωγούς συνδεσμολογίας και μία εν παραλλήλω (διακλαδωμένη) αντίσταση (R_{sh}) με τιμή $> 500\Omega$ που αντιπροσωπεύει τις διαρροές της διόδου (D)[41].

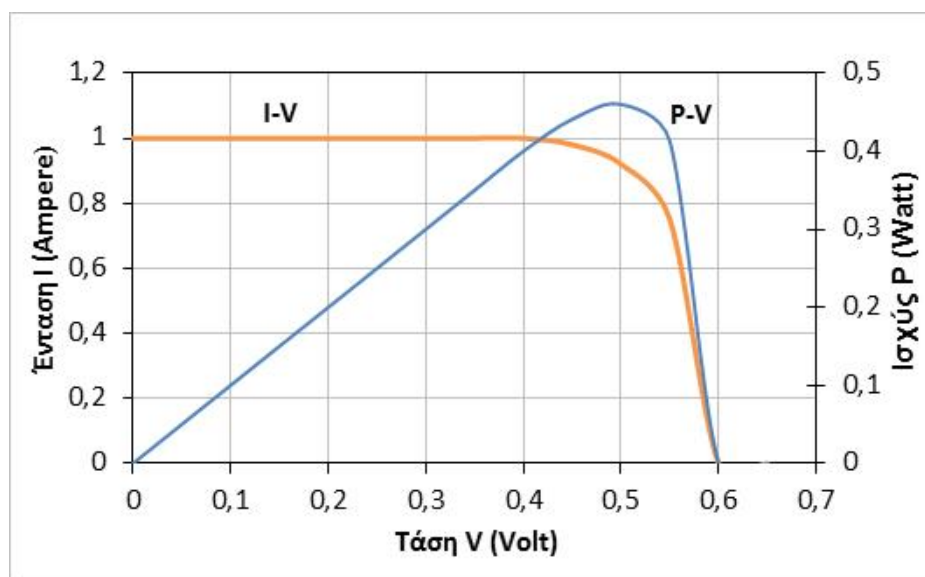
Συνδέοντας στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μια αντίσταση R (R_{Load} στο κύκλωμα του Σχήματος 2.2.4) δηλαδή ένα φορτίο και μεταβάλλοντας την τιμή της αντίστασης, μεταβάλλεται και η τάση V , μέχρι την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος V_{oc} , Σχήμα 2.2.5. Με την αύξηση της αντίστασης (R) αυξάνεται η τάση (V), ενώ η ένταση του ρεύματος παραμένει (I) σταθερή μέχρι ενός σημείου και στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Η καμπύλη ($I-V$), είναι η χαρακτηριστική καμπύλη για το Φ/Β στοιχείο, και ισχύει για σταθερή τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G) και σταθερή θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β (T_{pv}).

Η ηλεκτρική ισχύς (P_{pv}) που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο δίνεται από την Εξίσωση 2.2.1. Η διακύμανση της αποδιδόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την τάση (V), παρουσιάζεται επίσης στο Σχήμα 2.2.5, για σταθερή ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G).

$$P_{pv} = V \cdot I \quad (2.2.1)$$

Η μέγιστη ισχύς (P_m) εμφανίζεται σε μια τιμή τάσης (V_{mp}), ελαφρώς μικρότερη από την τάση (V_{oc}) ανοικτού κυκλώματος (Σχήμα 2.2.5). Σε αρκετές περιπτώσεις Φ/Β η τιμή αυτή εκτιμάται κατά προσέγγιση $V_{mp} \cong 0,9 \cdot V_{oc}$. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, η τάση (V_{mp}) και η ένταση (I_{mp}) που αντιστοιχούν στο σημείο της μέγιστης ισχύος του Φ/Β εντοπίζεται από το διάγραμμα ($P-V$). Αντίστοιχα, για τη μέγιστη ισχύ (P_m), ισχύει η ακόλουθη Εξίσωση.

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2.2.2)$$



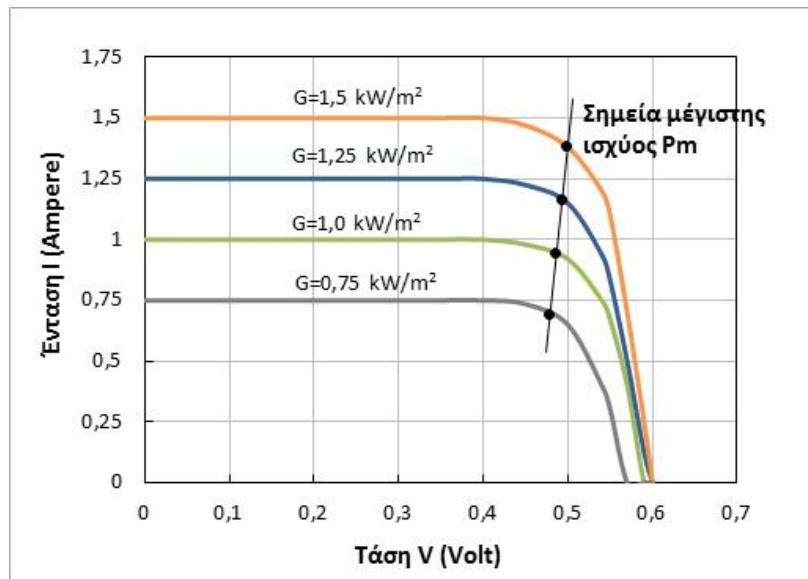
Σχήμα 2.2.5: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β, Τάσης – Έντασης και Τάσης -Ισχύος

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό μέγεθος των Φ/Β κυψελών είναι ο συντελεστής πλήρωσης (FF), που είναι ο λόγος της μέγιστης παραγόμενης ισχύος (P_m) προς τη μέγιστη τιμή της θεωρητικής ισχύος (Εξίσωση 2.2.3), η οποία ορίζεται από το γινόμενο του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) (μηδενική αντίσταση) και της τάσης ανοικτοκυκλώσεως (V_{oc}).

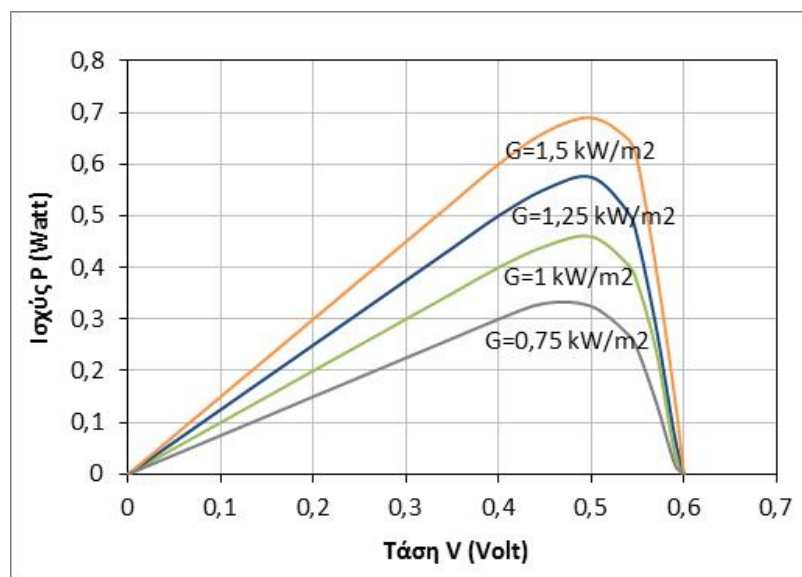
$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.2.3)$$

Η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G), διαφοροποιεί την καμπύλη λειτουργίας της Φ/Β κυψέλης. Ειδικότερα, η αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και η καμπύλη ($I-V$) μετατοπίζεται προς τα πάνω, θεωρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του Φ/Β (T_{pv}). Αντίστοιχα, η μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζει την καμπύλη λειτουργίας ($I-V$) προς τα κάτω, Σχήμα 2.2.6.

Ωστόσο, η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δε επηρεάζει σημαντικά την τάση ανοικτοκυκλώσεως (V_{oc}) του Φ/Β.



Σχήμα 2.2.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/Β, (I-V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 2.2.7: Διάγραμμα (P-V) Φ/Β για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (G)

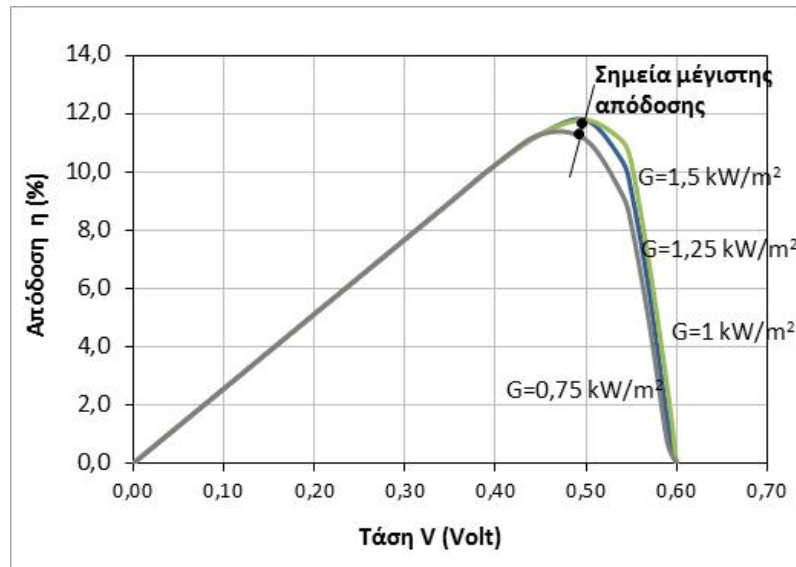
Στο Σχήμα 2.2.6 η γραμμή που ενώνει τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη ισχύς (P_m) του Φ/Β, είναι σχεδόν μια ευθεία γραμμή κάθετη στον άξονα της τάσης (V), με ελαφριά κλίση προς τα δεξιά. Συνεπώς, το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται σχεδόν πάντα κοντά στην ίδια τιμή τάσης (V), ανεξάρτητα από την τιμή έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G). Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό από τα στοιχεία του Σχήματος 4.2.7, όπου δίνονται οι καμπύλες (P-V) για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Αντίστοιχα ο βαθμός απόδοσης (η_{pv}) μιας Φ/Β κυψέλης (Σχήμα 4.2.8), εκφράζεται με το λόγο της ηλεκτρικής ισχύος (P_{pv}) που παράγει η Φ/Β κυψέλη προς τη διαθέσιμη ισχύ (W) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της. Συγκεκριμένα, η διαθέσιμη ισχύς (W) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι το γινόμενο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) στην επιφάνεια της Φ/Β κυψέλης σε W/m^2 , επί το

εμβαδόν της επιφάνειας της (A_{pv}) σε m^2 . Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση .

$$\eta_{pv} = \frac{P_{pv}}{G_T \cdot A_{pv}} \quad (2.2.4)$$

όπου: A_{pv} , η επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου σε m^2 και G_T , η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην κεκλιμένη ($\beta \neq 0$) επιφάνεια του Φ/Β σε $[W/m^2]$.



Σχήμα 2.2.8: Βαθμός απόδοσης Φ/Β, (η -V) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

2.2.3. Λειτουργία Φωτοβολταϊκών Σε Συνθήκες Εξωτερικού Περιβάλλοντος – Θεωρητικά και Εμπειρικά Μοντέλα Υπολογισμού

Η διακύμανση του βαθμού απόδοσης των Φ/Β (η_{pv}) σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο εξωτερικό περιβάλλον, αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με τα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής για συνθήκες εργαστηρίου STC. Για παράδειγμα, η διακύμανση του βαθμού απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της επιφάνειας τους (T_{pv}), όπως έχει καταγραφεί σε πειραματικές μετρήσεις δεν είναι γραμμική, όπως θεωρητικά προσεγγίζεται, καθώς εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G), η αέρια μάζα (AM), η γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο Φ/Β, κ.λ.π. [31,59]. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του Φ/Β είναι η θερμοκρασία του αέρα (T_{air}) και δευτερευόντως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G).

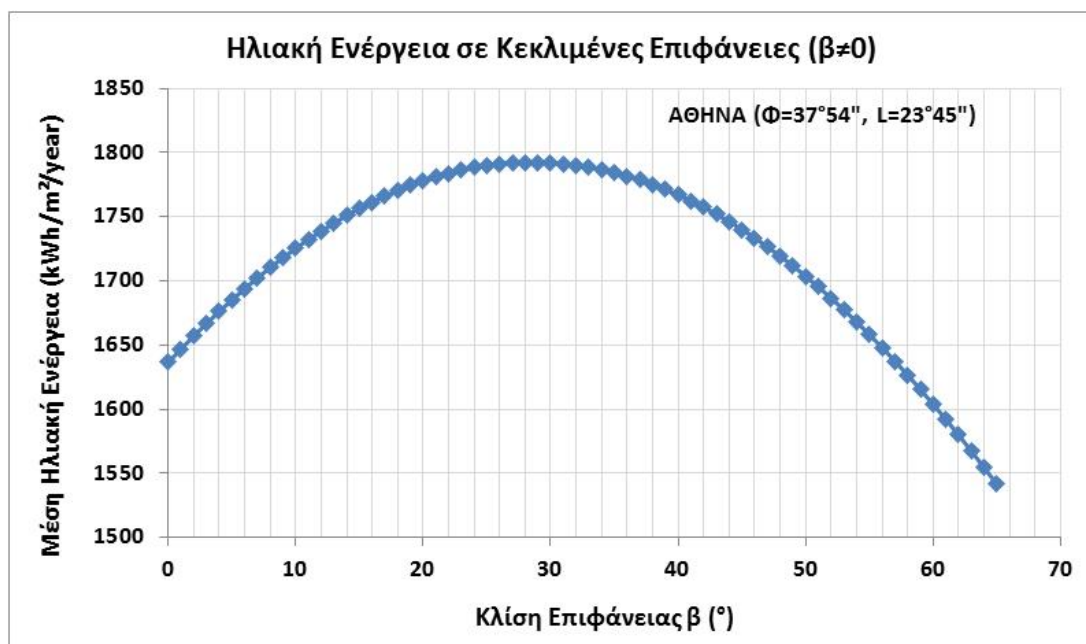
Η μεταβολή του ηλιακού ύψους (α) μεταβάλλει τη γωνία πρόσπτωσης (θ) και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G), πάνω σε μια επιφάνεια Φ/Β σταθερής κλίσης (β). Επιπλέον, ο συντελεστής μετάδοσης (τ_a), που είναι το γινόμενο της διαπερατότητας – απορροφητικότητας του Φ/Β, μεταβάλλει την τελική ωφέλιμη ηλιακή ακτινοβολίας (T_{pv}) που τελικά αξιοποιείται από το Φ/Β, με αποτέλεσμα και τη μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (P) από το Φ/Β.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (P_{pv}) θα μπορούσε να θεωρηθεί σχεδόν ανάλογη με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G). Ωστόσο κατά τη λειτουργία του Φ/Β, σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς παρουσιάζει μια

διακύμανση, για την ίδια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία προκύπτει από την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων που ήδη αναφέρθηκαν, όπως είναι η θερμοκρασία των Φ/Β (T_{pv}), η γωνία πρόσπτωσης (θ) και κατά συνέπεια ο συντελεστής (τ_a), η αέρια μάζα (AM) και άλλες φυσικές παράμετροι.

Θέση Εγκατάστασης Φ/Β

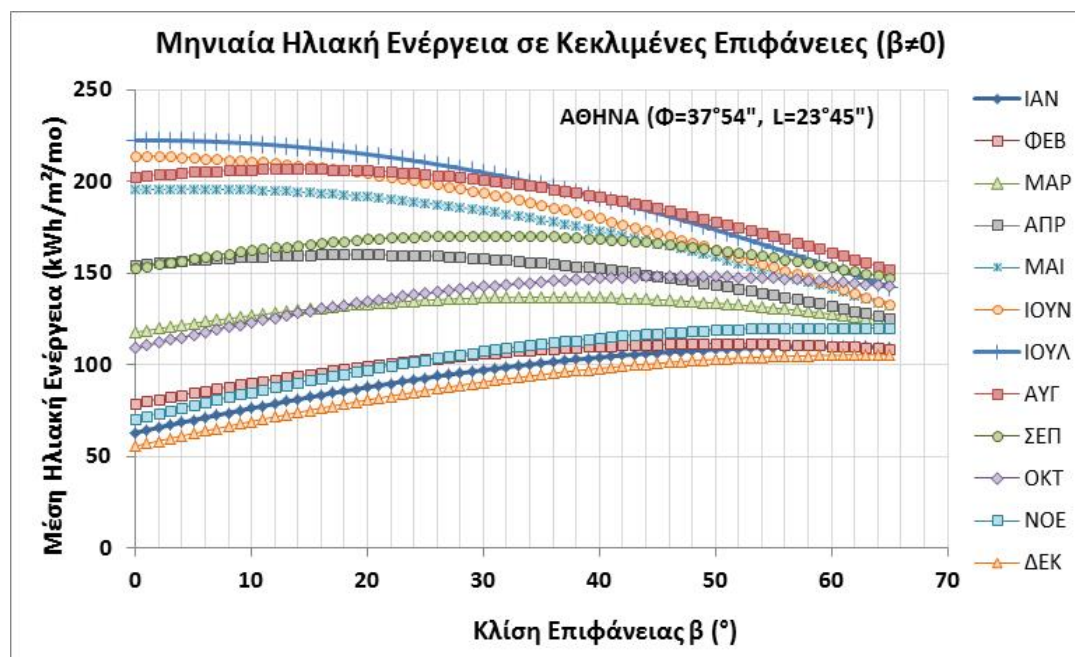
Στην ενότητα 2.1 αναλύθηκαν οι μεθοδολογίες υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας, βάσει θεωρητικών, γεωμετρικών και εμπειρικών μοντέλων, από παρατηρήσεις και πειραματικές μετρήσεις. Προκειμένου για τον ακριβή προσδιορισμό της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης μιας Φ/Β εγκατάστασης, είναι σημαντικός ο υπολογισμός της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας σε μια περιοχή, τόσο για κάθε εποχή του χρόνου, όσο και στη διάρκεια της ημέρας. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια καθώς και η σύστασή της, διάχυτη ή άμεση ηλιακή ενέργεια, εξαρτάται από πολλούς φυσικούς παράγοντες όπως είναι, η υγρασία της ατμόσφαιρας, τα νέφη, τα στερεά σωματίδια, καθώς επίσης και η απόσταση που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα που προσδιορίζεται μέσω της αέριας μάζας (AM). Η αέρια μάζα είναι μια παράμετρος που μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας, ενώ διαφοροποιείται ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και την εποχή του χρόνου.



Σχήμα 2.2.9: Διακύμανση της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας (kWh/m²/yr), σε επιφάνειες με κλίση (β), για την περιοχή της Αθήνας

Η μέση διαθέσιμη ημερήσια ηλιακή ενέργεια και ο αριθμός νεφοσκεπών ημερών ανά μήνα, είναι οι πιο βασικές παράμετροι, για τη διαστασιολόγηση μιας Φ/Β εγκατάστασης. Ανάλογα την περίοδο αξιοποίησης των Φ/Β (ετήσια, χειμερινή, θερινή κ.λ.π.), λαμβάνονται υπόψη και οι αντίστοιχες τιμές διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας ανά εποχή, ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη θέση εγκατάστασης (κλίση, προσανατολισμός) των Φ/Β, προκειμένου για τη μέγιστη αξιοποίηση τη διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.2.9, απεικονίζεται η διακύμανση της διαθέσιμης ετήσιας ηλιακής ενέργειας, ανάλογα με τη γωνία κλίσης (β) της επιφάνειας, για την περιοχή της Αθήνας. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2.2.10, απεικονίζεται η διακύμανση της διαθέσιμης μηνιαίας ηλιακής ενέργειας, ανάλογα τη γωνία κλίσης (β) της επιφάνειας, για κάθε μήνα, στην περιοχή της Αθήνας. Είναι προφανές ότι ανάλογα το μήνα και

την εποχή η βέλτιστη κλίση για μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται σημαντικά.



Σχήμα 2.2.10: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας ηλιακής ενέργειας (kWh/m²/mo), σε επιφάνειες με κλίση (β), για κάθε μήνα για την περιοχή της Αθήνας

Διαπερατότητα Διαφανούς Καλύμματος – Απορροφητικότητα Επιφάνειας Φ/Β

Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει πάνω σε μία επιφάνεια Φ/Β, εξαρτάται από τη θέση της επιφάνειας ως προς τις ακτίνες του ήλιου, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου. Όσο πιο κάθετα βλέπει η επιφάνεια του Φ/Β τις ηλιακές ακτίνες, δηλαδή όσο πιο μικρή είναι η γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας, τόσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²).

Η γωνία πρόσπτωσης (θ, deg) της ηλιακής ακτινοβολίας (G) πάνω σε μια επιφάνεια, εξαρτάται από τις συντεταγμένες της περιοχής εγκατάστασης, την εποχή και τη θέση της επιφάνειας (προσανατολισμός και γωνία κλίσης), και υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση [41]:

$$\text{συν } \theta = \text{συν} \delta \cdot \text{συν}(\varphi - \beta) \cdot \text{συν} \omega + \eta \mu \delta \cdot \eta \mu(\varphi - \beta) \quad (2.2.5)$$

όπου φ (deg) είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, β (deg) είναι η κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ω (deg) είναι η ηλιακή γωνία και δ (deg) είναι η ηλιακή απόκλιση για δεδομένη ημέρα του χρόνου (D).

Ωστόσο, η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα και φτάνει τελικά πάνω στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β, εξαρτάται από την ποιότητα του γυάλινου καλύμματος, δηλαδή από τον συντελεστή διαπερατότητας (τ) και την ποιότητα της συλλεκτικής επιφάνειας του Φ/Β, δηλαδή τον συντελεστή απορροφητικότητας (α) της επιφάνειας του Φ/Β. Το γινόμενο των δύο παραμέτρων (τα) διαφοροποιείται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην γυάλινη επιφάνεια του Φ/Β και τη γωνία διάθλασης (θ₂) του τζαμιού.

Η μεταφορά της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός γυάλινου καλύμματος Φ/Β, μπορεί να περιγραφεί με το απλό μοντέλο αέρα-γυαλιού, σύμφωνα με τους Sjerps-Koomen et all [41, 60]. Οι νόμοι Snell, Fresnel και Bougher μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της τελικής απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας (G) από μία Φ/Β κυψέλη με γυάλινο κάλυμμα, σύμφωνα με τους οποίους το γινόμενο $\tau(\theta)$, της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) του Φ/Β σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση [42, 60-61]:

$$\tau(\theta) = e^{-(KL/\sin\theta_r)} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\eta\mu^2(\theta_r - \theta)}{\eta\mu^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\varepsilon\varphi^2(\theta_r - \theta)}{\varepsilon\varphi^2(\theta_r + \theta)} \right) \right] \quad (2.2.6)$$

όπου θ (deg) και θ_r (deg) είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και η γωνία διάθλασης του τζαμιού αντίστοιχα, K (m^{-1}) είναι ο συντελεστής εξάλειψης (glazing extinction coefficient), και L (m) είναι το πάχος του γυάλινου καλύμματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις κρυσταλλικών Φ/Β, η τιμή για τον συντελεστή K είναι $4 m^{-1}$, για πολύ καθαρό γυαλί (water white glass), ενώ το L είναι συνήθως 2 mm.

Η γωνία διάθλασης (θ_r , deg) υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση (νόμος του Snell), όπου ο αδιάστατος δείκτης διάθλασης (n_r/n) για το γυαλί είναι 1,526 [41]:

$$\frac{\eta\mu\theta_r}{\eta\mu\theta} = \frac{n}{n_r} \Rightarrow \theta_r = \eta\mu^{-1} \cdot \left(\frac{\eta\mu\theta}{n_r/n} \right) = \eta\mu^{-1} \cdot \left(\frac{\eta\mu\theta}{1,526} \right) \quad (2.2.7)$$

Το ποσό της τελικής αξιοποιούμενης (ωφέλιμης) ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανάλογο του συντελεστή $\tau(\theta)$, ο οποίος είναι διαφορετικός για την άμεση (I_b) και διάχυτη (από σκέδαση I_s ή ανακλώμενη I_r) ηλιακή ακτινοβολία. Οι σχέσεις 2.2.6 και 2.2.7 εφαρμόζονται για τον υπολογισμό του $\tau(\theta)$, για κάθε είδος ηλιακής ακτινοβολίας, για την άμεση $\tau(\theta)_b$, από σκέδαση $\tau(\theta)_s$ και την ανακλώμενη $\tau(\theta)_r$.

Στην περίπτωση ηλιακής ακτινοβολίας από σκέδαση (d) ή ανάκλαση (r), η γωνία θ στην Εξίσωση 2.2.7 υπολογίζεται σε συνάρτηση της γωνίας κλίσης (β) της επιφάνειας, ως εξής [41]:

$$\theta_{ed} = 59,7 - 0,1388 \cdot \beta + 0,001497 \cdot \beta^2 \quad (2.2.8)$$

$$\theta_{er} = 90 - 0,5788 \cdot \beta + 0,002693 \cdot \beta^2 \quad (2.2.9)$$

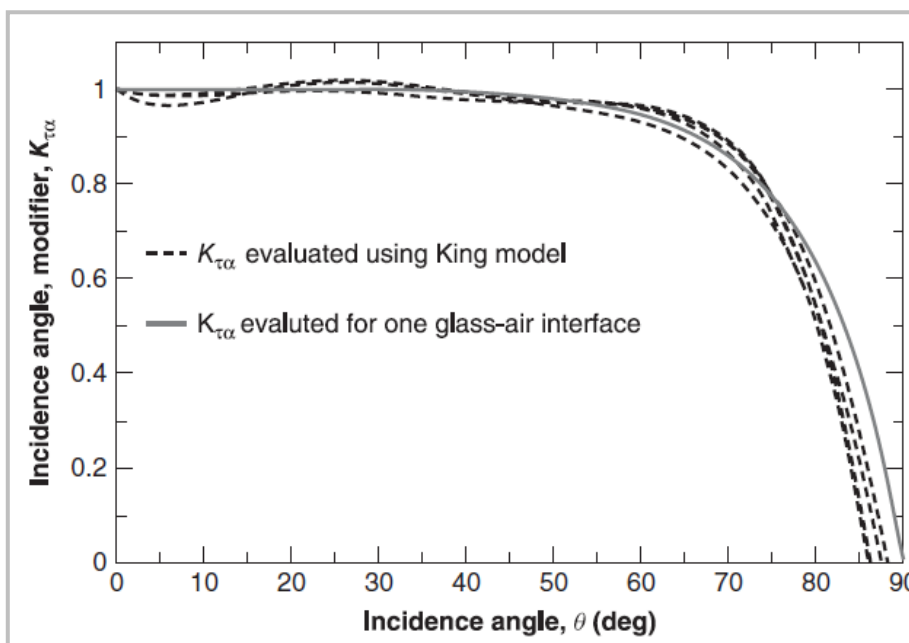
Η εξίσωση 2.2.6, στην περίπτωση άμεσης ηλιακής ακτινοβολία και καλύμματος Φ/Β από καθαρό μόνο γυαλί ("water white" glass), μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau(\theta)_{eb} = 0,9469 + 0,0008 \cdot \theta - 0,0001 \cdot \theta^2 + 5,95 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3 - 1,64 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^4 + 2,00215 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^5 - 1,005 \cdot 10^{-11} \cdot \theta^6 \quad (2.2.10)$$

Η εξίσωση 2.2.10 προσεγγίζει και άλλες πολυωνυμικές εξισώσεις, που έχουν προκύψει από εργαστηριακές μετρήσεις σε κρυσταλλικά Φ/Β με διάφορους τύπους γυάλινου καλύμματος [41,61-63]. Συνήθως η διακύμανση του γινομένου της διαπερατότητας (τ) του καλύμματος επί της απορροφητικότητας (α) της επιφάνειας του Φ/Β, εκφράζεται μέσω του συντελεστή μετατροπής $K_{\tau\alpha}$ (Incidence angle, modifier), ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$k_{\tau\alpha} = \frac{\tau(\theta)}{\tau(0)} \quad \text{όπου} \quad \tau(0) = \tau(\theta)_n \quad (2.2.11)$$

όπου $\tau(\theta)$ είναι το γινόμενο διαπερατότητας καλύμματος (τ) και απορροφητικότητας (α) της επιφάνειας του Φ/Β για γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας $\theta \neq 0^\circ$, και αντίστοιχα το $\tau(0)$ για μηδενική γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας $\theta = 0^\circ$ (κάθετη πρόσπτωση).



Σχήμα 2.2.11: Συντελεστής μετατροπής $K_{\tau\alpha}$ (Incidence angle, modifier) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) [41,60-62]

Στο Σχήμα 2.2.11, δίνεται η γραφική απεικόνιση της διακύμανση του συντελεστή μετατροπής $K_{\tau\alpha}$ (Incidence angle, modifier) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ), όπως έχει προκύψει από εμπειρικά μοντέλα βάσει μετρήσεων, για διάφορους τύπου γυαλιού [41, 60-62], και επιφάνειες Φ/B . Όπως φαίνεται από το Σχήμα, ο συντελεστής $K_{\tau\alpha}$ μειώνεται σημαντικά για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης άνω των 70° . Οι χαμηλές τιμές του συντελεστή $K_{\tau\alpha}$ συνεπάγονται και χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά διαπερνούν το γυάλινο κάλυμμα και απορροφούνται από τη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/B προς αξιοποίηση.

Προσπίπτουσα και Αξιοποιούμενη Ηλιακή Ακτινοβολία από το Φ/B

Ο συνολικός μέσος συντελεστής διαπερατότητας - απορροφητικότητας $\tau\alpha(\theta)_{av}$ είναι αυτός που καθορίζει και το τελικό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα φτάσει τελικά στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/B και θα αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συντελεστής εξαρτάται από τη θέση των Φ/B (κλίση και προσανατολισμός) και τη σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας, μεταβάλλοντας στη διάρκεια του χρόνου την τελική αξιοποιούμενη ηλιακή ενέργεια και κατά συνέπεια είναι μία παράμετρος που επιδρά επίσης στην ενεργειακή απόδοση των Φ/B . Για τις Ελληνικές περιοχές, η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια ($S_{pv,annual}$) που τελικά διαπερνά και προσπίπτει σε μια συλλεκτική (απορροφητική) επιφάνεια ενός Φ/B εκτιμάται περίπου 8,8 % έως 9,1 % χαμηλότερη, σε σχέση με την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει πάνω στο γυάλινο κάλυμμα ενός κρυσταλλικού Φ/B πυριτίου (I_β), όπως αναλύεται για τις διάφορες περιοχές σε επόμενο Κεφάλαιο. Τα ποσοστά αυτά της ηλιακής ενέργειας διαφοροποιούνται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης και τη ποσοστιαία σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη. Ο μέσος συντελεστής $\tau\alpha(\theta)_{av}$ εκτιμάται ότι είναι κατά μέσο όρο 4 % χαμηλότερος από το μέσο συντελεστή $\tau\alpha(\theta)_b$ για τη άμεση ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή:

$$\tau\alpha(\theta)_{av} = 0,96 \cdot \tau\alpha(\theta)_b \quad (2.2.12)$$

Η τελική αξιοποιούμενη ηλιακή ακτινοβολία (S_{pv}) υπολογίζεται από την Εξίσωση:

$$S_{pv} = G_T \cdot \tau\alpha(\theta)_{av} \quad \text{ή} \quad S_{pv} = I_\beta \cdot \tau\alpha(\theta)_{av} \quad (2.2.13)$$

όπου ως μέσος συντελεστής $\tau(\theta)_{av}$ χρησιμοποιείται συνήθως ο αντίστοιχος συντελεστής διαπερατότητας – απορροφητικότητας της άμεσης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας $\tau(\theta)_b$, ή όπως προκύπτει από την εμπειρική Εξίσωση 2.2.12 βάσει του συντελεστή $\tau(\theta)_b$. Ο υπολογισμός της ηλιακής ενέργειας (S_{pv}) που τελικά αξιοποιείται στην επιφάνεια ενός Φ/Β μπορεί να υπολογιστεί και αναλυτικά χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.1.14, εφόσον είναι γνωστή η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές $\tau(\theta)$, για ισοτροπική κατανομή της διάχυτης ηλιακής ενέργειας, ως εξής [41]:

$$S_{pv} = M \cdot [G_{T,b} \cdot R_b \cdot \tau(\theta)_b + G_{T,d} \cdot \tau(\theta)_d \cdot 0,5 \cdot (1 + \cos \beta) + G_T \cdot \tau(\theta)_r \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta)] \quad (2.2.14)$$

όπου: S_{pv} , η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β, σε $[W/m^2]$ και $\tau(\theta)_b$, $\tau(\theta)_d$ και $\tau(\theta)_r$ το γινόμενο της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) του Φ/Β για την άμεση, διάχυτη (από σκέδαση, ισοτροπικά) και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα. Επίσης, ο παράγοντας M είναι ο συντελεστής μετατροπής αέριας μάζας (air mass modifier), ο οποίος εκφράζει την μετατροπή της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την αέρια μάζα. Η επιλεκτική απορρόφηση από τα διάφορα στοιχεία (σωματίδια κ.λ.π.) στην ατμόσφαιρα προκαλεί αλλαγή στο φασματικό περιεχόμενο της ηλιακής ακτινοβολίας (ποσοστιαία σύσταση με διαφορετικού μήκους κύματος ακτινοβολίες), με αποτέλεσμα και τη διαφοροποίηση της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια ενός Φ/Β, καθώς και της τελικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον υπολογισμό του παράγοντα μετατροπής αέριας μάζας (M) έχει αναπτυχθεί από τους King, DL, Boyson WE, Kratochvil JE [62] μια εμπειρική Εξίσωση συναρτήσει της τιμής της αέριας μάζας (AM), ως εξής :

$$M = \sum_0^4 a_i (AM)^i \quad (2.2.15)$$

Για αέρια $AM=1,5$ που αφορά στις συνθήκες αναφοράς εργαστηρίου και η οποία αντιστοιχεί σε υψόμετρο μηδέν ($A=0m$), η τιμή του παράγοντα μετατροπής αέριας μάζας αντιστοιχεί με τη μονάδα ($M=M_{ref}=1$). Οι σταθεροί παράγοντες a_0 έως a_4 λαμβάνουν διαφορετική τιμή για κάθε τύπο Φ/Β, όπως αναφέρονται στον ακόλουθο Πίνακα [61-62, 64]. Η τιμή του παράγοντα M διαφοροποιείται ελάχιστα για τους διάφορους τύπους Φ/Β για ζενιθιακή γωνία κάτω των 70° , και στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε ομάδα συντελεστών από τον παραπάνω Πίνακα για όλους τους τύπους Φ/Β [64-65].

Πίνακας 2.2.2: Συντελεστές a_0 έως a_4 υπολογισμού του παράγοντα μετατροπής αέριας μάζας (M)

	Μεμβράνες πυριτίου	Μονοκρυσταλλικά	Πολυκρυσταλλικά	Άμορφα τριπλής επαφής
a0	0,93811	0,935823	0,91809	1,10044
a1	0,06219	0,054289	0,08626	-0,06142
a2	-0,01502	-0,008677	-0,02446	-0,00443
a3	0,00122	0,000527	0,00282	0,00063
a4	-0,00003	-0,000011	-0,00013	-0,00002

Γνωρίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία S_{pv} και την $S_{pv,ref}$ (συνθήκες STC), τότε μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η τιμή της διακλαδωμένης αντίστασης R_{sh} (Σχήμα 2.2.4), για $S_{pv,ref}$ να υπολογίζεται βάσει της ηλιακής ακτινοβολίας αναφοράς G_{Tref} (STC), ο συντελεστής $\tau(\theta)_n \approx 1$ (για κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας) δεν λαμβάνεται υπόψη και το $M_{ref}=1$.

$$\frac{S_{pv,ref}}{S_{pv}} = \frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} \quad \text{όπου} \quad S_{pv,ref} = M_{ref} \cdot G_{Tref} \cdot \tau(\theta)_n$$

Θερμοκρασία στην Επιφάνεια των Φ/Β Κυψελών

Προκειμένου για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των Φ/Β σε συνθήκες λειτουργίας εξωτερικού περιβάλλοντος, έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρητικές και εμπειρικές (πειραματικές) σχέσεις. Η πιο απλοποιημένη Εξίσωση υπολογισμού της θερμοκρασίας (T_{pv}) στην επιφάνεια των κρυσταλλικών Φ/Β πυριτίου, είναι συναρτήσεως της θερμοκρασίας του αέρα (T_{air}) και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G_T), που ουσιαστικά είναι και οι βασικές παράμετροι που επιδρούν στην τιμή της θερμοκρασίας, αν θεωρήσουμε αμελητέα την επίδραση του ανέμου (v_w). Η Εξίσωση Ross υπολογίζει με αρκετή ακρίβεια τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αέρα και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας [66]:

$$T_{pv} = T_{air} + k \cdot G_T \quad (2.2.16)$$

όπου, T_{pv} είναι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του Φ/Β, T_{air} η θερμοκρασία του αέρα, k είναι ο συντελεστής Ross ($K.m^2/W$) και G_T , η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2).

Σε αυτήν τη γραμμική Εξίσωση, η οποία ισχύει για λειτουργία χωρίς ηλεκτρικό φορτίο και χωρίς άνεμο, η παράμετρος k (γνωστή ως συντελεστής Ross), εκφράζει το λόγο της διαφοράς θερμοκρασίας Φ/Β και αέρα προς την ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή: $k = (T_{pv} - T_{air}) / G_T$.

Ο συντελεστής Ross λαμβάνει συνήθως τιμές $k \approx 0,02 \pm 0,04$ ($K.m^2/W$) [67-68]. Ωστόσο από νεώτερη μελέτη με ανάλυση σε διάφορες περιπτώσεις τοποθέτησης Φ/Β, καθώς και τη δυνατότητα ή μη αερισμού της επιφάνειάς τους, στον Πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι ενδεικτικές τιμές του συντελεστή Ross ανά περίπτωση [69].

Πίνακας 2.2.3: Συντελεστής k (παράμετρος Ross) ($K.m^2/W$)

Τύπος Φ/Β - θέση εγκατάστασης	k ($K.m^2/W$)
Ψυχόμενη επιφάνεια	0,020
Επιφάνεια ελεύθερα τοποθετημένη (free standing)	0,021
Επιφάνεια οριζόντια πάνω σε δώμα	0,026
Επιφάνεια ενσωματωμένη	0,054
Επιφάνεια πάνω σε κεκλιμένη στέγη	0,056

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας T_{pv} του Φ/Β έχουν αναπτυχθεί αρκετές αναλυτικές σχέσεις, που περιλαμβάνουν και άλλες κλιματικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα του ανέμου, και έχουν τη μορφή της εμπειρικής Εξίσωσης 2.2.17[70], ή της θεωρητικής Εξίσωσης 2.2.18[49].

$$T_{pv} = x_1 + x_2 \cdot G_T + x_3 T_{air} - x_4 \cdot v_w \quad (2.2.17)$$

όπου, T_{pv} είναι η θερμοκρασία στην επιφάνεια του Φ/Β ($^{\circ}C$), T_{air} η θερμοκρασία του αέρα, G_T η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) στην επιφάνεια του Φ/Β, v_w , η ταχύτητα του ανέμου (m/sec) και x_1, x_2, x_3, x_4 , οι αντίστοιχοι σταθεροί συντελεστές ανά παράμετρο με μονάδες x_1 σε ($^{\circ}C$), x_2 σε ($K.m^2/W$), x_3 αδιάστατος, x_4 σε ($^{\circ}C/m/sec$).

$$T_{pv} = T_a + \frac{x_1}{x_3 + x_4 \cdot v_w} k \cdot G_T \quad (2.2.18)$$

Η διακύμανση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των Φ/Β εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα της περιοχής (T_{air} , in $^{\circ}C$) και λιγότερο από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G , in W/m^2) και την ταχύτητα του ανέμου (v , in m/sec).

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ (P_m) ενός Φ/Β μπορεί να περιγραφεί και από την επίδρασή της θερμοκρασίας στην ένταση και την τάση του Φ/Β. Η μέγιστη ισχύς υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση :

$$P_m = FF \cdot (V_{oc} \cdot I_{sc}) = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2.2.19)$$

όπου (FF) είναι ο συντελεστής πλήρωσης, (P_m) η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς, (I_{sc}) το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, (V_{oc}) η τάση ανοικτοκυκλώσεως, (I_{mp}) το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος και (V_{mp}) η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Η τάση ρεύματος ανοικτοκυκλώσεως (V_{oc}) και ο συντελεστής πλήρωσης (FF) μειώνονται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασία στην επιφάνια των Φ/Β (T_{pv}), ενώ το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση[71].

Απόδοση Φ/Β Κυψελών

Η ενεργειακή απόδοση (η_{pv}) των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος αποκλίνει από την ονομαστική απόδοση που δίνει ο κατασκευαστής για STC, κυρίως λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας των Φ/Β (T_{pv}). Η ενεργειακή απόδοση (βαθμός απόδοσης) των Φ/Β μπορεί να περιγραφεί με την ακόλουθη θεωρητική γραμμική Εξίσωση για διαφορετικές κλιματικές συνθήκες [72-73]:

$$\eta_{pv} = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_T] \quad (2.2.20)$$

όπου, η_{Tref} είναι ο ονομαστικό βαθμός απόδοσης των Φ/Β για θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} (ή αλλιώς βαθμός απόδοσης για θερμοκρασία αναφοράς - STC, η οποία είναι συνήθως 25°C) όπως εφαρμόζονται βάσει προτύπου και δίνονται από τον κατασκευαστή για STC και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας G_T κάθετα στην επιφάνεια των Φ/Β (για συνθήκες εργαστηρίου είναι 1000W/m²)[74].

Ο συντελεστής θερμοκρασίας (β_{ref}) και ο συντελεστής ηλιακής ακτινοβολίας (γ), είναι οι βασικές ιδιότητες των Φ/Β και λαμβάνουν συνήθως τιμές περίπου 0,004K⁻¹ και 0,12 αντίστοιχα για Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου [75]. Ο συντελεστής ηλιακής ακτινοβολίας (γ) θεωρείται συνήθως μηδενικός [73] και η ως άνω Εξίσωση, για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης Φ/Β, απλοποιείται στη θεωρητική γραμμική Εξίσωση των Evans D.L. και Florschuetz L.W.[73] ως εξής:

$$\eta_{pv} = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})] \quad (2.2.21)$$

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης των Φ/Β (η_{ref}) καθώς και η θερμοκρασία αναφοράς (T_{ref}), τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής, μπορούν να λαμβάνουν περισσότερες από μία τιμές, όπως και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολία G_T , ανάλογα με τις επιλεγείσες συνθήκες δοκιμών στο εργαστήριο και σύμφωνα πάντα με το ισχύον πρότυπο. Επίσης, η τιμή του συντελεστή θερμοκρασίας (β_{ref}), εξαρτάται από το υλικό των Φ/Β καθώς και από τη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} , και υπολογίζεται από την Εξίσωση :

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_o - T_{ref}} \quad (2.2.22)$$

όπου T_o είναι η μέγιστη τιμή θερμοκρασίας των Φ/Β που θεωρητικά η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β (η_{pv}) μηδενίζεται και η θερμοκρασία αυτή εκτιμάται περίπου στους 270°C για τα κρυσταλλικά Φ/Β πυριτίου [76-77]. Ο συντελεστή θερμοκρασίας που δίνει ο κατασκευαστής (β_{ref}) λαμβάνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με την τεχνολογία των Φ/Β, όπως φαίνεται στον

Πίνακα που ακολουθεί, όπου δίνονται ενδεικτικές τιμές για θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$ και για διάφορους τύπους Φ/Β πυριτίου, κρυσταλλικά, άμορφα και υβριδικά (PV/T).

Πίνακας 2.2.4: Συντελεστής θερμοκρασίας β_{ref} για κρυσταλλικά Φ/Β

Τεχνολογία Φ/Β	η_{Tref}	β_{ref} (για $T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$)	Αναφορές
Μονοκρυσταλλικά πυριτίου (Si)	0,11±0,15	0.0035±0,006 τυπική τιμή 0,0038	[73, 78-88]
Πολυκρυσταλλικά πυριτίου (Si)	0,105±0,145	0,0038±0,0063 τυπική τιμή 0,0042	[78, 81-88]
Άμορφα πυριτίου (Si)	0,05±0,07	0,001±0,0025	[78, 81-83,87]
Υβριδικά κρυσταλλικά PV/T πυριτίου (Si)	0,10±0,15 0,127	0,0035±0,0041 0,006±0,0063	[89,90] [91,92]

Ωστόσο η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β μπορεί να μειωθεί δραστικά με τις επικαθίσεις στερεών ή υγρών ρύπων (σκόνη, ξηρό έδαφος, υγρασία κλπ). Οι επικαθίσεις ρύπων είναι επίσης μια παράμετρος που επηρεάζει την πραγματική ενεργειακή απόδοση ΦΒ σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και κατά συνέπεια την ισχύ εξόδου. Σύμφωνα με μετρήσεις πριν και μετά από βροχή, δείχνουν ότι μια σκονισμένη φωτοβολταϊκή επιφάνεια (ξηρή σκόνη) μειώνει την ισχύ εξόδου (P_{out}) των Φ/Β κατά περίπου 14%±15% για κρυσταλλικά Φ/Β πυριτίου και 1% για Φ/Β άμορφου πυριτίου, ενώ μια σκονισμένη φωτοβολταϊκή επιφάνεια με υγρασία μειώνει την ισχύ εξόδου κατά 44%±49% για κρυσταλλικά και 20% άμορφα Φ/Β αντίστοιχα [93]. Η ισχύς εξόδου (P_{out}) διαφοροποιείται ανάλογα με τη μάζα και τον τύπο των ρύπων (επικαθίσεις) και θα μπορούσε να μειωθεί ακόμα και 25% της αναμενόμενης τιμής ισχύος [94].

Για τον προσδιορισμό της πραγματικής απόδοσης των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και την ποσοτικοποίηση της απόκλισης από τη θεωρητική ενεργειακή απόδοση έχουν αναπτυχθεί αρκετά εμπειρικά μοντέλα βάσει πειραματικών μετρήσεων, τα οποία συσχετίζουν τις θεωρητικές τιμές των τεχνικών παραμέτρων (χαρακτηριστικών) των Φ/Β σε σχέση με τις μετρούμενες πειραματικές τιμές [87,95]. Μία από τις εμπειρικές αυτές σχέσεις, των Durisch W, Bitnar B, Mayor J, Kiess H, Lam K and Close J.[87], υπολογίζει τον βαθμό απόδοσης συναρτήσει αδιάστατων παραμέτρων, σύμφωνα με την ακόλουθη Εξίσωση :

$$\eta_{pv} = p \cdot [q \cdot \frac{G_T}{G_{Tref}} + (\frac{G_T}{G_{Tref}})^m] \cdot [1 + r \cdot \frac{T_{pv}}{T_{ref}} + s \frac{AM}{AM_o} + (\frac{AM}{AM_o})^u] \quad (2.2.23)$$

όπου, $G_{Tref} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$, $AM_o = 1,5$, για STC, ενώ p , q , m , r , s και u είναι οι συντελεστές των αδιάστατων παραμέτρων και δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα όπως προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων. Το k είναι ο συντελεστής Ross ($\text{K.m}^2/\text{W}$) (Εξίσωση 2.2.16).

Πίνακας 2.2.5: Συντελεστές αδιάστατων παραμέτρων της εμπειρικής Εξίσωσης Durisch W, Bitnar B, Mayor J, Kiess H, Lam K and Close J.[87]

Τύπος Φ/Β	p	q	m	r	s	u	k	$\Delta\eta_{stc}(\%)$
mono-Si	23,62	-0,2983	0,1912	-0,09307	-0,9795	0,9865	0,028	-7,2
poly-Si	15,39	-0,1770	0,0794	-0,09736	-0,8998	0,9324	0,026	-10,4
a-Si	36,02	-0,7576	0,6601	-0,02863	-1,1432	1,0322	0,022	-3,3

Στον Πίνακα 2.2.5 δίνεται και η ποσοστιαία απόκλιση $\Delta\eta_{STC}$ (%) της απόδοσης η_{STC} των Φ/Β, σε σχέση με την τιμή της απόδοσης όπως προέκυψε από τις μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον για παρόμοιες συνθήκες με αυτές του εργαστηρίου πιστοποίησης[87].

Ωστόσο, επειδή η θερμοκρασία του Φ/Β είναι δύσκολο να μετρηθεί, ο πραγματικός βαθμός απόδοση των Φ/Β μπορεί να υπολογιστεί και από την ακόλουθη Εξίσωση, όπου ο δείκτης (NOCT – Nominal Operating Cell Temperature) αφορά τις συνθήκες που αντιστοιχούν στη Θερμοκρασία Ονομαστικής Λειτουργίας του Φ/Β.

$$\eta_{pv} = \eta_{Tref} \cdot \left\{ 1 - \beta_{ref} \cdot [T_{air} - T_{ref} + (T_{NOCT} - T_{air}) \cdot \frac{G_T}{G_{NOCT}}] \right\} \quad (2.2.24)$$

Ηλεκτρική Ισχύς Φ/Β Κυψελών

Όσον αφορά στην πραγματική ισχύς εξόδου των Φ/Β ($P_{pv}=P_{out}$) σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος διαφοροποιείται σημαντικά σε σχέση με την ονομαστική ισχύ (P_m) του κατασκευαστή σε συνθήκες εργαστηρίου (STC). Η αναμενόμενη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να εκτιμηθεί λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση 2.2.4 και την Εξίσωση 2.2.21, από την ακόλουθη εμπειρική Εξίσωση που χρησιμοποιείται συχνά στην ίδια ή παρόμοια μορφή σε διάφορα πειραματικά μοντέλα [60, 68, 97-100]:

$$P_{pv} = P_{out} = A_{pv} \cdot G_T \cdot \tau(\theta)_{av} \cdot \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})] \quad (2.2.25)$$

όπου A , η επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου σε m^2 , και G_T , η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στην κεκλιμένη ($\beta \neq 0$) επιφάνεια του Φ/Β σε (W/m^2) και $\tau(\theta)_{av}$ το γινόμενο της διαπερατότητας (τ) και απορροφητικότητας (α) του Φ/Β σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας. Το γινόμενο της ηλιακής ακτινοβολίας G_T και του συντελεστή $\tau(\theta)_{av}$, στη ως άνω Εξίσωση, θα μπορούσε να αντικατασταθεί με την ηλιακή ακτινοβολία (S_{pv}) που υπολογίζεται αναλυτικά από την Εξίσωση 2.2.14, στην περίπτωση που είναι γνωστή (από μέτρηση ή εκτίμηση) η άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην Φ/Β επιφάνεια.

Στο πλαίσιο του προγράμματος «Photovoltaics for Utility Scale Applications (PVUSA)» που χρηματοδοτήθηκε από το U.S. Department of Energy (DOE) και την California Energy Commission (CEC), αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία με σταθερές συνθήκες δοκιμών PTC-PVUSA, οι οποίες είναι: ηλιακή ακτινοβολία $G_{Tref}=1000 W/m^2$, θερμοκρασία αέρα $T_{air}=20^\circ C$ και ταχύτητα ανέμου $v_w = 1 m/s$, για την αξιολόγηση / ταξινόμηση Φ/Β [101-105]. Αυτές οι συνθήκες δοκιμών υιοθετήθηκαν και από διάφορα Ερευνητικά Ιδρύματα και Κατασκευαστές Φ/Β, προκειμένου για την αξιολόγηση των Φ/Β τους [103-104, 106-107]. Η μεθοδολογία PVUSA αξιολογεί την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, για τουλάχιστον 30 ημέρες, καταγράφοντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία αέρα και την ταχύτητα του ανέμου [103-104, 105]. Η πολλαπλής πολυωνυμικής προσαρμογής εμπειρική Εξίσωση της μεθοδολογίας PVUSA, είναι η ακόλουθη:

$$P_{pv} = P_{out} = a \cdot G_T + b \cdot G_T^2 + c \cdot G_T \cdot v_w + d \cdot G_T \cdot T_{air} \quad (2.2.26)$$

όπου: P_{pv} είναι η ισχύς εξόδου σε watt; G_T είναι η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του Φ/Β σε (W/m^2), T_{air} είναι η θερμοκρασία αέρα σε ($^\circ C$), v_w είναι η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s) σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος, ενώ a , b , c και d είναι οι σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης που προκύπτουν ανάλογα με την τεχνολογία του Φ/Β, όπως ενδεικτικά δίνονται στον Πίνακα 2.2.6. Η ως άνω Εξίσωση ισχύει για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας άνω των $500 W/m^2$ [102].

Πίνακας 2.2.6: Συντελεστές παραμέτρων της πολυωνυμικής Εξίσωσης PVUSA [101-102]

Τύπος Φ/Β	a	b	c	D
a-Si	1,086173	-0,0001	-0,004013	-0,000536
a-Si/m-Si	1,040356	-0,00007	-0,006183	-0,000382
p-Si	1,067719	-0,000101	-0,007125	-0,000741
m-Si	1,217484	-0,00015	-0,008734	-0,000185
CIGS	1,157784	-0,000102	-0,009599	0,00003
CdTe	1,204361	-0,000181	-0,006742	-0,000467

Μια πιο απλοποιημένη μεθοδολογία που προτείνεται στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου, παρόμοια με αυτή της PVUSA και άλλες σχετικές μεθοδολογίες, είναι των C.L.A Dias, D.A.C. Branco, M.C. Arouca και L.F.L Legey[101], η οποία, περιγράφεται από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$\frac{P_{out}}{P_{ref}} = a \cdot G_T + b \cdot \left(\frac{G_T}{T_{air}}\right)^2 + c \cdot G_T \cdot T_{air} \quad (2.2.27)$$

όπου: P_{out} είναι η ισχύς εξόδου σε Watts; G_T είναι η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του Φ/Β σε (W/m^2), T_{air} είναι η θερμοκρασία αέρα σε ($^{\circ}C$), ενώ a, b, και c είναι σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης για τις διάφορες τεχνολογίες Φ/Β, όπου ενδεικτικά δίνονται στον Πίνακα 2.2.7 [101]. Η ως άνω Εξίσωση ισχύει επίσης για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας άνω των $500 W/m^2$ [102].

Πίνακας 2.2.7: Συντελεστές παραμέτρων της πολυωνυμικής Εξίσωσης 2.2.27

Τύπος Φ/Β	a	b	c
a-Si	1,071522633	-0,05205	-0,005
a-Si/m-Si	1,114469868	-0,05776	-0,00892
p-Si	1,136686945	-0,08193	-0,00991
m-Si	1,525696716	-0,15045	-0,01843
CIGS	1,347850292	-0,0789	-0,01629
CdTe	1,438052044	-0,13361	-0,01559

Παρόμοιες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί και για άλλες τεχνολογίες Φ/Β πυριτίου, όπως για τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από τεχνολογίες Φ/Β άμορφου πυριτίου/μονοκρυσταλλικού πυριτίου (a-Si/mc-Si). Μία από αυτές έχει αναπτυχθεί, λαμβάνοντας ως βασικές παραμέτρου επίδρασης, την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πάνω στην επιφάνεια του Φ/Β, την αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες καθαρού ουρανού G_{Tc} και τη θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β. Η μεθοδολογία περιγράφεται από την ακόλουθη Εξίσωση [108]:

$$P_{out} = \beta_0 + \beta_1 \cdot G_T + \beta_2 \cdot G_{Tc} + \beta_3 \cdot T_{pv} \quad (2.2.28)$$

Μια άλλη μέθοδος - MotherPV method (Meteorological, Optical and Thermal Histories for the Energy Rating of PhotoVoltaics) που αναπτύχθηκε από την INES/CEA, χρησιμοποιεί μια αδιάστατη παράμετρο που σχετίζεται με τις συνθήκες αναφοράς του Φ/Β ως εξής [109]:

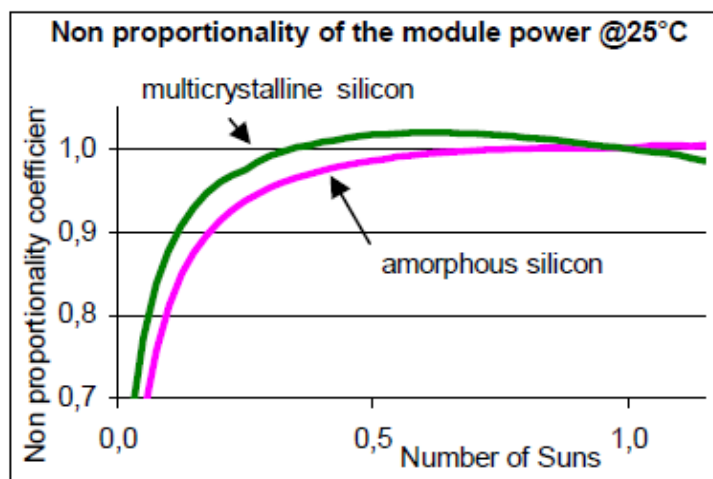
$$Coef = \frac{P_{out}}{P_{ref}} \cdot \frac{G_{Tref}}{G_T} \quad (2.2.29)$$

όπου G_T είναι η ηλιακή ακτινοβολία πάνω στην επιφάνεια του Φ/Β, G_{Tref} είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες STC, για θερμοκρασία Φ/Β $25^{\circ}C$. Ο συντελεστής αυτός (Coef)

αναφέρεται ως συγκριτικός συντελεστής απόδοσης του Φ/Β (relative efficiency) ή ως μη-αναλογικός συντελεστής του Φ/Β (non-proportionality coefficient).

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από την INES/CEA (National Solar Energy Institution of the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission) μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη Εξίσωση [109]:

$$\text{Coef} = A + B \cdot \ln(G_T) + C \cdot (G_T - 1) + D \cdot (T_{pv} - 25) \quad (2.2.30)$$



Σχήμα 2.2.12: Μη-αναλογικός συντελεστής απόδοσης [109]

Στην πράξη η τελική ωφέλιμη ισχύς εξόδου εξαρτάται από πολλές κλιματικές παραμέτρους και διάφορους αστάθμητους παράγοντες που δεν είναι πάντα εύκολο να προσδιοριστούν. Στα διάφορα στάδια ηλεκτρικής παραγωγής παρουσιάζονται απώλειες, που οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας στο Φ/Β, στη μη κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, στη σκίαση, στην επικάλυψη σκόνης και άλλων στοιχείων επί της επιφάνειας του Φ/Β, στην ανομοιόμορφη παραγωγή ενέργειας των διαφόρων πανέλων που είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους κ.λ.π., όπως πολλά από αυτά αναφέρθηκαν ήδη [69-71, 110-113]. Επίσης ενεργειακές απώλειες παρουσιάζονται κατά το στάδιο ανίχνευσης και μετατόπισης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου στο σημείο μέγιστης απόδοσης (Power Maximum Point) με απώλειες της τάξεως του 5% έως 6%, κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα με απώλειες της τάξεως από 3% έως 7% κατά μέσο όρο, καθώς και από τα καλώδια της τάξεως του 0,5% έως 1,5% [110].

Η ετήσια ποσοστιαία μείωση (υποβάθμιση) της ενεργειακής απόδοσης (Degradation Rate) είναι επίσης μια παράμετρος που αποτυπώνει τη σταδιακή γήρανση των Φ/Β. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, η μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια μείωση είναι 0,8% [30, 78-79]. Από την πιο πρόσφατη βιβλιογραφία που αναφέρεται σε δοκιμές Φ/Β εγκαταστάσεων, προκύπτει ότι η ετήσια ποσοστιαία μείωση της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β είναι κατά μέσο όρο 0,8% (0,7% για Si και 1,5% για a-Si) ανά έτος και μέση τιμή 0,5% (0,5% για Si και 1,0% για a-Si) [34]. Τα πολυκρυσταλλικά (p-Si) Φ/Β πυριτίου παρουσιάζουν χαμηλότερη ετήσια ποσοστιαία μείωση της ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά (m-Si) και κατά πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τα άμορφα (a-Si) Φ/Β πυριτίου [34]. Επίσης οι διαφορετικές κλιματικές συνθήκες παρουσιάζουν σημαντικές επιδράσεις στην ποσοστιαία ετήσια μείωση της ενεργειακής απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β, με χαμηλότερες τιμές (0,2-0,4%) στα ψυχρά κλίματα [34, 114-116] και υψηλότερες τιμές στα τροπικά κλίματα (>1,0%) [34, 116-119]. Η υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία αυξάνει τη ποσοστιαία μείωση της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β και για το λόγο αυτό, η λειτουργία τους σε τροπικά κλίματα μπορεί να μην ικανοποιεί την εγγύηση καλής λειτουργίας των 25 ετών [117-123].

Ανάλυση δεδομένων από τη διαθέσιμη διεθνή βιβλιογραφία δείχνει ότι ο δείκτης απόδοσης (Performance Ratio - PR) των Φ/Β που είναι ο λόγος της πραγματικής προς την θεωρητικά εκτιμώμενη ενεργειακή απόδοση, παρουσιάζει σταδιακή βελτίωση. Πριν το 2000 οι τυπικές τιμές του δείκτη απόδοσης ήταν περίπου στο 70%, αλλά σήμερα οι τιμές έχουν αυξηθεί και κυμαίνονται μεταξύ 80% και 90% [124].

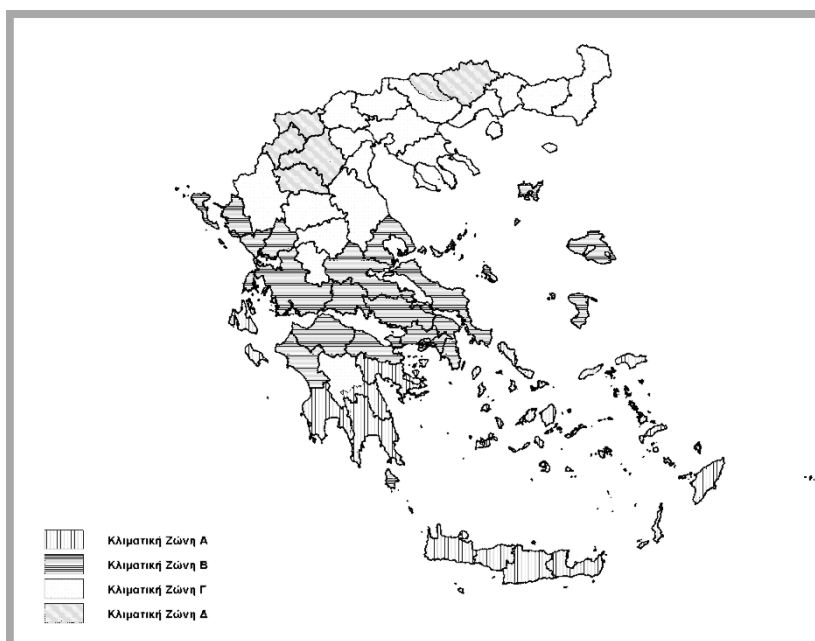
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Για την διαστασιολόγηση και εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, όπως τα ηλιοθερμικά συστήματα (ηλιακοί συλλέκτες) και τα Φ/Β, εκτός από την ηλιακή ενέργεια, είναι απαραίτητη η γνώση και άλλων κλιματικών παραμέτρων για την υπό μελέτη περιοχή της εγκατάστασης. Γενικότερα, τα κλιματικά δεδομένα, τα οποία είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς της απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος, είναι τα ακόλουθα:

- Η μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C) της περιοχής,
- Η μέση μηνιαία ειδική υγρασία (g/kg) της περιοχής,
- Η μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s) στην περιοχή,
- Η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m²/mo),
- Η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m²/mo) σε κεκλιμένο επίπεδο.

3.1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ελληνική επικράτεια διαιρείται σε τέσσερις κλιματικές ζώνες με βάση τις βαθμομέρες θέρμανσης (Degree Day), όπως ορίζεται στον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων[45,125]. Στον Πίνακα 3.1.1. [45,125] προσδιορίζονται οι νομοί που υπάγονται στις τέσσερις κλιματικές ζώνες (από τη θερμότερη στην ψυχρότερη) και ακολουθεί σχηματική απεικόνιση των παραπάνω ζωνών στο Σχήμα 3.1.1. Σε κάθε νομό, οι περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο άνω των 500 μέτρων, εντάσσονται στην επόμενη ψυχρότερη κλιματική ζώνη από εκείνη στην οποία ανήκουν σύμφωνα με τα παραπάνω. Για τη Δ ζώνη όλες οι περιοχές ανεξαρτήτως υψόμετρου περιλαμβάνονται στην ζώνη Δ. Στο τμήμα του νομού Αρκαδίας που εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Γ και στο τμήμα του νομού Σερρών (ΒΑ τμήμα) που εντάσσεται στην κλιματική ζώνη Δ, περιλαμβάνονται όλες οι περιοχές που έχουν υψόμετρο άνω των 500 μέτρων.



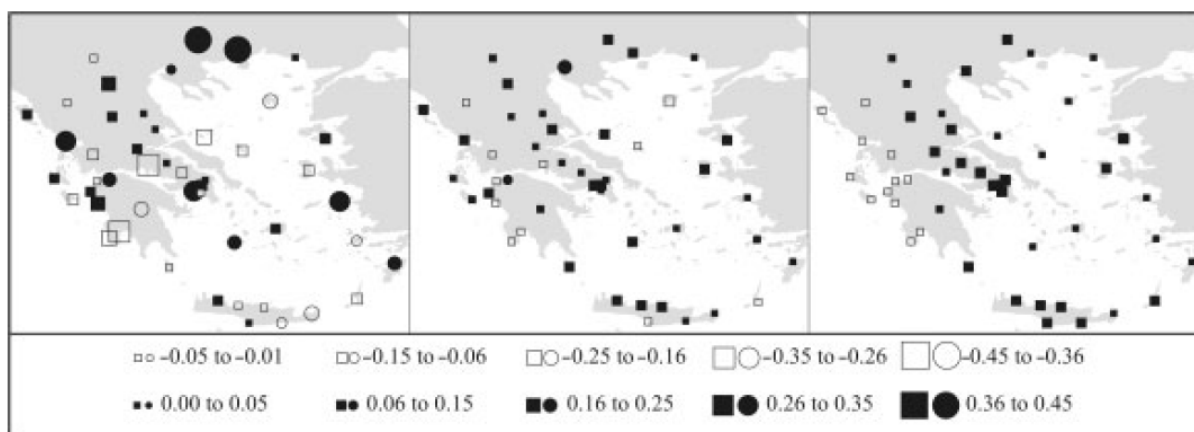
Σχήμα 3.1.1: Σχηματική απεικόνιση των κλιματικών ζωνών της ελληνικής επικράτειας

Πίνακας 3.1.1: Διαχωρισμός της ελληνικής επικράτειας σε κλιματικές ζώνες κατά νομούς

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ	ΝΟΜΟΙ
ΖΩΝΗ Α	Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας & Ιθάκης, Κύθηρα & νησιά Σαρωνικού (Αττικής), Αρκαδίας (πεδινή).
ΖΩΝΗ Β	Αττικής (εκτός Κυθήρων & νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Λευκάδας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας.
ΖΩΝΗ Γ	Αρκαδίας (ορεινή), Ευρυτανίας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Πιερίας, Ημαθίας, Πέλλας, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου.
ΖΩΝΗ Δ	Γρεβενών, Κοζάνης, Καστοριάς, Φλώρινας, Σερρών (ΒΑ τμήμα), Δράμας.

Τα κλιματικά δεδομένα σε όλες τις περιοχές του πλανήτη παρουσιάζουν αλλαγές στο πέρασμα του χρόνου, όπου τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρούνται κάποιες τάσεις αλλαγής, κυρίως λόγω του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, όπως για παράδειγμα είναι και η θερμοκρασία του αέρα, η βασική παράμετρος που διαμορφώνει τις κλιματικές περιοχές / ζώνες μιας χώρας. Στο πλαίσιο αυτό διεξάγονται πολλές μελέτες με στόχο την ανίχνευση αποκλίσεων κλιματικών σειρών. Οι αναλύσεις αυτές βασίζονται στην ομογενοποίηση μετεωρολογικών μετρήσεων. Στην πράξη, πάντα υπάρχουν ανομοιογένειες καθώς οι μετεωρολογικοί σταθμοί και τα δίκτυα αλλάζουν διαρκώς.

Στο Σχήμα 3.1.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μελέτης για την εκτίμηση των θερμοκρασιακών τάσεων στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, όπου εφαρμόστηκαν δύο μέθοδοι ομοιογένειας δεδομένων, MASH και Climatol, σε δεδομένα 49 μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ[126]. Οι πιο έντονες εποχιακές τάσεις καταγράφηκαν το καλοκαίρι. Οι απόλυτες τιμές θερμοκρασιακών διαφορών κυμαίνονταν από 0,0 έως 0,8 ° C για τη μέθοδο MASH και από 0,0 έως 1,0 ° C για τη μέθοδο Climatol.



Σχήμα 3.1.2: Μέσες ετήσιες θερμοκρασιακές τάσεις (°C / δεκαετία), για την περίοδο 1960-2004. Τα ακατέργαστα δεδομένα απεικονίζονται αριστερά, τα ομογενοποιημένα με MASH στη μέση, και τα που ομογενοποιημένα με Climatol στα δεξιά. Οι κύκλοι απεικονίζουν στατιστικά σημαντικές τάσεις (περίπου 95%) και τα ορθογώνια μη σημαντικές τάσεις

3.2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα όπως ήδη αναφέρθηκε είναι ιδιαίτερα υψηλό και κυμαίνεται στις διαφορές περιοχές από 1.400÷1.800 (kWh/m²/yr) ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο. Οι τιμές της ηλιακής ενέργειας έχουν προκύψει από μετρήσεις της Εθνική Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, για μεγάλες χρονικές περιόδους που πλέον υπερβαίνουν τα 40 χρόνια για αρκετές περιοχές. Οι μετρήσεις αυτές στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αντιπροσωπευτικές και για άλλες περιοχές που βρίσκονται κοντά στους σταθμούς μέτρησης της ΕΜΥ και οι οποίες διαθέτουν παρόμοιο μικροκλίμα και γεωλογικό ανάγλυφο. Για παράδειγμα, ένας ορεινός όγκος που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά μιας περιοχής, μπορεί να περιορίζει σημαντικά τον πρωινό ηλιασμό της περιοχής και κατά συνέπεια την ημερήσια, μηνιαία και ετήσια ηλιακή διαθέσιμη ενέργεια. Για το λόγο αυτό, σε κάθε μελέτη ηλιακών εφαρμογών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ιδιαιτερότητες της περιοχής (φυσικά εμπόδια, μικροκλίμα, τεχνητά εμπόδια κ.λ.π.), για τον προσδιορισμό της ηλιακής ενέργειας.

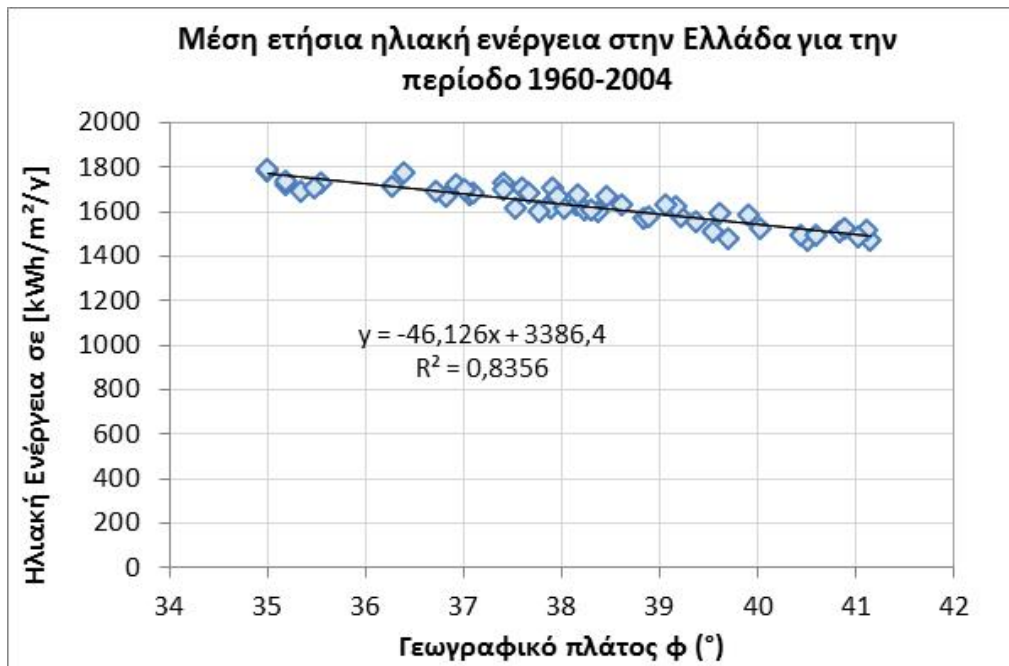
Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προσδιοριστεί με αρκετή ακρίβεια στη διάρκεια μιας ημέρας του χρόνου, τόσο κατά τις αίθριες μέρες, όσο και τις ημέρες με νέφωση (διάχυτη ακτινοβολία). Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει τη μέγιστη ένταση της (W/m²) κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεσημεριού (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά τη χειμερινή περίοδο. Στην Ελλάδα η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο, λόγω της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας, της μείωσης των νεφώσεων, αλλά και της θέσης του ήλιου, λόγω της οποίας η ακτινοβολία προσπίπτει υπό μικρότερη ζενίθια γωνία στα πλάτη του βορείου ημισφαιρίου.

3.2.1. Μέση Μηνιαία Ηλιακή Ενέργεια

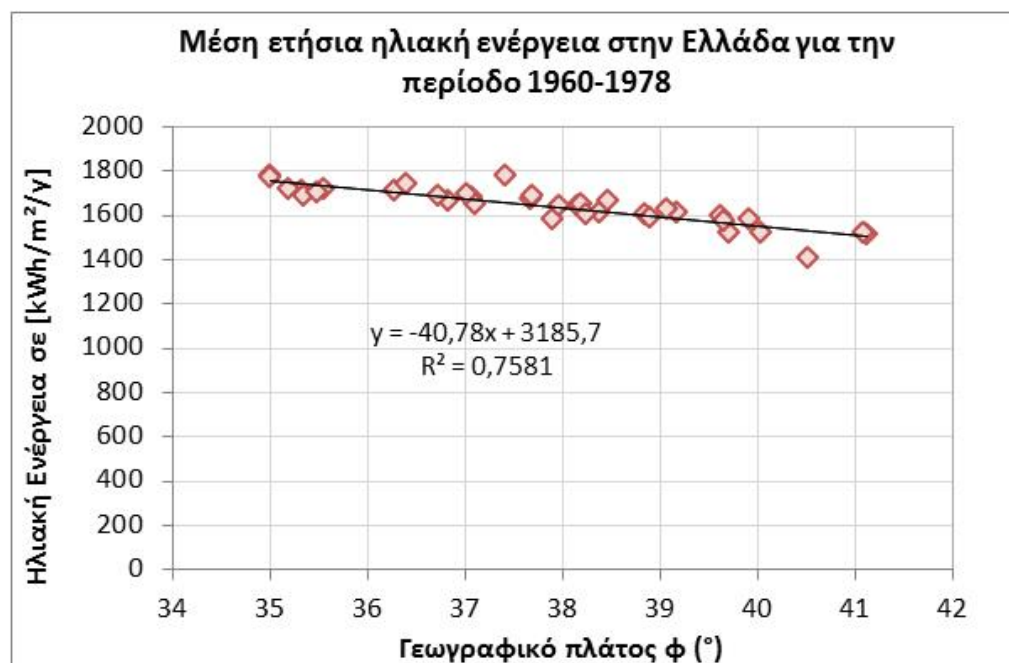
Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε κεκλιμένη ή/και περιστρεφόμενη επιφάνεια, είναι απαραίτητη η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Στην Ελλάδα οι σταθμοί της ΕΜΥ (Πίνακας Α.1 του Παραρτήματος Α) καταγράφουν εδώ και αρκετά χρόνια, κυρίως τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα του έτους (hr/day), αλλά και σε αρκετές περιπτώσεις την ολική ηλιακή ενέργεια (kWh/m²), στις διάφορες περιοχές της χώρας μας. Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών έχουν επιλεγεί ώστε να διεξάγονται αξιόπιστες μετρήσεις, χωρίς να επηρεάζονται από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια και τεχνικά φαινόμενα που να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα.

Στον Πίνακα Α.2 του Παραρτήματος Α, δίνονται οι τιμές της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, για διάφορες περιοχές της Ελλάδος. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (hrs/mo) με χρονική διάρκεια τουλάχιστον πάνω από 30 έτη για τις περισσότερες περιοχές, οι οποίες παραχωρήθηκαν από την ΕΜΥ, καθώς και από υπολογισμούς που έγιναν βάσει εμπειρικών σχέσεων [127-130], όπως ισχύουν για τις Ελληνικές περιοχές, αλλά και παλαιότερα δεδομένα ηλιακής ενέργειας τα οποία έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικές εργασίες και συνέδρια [44-45,127, 130-133].

Στο Σχήμα 3.2.1 απεικονίζεται η διακύμανση της μέσης ετήσια ηλιακής ενέργειας σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος των ελληνικών περιοχών, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς και τις διαθέσιμες μετρήσεις των ωρών ηλιοφάνειας και της ηλιακής ενέργειας, για την περίοδο 1960 έως 2004. Επισημαίνεται ότι οι τιμές της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας για την περίοδο 1960 έως 2004, παρουσιάζει μια μικρή αύξηση της τάξεως του 0,5% έως 2,5% για ορισμένες Ελληνικές περιοχές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για την περίοδο 1960 έως 1978 (Σχήμα 3.2.2, [44,131,133]).



Σχήμα 3.2.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, στις Ελληνικές περιοχές, 1960-2004



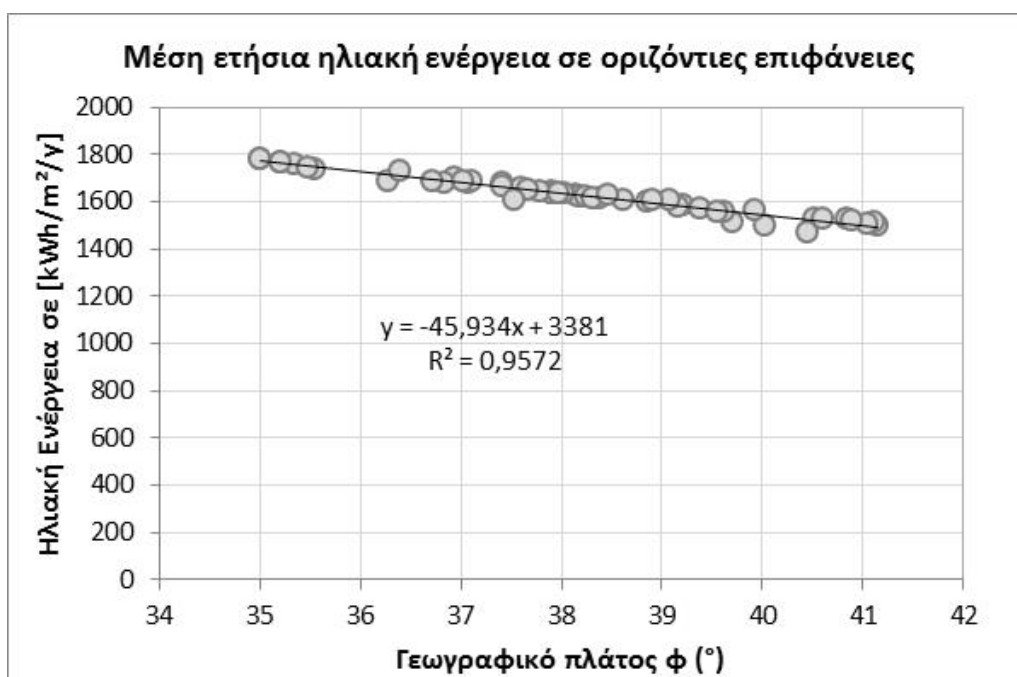
Σχήμα 3.2.2: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, στις Ελληνικές περιοχές, για την περίοδο 1960-1978

Λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις της ΕΜΥ για την ηλιακή ενέργεια στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) και γεωγραφικό μήκος (L) της περιοχής, το υψόμετρο (A) του σταθμού μέτρησης, προέκυψε η ακόλουθη Εξίσωση, η οποία υπολογίζει τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια ($kWh/m^2/yr$), η οποία αναμένεται να προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στις περιοχές αυτές ετησίως, με αρκετά καλή ακρίβεια ($R^2=0,859$).

$$H_0 = 3233 (\pm 134,5) - 44 (\pm 2,7) * \phi + 4 (\pm 2,5) * L - 0,08 (\pm 0,03) * A \quad \text{με } R^2=0,86 \quad (3.2.1)$$

Η μοντελοποίηση της Εξίσωσης έγινε σε συνάρτηση των αναφερόμενων παραμέτρων, ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της αναμενόμενης μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο, για όλες τις Ελληνικές περιοχές. Από την ανάλυση των δεδομένων για την ως άνω μοντελοποίηση και τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προέκυψε ότι το γεωγραφικό πλάτος ϕ είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει τη μεταβολή της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιες επιφάνειες με $BETA = -0,876$, ενώ το υψόμετρο A με $BETA = -0,149$ και το γεωγραφικό μήκος L με $BETA = 0,085$ επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό την αναμενόμενη μέση ετήσια προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια. Το συνολικό τυπικό σφάλμα της Εξίσωσης 3.2.1 είναι $32,7 \text{ kWh/m}^2/\text{yr}$.

Στο Σχήμα 3.2.3 απεικονίζεται η διακύμανση της αναμενόμενης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , όπως προκύπτει από την Εξίσωση 3.2.1.



Σχήμα 3.2.3: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια για οριζόντιες επιφάνειες (Εξίσωση 3.2.1)

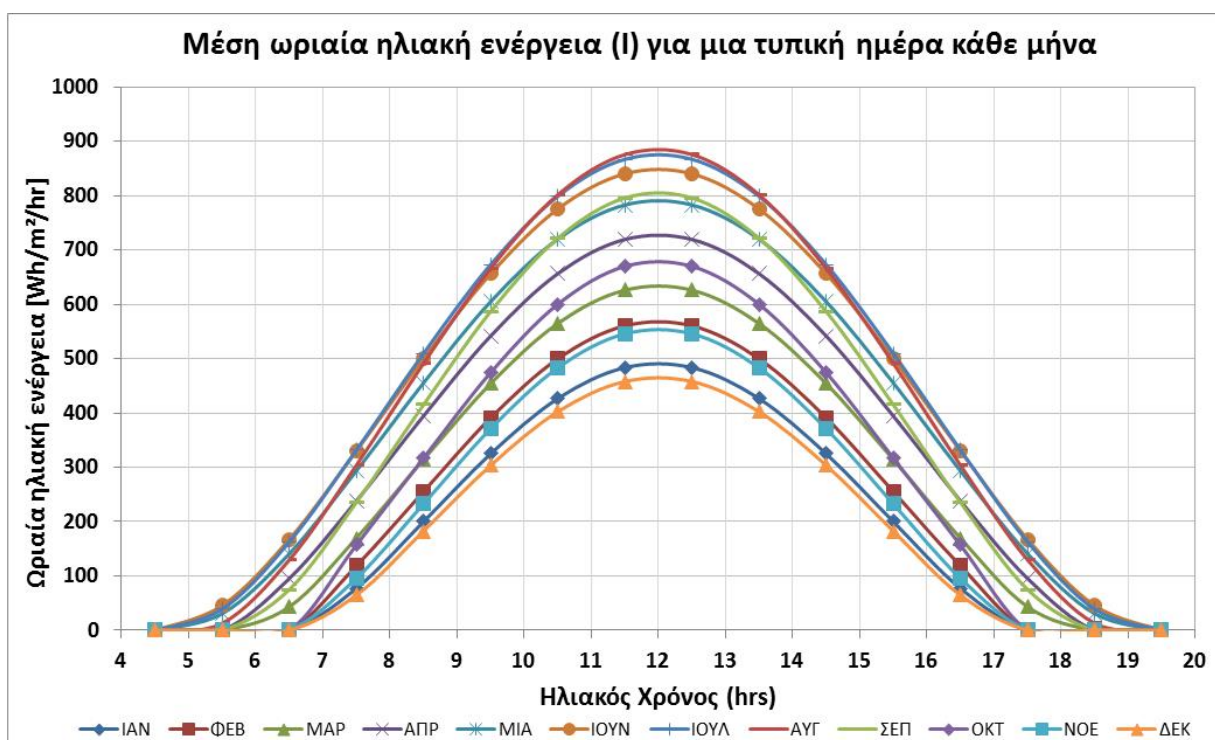
3.2.2. Μέση Μηνιαία Ωριαία Ηλιακή Ενέργεια

Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση μηνιαία ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο (H) ανά περιοχή και γεωγραφικό πλάτος, υπολογίστηκε η αντίστοιχη διάχυτη ηλιακή ενέργεια (H_d) σε οριζόντιο επίπεδο (εξίσωση 2.37) και στη συνέχεια η μέση ωριαία άμεση (I_b), διάχυτη (I_d) και ολική (I) ηλιακή ενέργεια, (μεθοδολογία Κεφαλαίου 2.1.2), η οποία προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0$) για τη μέση αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα (D) και για κάθε κλίση (β).

Στον Πίνακα 3.2.1 δίνονται ενδεικτικά οι μέσες ωριαίες τιμές της αναμενόμενης ολικής ηλιακής ενέργειας ($\text{kWh/m}^2/\text{hr}$) σε κεκλιμένο επίπεδο, για τις αντίστοιχες τυπικές / αντιπροσωπευτικές ημέρες (D) κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας και για βέλτιστη μηνιαία κλίση (β). Αντίστοιχα στο διάγραμμα του Σχήματος 3.2.4, απεικονίζεται η διακύμανση της ωριαίας ηλιακής ενέργειας (I) για κάθε τυπική ημέρα του μήνα (D) για την περιοχή της Αθήνας.

Πίνακας 3.2.1: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια (kWh/m²/hr) στο κεκλιμένο επίπεδο για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα)

Ηλιακός χρόνος (hrs)	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
4:00-5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00-6:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00-7:00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,14	0,17	0,16	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00
7:00-8:00	0,08	0,12	0,17	0,24	0,29	0,33	0,33	0,30	0,24	0,16	0,10	0,06
8:00-9:00	0,20	0,26	0,31	0,39	0,46	0,50	0,51	0,49	0,42	0,32	0,23	0,18
9:00-10:00	0,32	0,39	0,45	0,54	0,60	0,66	0,67	0,67	0,59	0,47	0,37	0,30
10:00-11:00	0,43	0,50	0,56	0,66	0,72	0,78	0,80	0,80	0,72	0,60	0,48	0,40
11:00-12:00	0,48	0,56	0,63	0,72	0,78	0,84	0,87	0,88	0,80	0,67	0,55	0,46
12:00-13:00	0,48	0,56	0,63	0,72	0,78	0,84	0,87	0,88	0,80	0,67	0,55	0,46
13:00-14:00	0,43	0,50	0,56	0,66	0,72	0,78	0,80	0,80	0,72	0,60	0,48	0,40
14:00-15:00	0,32	0,39	0,45	0,54	0,60	0,66	0,67	0,67	0,59	0,47	0,37	0,30
15:00-16:00	0,20	0,26	0,31	0,39	0,46	0,50	0,51	0,49	0,42	0,32	0,23	0,18
16:00-17:00	0,08	0,12	0,17	0,24	0,29	0,33	0,33	0,30	0,24	0,16	0,10	0,06
17:00-18:00	0,00	0,00	0,04	0,10	0,14	0,17	0,16	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00
18:00-19:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
19:00-20:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Σχήμα 3.2.4: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια (Wh/m²/hr) για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα, σε επιφάνεια με βέλτιστη κλίση, στην Αθήνα

Η ίδια ανάλυση έγινε για το σύνολο των ελληνικών περιοχών που αναφέρονται στον Πίνακα Α.2 του Παραρτήματος Α, βάσει των τιμών της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (διαθέσιμες μετρήσεις κυρίως από την ΕΜΥ) στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m²/yr), προκειμένου

να υπολογιστούν οι αντίστοιχες τιμές της ωριαίας ηλιακής ενέργειας (I) για κάθε τυπική ημέρα του μήνα (D) και για κάθε γωνία κλίση (β) της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία και έχει νότιο προσανατολισμό (γ=0).

Από την ανάλυση των τιμών της μέσης ωριαίας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο, για την τυπική ημέρα (D) κάθε μήνα, σε κάθε υπό μελέτη περιοχή, προέκυψε η εμπειρική Εξίσωση 3.2.2. Η Εξίσωση 3.2.2 μοντελοποιεί την εκτίμηση της μέσης ωριαίας ηλιακής ενέργειας (kWh/m²), για κάθε μήνα, για όλες τις Ελληνικές περιοχές, σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), και την τοπική ώρα (Ti) της ημέρας για την οποία θα υπολογιστεί η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Η επίδραση του υψομέτρου (A) της περιοχής στον υπολογισμό της τιμής της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας είναι αμελητέα.

$$I_o = x_0 + x_1 \cdot \varphi + x_2 \cdot L + x_3 \cdot Ti + x_4 \cdot Ti^2 + x_5 \cdot Ti^3 + x_6 \cdot Ti^4 \quad (3.2.2)$$

Οι σταθεροί συντελεστές (x₀ έως x₆) της Εξίσωσης 3.2.2 διαφοροποιούνται για κάθε μήνα, όπως δίνονται στον Πίνακα 3.2.2 ο οποίος αφορά την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται επίσης τα τυπικά σφάλματα των σταθερών συντελεστών και των τιμών της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που υπολογίζονται από την Εξίσωση 3.2.2, για κάθε μήνα. Οι τιμές του τυπικού σφάλματος των ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 0,0164(kWh/m²) και 0,0266(kWh/m²). Επίσης, στον ίδιο Πίνακα φαίνονται και οι τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA) για κάθε παράμετρο (ανεξάρτητες μεταβλητές) της Εξίσωσης 3.2.2.

Στον Πίνακα 3.2.3 δίνονται οι σταθεροί συντελεστές (x₀ έως x₆) για τον υπολογισμό της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m²) σε κεκλιμένο επίπεδο, με γωνία (β) που αντιστοιχεί στη βέλτιστη ηλιακή αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού. Στον ίδιο Πίνακα 3.2.3 δίνονται επίσης τα τυπικά σφάλματα των σταθερών συντελεστών και των τιμών της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που υπολογίζονται από την Εξίσωση 3.2.2, για κάθε μήνα. Οι τιμές του τυπικού σφάλματος των ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 0,0192 kWh/m² και 0,0365 kWh/m². Επίσης, δίνονται και οι τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA) για κάθε παράμετρο (ανεξάρτητες μεταβλητές) της Εξίσωσης 3.2.2.

Αντίστοιχα, στον Πίνακα 3.2.4 δίνονται οι σταθεροί συντελεστές (x₀ έως x₆) για τον υπολογισμό της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m²) στην κεκλιμένη επιφάνεια ενός Φ/Β, με γωνία (β) που αντιστοιχεί στη βέλτιστη ηλιακή αξιοποίηση από το Φ/Β. Η τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των σταθερών συντελεστών της αναλυτικής Εξίσωσης 3.2.2, βασίστηκαν στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια και στο γινόμενο των συντελεστών διαπερατότητας του γυαλιού και απορροφητικότητας της συλλεκτικής επιφάνειας (τα) όπως υπολογίστηκε από την Εξίσωση 2.2.6. Στον Πίνακα 3.2.4 δίνονται επίσης τα τυπικά σφάλματα των σταθερών συντελεστών και των τιμών της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που υπολογίζονται από την Εξίσωση 3.2.2, για κάθε μήνα. Οι τιμές του τυπικού σφάλματος των ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 0,019 kWh/m² και 0,034 kWh/m². Επίσης, δίνονται και οι τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA) για κάθε παράμετρο (ανεξάρτητες μεταβλητές) της Εξίσωσης 3.2.2.

Πίνακας 3.2.2: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (I)

Σταθεροί συντελεστές								R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ	5,02	-0,0073	-0,0018	-1,92	0,272	-0,0156	0,000313	0,98
ΦΕΒ	5,06	-0,0078	-0,0005	-1,99	0,287	-0,0166	0,000332	0,99
ΜΑΡ	4,49	-0,0097	0,0000	-1,80	0,269	-0,0158	0,000315	0,99
ΑΠΡ	2,96	-0,0110	0,0033	-1,28	0,207	-0,0124	0,000249	0,99
ΜΑΙΟΣ	2,7	-0,0108	0,0039	-1,18	0,196	-0,0119	0,000238	0,99
ΙΟΥΝ	2,5	-0,0088	0,0034	-1,16	0,195	-0,0119	0,000238	0,99
ΙΟΥΛ	2,7	-0,0079	0,0021	-1,23	0,205	-0,0125	0,000250	0,99
ΑΥΓ	2,7	-0,0079	0,0021	-1,23	0,205	-0,0125	0,000250	0,99
ΣΕΠΤ	4,55	-0,0100	0,0030	-1,91	0,292	-0,0173	0,000345	0,99
ΟΚΤ	5,8	-0,0100	0,0025	-2,31	0,336	-0,0195	0,000390	0,98
ΝΟΕΜ	5,60	-0,0102	0,0009	-2,15	0,306	-0,0176	0,000352	0,99
ΔΕΚ	5,00	-0,0077	-0,0004	-1,91	0,269	-0,0154	0,000308	0,98
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	Συνολικό
ΙΑΝ	0,07	0,0004	0,0003	0,03	0,003	0,0002	0,000004	0,017
ΦΕΒ	0,07	0,0004	0,0003	0,03	0,003	0,0002	0,000004	0,017
ΜΑΡ	0,08	0,0004	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,019
ΑΠΡ	0,09	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,022
ΜΑΙΟΣ	0,11	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000006	0,027
ΙΟΥΝ	0,11	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000005	0,025
ΙΟΥΛ	0,11	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000005	0,025
ΑΥΓ	0,11	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000005	0,025
ΣΕΠΤ	0,08	0,0004	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,019
ΟΚΤ	0,11	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000006	0,027
ΝΟΕΜ	0,08	0,0004	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,019
ΔΕΚ	0,07	0,0004	0,0003	0,02	0,003	0,0002	0,000003	0,016
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ		-0,097	-0,027	-59,8	214,1	-251,0	96,6	
ΦΕΒ		-0,082	-0,006	-49,0	178,6	-210,9	81,2	
ΜΑΡ		-0,083	0,000	-35,8	134,9	-161,3	62,1	
ΑΠΡ		-0,079	0,027	-21,6	87,9	-107,9	41,5	
ΜΑΙΟΣ		-0,073	0,029	-18,6	77,9	-96,6	37,2	
ΙΟΥΝ		-0,057	0,025	-17,5	74,2	-92,5	35,6	
ΙΟΥΛ		-0,050	0,015	-18,0	76,0	-94,5	36,4	
ΑΥΓ		-0,049	0,015	-17,6	74,4	-92,5	35,6	
ΣΕΠΤ		-0,067	0,023	-30,1	116,1	-140,0	53,9	
ΟΚΤ		-0,084	0,023	-45,3	166,2	-196,8	75,7	
ΝΟΕΜ		-0,116	0,011	-57,3	205,8	-241,6	93,0	
ΔΕΚ		-0,110	-0,007	-63,7	227,1	-265,7	102,3	

Πίνακας 3.2.3: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής), της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (I_{β}) με βέλτιστη κλίση β (μέγιστη ετήσια αξιοποίηση)

Σταθεροί συντελεστές								R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ	5,9	-0,0067	-0,0033	-2,32	0,333	-0,0192	0,000384	0,98
ΦΕΒ	5,9	-0,0071	-0,0007	-2,35	0,342	-0,0198	0,000396	0,99
ΜΑΡ	5,21	-0,0093	0,0002	-2,12	0,316	-0,0185	0,000370	0,99
ΑΠΡ	4,0	-0,0102	0,0038	-1,72	0,267	-0,0159	0,000317	0,99
ΜΑΙΟΣ	3,6	-0,0094	0,0041	-1,58	0,251	-0,0150	0,000300	0,99
ΙΟΥΝ	3,4	-0,0073	0,0034	-1,54	0,247	-0,0149	0,000297	0,99
ΙΟΥΛ	3,6	-0,0066	0,0022	-1,64	0,263	-0,0158	0,000315	0,99
ΑΥΓ	4,35	-0,0072	0,0020	-1,93	0,302	-0,0180	0,000360	1,00
ΣΕΠΤ	5,54	-0,0087	0,0039	-2,36	0,357	-0,0210	0,000420	1,00
ΟΚΤ	6,6	-0,0097	0,0040	-2,71	0,397	-0,0231	0,000462	0,98
ΝΟΕΜ	6,6	-0,0107	0,0016	-2,58	0,371	-0,0215	0,000429	0,99
ΔΕΚ	5,93	-0,0074	-0,0009	-2,32	0,333	-0,0192	0,000383	0,99
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	Συνολικό
ΙΑΝ	0,10	0,00054	0,00047	0,036	0,0046	0,00026	0,0000051	0,0238
ΦΕΒ	0,10	0,00054	0,00048	0,036	0,0047	0,00026	0,0000051	0,0239
ΜΑΡ	0,09	0,00049	0,00043	0,032	0,0042	0,00023	0,0000046	0,0216
ΑΠΡ	0,10	0,00051	0,00045	0,034	0,0044	0,00025	0,0000049	0,0228
ΜΑΙΟΣ	0,11	0,00059	0,00052	0,039	0,0051	0,00028	0,0000057	0,0263
ΙΟΥΝ	0,10	0,00053	0,00047	0,035	0,0046	0,00026	0,0000051	0,0237
ΙΟΥΛ	0,10	0,00053	0,00047	0,035	0,0046	0,00025	0,0000051	0,0235
ΑΥΓ	0,09	0,00046	0,00041	0,031	0,0040	0,00022	0,0000044	0,0204
ΣΕΠΤ	0,09	0,00046	0,00040	0,030	0,0040	0,00022	0,0000044	0,0203
ΟΚΤ	0,15	0,00082	0,00073	0,055	0,0071	0,00039	0,0000079	0,0365
ΝΟΕΜ	0,10	0,00052	0,00046	0,034	0,0045	0,00025	0,0000050	0,0230
ΔΕΚ	0,08	0,00043	0,00038	0,029	0,0037	0,00021	0,0000041	0,0192
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ		-0,06	-0,03	-51,3	185,9	-219,0	84,2	
ΦΕΒ		-0,06	-0,01	-45,2	165,9	-196,3	75,5	
ΜΑΡ		-0,07	0,00	-36,3	136,3	-162,8	62,6	
ΑΠΡ		-0,07	0,03	-26,5	104,1	-126,2	48,5	
ΜΑΙΟΣ		-0,06	0,03	-23,3	93,4	-114,1	43,9	
ΙΟΥΝ		-0,04	0,02	-21,8	88,5	-108,5	41,7	
ΙΟΥΛ		-0,04	0,01	-22,6	91,0	-111,4	42,8	
ΑΥΓ		-0,04	0,01	-25,4	100,5	-122,1	47,0	
ΣΕΠΤ		-0,05	0,03	-32,3	123,3	-148,0	56,9	
ΟΚΤ		-0,06	0,03	-42,1	155,5	-184,5	71,0	
ΝΟΕΜ		-0,09	0,01	-49,4	179,7	-211,9	81,5	
ΔΕΚ		-0,07	-0,01	-53,8	194,0	-228,1	87,8	

Πίνακας 3.2.4: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής), της Εξίσωσης 3.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη απορροφητική επιφάνεια του Φ/Β (I_{β} -τα(θ)) με βέλτιστη κλίση β (μέγιστη ετήσια αξιοποίηση)

Σταθεροί συντελεστές								R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ	5,97	-0,0063	-0,0031	-2,34	0,334	-0,0192	0,000384	0,98
ΦΕΒ	5,99	-0,0067	-0,0007	-2,39	0,346	-0,0200	0,000400	0,99
ΜΑΡ	5,66	-0,0086	0,0002	-2,29	0,337	-0,0196	0,000393	0,99
ΑΠΡ	4,80	-0,0093	0,0038	-2,03	0,307	-0,0181	0,000361	0,99
ΜΑΙΟΣ	4,0	-0,0082	0,0045	-1,76	0,275	-0,0164	0,000328	0,99
ΙΟΥΝ	4,0	-0,0082	0,0045	-1,76	0,275	-0,0164	0,000328	0,99
ΙΟΥΛ	4,0	-0,0055	0,0030	-1,82	0,287	-0,0171	0,000342	0,99
ΑΥΓ	5,11	-0,0063	0,0024	-2,23	0,341	-0,0202	0,000403	1,00
ΣΕΠΤ	6,26	-0,0079	0,0036	-2,63	0,391	-0,0229	0,000457	0,99
ΟΚΤ	6,9	-0,0089	0,0036	-2,79	0,406	-0,0235	0,000471	0,98
ΝΟΕΜ	6,65	-0,0101	0,0014	-2,61	0,374	-0,0216	0,000431	0,99
ΔΕΚ	5,96	-0,0069	-0,0009	-2,33	0,332	-0,0191	0,000382	0,98
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	Συνολικό
ΙΑΝ	0,097	0,0005	0,0005	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,023
ΦΕΒ	0,094	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,022
ΜΑΡ	0,088	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,021
ΑΠΡ	0,095	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,022
ΜΑΙΟΣ	0,115	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000006	0,027
ΙΟΥΝ	0,115	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000006	0,027
ΙΟΥΛ	0,110	0,0006	0,0005	0,04	0,005	0,0003	0,000006	0,026
ΑΥΓ	0,091	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,022
ΣΕΠΤ	0,085	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,020
ΟΚΤ	0,144	0,0008	0,0007	0,05	0,007	0,0004	0,000007	0,034
ΝΟΕΜ	0,094	0,0005	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000005	0,022
ΔΕΚ	0,080	0,0004	0,0004	0,03	0,004	0,0002	0,000004	0,019
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ		-0,06	-0,03	-54,3	195,6	-229,9	88,4	
ΦΕΒ		-0,06	-0,01	-48,3	176,0	-207,8	79,9	
ΜΑΡ		-0,06	0,00	-40,5	150,3	-178,6	68,7	
ΑΠΡ		-0,06	0,03	-32,0	122,1	-146,6	56,4	
ΜΑΙΟΣ		-0,05	0,03	-25,8	101,7	-123,5	47,5	
ΙΟΥΝ		-0,05	0,03	-24,4	96,4	-117,0	45,0	
ΙΟΥΛ		-0,03	0,02	-24,6	97,9	-119,2	45,9	
ΑΥΓ		-0,04	0,02	-29,7	114,7	-138,3	53,2	
ΣΕΠΤ		-0,05	0,02	-37,0	138,8	-165,7	63,7	
ΟΚΤ		-0,06	0,03	-45,4	166,2	-196,6	75,6	
ΝΟΕΜ		-0,08	0,01	-52,5	189,9	-223,4	86,0	
ΔΕΚ		-0,07	-0,01	-56,7	203,6	-239,0	91,9	

Μια παράμετρος που είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της σύστασης της ηλιακής ενέργειας, είναι ο συντελεστής αιθριότητας (Εξίσωση 2.1.5), ο οποίος υπολογίζεται από το λόγο της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, προς την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (I) στο όριο της ατμόσφαιρας (I_0). Ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα το είδος της νέφωση, το ποσοστό κάλυψης του ουράνιου θόλου από τη νέφωση, καθώς και τη δυνατότητα θέασης του ηλιακού δίσκου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Ο μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας κάθε μήνα διαφοροποιείται αρκετά, με τους χειμερινούς μήνες να παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές, λόγω υψηλής νέφωσης (Πίνακας Α.3, Παράρτημα Α), μεταξύ 0,37 και 0,50, σε σχέση με του θερινούς μήνες όπου οι τιμές του μέσου συντελεστή αιθριότητας κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,57 και 0,66, ανάλογα με την περιοχή, για τις Ελληνικές περιοχές. Στον Πίνακα Α.3 του Παραρτήματος Α δίνονται οι τιμές του μέσου μηνιαίου συντελεστή αιθριότητας (k_t) όπως προέκυψαν από τις σχέσεις 2.1.3 και 2.1.7 για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές, βάσει των τιμών της συνολικής τιμής ηλιακής ενέργειας ανά μήνα, όπως δίνονται στον Πίνακα Α.2. Παραρτήματος Α.

Γνωρίζοντας τον συντελεστή αιθριότητας για κάθε δεδομένη στιγμή (k_t), καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (I), από την Εξίσωση 2.1.9 μπορεί να υπολογιστεί και το ποσό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας (k_d) σε σχέση με τη συνολική. Ανάλογα τη σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη, ανακλώμενη), διαφοροποιείται και ο μέσος συντελεστής διαπερατότητας-απορροφητικότητας $\tau_a(\theta)_{av}$ του Φ/Β σε κάθε χρονική στιγμή (Εξίσωση 2.2.12), καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά φτάνει στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β (S_{pv}).

Στον Πίνακα Α.4 του Παραρτήματος Α δίνονται τιμές για τη μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και στο Πίνακα Α.5 ο μέσος μηνιαίος συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας [45,127,131].

3.2.3. Μέση Μηνιαία Ωριαία Ηλιακή Ενέργεια – Συνθήκες Καθαρού Ουρανού

Άλλος ένας τρόπος προσδιορισμού του ποσοστού άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε δεδομένη χρονική στιγμή, είναι μέσω της Εξίσωσης 2.1.10 γνωρίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Η ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες καθαρού ουρανού μπορεί να υπολογιστεί βάσει του εμπειρικού μοντέλου Hottel (Εξίσωση 2.1.12) ή και με τη χρήση των διαθέσιμων ατμοσφαιρικών μοντέλων, τα οποία βασίζονται σε μεθοδολογίες μεταφοράς ακτινοβολίας συνδυάζοντας τα δεδομένα από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες και την ηλιακή γεωμετρία[136]. Μερικά από τα πιο γνωστά ατμοσφαιρικά μοντέλα είναι το μοντέλο Solis[137], το μοντέλο Ευρωπαϊκός Ηλιακός Χάρτης (European Solar Radiation Atlas - ESRA)[138], το μοντέλο Ineichen[136,139] και το μοντέλο Reference Evaluation on Solar Transmittance 2 (REST2)[140], εκ των οποίων κάποια χρειάζονται μία μεταβλητή και άλλα πολλές μεταβλητές παραμέτρους. Επίσης υπάρχουν εργασίες βελτιστοποίησης των μοντέλων αυτών, που βασίζονται στη σύσταση της ατμόσφαιρας, το υψόμετρο της περιοχής και άλλες παραμέτρους[136,141]. Η επιλογή ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού, εξαρτάται κυρίως από τα διαθέσιμα δεδομένα για την υπό μελέτη περιοχή[136,142].

Η μέση τιμή του συντελεστή αιθριότητας (k_t) για συνθήκες καθαρού ουρανού κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,85 και 0,95 και εξαρτάται κυρίως από την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα και τη λευκαύγεια. Σε κάθε περίπτωση, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) σε συνθήκες αιθριότητας, για κάθε χρονική στιγμή, μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά με αρκετή ακρίβεια θεωρώντας έναν συντελεστή αιθριότητας $k_t=0,9$ και υπολογίζονται την ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας από την Εξίσωση 2.1.2.

3.2.4. Βέλτιστη Κλίση Επιφάνειας (β) για Μέγιστη Ετήσια Ηλιακή Αξιοποίηση

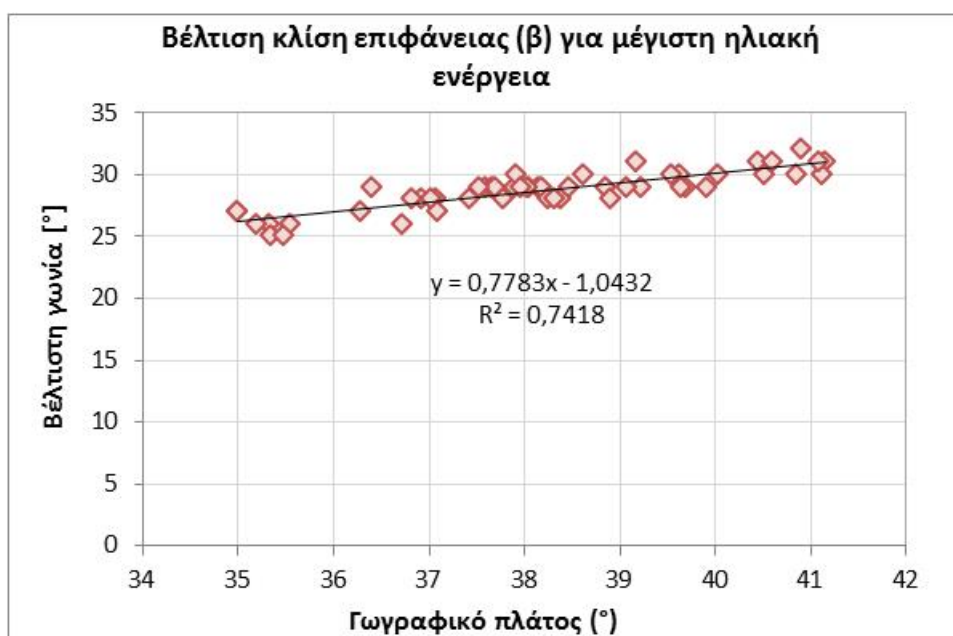
Από τον υπολογισμό της ωριαίας ηλιακής ενέργειας (I_{β}) σε κεκλιμένο επίπεδο για κάθε τυπική ημέρα του μήνα, για κάθε υπό μελέτη περιοχή που υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις και για κάθε γωνία κλίσης (β), εκτιμήθηκε η βέλτιστη κλίση (β) της επιφάνειας, ώστε να δέχεται τη μέγιστη ηλιακή ενέργεια σε ετήσια βάση. Η βέλτιστη κλίση (β) διαφοροποιείται σε περίπτωση εποχικής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.

Από τις τιμές της βέλτιστης κλίσης (β) για μέγιστη ετήσια ηλιακή αξιοποίηση που προσδιορίστηκαν από τους αναλυτικούς υπολογισμούς, προέκυψε η εμπειρική Εξίσωση 3.2.3 που υπολογίζει τη βέλτιστη κλίση (β) σε συνάρτηση της ετήσιας ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο (H_0) για κάθε ελληνική περιοχή, το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), καθώς και το υψόμετρο (A) κάθε περιοχή.

$$\beta = -43,5 (\pm 10) + 0,014 (\pm 0,003) \cdot H_0 + 1,4 (\pm 0,14) \cdot \varphi - 0,12 (\pm 0,05) \cdot L + 0,0006 (\pm 0,0007) \cdot A$$

$$\text{με } R^2=0,827$$

(3.2.3)

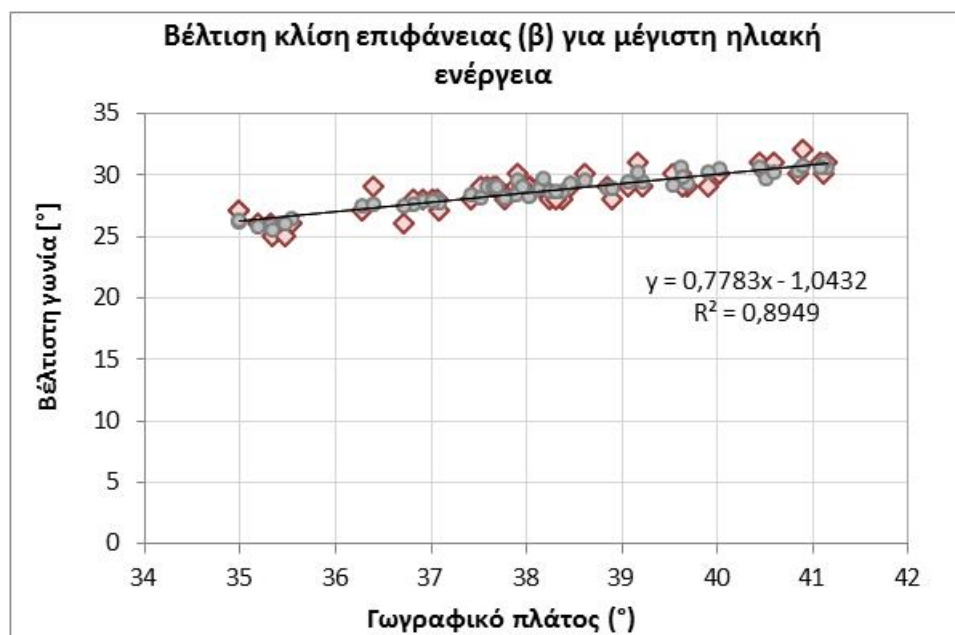


Σχήμα 3.2.5: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας για αξιοποίηση της μέγιστης ετήσιας ηλιακής ενέργειας

Στο Σχήμα 3.2.5 απεικονίζεται η βέλτιστη κλίση για ετήσια αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) κάθε περιοχής, που είναι και η κύρια παράμετρος που διαμορφώνει την τιμή της βέλτιστης κλίσης (β) με συντελεστή $BETA=1,520$, ενώ η ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο (H_0) είναι η δεύτερη σημαντική παράμετρος καθορισμού με $BETA=0,776$. Το γεωγραφικό μήκος L με $BETA=-0,156$ και το υψόμετρο A με $BETA=0,072$, επηρεάζουν σε πολύ μικρότερο βαθμό τη βέλτιστη τιμή της γωνίας κλίσης μιας επιφάνειας για μέγιστη αξιοποίηση της ετήσιας ηλιακής ενέργειας. Το συνολικό τυπικό σφάλμα της Εξίσωσης 3.2.3, είναι $0,67^\circ$.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 3.2.6 απεικονίζεται η βέλτιστη κλίση για ετήσια αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) κάθε περιοχής, όπως υπολογίστηκε από την ανάλυση ανά περιοχή (μπλε γραμμή όμοια με αυτή το Σχήματος 3.2.5), καθώς και όπως προκύπτει από την αναλυτική Εξίσωση προσέγγισης της βέλτιστης κλίσης επιφάνειας (εξίσωση 3.2.3) και φαίνεται με τη γκρι απόχρωση στο Σχήμα 3.2.6. Η δύο απεικονίσεις στο Σχήμα

παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις, καθώς η αναλυτική Εξίσωση 3.2.3 περιγράφει με αρκετά καλή ακρίβεια τον υπολογισμό της βέλτιστης κλίσης επιφάνειας για μέγιστη αξιοποίηση της προσπίπτουσας διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.



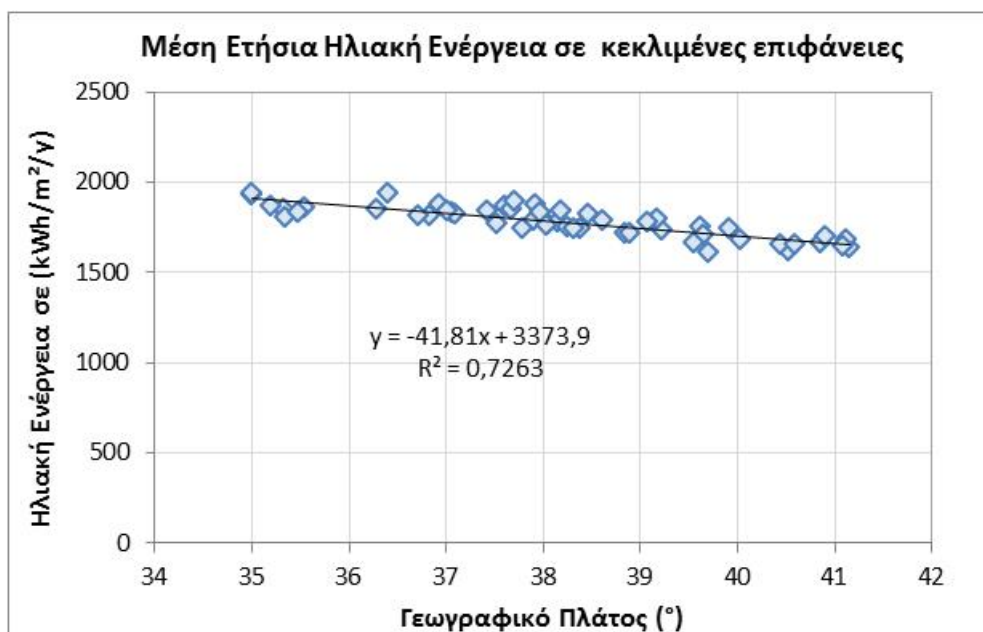
Σχήμα 3.2.6: Βέλτιστη κλίση επιφάνειας για μέγιστη ετήσια αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας, από ανάλυση μετρήσεων (κόκκινη απόχρωση), από αναλυτική Εξίσωση 3.2.2 (γκρι απόχρωση)

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση που έγινε σε ωριαία βάση για τον υπολογισμό της διακύμανσης των ωριαίων τιμών της αναμενόμενης ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες (Εξίσωση 3.2.2 και Πίνακας 3.2.4) καθώς επίσης και τη βέλτιστη κλίση εγκατάστασης Φ/Β (Εξίσωση 3.2.3), εκτιμήθηκε η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια (H_{β}) που αναμένεται να προσπίπτει ετησίως σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta \neq 0$), σε συνάρτηση με τη βέλτιστη κλίση (β), το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) και γεωγραφικό μήκος (L) της περιοχής, καθώς και το υψόμετρο (A) του σταθμού μέτρησης, και η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$H_{\beta} = 3191 (\pm 129) + 35 (\pm 5,6) \cdot \beta - 66 (\pm 5,0) \cdot \phi + 5,6 (\pm 2,5) \cdot L - 0,08 (\pm 0,03) \cdot A \quad R^2=0,87 \quad (3.2.4)$$

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην Εξίσωση δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης της αναμενόμενης μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες με βέλτιστη κλίση (β), για όλες τις Ελληνικές περιοχές. Από την ανάλυση των δεδομένων για την ως άνω μοντελοποίηση και τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προέκυψε και πάλι ότι το γεωγραφικό πλάτος ϕ είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει τη αναμενόμενη τιμή της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες με $BETA = -1,354$, τη κλίση (β) της κεκλιμένης επιφάνειας ως η δεύτερη σημαντική παράμετρος με $BETA = 0,641$, ενώ το υψόμετρο A με $BETA = -0,171$ και το γεωγραφικό μήκος L με $BETA = 0,129$ επηρεάζουν σε πολύ μικρότερο βαθμό την αναμενόμενη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες, με βέλτιστη κλίση (β). Το συνολικό τυπικό σφάλμα της Εξίσωσης 3.2.1 είναι $31,5 \text{ kWh/m}^2/\text{yr}$.

Στο Σχήμα 3.2.7 απεικονίζεται η διακύμανση της αναμενόμενης ετήσιας ηλιακής ενέργειας, σε κεκλιμένες επιφάνειες με βέλτιστη κλίση (β), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , όπως προκύπτει από την Εξίσωση 3.2.4.



Σχήμα 3.2.7: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια για κεκλιμένες επιφάνειες, με βέλτιστη κλίση (β)

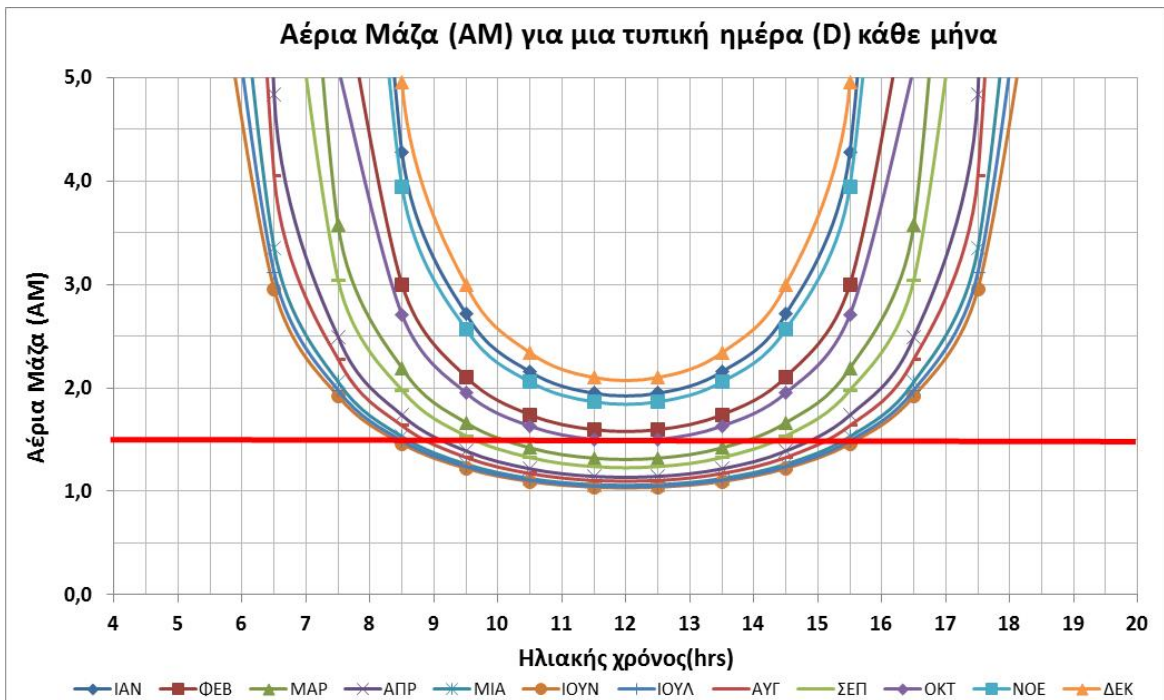
3.2.5. Παράμετροι που Επηρεάζουν τη Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια μιας Περιοχής

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει κυρίως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια μιας περιοχής είναι η αέρια μάζα (AM), όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2.1.3. Στο Σχήμα 3.2.8 απεικονίζεται η διακύμανση της τιμής της αέριας μάζας για την περιοχή της Αθήνας στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας (D) κάθε μήνα του έτους όπως προκύπτει από την Εξίσωση 2.1.29. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή της αέριας μάζας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.8 και κατά συνέπεια οι μικρότερες τιμές της AM εμφανίζονται κατά τις μεσημεριανές ώρες. Επιπλέον, όσο πιο μικρή είναι η τιμή της αέριας μάζας, τόσο μεγαλύτερη είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τη διάχυτη και το αντίστροφο.

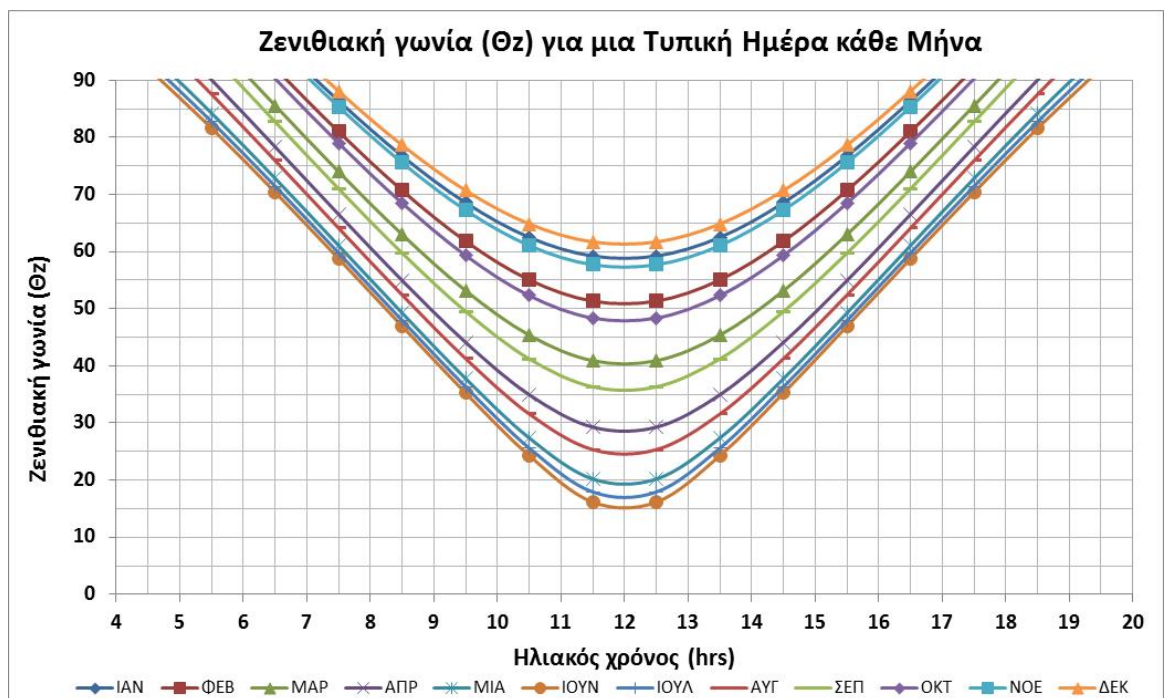
Η απόδοση ενός Φ/Β σε συνθήκες εργαστηρίου (STC), εκτιμάται για τιμή αέριας μάζας ίση με 1,5 (κόκκινη οριζόντια γραμμή Σχήματος 3.2.8). Η τιμή όμως 1,5 παρατηρείται για ορισμένο χρονικό διάστημα μέσα σε μια ημέρα και ανάλογα πάντα με την εποχή. Για παράδειγμα κατά τον μήνα Δεκέμβριο, η ελάχιστη τιμή της αέριας μάζας δεν πέφτει κάτω από το 2,1 στη διάρκεια της ημέρας για την Αθήνα (Σχήμα 3.2.8). Η διακύμανση της τιμής AM, είναι μια παράμετρος που καθορίζει τόσο τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια σε μια περιοχή, καθώς και την τελική ενεργειακή απόδοση μιας εγκατάστασης που αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια.

Η αέρια μάζα υπολογίζεται συναρτήσει της ζενιθιακής γωνίας (θ_z) του ήλιου, που ουσιαστικά είναι η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια μιας περιοχής. Όσο μικρότερη είναι η ζενιθιακή γωνία του ήλιου σε μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο Σχήμα 3.2.9 απεικονίζεται η διακύμανση της ζενιθιακής γωνίας στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας για κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας.

Οι μικρότερες τιμές της ζενιθιακής γωνίας παρουσιάζονται κατά τις μεσημεριανές ώρες, όταν δηλαδή καταγράφονται και οι μέγιστες τιμές της ηλιακής ενέργειας κάθε εποχή του έτους. Η ζενιθιακή γωνία εξαρτάται από την ωριαία γωνία (ω), την ηλιακή απόκλιση (δ) και το γεωγραφικό πλάτος (φ) μιας περιοχής.



Σχήμα 3.2.8: Μέση ωριαία ολική ηλιακή ενέργεια ($\text{kWh/m}^2/\text{hr}$) για τη μέση ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα).



Σχήμα 3.2.9: Ωριαία διακύμανση της ζενιθιακής γωνίας (θ_z) για τη μέση ημέρα κάθε μήνα (Αθήνα).

3.3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ

Πίνακας 3.3.1: Ελληνικές πόλεις με μετρήσεις της ΕΜΥ για τη διακύμανση της θερμοκρασία του αέρα

Πόλη	Περιοχή (Νομός)	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Υψόμετρο Βαρομέτρου (m)
Αθήνα (Ελληνικό)	Αττικής	37° 54'	23° 45'	15,0
Αθήνα (Ν. Φιλαδέλφεια)	Αττικής	38° 03'	23° 40'	138,0
Αργίνιο	Αιτωλοακαρνανίας	38° 37'	21° 23'	25,0
Αγχιάλος	Μαγνησίας	39° 13'	22° 48'	15,3
Αλεξανδρούπολη	Έβρου	40° 51'	25° 56'	3,5
Ανδραβίδα	Ηλείας	37° 55'	21° 17'	15,1
Άραξος	Αχαΐας	38° 09'	21° 25'	11,5
Άργος (Πυργέλα)	Αργολίδας	37° 36'	22° 47'	11,2
Αργοστόλι	Κεφαλονιάς	38° 11'	20° 30'	22,0
Άρτα	Άρτας	39° 14'	21° 00'	10,5
Ελευσίνα	Αττικής	38° 5'	23° 21'	30,0
Ζάκυνθος	Ζακύνθου	37° 47'	20° 54'	7,9
Ηράκλειο	Ηρακλείου	35° 20'	25° 11'	39,3
Θεσσαλονίκη (Μίκρα)	Θεσσαλονίκης	40° 31'	22° 58'	4,8
Ιεράπετρα	Λασιθίου	35° 00'	25° 44'	10,0
Ιωάννινα	Ιωαννίνων	39° 42'	20° 49'	484,0
Καλαμάτα	Μεσσηνίας	37° 04'	22° 00'	11,1
Καστοριά	Καστοριάς	40°27'	21° 17'	660,9
Κέρκυρα	Κερκύρας	39° 37'	19° 55'	4,0
Κοζάνη	Κοζάνης	40° 18'	21° 47'	625,0
Κύθηρα	Αττικής	36° 17'	23° 10'	316,6
Λαμία	Φθιώτιδος	38° 51'	22° 24'	17,0
Λάρισα	Λαρίσης	39° 39'	22° 27'	73,6
Λήμνος	Λέσβου	39° 55'	25° 14'	5,0
Μεθώνη	Μεσσηνίας	36° 50'	21° 42'	33,0
Μήλος	Κυκλάδων	36° 43'	24° 27'	182,0
Μυτιλήνη	Λέσβου	39° 04'	26° 36'	4,0
Νάξος	Κυκλάδων	37° 06'	25° 23'	9,8
Πύργος	Ηλείας	37° 40'	21° 18'	12,0
Ρέθυμνο	Ρεθύμνου	35° 21'	24° 31'	7,0
Ρόδος	Δωδεκανήσου	36° 24'	28° 07'	11,5
Σάμος	Σάμου	37° 42'	26° 55'	7,3
Σαντορίνη	Κυκλάδων	36° 15'	25° 15'	37,0
Σέρρες	Σερρών	41° 05'	23° 34'	35,0
Σκύρος	Ευβοίας	38° 54'	24° 33'	17,9
Σούδα	Χανίων	35° 33'	24° 07'	151,6
Τανάγρα	Αττικής	38° 19'	23° 33'	140,0
Τρίκαλα Ημαθίας	Ημαθίας	40° 36'	22° 33'	0,8
Τρίπολη	Αρκαδίας	37° 32'	22° 24'	650,9
Χρυσούπολη	Καβάλας	40° 54'	24° 36'	5,4

Για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα, για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα του έτους, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις της EMY, για σαράντα Ελληνικές περιοχές όπως αναφέρονται στον Πίνακα 3.3.1., για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της EMY για τη θερμοκρασία του αέρα, για χρονική περίοδο άνω των 15 ετών. Η περίοδος μετρήσεων για τις περισσότερες περιοχές είναι από το 1990 έως το 2004 και σε ορισμένες περιπτώσεις μέχρι το 2010 και σε 3ώρη βάση.

Στο Παράρτημα Β, στον Πίνακα Β.1 δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας (ανά τρίωρο) στη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας (ανατολή έως δύση του ήλιου), για κάθε μήνα και περιοχή, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων (ανάλυση χρονοσειρών) της EMY. Επίσης στον Πίνακα Β.2 του ίδιου Παραρτήματος δίνονται οι μέσες τιμές των τυπικών αποκλίσεων των ωριαίων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, για κάθε μήνα.

Αρκετές επιστημονικές εργασίες έχουν ως αντικείμενο την επεξεργασία μετρήσεων της θερμοκρασίας του αέρα ή/και τον προσδιορισμό αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας ή ετήσιας τιμής της θερμοκρασίας του αέρα, για τις διάφορες ελληνικές περιοχές [45, 131, 133, 126-127, 143-144]. Ωστόσο, η ανάπτυξη αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της ωριαίας διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα, για το σύνολο των ελληνικών περιοχών, είναι ένα πεδίο που μέχρι σήμερα δεν έχει καλυφθεί, αλλά θα έχει μεγάλη χρησιμότητα σε διάφορες τεχνικές εφαρμογές, όπως είναι και η λειτουργία των Φ/Β.

3.3.1. Ανάλυση Μετρήσεων Θερμοκρασίας Αέρα

Για κάθε ελληνική περιοχή έγινε στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της EMY που αφορούν στη θερμοκρασία του αέρα, για κάθε χρονική στιγμή, ημέρα, μήνα και έτος της χρονικής περιόδου καταγραφής. Από τις 3ώρες μετρήσεις της θερμοκρασίας της EMY εκτιμήθηκε η μέση, μέγιστη και ελάχιστη ωριαία τιμή της θερμοκρασίας κάθε μήνα και περιοχής. Η διακύμανση της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας, στη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας για κάθε μήνα, παρουσιάζει τη μορφή του Σχήματος 3.3.1 για τις περισσότερες Ελληνικές περιοχές. Τα τυπικά σφάλματα των μέσων τιμών των μετρήσεων της θερμοκρασίας αέρα κυμαίνονταν από $\pm 2(^{\circ}\text{C})$ έως $\pm 5,5(^{\circ}\text{C})$, ανάλογα το μήνα και την περιοχή. Για τις βόρειο-δυτικές Ελληνικές περιοχές παρουσιάζονται μεγαλύτερες τυπικές αποκλίσεις, ενώ για τις νησιωτικές περιοχές χαμηλότερες τυπικές αποκλίσεις.

Οι αναλυτικές σχέσεις που προέκυψαν από πολλαπλή πολυωνυμική προσαρμογή και περιγράφουν τη διακύμανση της ωριαίας θερμοκρασία $T_{\text{air},im}$, συναρτήσεως του χρόνου σε ώρες T_i (UTC), όπου $i=1$ έως 24 ώρες, για κάθε μήνα του έτους, είναι:

- α) πολυωνυμικές εβδόμου βαθμού για χρονική περίοδο στη διάρκεια της ημέρας από 6:00 έως 19:00 UTC, (8:00 έως 21:00 τοπική ώρα):

$$T_{\text{air},im} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T_i + \alpha_2 \cdot T_i^2 + \alpha_3 \cdot T_i^3 + \alpha_4 \cdot T_i^4 + \alpha_5 \cdot T_i^5 + \alpha_6 \cdot T_i^6 + \alpha_7 \cdot T_i^7 \quad (3.3.1)$$

- β) και πολυωνυμικές τρίτου βαθμού για χρονική περίοδο στη διάρκεια της ημέρας από 19:00 έως 6:00 UTC, (21:00 έως 8:00 τοπική ώρα), κυρίως νυχτερινές ώρες, με τη μορφή της ακόλουθης Εξίσωσης. Καθώς ο συντελεστής α_3 προκύπτει σχεδόν με μηδενική τιμή, για όλες τις Ελληνικές περιοχές η πολυωνυμική Εξίσωση γίνεται ουσιαστικά δευτέρου βαθμού.

$$T_{\text{air},im} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T_i + \alpha_2 \cdot T_i^2 + \alpha_3 \cdot T_i^3 \quad (3.3.2)$$

Οι σταθεροί συντελεστές α_0 έως α_7 των εξισώσεων 3.3.1 και 3.3.2, προσδιορίστηκαν από την πολυωνυμική προσέγγιση και αφορούν στον υπολογισμό της μέσης ωριαίας τιμής της

θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, καθώς και της μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης ωριαίας τιμής της θερμοκρασίας κάθε μήνα.

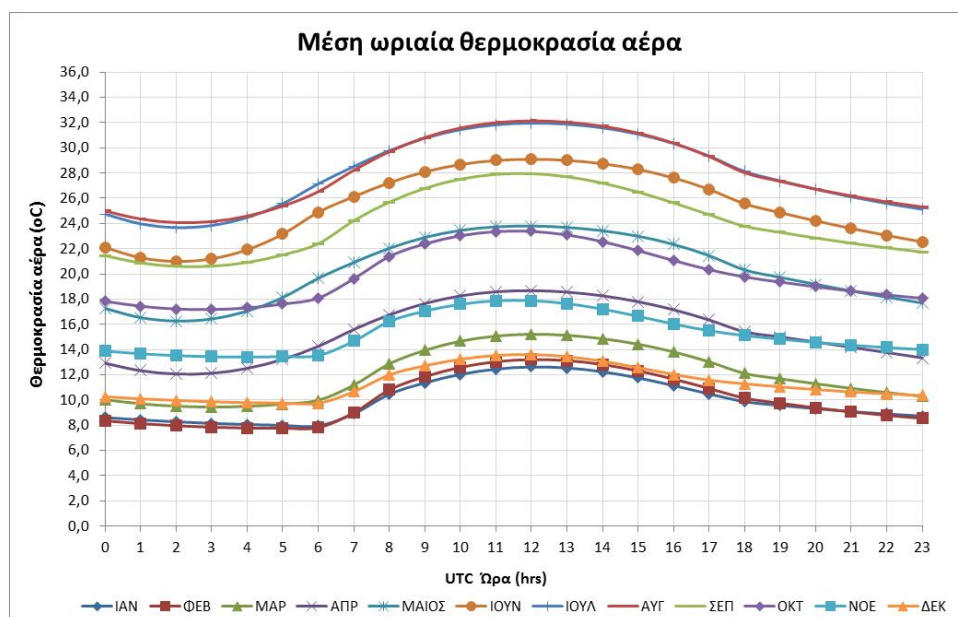
Η μέση τιμή της ωριαία θερμοκρασίας του αέρα, για κάθε μήνα που προσδιορίστηκε από την ανάλυση, αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των τιμών θερμοκρασίας για δεδομένη ώρα, για όλες τις ημέρες του μήνα και όλα τα έτη. Αντίστοιχα, η μέση μέγιστη και μέση ελάχιστη ωριαία τιμή της θερμοκρασίας ανά μήνα αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των μέγιστων και ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας για δεδομένη ώρα, για όλες τις ημέρες του μήνα και όλα τα έτη καταγραφής των μετρήσεων.

Η πολυωνυμικές σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση δίνουν συντελεστές προσδιορισμού (R^2) και συσχέτισης (R) σχεδόν μονάδα ($R^2=1$), καθώς οι σχέσεις που προκύπτουν δίνουν τιμές θερμοκρασία αέρα οι οποίες σχεδόν ταυτίζονται με τις μετρήσεις. Αντίστοιχα οι τιμές της μέσης τετραγωνικής απόκλισης (RMS) είναι για την πλειοψηφία των εξισώσεων που προέκυψαν μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές. Τέλος και τα υπόλοιπα (residuals) που προκύπτουν από την ανάλυση των σχέσεων είναι σχεδόν μηδενικά και για την ακρίβεια παρουσιάζουν τιμές της τάξεως του $\chi \cdot E^{-10}$ έως $\chi \cdot E^{-14}$.

Οι πολυωνυμικές εξισώσεις και ο προσδιορισμός των σταθερών συντελεστών α_0 έως α_7 , που προέκυψε από την ανάλυση, αφορούν τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (UTC) και είναι: από 0:00 έως 6:00 π.μ. (δευτέρου βαθμού), από 6:00 π.μ. έως 19:00 μ.μ. (δευτέρου βαθμού), από 19:00 έως 0:00 μ.μ. (δευτέρου βαθμού). Στον Πίνακα 3.3.2 δίνονται οι σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής) για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα από τις εξισώσεις 3.3.1 και 3.3.2, για κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας.

Αντίστοιχες τιμές των σταθερών συντελεστών α_0 έως α_7 (Πίνακας 3.3.2) προέκυψαν για τη μέση μέγιστη και μέση ελάχιστη θερμοκρασία αέρα, για κάθε γεωγραφική περιοχή του Πίνακα 3.3.1, όπου υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της EMY.

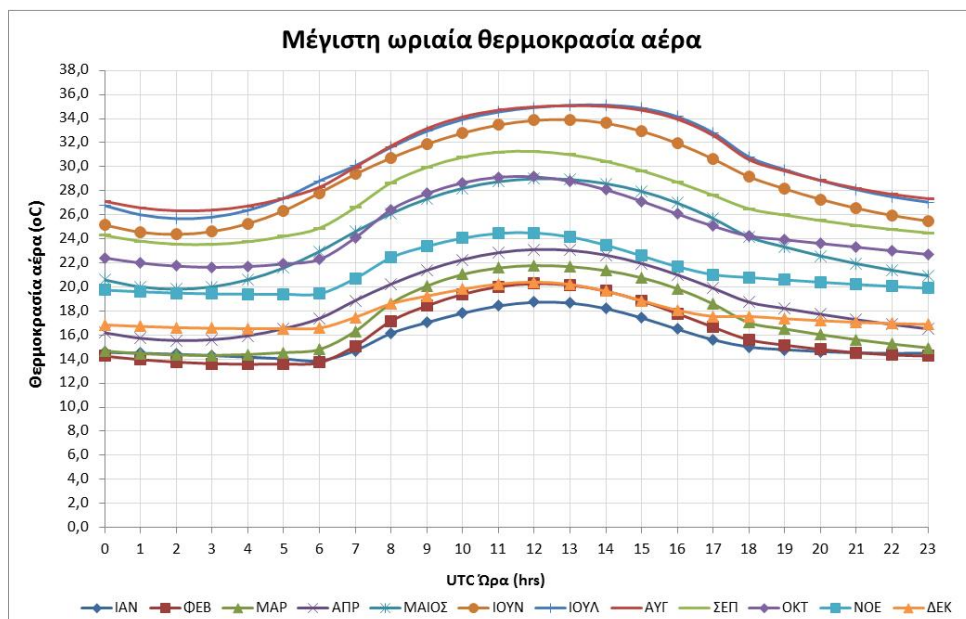
Στα Σχήματα 3.3.1, 3.3.2 και 3.3.3 απεικονίζεται η μέση, μέγιστη και ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική ημέρα, για κάθε μήνα, ενδεικτικά για την περιοχή της Αθήνας, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των αναλυτικών σχέσεων 3.3.1 και 3.3.2.



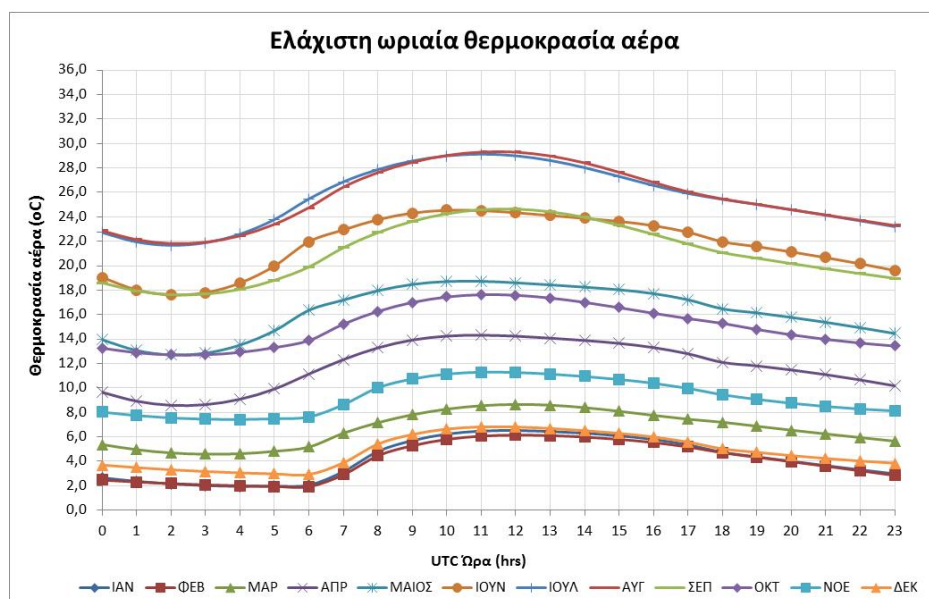
Σχήμα 3.3.1: Μέση ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας.

Πίνακας 3.3.2: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης (προσαρμογής) για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα από τις εξισώσεις 3.3.1 και 3.3.2, για κάθε μήνα για την περιοχή της Αθήνα

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Χρονική Περίοδος 00:00 έως 06:00 UTC												
α0	8,61	8,35	10,02	12,92	17,27	22,10	24,74	24,99	21,45	17,83	13,88	10,27
α1	-0,20	-0,25	-0,38	-0,75	-0,95	-1,06	-1,00	-0,81	-0,71	-0,48	-0,24	-0,18
α2	0,015	0,027	0,062	0,163	0,225	0,255	0,233	0,178	0,145	0,087	0,031	0,016
Χρονική Περίοδος 06:00 έως 19:00 UTC												
α0	-7,84	-5,67	22,01	21,34	38,68	39,65	42,97	36,98	5,07	-23,92	-20,30	-24,68
α1	4,44	2,19	-10,35	-7,44	-13,42	-10,99	-11,87	-10,40	3,49	15,54	12,53	13,93
α2	-0,45	0,12	2,41	1,84	2,96	2,46	2,65	2,56	-0,04	-2,22	-1,80	-2,21
α3	0,03	-0,02	-0,20	-0,16	-0,24	-0,20	-0,22	-0,22	-0,01	0,15	0,12	0,17
α4	-0,0004	0,0005	0,0022	0,0020	0,0029	0,0020	0,0022	0,0031	0,0001	-0,0015	-0,0009	-0,0017
α5	-0,00010	0,00005	0,00058	0,00045	0,00075	0,00065	0,00068	0,00064	0,00003	-0,00048	-0,00044	-0,00054
α6	0,0000064	-0,0000030	-0,0000332	-0,0000264	-0,0000437	-0,0000369	-0,0000391	-0,0000385	-0,0000015	0,0000274	0,0000247	0,0000313
α7	- 0,0000001 1	0,00000006	0,0000005 6	0,0000004 5	0,0000007 5	0,0000006 3	0,0000006 7	0,0000006 7	0,0000000 3	- 0,0000004 6	- 0,0000004 2	- 0,0000005 3
Χρονική Περίοδος 19:00 έως 24:00 UTC												
α0	21,16	24,76	25,08	21,88	36,12	46,89	53,56	52,66	39,20	32,97	25,92	20,68
α1	-0,94	-1,19	-1,00	-0,32	-1,16	-1,64	-2,05	-2,02	-1,21	-1,04	-0,90	-0,79
α2	0,0173	0,0213	0,0155	-0,0024	0,0154	0,0253	0,0354	0,0360	0,0195	0,0172	0,0164	0,0146



Σχήμα 3.3.2: Μέγιστη ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας



Σχήμα 3.3.3: Ελάχιστη ωριαία θερμοκρασία για μια τυπική μέρα κάθε μήνα, για την περιοχή της Αθήνας

3.3.2. Αναλυτικές Σχέσεις Υπολογισμού της Μέσης Ωριαίας Θερμοκρασίας Αέρα

Από τις αναλυτικές σχέσεις 3.3.1 και 3.3.2 εκτίμησης της ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων της ΕΜΥ, προσδιορίστηκαν για κάθε περιοχή οι αναμενόμενες μέσες, μέγιστες και ελάχιστες ωριαίες θερμοκρασίες. Οι μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασία αέρα από κάθε ελληνική περιοχή, χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη εμπειρικών σχέσεων που έχουν τη μορφή της Εξίσωσης 3.3.3, και οι οποίες μοντελοποιούν την εκτίμηση της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης ωριαίας θερμοκρασίας, για κάθε μήνα, για όλες τις Ελληνικές περιοχές, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό

πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος (L), το υψόμετρο (A) και την τοπική πλέον ώρα (T_i) της ημέρας για την οποία θα υπολογιστεί η τιμή της θερμοκρασίας.

$$T_{air,im} = x_0 + x_1 \cdot \phi + x_2 \cdot L + x_3 \cdot A + x_4 \cdot T_i + x_5 \cdot T_i^2 + x_6 \cdot T_i^3 + x_7 \cdot T_i^4 \quad (3.3.3)$$

Οι σταθεροί συντελεστές (x_0 έως x_7) της Εξίσωσης 3.3.3 διαφοροποιούνται για κάθε μήνα, όπως δίνονται στους πίνακες 3.3.3. για τη μέση μηνιαία θερμοκρασία, 3.3.4. για τη μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία και 3.3.5. για την ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία. Αφορούν τις ώρες της ημέρας με ηλιοφάνεια, για τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει μια Φ/Β μονάδα.

Στους πίνακες 3.3.3, 3.3.4 και 3.3.5 δίνονται επίσης τα τυπικά σφάλματα των σταθερών συντελεστών και των τιμών της μέσης, μέσης μέγιστης και μέσης ελάχιστης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα που υπολογίζονται από την Εξίσωση 3.3.3., για κάθε μήνα και για κάθε γεωγραφική περιοχή της Ελλάδας. Οι τιμές του τυπικού σφάλματος των ωριαίων θερμοκρασιών κυμαίνεται μεταξύ $1,0^\circ\text{C}$ και $2,0^\circ\text{C}$, ενώ ειδικά για τη μέση τιμή της ωριαίας θερμοκρασίας (Πίνακας 3.3.3) το τυπικό σφάλμα κυμαίνεται σε ακόμα πιο χαμηλές τιμές, μεταξύ $1,0^\circ\text{C}$ και $1,6^\circ\text{C}$.

Στους ίδιους πίνακες δίνονται και οι τυποποιημένοι συντελεστές βήτα ($BETA$) για κάθε παράμετρο (ανεξάρτητη μεταβλητή) της Εξίσωσης 3.3.3.

Πίνακας 3.3.3: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο 6:00 πμ έως 21:00 μμ τοπική ώρα Ελλάδος.

Σταθεροί συντελεστές									R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ	97	-1,27	-0,09	-0,0076	-15,1	1,9	-0,099	0,0017	0,85
ΦΕΒ	84	-1,00	-0,11	-0,0066	-14,1	1,9	-0,095	0,0017	0,86
ΜΑΡ	65	-0,69	-0,10	-0,0052	-11,5	1,6	-0,083	0,0015	0,84
ΑΠΡ	35	-0,35	0,01	-0,0051	-5,7	0,9	-0,052	0,0009	0,85
ΜΑΙΟΣ	17	-0,03	-0,07	-0,0047	-1,7	0,5	-0,030	0,0005	0,79
ΙΟΥΝ	7	0,13	-0,03	-0,0035	0,6	0,2	-0,02	0,0003	0,73
ΙΟΥΛ	15	0,13	0,00	-0,0033	-1,6	0,5	-0,03	0,0005	0,72
ΑΥΓ	34	0,00	-0,09	-0,0042	-6,0	1,0	-0,06	0,0010	0,74
ΣΕΠΤ	54	-0,38	-0,01	-0,0052	-9,4	1,4	-0,077	0,0014	0,80
ΟΚΤ	80	-0,77	-0,07	-0,0058	-13,8	1,9	-0,102	0,0018	0,84
ΝΟΕΜ	94	-1,14	-0,08	-0,0072	-14,7	2,0	-0,104	0,0019	0,87
ΔΕΚ	98	-1,35	-0,06	-0,0079	-13,9	1,8	-0,095	0,0017	0,86
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών									
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	Συνολικό
ΙΑΝ	4,9	0,03	0,03	0,0003	1,6	0,19	0,010	0,0002	1,3
ΦΕΒ	4,5	0,03	0,03	0,0003	1,4	0,18	0,009	0,0002	1,2
ΜΑΡ	4,4	0,03	0,03	0,0003	1,4	0,17	0,009	0,0002	1,2
ΑΠΡ	3,8	0,03	0,02	0,0002	1,2	0,15	0,008	0,0001	1,0
ΜΑΙΟΣ	4,7	0,03	0,03	0,0003	1,5	0,18	0,009	0,0002	1,3
ΙΟΥΝ	5,7	0,04	0,03	0,0004	1,8	0,22	0,01	0,0002	1,6
ΙΟΥΛ	6,0	0,04	0,04	0,0004	1,9	0,24	0,01	0,0002	1,6
ΑΥΓ	6,0	0,04	0,04	0,0004	1,9	0,23	0,01	0,0002	1,6
ΣΕΠΤ	5,2	0,04	0,03	0,0003	1,7	0,20	0,011	0,0002	1,4
ΟΚΤ	4,8	0,03	0,03	0,0003	1,5	0,19	0,010	0,0002	1,3
ΝΟΕΜ	4,4	0,03	0,03	0,0003	1,4	0,17	0,009	0,0002	1,2
ΔΕΚ	4,7	0,03	0,03	0,0003	1,5	0,18	0,010	0,0002	1,3
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών									
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ		-0,60	-0,05	-0,40	-19,9	70,3	-79,7	29,4	
ΦΕΒ		-0,51	-0,07	-0,38	-20,1	72,4	-82,6	30,5	
ΜΑΡ		-0,38	-0,07	-0,32	-17,6	66,7	-77,7	28,8	
ΑΠΡ		-0,21	0,00	-0,34	-9,7	43,2	-53,4	20,1	
ΜΑΙΟΣ		-0,02	-0,05	-0,31	-2,8	21,5	-29,9	11,4	
ΙΟΥΝ		0,07	-0,02	-0,21	0,9	9,3	-15,8	6,0	
ΙΟΥΛ		0,07	0,00	-0,19	-2,4	19,4	-26,5	9,8	
ΑΥΓ		0,00	-0,06	-0,24	-8,7	40,0	-49,7	18,6	
ΣΕΠΤ		-0,20	-0,01	-0,30	-13,5	56,0	-67,8	25,6	
ΟΚΤ		-0,40	-0,05	-0,33	-19,7	75,2	-89,0	33,7	
ΝΟΕΜ		-0,57	-0,04	-0,40	-20,5	75,4	-88,1	33,4	
ΔΕΚ		-0,64	-0,04	-0,42	-18,6	66,6	-77,0	29,0	

Πίνακας 3.3.4: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της **μέγιστης ωριαίας** θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο **6:00 πμ έως 21:00 μμ** τοπική ώρα Ελλάδος.

Σταθεροί συντελεστές									R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ	74	-0,68	0,00	-0,0063	-13,5	1,8	-0,091	0,0016	0,76
ΦΕΒ	67	-0,51	-0,02	-0,0055	-13,1	1,7	-0,088	0,0015	0,73
ΜΑΡ	62	-0,42	-0,08	-0,0033	-12,5	1,7	-0,089	0,0015	0,68
ΑΠΡ	53	-0,40	0,03	-0,0032	-9,4	1,4	-0,073	0,0013	0,70
ΜΑΙΟΣ	31	-0,09	-0,05	-0,0038	-4,3	0,8	-0,047	0,0008	0,71
ΙΟΥΝ	23	-0,04	0,00	-0,0025	-1,4	0,5	-0,03	0,0005	0,70
ΙΟΥΛ	23	-0,04	0,00	-0,0025	-1,4	0,5	-0,03	0,0005	0,71
ΑΥΓ	47	-0,11	-0,11	-0,0027	-7,8	1,3	-0,07	0,0012	0,71
ΣΕΠΤ	47	-0,11	-0,11	-0,0027	-7,8	1,3	-0,068	0,0012	0,76
ΟΚΤ	82	-0,52	-0,09	-0,0043	-16,1	2,2	-0,117	0,0021	0,77
ΝΟΕΜ	84	-0,74	-0,06	-0,0059	-14,6	2,0	-0,106	0,0019	0,76
ΔΕΚ	71	-0,73	0,01	-0,0077	-11,2	1,5	-0,080	0,0015	0,78
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών									
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	Συνολικό
ΙΑΝ	4,8	0,03	0,03	0,0003	1,5	0,2	0,010	0,0002	1,3
ΦΕΒ	5,2	0,04	0,03	0,0003	1,7	0,2	0,010	0,0002	1,4
ΜΑΡ	6,4	0,04	0,04	0,0004	2,1	0,3	0,013	0,0002	1,7
ΑΠΡ	6,4	0,04	0,04	0,0004	2,1	0,3	0,013	0,0002	1,7
ΜΑΙΟΣ	6,7	0,05	0,04	0,0004	2,2	0,3	0,014	0,0003	1,8
ΙΟΥΝ	7,3	0,05	0,04	0,0005	2,4	0,3	0,01	0,0003	2,0
ΙΟΥΛ	7,3	0,05	0,04	0,0005	2,4	0,3	0,01	0,0003	2,0
ΑΥΓ	7,2	0,05	0,04	0,0005	2,3	0,3	0,01	0,0003	2,0
ΣΕΠΤ	7,2	0,05	0,04	0,0005	2,3	0,3	0,015	0,0003	1,7
ΟΚΤ	5,7	0,04	0,03	0,0004	1,8	0,2	0,011	0,0002	1,5
ΝΟΕΜ	5,3	0,04	0,03	0,0003	1,7	0,2	0,011	0,0002	1,4
ΔΕΚ	4,6	0,03	0,03	0,0003	1,5	0,2	0,009	0,0002	1,2
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών									
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ		-0,42	0,00	-0,43	-23,35	83,13	-95,13	35,42	
ΦΕΒ		-0,31	-0,01	-0,37	-22,37	80,38	-91,59	33,68	
ΜΑΡ		-0,22	-0,05	-0,20	-18,60	69,70	-80,49	29,56	
ΑΠΡ		-0,21	0,02	-0,18	-13,53	54,22	-64,22	23,71	
ΜΑΙΟΣ		-0,04	-0,03	-0,20	-5,80	30,26	-38,39	14,18	
ΙΟΥΝ		-0,02	0,00	-0,13	-1,78	16,30	-21,82	7,60	
ΙΟΥΛ		-0,02	0,00	-0,13	-1,76	16,10	-21,56	7,51	
ΑΥΓ		-0,05	-0,06	-0,13	-9,71	42,70	-51,83	19,13	
ΣΕΠΤ		-0,05	-0,06	-0,14	-10,33	45,42	-55,13	20,35	
ΟΚΤ		-0,26	-0,06	-0,24	-22,85	86,24	-101,69	38,44	
ΝΟΕΜ		-0,42	-0,04	-0,37	-22,89	85,54	-101,55	38,97	
ΔΕΚ		-0,45	0,01	-0,52	-19,13	70,66	-83,69	32,22	

Πίνακας 3.3.5: Σταθεροί συντελεστές πολλαπλής πολυωνυμική προσέγγισης, της Εξίσωσης 3.3.3, για τον υπολογισμό της **ελάχιστης ωριαίας** θερμοκρασίας του αέρα για κάθε μήνα, σε διάφορες Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), γεωγραφικό μήκος (L), και υψόμετρο (A). Οι συντελεστές ισχύουν για χρονική περίοδο 6:00 πμ έως 21:00 μμ τοπική ώρα Ελλάδος.

Σταθεροί συντελεστές									R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ	101	-1,53	-0,19	-0,0095	-14,1	1,8	-0,093	0,0016	0,80
ΦΕΒ	85	-1,25	-0,25	-0,0090	-12,0	1,6	-0,083	0,0015	0,79
ΜΑΡ	60	-0,91	-0,18	-0,0084	-8,0	1,1	-0,061	0,0011	0,75
ΑΠΡ	34	-0,67	0,02	-0,0076	-2,9	0,6	-0,033	0,0006	0,78
ΜΑΙΟΣ	13	-0,32	-0,04	-0,0076	2,6	-0,1	0,000	0,0000	0,68
ΙΟΥΝ	3	-0,02	0,01	-0,0073	2,6	0,0	-0,01	0,0001	0,66
ΙΟΥΛ	19	-0,16	0,07	-0,0069	-0,5	0,3	-0,02	0,0004	0,58
ΑΥΓ	37	-0,22	0,01	-0,0071	-5,4	0,9	-0,05	0,0010	0,61
ΣΕΠΤ	42	-0,52	0,08	-0,0075	-5,3	0,9	-0,050	0,0009	0,69
ΟΚΤ	84	-1,14	-0,12	-0,0082	-11,3	1,6	-0,085	0,0015	0,74
ΝΟΕΜ	95	-1,40	-0,12	-0,0084	-13,1	1,7	-0,091	0,0016	0,80
ΔΕΚ	109	-1,68	-0,22	-0,0089	-14,3	1,8	-0,094	0,0017	0,81
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών									
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	Συνολικό
ΙΑΝ	6,7	0,05	0,04	0,0004	2,2	0,3	0,014	0,0003	1,8
ΦΕΒ	6,3	0,04	0,04	0,0004	2,0	0,2	0,013	0,0002	1,7
ΜΑΡ	6,0	0,04	0,04	0,0004	1,9	0,2	0,012	0,0002	1,6
ΑΠΡ	5,1	0,04	0,03	0,0003	1,7	0,2	0,010	0,0002	1,4
ΜΑΙΟΣ	5,3	0,04	0,03	0,0003	1,7	0,2	0,011	0,0002	1,4
ΙΟΥΝ	6,1	0,04	0,04	0,0004	2,0	0,2	0,01	0,0002	1,7
ΙΟΥΛ	7,3	0,05	0,04	0,0005	2,3	0,3	0,01	0,0003	2,0
ΑΥΓ	7,2	0,05	0,04	0,0005	2,3	0,3	0,01	0,0003	2,0
ΣΕΠΤ	6,8	0,05	0,04	0,0004	2,2	0,3	0,014	0,0003	1,8
ΟΚΤ	6,9	0,05	0,04	0,0004	2,2	0,3	0,014	0,0003	1,9
ΝΟΕΜ	6,4	0,04	0,04	0,0004	2,1	0,3	0,013	0,0002	1,7
ΔΕΚ	6,5	0,05	0,04	0,0004	2,1	0,3	0,013	0,0002	1,8
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών									
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
ΙΑΝ		-0,62	-0,09	-0,42	-15,83	56,14	-63,79	23,66	
ΦΕΒ		-0,55	-0,13	-0,44	-14,69	53,83	-62,10	23,21	
ΜΑΡ		-0,45	-0,11	-0,47	-11,17	43,50	-51,48	19,44	
ΑΠΡ		-0,37	0,01	-0,47	-4,40	23,67	-31,15	12,19	
ΜΑΙΟΣ		-0,21	-0,03	-0,54	4,62	-5,19	0,07	0,80	
ΙΟΥΝ		-0,01	0,01	-0,46	4,11	-1,46	-5,31	2,97	
ΙΟΥΛ		-0,08	0,04	-0,41	-0,72	13,05	-20,59	8,52	
ΑΥΓ		-0,12	0,01	-0,41	-7,90	36,36	-46,21	18,00	
ΣΕΠΤ		-0,26	0,05	-0,41	-7,25	33,43	-42,19	16,28	
ΟΚΤ		-0,51	-0,06	-0,41	-13,90	53,40	-63,64	24,34	
ΝΟΕΜ		-0,59	-0,06	-0,39	-15,48	56,56	-65,40	24,51	
ΔΕΚ		-0,67	-0,10	-0,40	-15,97	56,36	-64,09	23,86	

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Με σκοπό την ανάλυση και αξιολόγηση της λειτουργίας των Φ/Β υπό συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις μιας πειραματικής Φ/Β εγκατάστασης στην περιοχή της Αθήνας. Από την επεξεργασία των μετρήσεων, αξιολογήθηκε η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β και διεξάχθηκαν αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες περιγράφουν με αρκετή ακρίβεια τη συμπεριφορά των Φ/Β σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Για τις σχέσεις αυτές έγινε συγκριτική αξιολόγηση με άλλες αντίστοιχες διεθνείς εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις (μοντέλα), οι οποίες αναφέρθηκαν ήδη στο Κεφάλαιο 2. Επιπλέον, οι σχέσεις αυτές αξιολογήθηκαν σε σχέση με αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις που προέκυψαν από μετρήσεις πειραματικής Φ/Β εγκατάστασης στην περιοχή Cadarache της Γαλλίας.

Η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β διαφοροποιείται στη διάρκεια της ημέρα ανά εποχή, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις τεχνικές προδιαγραφές τους. Η παρούσα ανάλυση της λειτουργίας των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, περιλαμβάνει τόσο τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης (η , %) όσο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (P) των Φ/Β, σε συνάρτηση με τη διακύμανση των διαφόρων κλιματικών συνθηκών, δηλαδή της ηλιακής ακτινοβολίας (καθαρός ουρανός, μερική ή πλήρης νέφωση), της θερμοκρασία του αέρα, της ταχύτητα ανέμου, της ηλιακής γεωμετρίας ως προς την επιφάνεια των Φ/Β, καθώς και τις τεχνικές προδιαγραφές των Φ/Β και του υποστηρικτικού εξοπλισμού σύμφωνα με τον κατασκευαστή, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις κλιματικές παραμέτρους.

4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ Φ/Β

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες, αφορούν κυρίως την Φ/Β πειραματική εγκατάσταση στο Αστεροσκοπείο Αθηνών. Οι αναλυτικές σχέσεις που προέκυψαν αξιολογήθηκαν με τις μετρήσεις Φ/Β εγκατάστασης που βρίσκεται στο Γαλλικό Κέντρο Ατομικής και Εναλλακτικής Ενέργειας (CEA - Atomic Energy and Alternative Energy Commission of France) στο Κανταράς της Γαλλίας, CEA-Cadarache.

4.1.1. Πειραματική Μονάδα Αστεροσκοπείου

Η πειραματική Φ/Β εγκατάσταση βρίσκεται στην περιοχή της Παλαιάς Πεντέλης ($\varphi=37,97^\circ$, $L=23,71^\circ$), στις εγκαταστάσεις του Αστεροσκοπείου Αθηνών και αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si). Η συνολική επιφάνεια των Φ/Β είναι $A = 3,467 \text{ m}^2$ και η συνολική ονομαστική μέγιστη ισχύς εξόδου 392 Wp .
- Αισθητήρες και όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα και της επιφάνειας των Φ/Β, της ηλιακής ακτινοβολίας, της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, τάσης και έντασης ηλεκτρικού ρεύματος κ.ά.
- Όργανα ελέγχου και βελτιστοποίησης της λειτουργίας της εγκατάστασης, μετατροπείς, κ.λ.π.

Στο Σχήμα 4.1.1, φαίνεται το εξωτερικό τμήμα της πειραματικής διάταξης, δηλαδή τα Φ/Β πλαίσια και οι ηλεκτρικές συνδέσεις των καταγραφικών. Οι Φ/Β επιφάνειες αποτελούνται από 8 PHOTOWATT πλαίσια ($0,433 \text{ m}^2$ έκαστο), μοντέλο PWX 500 με αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ 49

Wp έκαστο. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από 36 Φ/Β κυψέλες (cells). Τα Φ/Β πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά ανά τέσσερα και σχηματίζουν μια ενιαία Φ/Β επιφάνεια. Οι δύο Φ/Β επιφάνειες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα. Η τοποθέτηση των Φ/Β επιφανειών έχει γίνει με νότιο προσανατολισμό και χωρίς να αλληλοσκιάζονται στη διάρκεια της ημέρας, ενώ δεν υπάρχει περιμετρικά τους κανένα φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο. Η γωνία κλίσης των επιφανειών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν 20°.



Σχήμα 4.1.1: Φ/Β πλαίσια στην Πεντέλη. Στο αριστερό πλαίσιο φαίνεται το πυρανόμετρο

Οι τεχνικές προδιαγραφές της κάθε Φ/Β συστοιχίας, σύμφωνα με τον κατασκευαστή (συνθήκες εργαστηρίου, STC, για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m², θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β 25, 45, & 60 °C, και αέρια μάζα AM=1,5), δίνονται στον Πίνακα 4.1.1. Ο συντελεστής θερμοκρασίας β_{ref} (temperature coefficient) των Φ/Β λαμβάνει την τιμή β_{ref}=0,0043 (°C⁻¹) ή αλλιώς -0,43(%/°C).

Πίνακας 4.1.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β μονάδων (Αστεροσκοπείου) για STC

Θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β (°C)	25	45	60
Μέγιστη ισχύς P _{mp} (W _p)	49	44,8	41,5
Τάση στη μέγιστη ισχύ V _{mp} (V)	17	15,44	14,27
Ένταση στη μέγιστη ισχύ I _{mp} (A)	2,88	2,9	2,91
Τάση ανοικτού κυκλώματος V _{oc} (V)	21,6	20	18,86
Ένταση βραχυκυκλώσεως I _{sc} (A)	3,15	3,17	3,18
Βαθμός απόδοσης η (%)	11,31	10,34	9,58
Μεταβολή χαρακτηριστικών 0,95 (mA/°C), -79 (mV/°C), -0,43(%/°C)			

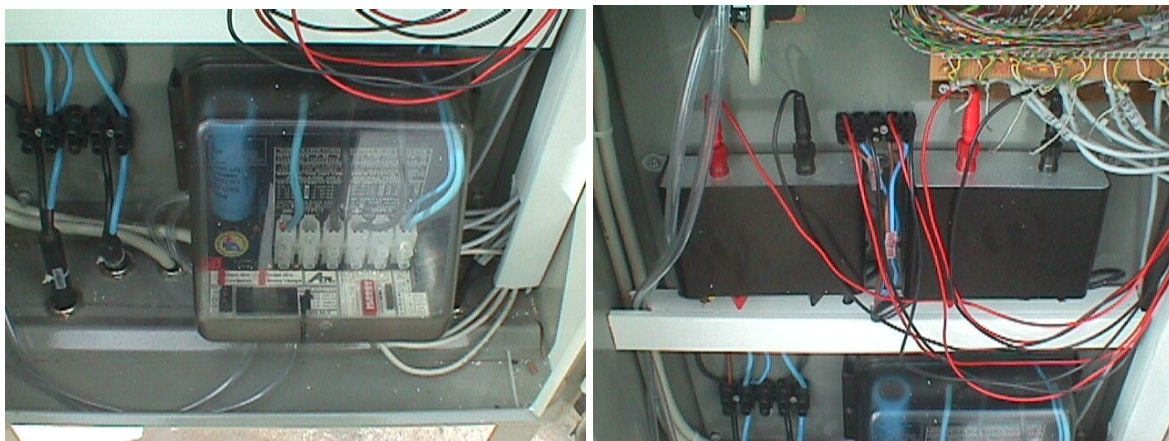
Για την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (maximum power tracker), μοντέλο 800BVL, της εταιρείας «Australian Energy Research Laboratories», (Σχήμα 4.1.2). Ο ανιχνευτής διαθέτει έναν DC / DC μετατροπέα τάσεως, ώστε η τάση των Φ/Β να ρυθμίζεται στην τιμή που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ (P_{max}). Με την παρεμβολή του ανιχνευτή τα Φ/Β παρέχουν αυτόματα τη μέγιστη ισχύ κάθε χρονική στιγμή, σε συνάρτηση πάντα και με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία.

Η τάση και ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, πριν και μετά τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος, μετρούνται και καταγράφονται προκειμένου να καθορίζεται η ισχύς της εγκατάστασης πριν και

μετά τον ανιχνευτή. Η τάση μετράται άμεσα, ενώ το ρεύμα υπολογίζεται έμμεσα, από μετρήσεις της τάσης σε μια αντίσταση εκτροπής ρεύματος. Οι μετρήσεις των τάσεων, εντάσεων και ισχύος έγιναν με το ψηφιακό πολύμετρο Hewlett Packard HP44701A, με ακρίβειες $\pm 0,01$ W για την ισχύ, ± 10 μ V για την τάση και ένταση.

Η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των Φ/Β, μετρήθηκε με τη χρήση ενός πυρανομέτρου της εταιρείας Kipp & Zonen, μοντέλο CM 11 και ακρίβεια ± 1 W/m². Το πυρανόμετρο μετράει την ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) και είναι εγκατεστημένο πάνω στη μία Φ/Β επιφάνεια, με την ίδια κλίση.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β έγινε με τη χρήση θερμομέτρων πλατινένιων αντιστάσεων (Pt100) με ακρίβεια $\pm 0,1$ °C.



Σχήμα 4.1.2: Ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (αριστερά) και αντίσταση εκτροπής ρεύματος για μετρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος

Πίνακας 4.1.2: Συμβολισμοί και μονάδες μετρήσεων οργάνων πειραματικής διάταξης Φ/Β

Συμβολισμός	Περιγραφή	Αισθητήρας	Μονάδες	Παρατηρήσεις
G_s	Ένταση ολικής ηλιακής ακτινοβολία	CM 11	1 Wm ⁻² (est)	Παράλληλα με την επιφάνεια των Φ/Β στοιχείων.
U_{pv-in}	Τάση εξόδου από Φ/Β	HP44701A	10 μ V	Τάση εισόδου στον power tracker/ inverter
I_{pv-in}	Ρεύμα εξόδου από Φ/Β	HP44701A	10 μ V	Ρεύμα εισόδου στον power tracker/ inverter
P_{pv-in}	Ισχύς εξόδου από Φ/Β		0,01 W (est)	Ισχύς εισόδου στον power tracker/ inverter
U_{pv-out}	Τάση εξόδου από Inverter	HP44701A	10 μ V	Τάση εξόδου από power tracker/ inverter
I_{pv-out}	Ρεύμα εξόδου από Inverter	HP44701A	10 μ V	Ρεύμα εξόδου από power tracker/ inverter
P_{pv-out}	Ισχύς εξόδου από Inverter		0,01 W (est)	Ισχύς εξόδου από power tracker/ inverter
V	Ταχύτητα αέρα			Τοποθετημένο σε ιστό δίπλα στην Φ/Β εγκατάσταση
T_{pvN}	Θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β	Pt100	0,1 °C	Τοποθετημένο στην πίσω πλευρά των βορινών Φ/Β στοιχείων
T_{pvS}	Θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β	Pt100	0,1 °C	Τοποθετημένο στην πίσω πλευρά των νότιων Φ/Β στοιχείων

Πριν την εγκατάσταση των αισθητήρων, έγινε βαθμονόμησή τους, σύμφωνα με την διαδικασία που ακολουθείται στο εργαστήριο βαθμονόμησης του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι σύμφωνη με τη Διεθνή Θερμοκρασιακή Κλίμακα του 1990. Η μέση αβεβαιότητα των αισθητήρων είναι $\pm 0,3$ °C.

Η καταγραφή των δεδομένων έγινε με τη χρήση ενός υπολογιστή μεγάλης ισχύος HP 3852A, ο οποίος ελέγχεται μέσω υπολογιστή, μέσω ειδικού λογισμικού το οποίο έχει δημιουργηθεί για τις ανάγκες του πειράματος. Όλοι οι αισθητήρες ανακτούν δεδομένα κάθε 30 sec (δευτερόλεπτα) και τα αποθηκεύουν κάθε 10 min (λεπτά). Ο Πίνακας 4.1.2 δείχνει τις διάφορες παραμέτρους των μετρήσεων.

4.1.2. Πειραματική Μονάδα στο CEA-Cadarache, στη Γαλλία.

Η πειραματική Φ/Β εγκατάσταση βρίσκεται στο κέντρο διαστημικών ερευνών CEA-Cadarache, στην περιοχή Cadarache της Γαλλίας ($\varphi=43,69^\circ$, $L=5,75^\circ$). Αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (poly-Si), συνολικής επιφάνειας 27,51m² και η συνολική ονομαστική μέγιστη ισχύς εξόδου 2992 Wp.
- Αισθητήρες και όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα και της επιφάνειας των Φ/Β, της ταχύτητας του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας, της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, τάσης και έντασης ηλεκτρικού ρεύματος πριν και μετά τον μετατροπέα (ανιχνευτή μέγιστης ισχύος κα inverter), κ.ά.
- Όργανα ελέγχου και βελτιστοποίησης της λειτουργίας της εγκατάστασης, μετατροπείς, κ.λ.π.



Σχήμα 4.1.3: Φ/Β πλαίσια στο CEA-Cadarache

Στο Σχήμα 4.1.3, φαίνεται το εξωτερικό τμήμα της πειραματικής διάταξης. Οι Φ/Β επιφάνειες αποτελούνται από 40 PHOTOWATT πλαίσια (0,688 m² έκαστο), μοντέλο PW 750 με αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ 75 Wp έκαστο. Η εγκατάσταση αποτελείται από 2 σειρές Φ/Β συνδεδεμένες παράλληλα και κάθε σειρά διαθέτει 20 πάνελ συνδεδεμένα σε σειρά. Η

τοποθέτηση των Φ/Β επιφανειών έχει γίνει με νότιο προσανατολισμό και χωρίς να αλληλοσκιάζονται στη διάρκεια της ημέρας, ενώ δεν υπάρχει τεχνητό εμπόδιο (λυόμενη κτιριακή κατασκευή) στη βόρεια πλευρά των Φ/Β. Η γωνία κλίσης των επιφανειών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν 30°.

Πίνακας 4.1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (CEN-Cadarache) για STC

Θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β (°C)	25	Μεταβολή χαρακτηριστικών 1,46 (mA/°C), -79 (mV/°C), -0,43(%/°C)
Μέγιστη ισχύς P_{mp} (W _p)	75	
Τάση στη μέγιστη ισχύ V_{mp} (V)	17	
Ένταση στη μέγιστη ισχύ I_{mp} (A)	4,4	
Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (V)	21,5	
Ένταση βραχυκυκλώσεως I_{sc} (A)	4,7	
Βαθμός απόδοσης η (%)	10,88	

Οι τεχνικές προδιαγραφές των Φ/Β πλαισίων, σύμφωνα με τον κατασκευαστή (συνθήκες εργαστηρίου, STC, για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m², θερμοκρασία επιφάνειας Φ/Β 25 °C, και αέρια μάζα AM=1,5), δίνονται στον Πίνακα 4.1.3. Ο συντελεστής θερμοκρασίας β_{ref} (temperature coefficient) των Φ/Β λαμβάνει την τιμή $\beta_{ref}=0,0043$ (°C⁻¹) ή αλλιώς -0,43(%/°C).

Και σε αυτή την εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής μέγιστης ισχύος (maximum power tracker). Ο ανιχνευτής διαθέτει επίσης έναν DC / DC μετατροπέα τάσεως. Η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των Φ/Β, μετρήθηκε με τη χρήση ενός πυρανομέτρου της εταιρείας Kipp & Zonen, SPLite (W/m²). Το πυρανόμετρο μετράει την ένταση της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) στην επιφάνεια των Φ/Β και είναι τοποθετημένο με κλίση ίδια με αυτή των Φ/Β.

4.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ Φ/Β ΜΟΝΑΔΩΝ

Στις επόμενες δύο ενότητες αναφέρονται συνοπτικά τα δεδομένα που καταγράφηκαν στις δύο πειραματικές μονάδες στην Αθήνα και στο Cadarache.

4.2.1. Δεδομένα Πειραματικής Μονάδας Αστεροσκοπείου

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος στην Παλαιά Πεντέλη, είναι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G , W/m²) στην κεκλιμένη επιφάνεια των Φ/Β, η ταχύτητα του ανέμου (v , m/s), η θερμοκρασία του αέρα (T_{air} , °C), η τάση (V_{in} , V) και ένταση (I_{in} , A) του ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο των Φ/Β (είσοδο στο power tracker / inverter), και στην έξοδο (V_{out} , I_{out}) από τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (power tracker / inverter) και η θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων (T_{pv} , °C). Οι μετρήσεις έγιναν σε δύο χρονικά διαστήματα από τον Μάιο μέχρι και τον Σεπτέμβριο και από τον Δεκέμβριο μέχρι τον Φεβρουάριο, ενώ οι χρονικές περιόδους μετρήσεων (με συχνότητα ανά δέκα λεπτά) ανέρχονται συνολικά σε $N=14.972$. Από τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν μόνο αυτές που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανέρχεται άνω των 100 W/m². Οι μετρήσεις που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, ήταν για $N_s=4.570$ χρονικές περιόδους από τη θερινή περίοδο και για $N_w=2.165$ χρονικές περιόδους από τη χειμερινή περίοδο. Στον Πίνακα 4.2.1 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των χρησιμοποιούμενων μετρήσεων των ως άνω παραμέτρων, κατά τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2.1: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο

(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Θερινή περίοδος (Μάιος– Σεπτέμβριος)										
G (W/m²)	402	535	633	715	789	860	921	969	1006	1125
v (m·s⁻¹)	1,55	1,97	2,31	2,59	2,85	3,11	3,41	3,83	4,44	7,34
T_{air} (°C)	25,57	27,19	28,36	29,37	30,38	31,39	32,53	33,56	35,18	41,67
T_{pv} (°C)	34,2	37,4	40,0	42,3	44,5	46,4	48,3	50,5	53,4	62,5
V_{in} (V)	29,7	29,9	30,0	30,2	30,3	30,4	30,6	30,8	31,0	32,3
I_{in} (A)	4,0	5,3	6,3	7,1	7,8	8,4	8,9	9,2	9,5	10,6
P_{in} (W)	120,5	159,9	192,7	217,3	237,0	254,2	267,9	279,0	289,8	330,9
V_{out} (V)	15,2	17,1	18,5	19,4	20,2	20,8	21,3	21,6	21,9	23,1
I_{out} (A)	7,4	8,8	9,9	10,6	11,2	11,7	12,1	12,4	12,7	97,9
P_{out} (W)	114,1	151,9	184,6	207,8	227,7	244,6	257,9	268,5	278,6	318,6
Χειμερινή περίοδος (Δεκέμβριος– Φεβρουάριος)										
G (W/m²)	146	195	258	335	431	547	665	758	836	1079
v (m·s⁻¹)	1,23	1,75	2,14	2,59	3,05	3,59	4,19	5,01	6,52	10,10
T_{air} (°C)	3,32	5,04	6,66	8,69	10,36	11,70	12,90	14,17	15,89	20,20
T_{pv} (°C)	6,4	9,2	11,9	14,2	16,3	18,7	21,2	24,2	28,2	38,6
V_{in} (V)	30,6	31,1	31,5	31,7	31,9	32,2	32,4	32,7	33,1	35,6
I_{in} (A)	1,4	1,9	2,5	3,3	4,3	5,5	6,6	7,6	8,3	10,3
P_{in} (W)	42,5	59,6	78,9	106,1	138,3	179,0	216,2	246,4	271,3	331,2
V_{out} (V)	9,1	10,9	12,4	14,2	15,8	17,6	19,1	20,2	21,1	23,0
I_{out} (A)	4,2	5,0	5,9	6,9	8,2	9,5	10,7	11,6	12,4	14,0
P_{out} (W)	38,0	54,9	74,0	100,3	131,3	170,9	208,0	236,2	261,0	320,1

Πίνακας 4.2.2: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων στη Φ/Β εγκατάσταση CEN-Cadarache

(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
G (W/m²)	242	376,2	508,0	612	704	782,6	855	928	989,0	1125
v (m·s⁻¹)	1,5	1,9	2,3	2,6	2,9	3,2	3,6	4,1	4,9	10,1
T_{air} (°C)	6,9	11,9	17,1	25,9	27,9	29,5	31,0	32,6	34,2	41,7
T_{pv} (°C)	12,2	19,3	28,2	34,9	39,0	42,6	45,7	48,4	51,9	62,5
V_{in} (V)	29,8	30,0	30,2	30,4	30,6	30,8	31,2	31,7	32,4	35,6
I_{in} (A)	2,4	3,7	5,0	6,2	7,1	7,8	8,4	8,9	9,4	10,6
P_{in} (W)	73,2	116,0	154,9	190,7	218,0	240,4	258,7	273,4	286,4	331,2
V_{out} (V)	12,0	14,8	16,8	18,3	19,4	20,3	20,9	21,4	21,8	23,1
I_{out} (A)	5,6	7,3	8,7	9,8	10,7	11,3	11,9	12,3	12,6	14,0
P_{out} (W)	68,2	109,9	147,6	181,8	208,7	231,0	248,7	262,9	275,2	320,1

Η ηλιακή ακτινοβολία (G) παρουσιάζει χαμηλές τιμές με μεγαλύτερη συχνότητα κατά τη χειμερινή περίοδο, σε σχέση με τη θερινή, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της υψηλής νέφωσης που παρουσιάζουν οι χειμερινοί μήνες. Η μέγιστη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας που καταγράφηκε στην επιφάνεια του Φ/Β είναι 1125 (W/m²) για τη θερινή περίοδο και 1079 (W/m²) για τη χειμερινή περίοδο αντίστοιχα. Η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια της ημέρας, η οποία διαφοροποιείται και ανά εποχή, οδηγεί και στη διαφοροποίηση των τιμών της τελικής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος ανά εποχή. Συγκεκριμένα το 60% των

τιμών της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (P), που καταγράφηκαν στην πειραματική μονάδα των Φ/Β, είναι περίπου διπλάσιες κατά τη θερινή περίοδο.

Οι μετρήσεις από τη Φ/Β μονάδας στη Πεντέλη που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ανάλυση, ήταν συνολικά για N=6.727 χρονικές περιόδους, με συχνότητα ανά 10 λεπτά. Στον Πίνακα 4.2.2 δίνεται η ποσοστιαία κατανομή του συνόλου των μετρήσεων.

4.2.2. Δεδομένα Πειραματικής Μονάδας CEN-Cadarache

Τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν από το ερευνητικό κέντρο CEA-Cadarache, της Γαλλίας, εκτός από τις μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας (G, W/m²) στην επιφάνεια των Φ/Β, της ταχύτητα του ανέμου (v, m/s), της θερμοκρασία του αέρα (T_{air}, °C), της τάσης (V_{in}, V) και έντασης (I_{in}, A) ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο των Φ/Β και στην έξοδο (V_{out}, I_{out}) από τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (power tracker / inverter) και της θερμοκρασίας των Φ/Β (T_{pV}, °C), περιελάμβαναν μεταξύ άλλων, τον ηλιακό χρόνο (HX), το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s), τη γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β και έναν ενδεικτικό συντελεστή που αφορά την αιθριότητα του καιρού, ο οποίος σχετίζεται με τη νέφωση της περιοχής.

Οι μετρήσεις έγιναν για χρονικό διάστημα ενός έτους από τον Ιανουάριο έως τον Δεκέμβριο, ενώ οι χρονικές περιόδους μετρήσεων (με συχνότητα ανά 10 δευτερόλεπτα) ανέρχονται συνολικά σε N=2.580.175. Από τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν μόνο αυτές που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανέρχεται άνω των 100 W/m² και έως 1200 W/m². Οι μετρήσεις από τη Φ/Β μονάδας στο CEA-Cadarache που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, ήταν συνολικά για N=218.042 χρονικές περιόδους, με συχνότητα περίπου ανά 1 λεπτό. Στον Πίνακα 4.2.3 δίνεται η ποσοστιαία κατανομή του συνόλου των μετρήσεων.

Πίνακας 4.2.3: Ποσοστιαία κατανομή (%) των μετρήσεων στη Φ/Β εγκατάσταση CEN-Cadarache

(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
G (W/m²)	183	268	363	477	597	710	801	884	969	1200
v (m·s⁻¹)	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	1,0	1,6	2,3	3,3	13,4
T_{air} (°C)	8,8	12,4	14,8	17,2	19,6	22,4	24,9	27,4	30,2	40,3
T_{pV} (°C)	16,4	23,3	29,1	33,9	38,4	43,0	48,2	53,7	60,2	74,7
V_{in} (V)	276	283	290	297	303	309	314	321	329	393
I_{in} (A)	1,3	1,9	2,5	3,3	4,2	5,1	5,8	6,4	7,1	9,5
P_{in} (W)	400	589	802	1049	1303	1529	1709	1845	1982	2999
V_{out} (V)	229	231	234	235	237	238	240	242	244	251
I_{out} (A)	1,6	2,3	3,2	4,1	5,1	6,0	6,6	7,1	7,6	11,8
P_{out} (W)	346	525	727	962	1205	1419	1587	1714	1843	2870

Ένας σημαντικός αριθμός μετρήσεων της ταχύτητας του αέρα κατά τη χειμερινή περίοδο στο Cadarache δεν έχει καταγραφεί (σφάλμα μετρήσεων), αλλά και για τις υπόλοιπες περιόδους η ταχύτητα του αέρα που καταγράφηκε παρουσιάζει χαμηλές τιμές σε σχέση και με τις μετρήσεις στην περιοχή της Παλαιάς Πεντέλης στην Αθήνα. Σημειώνεται ότι η Φ/Β εγκατάσταση στη κέντρο CEN-Cadarache, βρίσκεται μπροστά από μία λυόμενη κτιριακή κατασκευή, η οποία ανακόπτει την ταχύτητα του αέρα προς τα Φ/Β.

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β

Βάσει των πειραματικών μετρήσεων που έγιναν στην Παλαιά Πεντέλη υπολογίστηκαν όλες οι παράμετροι που είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση της λειτουργίας των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι παράμετροι αυτές είναι η γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β, για κάθε χρονική στιγμή μέτρησης, ο συντελεστής διαπερατότητας-απορροφητικότητας $\tau(\theta)$ της επιφάνειας του Φ/Β, η πτώση τάσης των Φ/Β (ΔV), ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης (%) των Φ/Β στην είσοδο (n_{in}) και στην έξοδο (n_{out}) από τον ανιχνευτή μέγιστου σημείου και τον μετατροπέα, καθώς και ο βαθμός απόδοσης του power tracker / inverter (n_{inv}). Στον Πίνακα 4.3.1 δίνεται συγκεντρωτικά η ποσοστιαία κατανομή (%) των τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β, όπως υπολογίζονται στις ενότητες που ακολουθούν, βάσει των πειραματικών μετρήσεων κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο.

Πίνακας 4.3.1: Ποσοστιαία κατανομή (%) των τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β που υπολογίστηκαν βάσει των μετρήσεων, κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο, στην Παλαιά Πεντέλη

(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Θερινή περίοδος (Μάιος– Σεπτέμβριος)										
θ (deg)	8.2	14.1	19.1	24.7	30.8	37.2	43.7	50.8	60.9	79.4
$\tau(\theta)$	0.854	0.897	0.917	0.928	0.935	0.939	0.941	0.943	0.945	0.947
n_{in} (%)	8.0	8.2	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	10.0
ΔV (V)	8.1	8.3	8.4	8.6	8.7	8.8	9.0	9.2	9.4	10.7
n_{out} (%)	7,7	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	9,6
n_{inv} (%)	89,7	91,9	93,3	94,3	94,9	95,4	95,9	96,2	96,4	115,1
Χειμερινή περίοδος (Δεκέμβριος– Φεβρουάριος)										
θ (deg)	36,2	39,2	41,5	43,6	46,8	50,8	55,2	60,1	66,4	77,8
$\tau(\theta)$	0,894	0,929	0,939	0,944	0,947	0,948	0,949	0,949	0,949	0,949
n_{in} (%)	8,4	8,7	9,0	9,1	9,2	9,3	9,5	9,6	9,7	10,4
ΔV (V)	9,0	9,5	9,9	10,1	10,3	10,6	10,8	11,1	11,5	14,0
n_{out} (%)	7,5	8,1	8,4	8,6	8,8	8,9	9,0	9,2	9,3	9,9
n_{inv} (%)	92,9	94,7	95,2	95,6	96,0	96,2	96,4	96,5	96,6	108,2

Επιπλέον για κάθε χρονική στιγμή υπολογίστηκαν και οι παράμετροι που σχετίζονται με την ηλιακή γεωμετρία, όπως η ζενιθιακή γωνία (θ_z) και η αέρια μάζα (AM).

4.3.1. Γεωμετρικοί Παράγοντες Ηλιακής Ακτινοβολίας

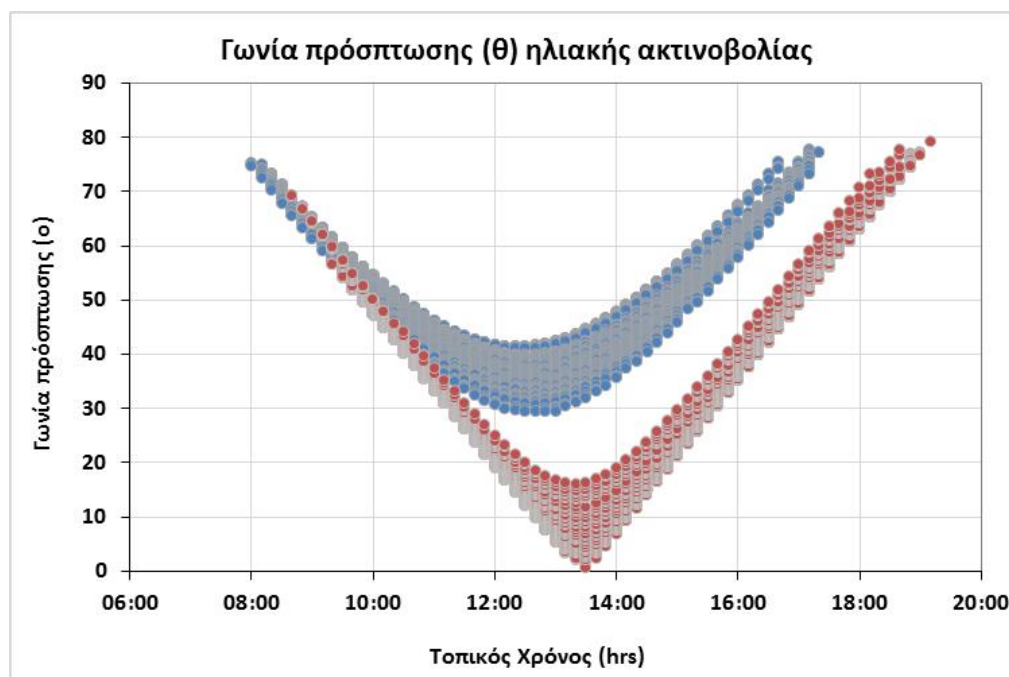
Η γωνία πρόσπτωσης (θ , σε μοίρες ($^\circ$)) της ηλιακής ακτινοβολίας στην κεκλιμένη ($\beta = 20^\circ$) επιφάνεια των Φ/Β, υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση [41]:

$$\cos \theta = \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) \quad (4.3.1)$$

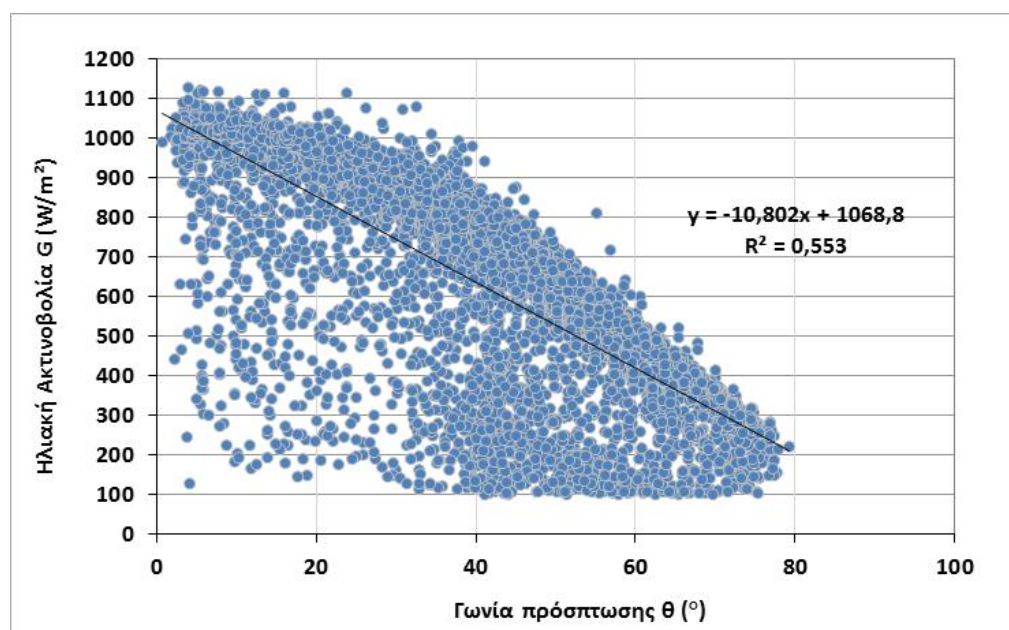
όπου φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής των Φ/Β, β είναι η κλίση της επιφάνειας των Φ/Β, ω (σε μοίρες ($^\circ$)) είναι η ωριαία γωνία του ήλιου και δ (σε μοίρες ($^\circ$)) η ηλιακή απόκλιση.

Στο Σχήμα 4.3.1 απεικονίζεται η διακύμανση των τιμών της γωνίας πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας (G) πάνω στην κεκλιμένη επιφάνεια των Φ/Β με κλίση (β), σε συνάρτηση με τον τοπικό χρόνο (hrs) της περιοχής της Παλαιάς Πεντέλης, στη διάρκεια των ημερών μέτρησης,

κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινη σήμανση καμπύλης) και τη χειμερινή (μπλε σήμανση καμπύλης).



Σχήμα 4.3.1: Γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β, στη διάρκεια της ημέρα, κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινη καμπύλη) και τη χειμερινή (μπλε καμπύλη)

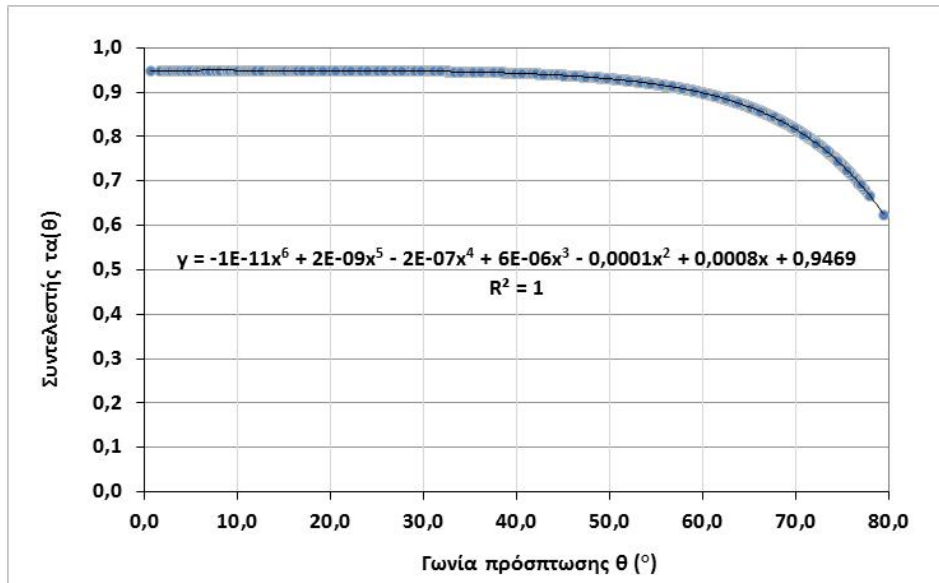


Σχήμα 4.3.2: Ηλιακή ακτινοβολία (G) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ) στην επιφάνεια Φ/Β

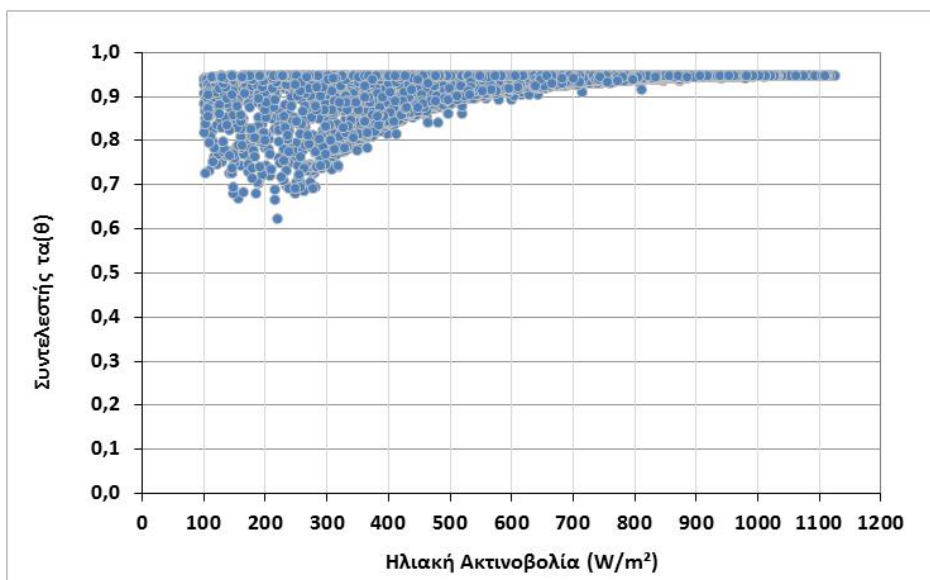
Οι μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης καταγράφονται τις μεσημεριανές ώρες της θερινής περιόδου (Σχήμα 4.3.1), όπου παρατηρούνται και οι μέγιστες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για τις αίθριες ημέρες (Σχήμα 4.3.2). Η μεγάλη διασπορά των τιμών της ηλιακής ακτινοβολία στο Σχήμα 4.3.2 οφείλεται σε χρονικές στιγμές με νέφωση, οπότε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει πολύ χαμηλές τιμές και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G) είναι κυρίως διάχυτη. Αντίστοιχα, οι μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (θ) δίνουν χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των Φ/Β πανέλων.

Η μεταφορά της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του γυάλινου καλύμματος πάνω στη συλλεκτική επιφάνεια και η τελική αξιοποίησή της υπολογίζεται με πολύ καλή ακρίβεια από την Εξίσωση 2.2.6, για κάθε είδος ηλιακής ακτινοβολίας (άμεση, διάχυτη, ανακλώμενη).

Ο συντελεστής (τα), που είναι το γινόμενο της διαπερατότητας (τ) του καλύμματος επί την απορροφητικότητα (α) της επιφάνειας του Φ/Β, εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (G) πάνω σε μια κεκλιμένη επιφάνεια (β≠0), τη γωνία διάθλασης του τζαμιού (θ_t), τον συντελεστή εξάλειψης K (glazing extinction coefficient) και το πάχος του γυάλινου καλύμματος L. Για πολύ καθαρό γυαλί (water white glass) με πάχος L=0.002 mm, λαμβάνεται το K= 4m⁻¹. Η γωνία διάθλασης υπολογίζεται από την Εξίσωση 2.2.7 για αδιάστατο δείκτη διάθλασης για το γυαλί n/n_r = 1,526.



Σχήμα 4.3.3: Συντελεστής τα(θ) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (θ)



Σχήμα 4.3.4: Συντελεστής τα(θ) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (G)

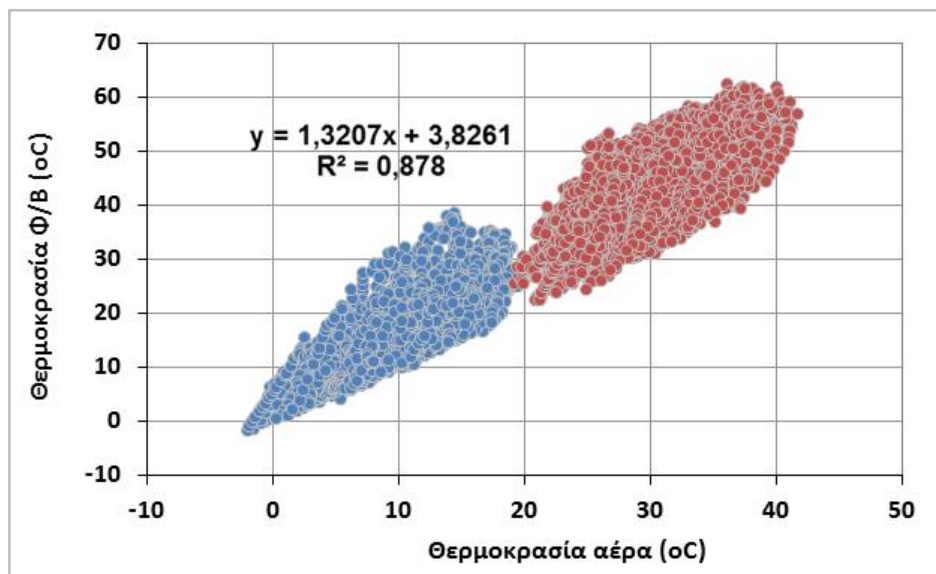
Για την περίπτωση του γυάλινου καλύμματος των Φ/Β της πειραματικής μονάδας, η οποία διαθέτει μονό «καθαρό γυαλί», μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η Εξίσωση 2.2.10 για τον

υπολογισμό του μέσου συντελεστή $\tau_a(\theta)$, η οποία προκύπτει από την Εξίσωση 2.2.6 για κάλυμμα μονού τζαμιού, σε συνάρτηση μόνο με τη γωνία πρόσπτωσης.

Στο Σχήμα 4.3.3 [41,60-61] απεικονίζεται η διακύμανση του συντελεστή $\tau_a(\theta)$ όπως προκύπτει από την εφαρμογή της Εξίσωσης 2.2.6 σε συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης και της γωνίας διάθλασης για το μονό τζάμι των Φ/Β. Ο συντελεστής (τ_a) μειώνεται σημαντικά, κάτω από 0,8 (80%), για γωνίες πρόσπτωσης άνω των 70°. Μικρές τιμές του συντελεστή (τ_a) σημαίνει αντίστοιχα και χαμηλές τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά διαπερνά τα γυάλινο κάλυμμα και απορροφάται προς αξιοποίηση από τη συλλεκτική επιφάνεια του κρυσταλλικού Φ/Β, (Σχήμα 4.3.4). Χαμηλές τιμές του συντελεστή (τ_a), παρατηρούνται τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες της περιόδου μετρήσεων λόγω του χαμηλού ηλιακού ύψους.

4.3.2. Παράμετροι και Φυσικά Μεγέθη Λειτουργίας Φ/Β

Η διακύμανση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των Φ/Β (T_{pv}), σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (εξωτερική) θερμοκρασία αέρα (T_{air}), ακολουθεί μιας γραμμικής μορφής απεικόνιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.5, αλλά με μεγάλη διασπορά. Η διασπορά της θερμοκρασίας των Φ/Β για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, κυμαίνεται περίπου από 20K έως 25K κατά τη θερινή περίοδο και περίπου 10K έως 15K για τη χειμερινή περίοδο.

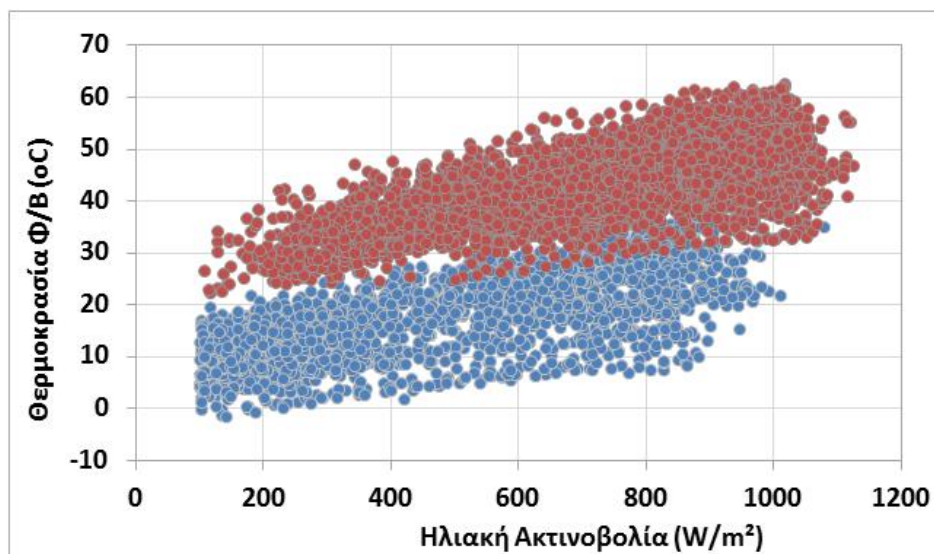


Σχήμα 4.3.5: Θερμοκρασία Φ/Β (T_{pv}) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αέρα (T_{air}), κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινα σημεία) και τη χειμερινή (μπλε σημεία)

Η μετρούμενη θερμοκρασία του Φ/Β (T_{pv}) ήταν σημαντικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αέρα (T_{air}), με μέσο όρο περίπου 16,8°C τη χειμερινή περίοδο και 49,9°C τη θερινή, δεδομένου ότι τους θερινούς μήνες η θερμότητα που αποθηκεύεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο Φ/Β δεν μπορεί να απορριφθεί στο περιβάλλον.

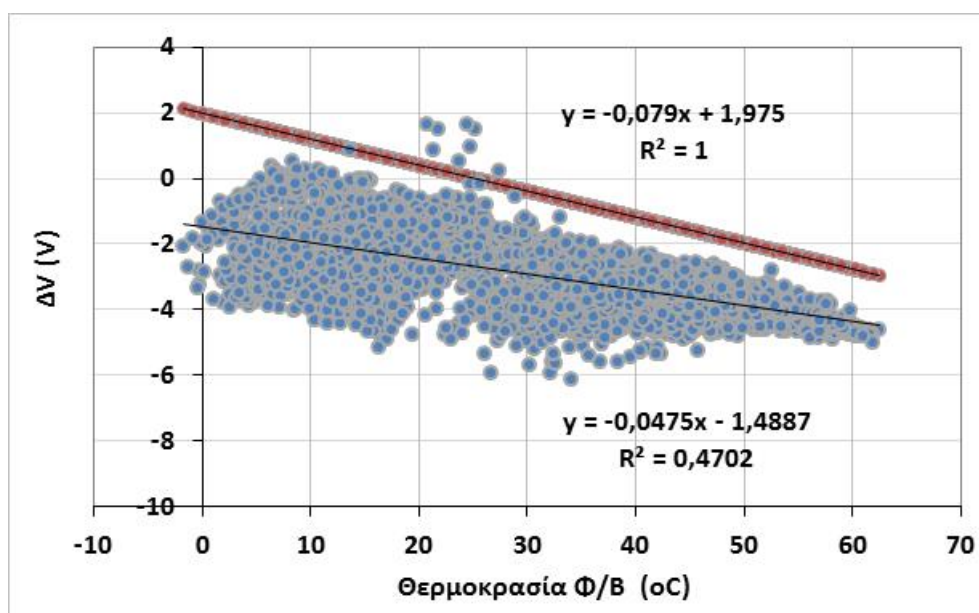
Η αυξημένη διασπορά της θερμοκρασίας T_{pv} για δεδομένη θερμοκρασία αέρα (T_{air}) οφείλεται κυρίως στη διακύμανση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β, ενώ η ταχύτητα του ανέμου (v), είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει ελάχιστα τη θερμοκρασία των Φ/Β σε μικρό βαθμό. Η διακύμανση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των Φ/Β, σε συνάρτηση με την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.6, για τις δύο διαφορετικές περιόδους.

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση του Ross [σχ. 2.2.16] $T_{pv} = T_{air} + k \cdot G_T$, από τις μετρήσεις της Φ/Β μονάδας προκύπτει μέσος συντελεστής $k=0,017$. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η μονάδα είναι εγκατεστημένη σε υψόμετρο, εκτεθειμένη σε υψηλές ταχύτητες ανέμου (ανοικτός χώρος), χωρίς φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.



Σχήμα 4.3.6: Θερμοκρασία Φ/Β (T_{pv}) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (G), κατά τη θερινή περίοδο (κόκκινα σημεία) και τη χειμερινή (μπλε σημεία)

Η τάση μέγιστης ισχύος V_{mp} για τις δύο Φ/Β μονάδες του πειράματος που είναι συνδεδεμένες σε σειρά είναι 34 Volt (17 Volt έκαστη), για θερμοκρασία Φ/Β 25 °C. Ωστόσο η τάση μέγιστης ισχύος, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά STC του Φ/Β, μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β με ρυθμό μεταβολής $-79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.7 με κόκκινη χρώμα.

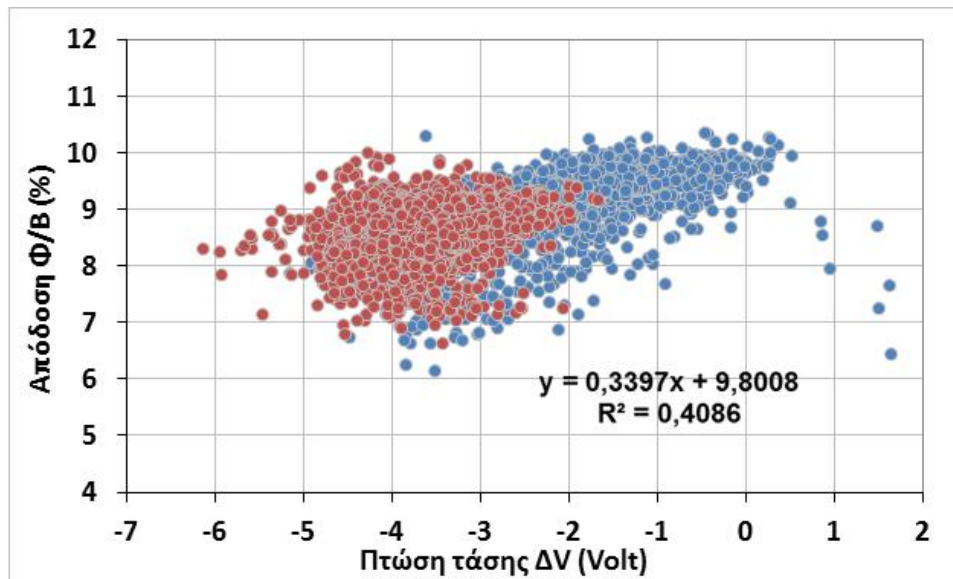


Σχήμα 4.3.7: Πτώση τάσης συναρτήσει Θερμοκρασία Φ/Β, σύμφωνα με STC (κόκκινα σημεία) και σύμφωνα με μετρήσεις (μπλε σημεία)

Στην πράξη η μεταβολή της τάσης λειτουργίας του Φ/Β διαφοροποιείται σημαντικά και εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους εκτός από τη θερμοκρασία του Φ/Β. Βάσει των πειραματικών

μετρήσεων υπολογίστηκε η πτώση τάσης (ΔV , Volt) των Φ/B σε σχέση με την ονομαστική τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp} , Volt), η οποία παρουσιάζει μια γραμμικού τύπου συνάρτηση (Σχήμα 4.3.7 μπλε χρώμα), αλλά με διασπορά από 1 Volt έως και 6 Volt για συγκεκριμένες τιμές της θερμοκρασίας του Φ/B . Ο μέσος ρυθμός μεταβολής της τάσης λειτουργίας του Φ/B σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του Φ/B υπολογίστηκε στα $-145\text{mV}/^\circ\text{C}$ (130 έως $171\text{mV}/^\circ\text{C}$). Η τιμή αυτή είναι σχεδόν διπλάσια από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής για STC ($-79\text{mV}/^\circ\text{C}$) στον Πίνακα 4.1.1.

Στο Σχήμα 4.3.8 απεικονίζεται η πραγματική ενεργειακή απόδοση του Φ/B σε συνάρτηση με την πτώση τάσης λειτουργίας του (ΔV), η οποία είναι η διαφορά της μετρούμενης σε σχέση με την αναμενόμενη ονομαστική τάση μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 4.3.8: Διακύμανση απόδοσης Φ/B συναρτήσει της πτώσης τάσης ΔV , διαφορά μετρούμενης με αναμενόμενη ονομαστική (STC), χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα)

Σύμφωνα με τη θεωρητική προσέγγιση, η απόδοση ενός Φ/B είναι ένα πολυπαραμετρικό μέγεθος και εξαρτάται κυρίως από το συντελεστή θερμοκρασίας β_{ref} (temperature coefficient), όπου για την πειραματική εγκατάσταση (Πίνακας 4.1.1) είναι $\beta_{ref} = 0,0043\text{ }(^{\circ}\text{C}^{-1})$ ή αλλιώς $-0,43\text{ }(\%/^{\circ}\text{C})$. Βάσει του συντελεστή θερμοκρασίας υπολογίστηκε η θεωρητικά αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση των Φ/B σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/B από την ακόλουθη Εξίσωση, η οποία προκύπτει από την Εξίσωση 2.2.21, ως εξής:

$$\begin{aligned} n_{pv} &= n_{T_{ref}} \cdot [1 - \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - T_{ref})] \Rightarrow n_{pv} = -0,0494 \cdot (T_{pv} - T_{ref}) + 11,33 \Rightarrow \\ n_{pv} &= -0,0494 \cdot T_{pv} + 12,55 \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

όπου, $n_{T_{ref}}$ είναι ο ονομαστικό βαθμός απόδοσης των Φ/B (STC) για την αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Πίνακας 4.1.1).

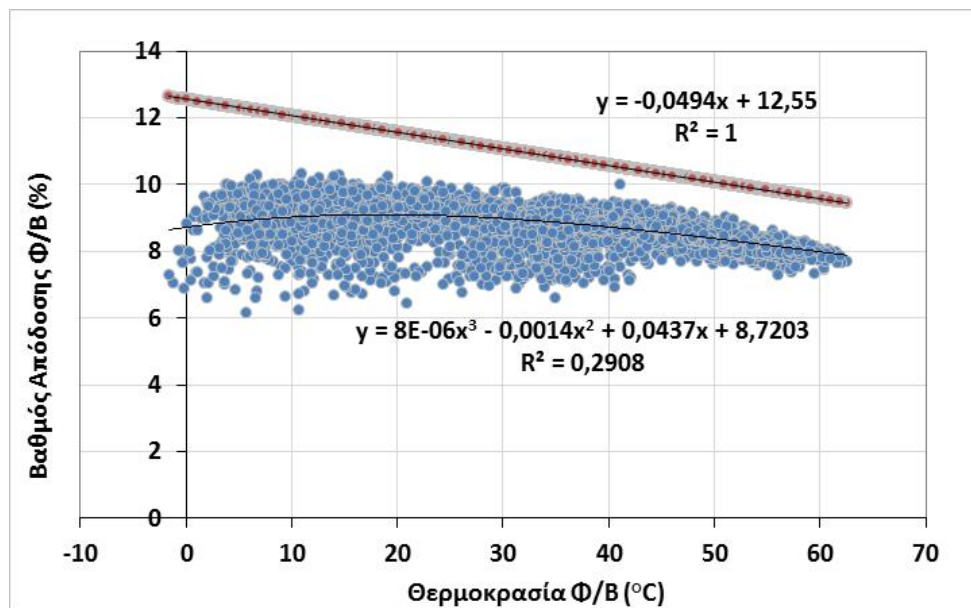
Επιπλέον, υπολογίστηκε και η πραγματική ενεργειακή απόδοση των Φ/B ($n_{pv,act}$, %) της πειραματικής εγκατάστασης από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$n_{pv,act} = \frac{P_{pv-in}}{G_s \cdot A} \quad (4.3.3)$$

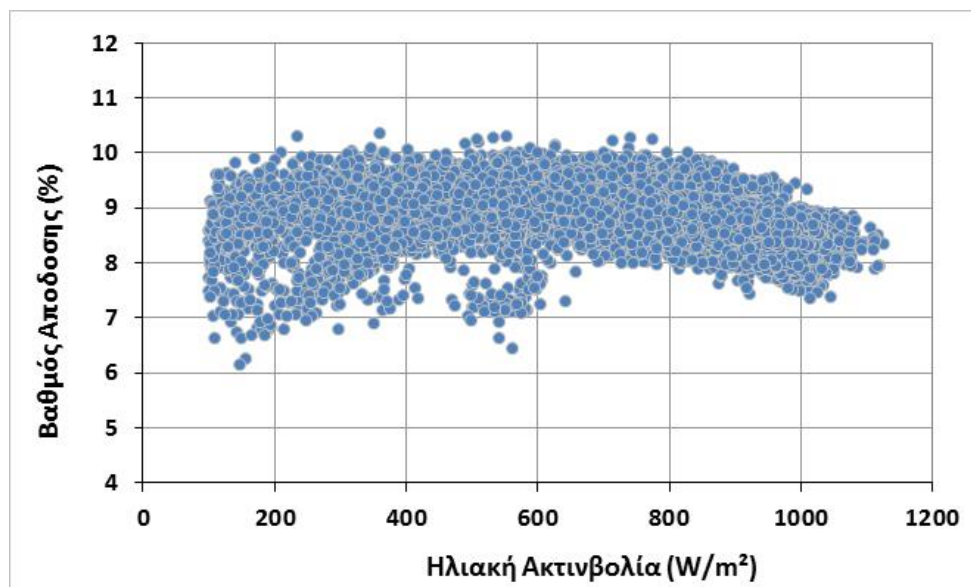
όπου $n_{pv,act}$ είναι η ενεργειακή απόδοση (%), P_{pv-in} είναι η ηλεκτρική ισχύς (Watt) στην έξοδο από το Φ/B (πριν το inverter), G_s είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) και A είναι η συνολική επιφάνεια των Φ/B ($3,467\text{ m}^2$).

Στο Σχήμα 4.3.9 με μπλε χρώμα απεικονίζεται η διακύμανση της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β όπως προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις και την Εξίσωση 4.2.2, βάσει των μετρήσεων της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου (P) από το Φ/Β (πριν το inverter) και από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως αναμενόταν, τα Φ/Β παρουσιάζουν υψηλότερο βαθμό απόδοση κατά τη χειμερινή περίοδο σε σχέση με τη θερινή περίοδο, όπου καταγράφονται υψηλότερες θερμοκρασίες στην επιφάνεια των Φ/Β.

Στο ίδιο Σχήμα 4.3.9 η γραμμική απεικόνιση με κόκκινο χρώμα, αφορά στη θεωρητικά αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση, όπως προέκυψε από την Εξίσωση 4.3.2 και για συντελεστή θερμοκρασίας $\beta_{ref}=0,0043$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).



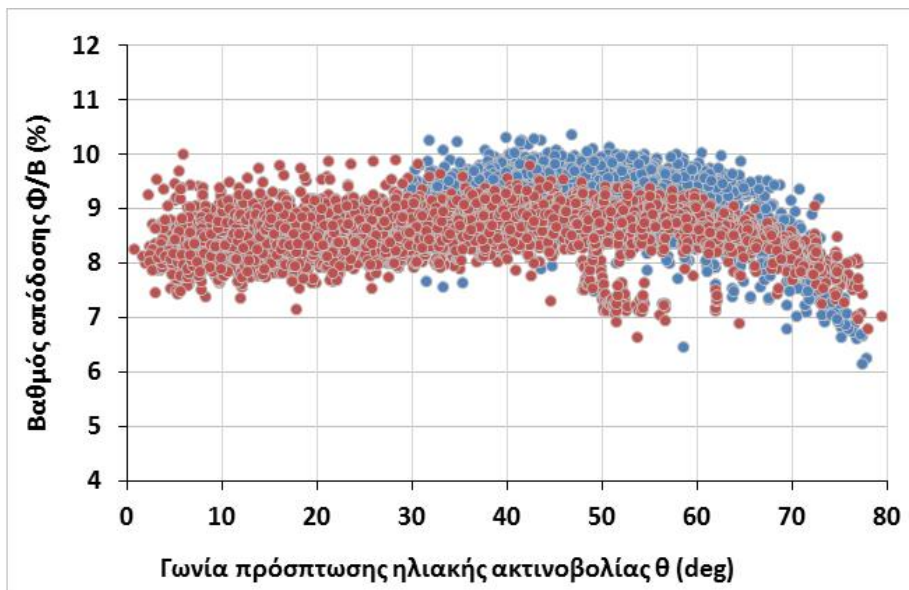
Σχήμα 4.3.9: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β.



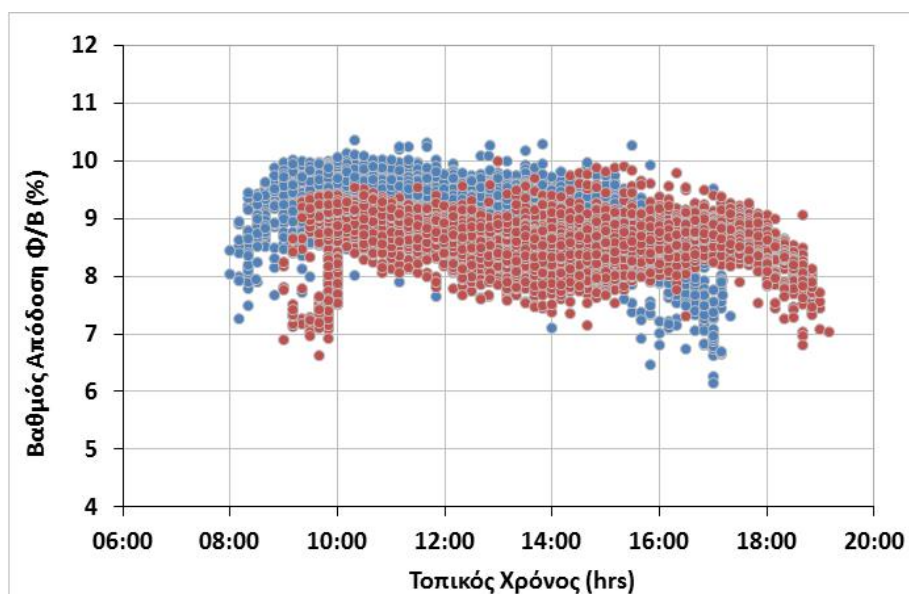
Σχήμα 4.3.10: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία

Είναι φανερό ότι η ενεργειακή απόδοση (%) του Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος διαφοροποιείται σημαντικά από την αναμενόμενη θεωρητική απόδοση σε συνθήκες εργαστηρίου (STC). Ειδικότερα, από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή

της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων δεν υπερβαίνει το 10,4% (Σχήμα 4.3.9). Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται κατά τη χειμερινή περίοδο, όταν η θερμοκρασία των Φ/Β είναι χαμηλή ($\approx 10^{\circ}\text{C}$) και οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνονται από 600 έως 800 W/m^2 . Η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_s), αυξάνει τη θερμοκρασία των Φ/Β (T_{pv}) και κατά συνέπεια μειώνει την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β (Σχήμα 4.3.10) ειδικά για τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας άνω των 800 W/m^2 . Οι χαμηλές τιμές της ενεργειακής απόδοσης ($\eta_{pv,act} < 8\%$) των Φ/Β που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.3.9 και 4.3.10, αναφέρονται σε χρονικές περιόδους νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα, για γωνίες πρόσπτωσης ηλιακή ακτινοβολίας (θ) μεγαλύτερες από 70° , Σχήμα 4.3.11.



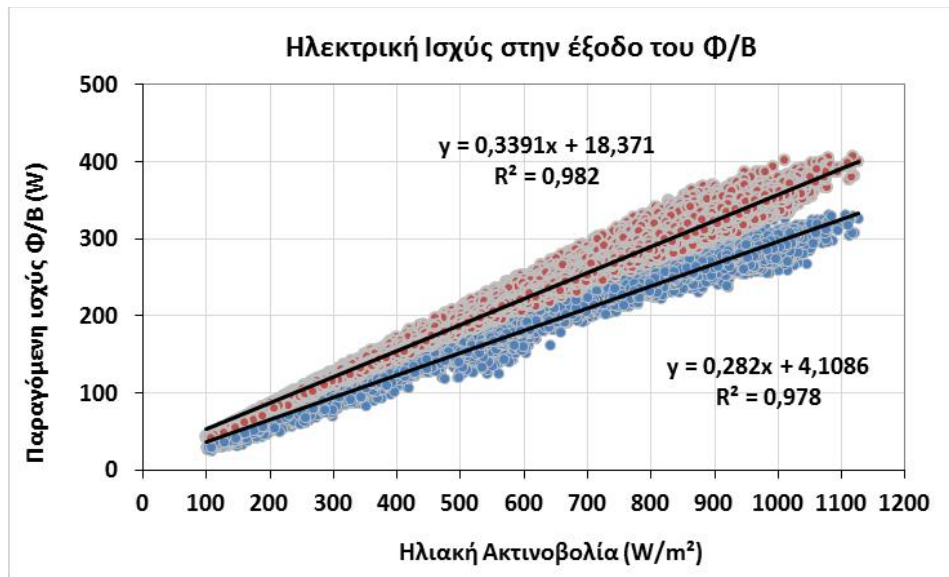
Σχήμα 4.3.11: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (θ)



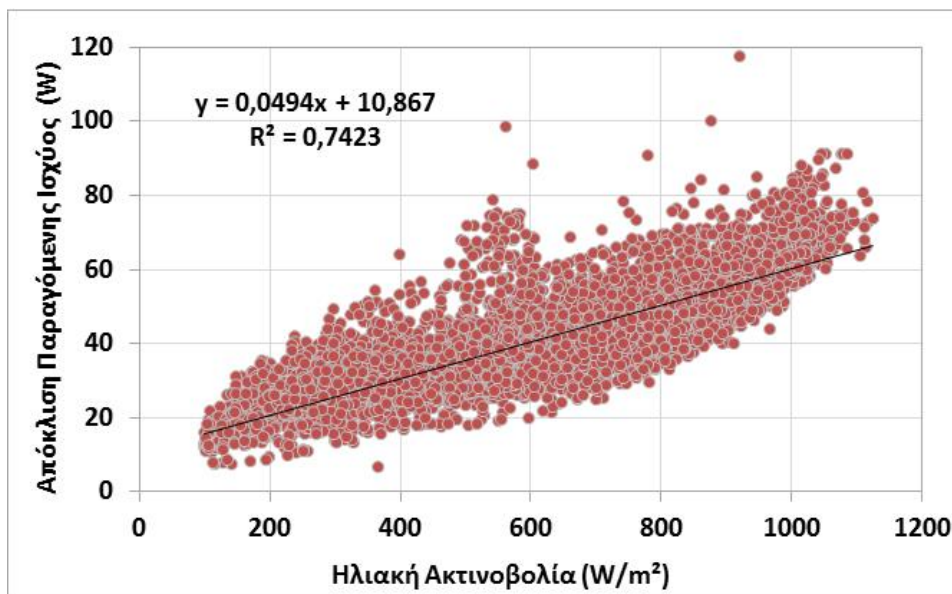
Σχήμα 4.3.12: Ενεργειακή απόδοση Φ/Β σε συνάρτηση με τον τοπικό χρόνο (hrs)

Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με τον τοπικό χρόνο ($TX = GMT + 2\text{hrs}$) απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.12. Όπως αναφέρθηκε, οι χαμηλότερες τιμές της απόδοσης των Φ/Β στη διάρκεια της μέρας αντιστοιχούν σε μεγάλες γωνίες ηλιακής πρόσπτωσης (πρωινές και

απογευματινές ώρες), οι οποίες εμφανίζονται δύο φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας, συμμετρικά ως προς το ηλιακό μεσημέρι, και είναι η χρονική περίοδος με το χαμηλότερο συντελεστή $\tau(\theta)$, διαπερατότητας-απορροφητικότητας του Φ/B .



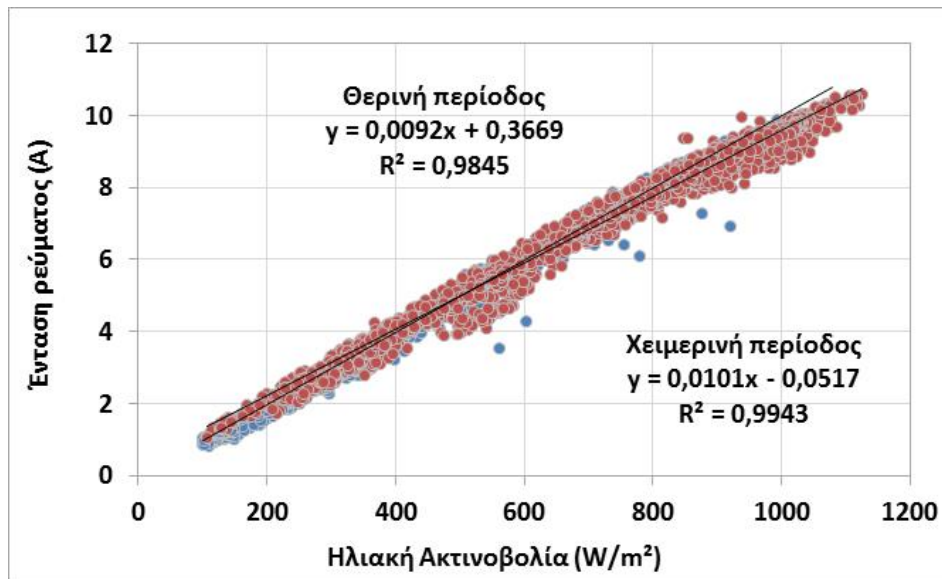
Σχήμα 4.3.13: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W) στην έξοδο του Φ/B (μπλε χρώμα καμπύλης), και αναμενόμενη θεωρητική ηλεκτρική ισχύς (κόκκινο χρώμα καμπύλη) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2)



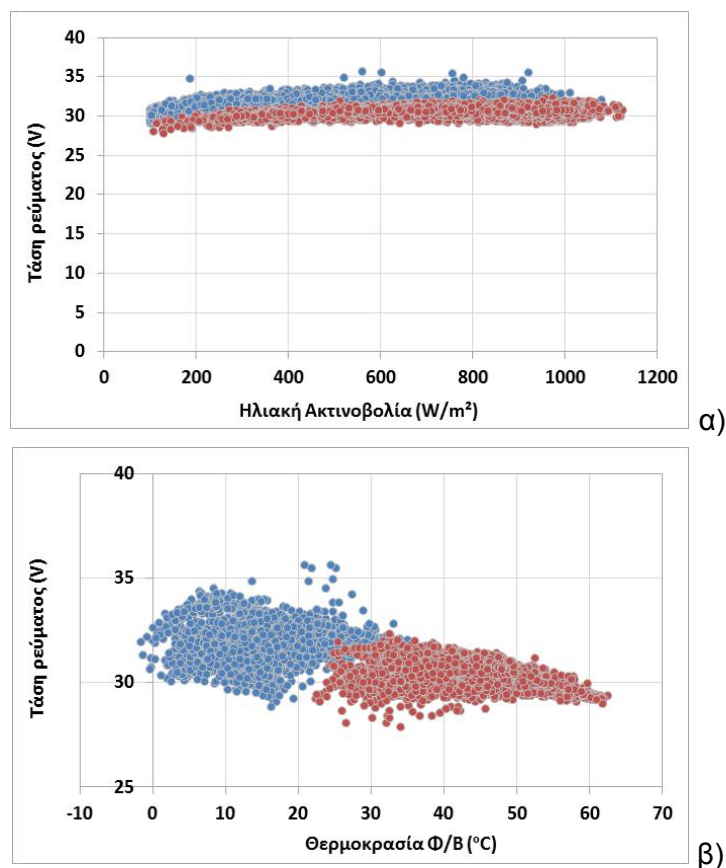
Σχήμα 4.3.14: Απόκλιση της παραγόμενης στην έξοδο του Φ/B και της αναμενόμενης θεωρητικής ηλεκτρικής ισχύος σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)

Από τη θεωρητικά αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση των Φ/B (η_{pv}) υπολογίστηκε και η θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρική ισχύς P_{pv} , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.13 με κόκκινο χρώμα, βάσει της μετρούμενης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_s). Στο ίδιο Σχήμα, με μπλε χρώμα, απεικονίζεται και η μετρούμενη ηλεκτρική ισχύς (P_{pv-in} ή P_{pv-act} , Watt) στην έξοδο από τα Φ/B (πριν το inverter). Η απόκλιση της θεωρητικά αναμενόμενης και της μετρούμενης παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζει σημαντική απόκλιση, ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές της έντασης της ηλιακής ενέργειας (Σχήμα 4.3.14), όπου υπερβαίνει σε κάποιες

περιπτώσεις και τα 80Watt. Η μέση ποσοστιαία απόκλιση της αναμενόμενης και της τελικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι περίπου 18%.



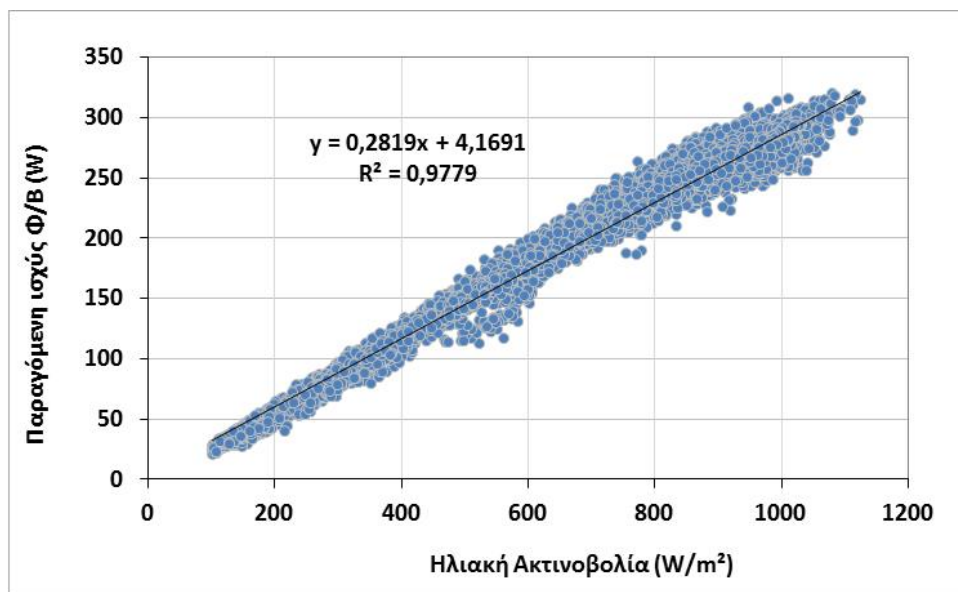
Σχήμα 4.3.15: Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο του Φ/Β (I_{pv-act}) σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²), χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα)



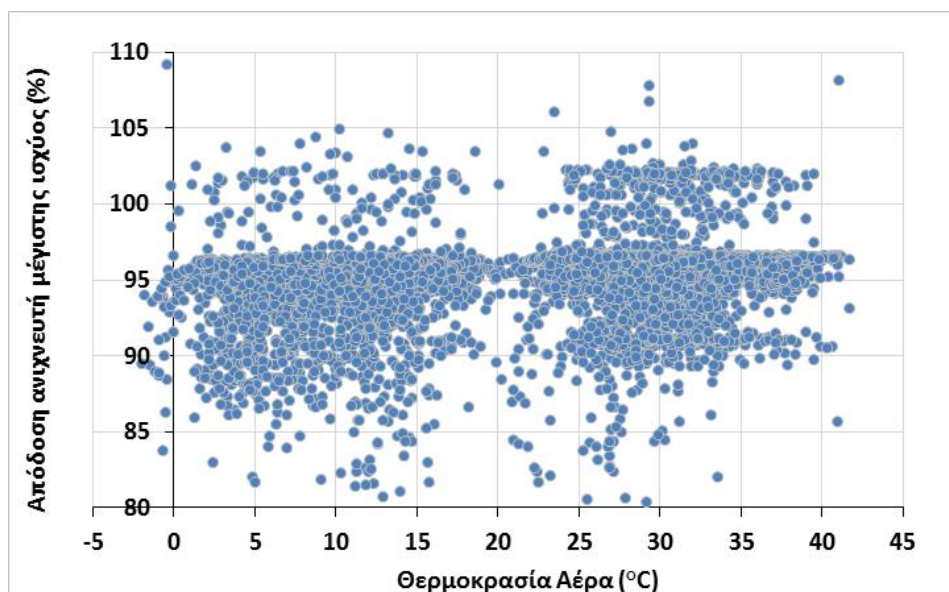
Σχήμα 4.3.16: Τάση ηλεκτρικού ρεύματος στην έξοδο του Φ/Β (V_{pv-act}) σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (α) και την θερμοκρασία του Φ/Β (β). Χειμερινή περίοδος (μπλε χρώμα) και θερινή περίοδος (κόκκινο χρώμα)

Αντίστοιχη απεικόνιση με αυτή της ισχύος εξόδου από το Φ/Β έχει και η ένταση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.3.15), η οποία παρουσιάζει πολύ καλή γραμμική προσέγγιση σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Επιπλέον, η τάση του ρεύματος στην έξοδο του Φ/Β, παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές κατά τη χειμερινή περίοδο όπου η θερμοκρασία των Φ/Β είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές τη θερινή περίοδο (Σχήμα 4.3.16).

Στην πειραματική μονάδα παρεμβάλλεται ένας ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (power tracker) με ενσωματωμένο ένα ανορθωτή/μετατροπέα (inverter) DC/DC, για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος και τη μετατροπή στην αντίστοιχη τιμή τάσης. Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο από τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3.17, σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η οποία παρουσιάζει μια γραμμικού τύπου μορφή.



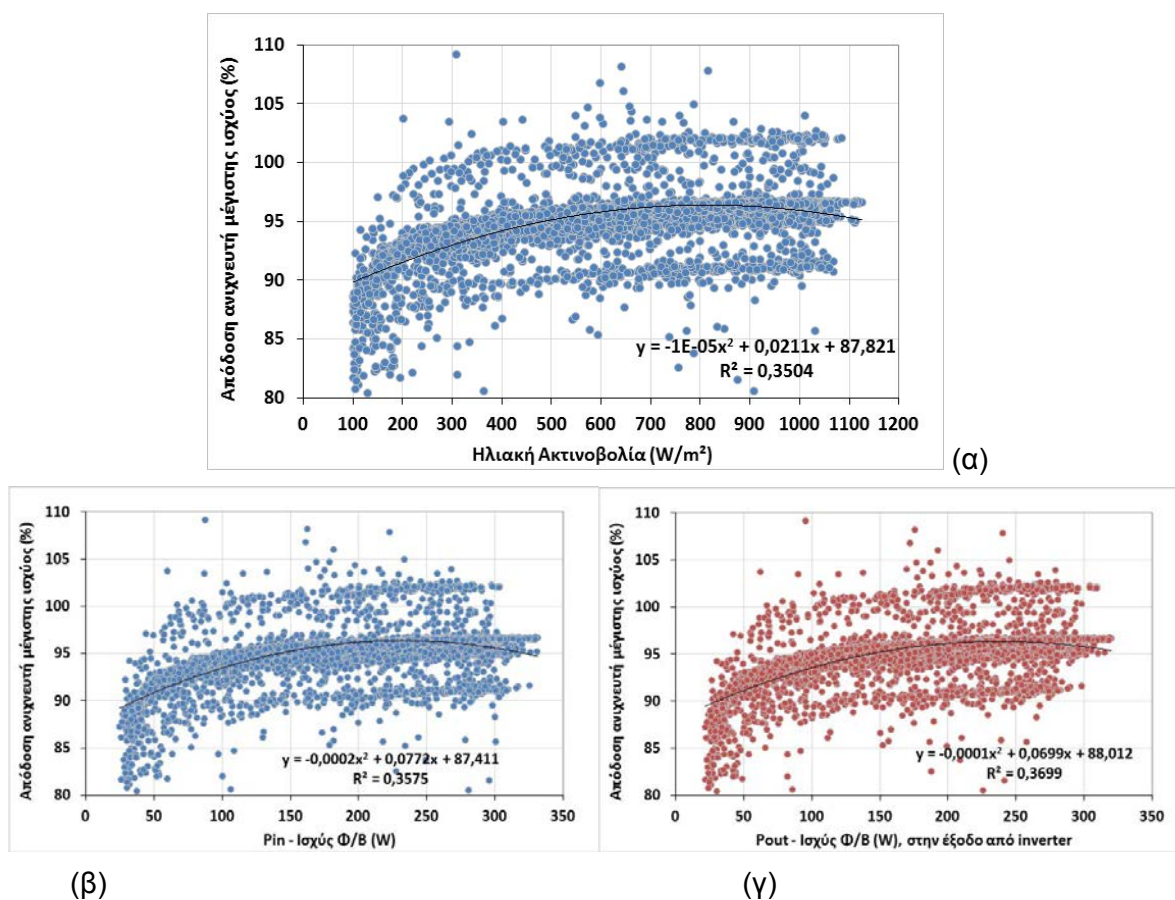
Σχήμα 4.3.17: Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W) στην έξοδο από τη διάταξη του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και του ανορθωτή (inverter), σε συνάρτηση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)



Σχήμα 4.3.18: Βαθμός απόδοσης διάταξης ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και ανορθωτή σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αέρα

Η απόκλιση της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο από το Φ/Β και στην έξοδο από τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος, ουσιαστικά απεικονίζει το βαθμό απόδοσης του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος, με μέση τιμή απόδοσης 95,1%, βάσει των πειραματικών μετρήσεων, Σχήμα 4.3.18. Οι μεγάλες τιμές του βαθμού απόδοσης (πάνω από 100%) του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος που προέκυψαν από τις μετρήσεις, οφείλονται κυρίως στο στιγμιαίο χρόνο απόκρισης του Φ/Β και των οργάνων μέτρησης (πυρανόμετρο, βολτόμετρο κ.λ.π.). Στη διάρκεια του πειράματος παρατηρούνται μεταβατικές περιόδους με έντονη διακύμανση των κλιματικών συνθηκών (π.χ. από μερική ή ολική νέφωση σε καθαρό ουρανό), γεγονός που οδηγεί σε αποκλίσεις στις αντίστοιχες μετρήσεις, δεδομένου ότι ο χρόνος απόκρισης είναι κάποια δευτερόλεπτα (sec), όπως π.χ. για ένα πυρανόμετρο είναι της τάξεως των περίπου 30sec.

Στο Σχήμα 4.3.19 απεικονίζεται ο βαθμός απόδοσης της διάταξης του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και ανορθωτή, σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία, την ισχύ εξόδου από το Φ/Β και τη ισχύ εξόδου από το ανιχνευτή μέγιστης ισχύος και ανορθωτή (inverter).



Σχήμα 4.3.19: Βαθμός απόδοσης ανιχνευτή μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (α), την ισχύ εξόδου από το Φ/Β (β) και την ισχύ εξόδου από το inverter (γ)

Η απόδοση του συστήματος μετατροπής (MPP/ inverter) παρουσιάζει μια πτωτική τάση για χαμηλότερες τιμές της παραγόμενης ισχύος (P) του Φ/Β (Σχήμα 4.3.19). Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα επηρεάζει ελάχιστα, αλλά με θετικό πρόσημο (Σχήμα 4.3.18), το βαθμό απόδοσης του συστήματος μετατροπής.

4.3.3. Λειτουργία Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος Παρόμοιες με τις Πρότυπες Συνθήκες Εργαστηρίου (Standard Test Conditions - STC)

Προκειμένου για την συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης των εξωτερικών συνθηκών περιβάλλοντος στην ενεργειακή απόδοση τους σε σχέση με τις συνθήκες εργαστηρίου (STC), απομονώθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις του Φ/Β στην Παλαιά Πεντέλη που αφορούν σε ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000W/m^2 , δηλαδή παρόμοια με αυτήν σε συνθήκες εργαστηρίου (STC). Για τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας περίπου στα 1000W/m^2 , η πραγματική απόδοση των Φ/Β εκτιμήθηκε μεταξύ 7,5% και 9,5%, ανάλογα με τη θερμοκρασία των Φ/Β, η οποία καταγράφηκε μεταξύ 25°C και 60°C , για τη χρονική διάρκεια των μετρήσεων. Μείωσης της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β δίνονται και για συνθήκες εργαστηρίου (SCT) στην περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας των Φ/Β (Πίνακας 4.1.1).

Απομονώνοντας τις μετρήσεις που προκύπτουν για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000W/m^2 , έγινε συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των σχέσεων που υπολογίζουν το βαθμό απόδοσης των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στην επιφάνειά τους, τόσο κάτω υπό συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, όσο και υπό συνθήκες εργαστηρίου (STC), σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 4.1.1. Η εμπειρική Εξίσωση που προκύπτει από τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης των Φ/Β (n_{pv-act}) και της θερμοκρασίας των Φ/Β (T_{pv}) για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου στα 1000W/m^2 , είναι η ακόλουθη:

$$n_{pv} = 10,43(\pm 0,06) - 0,043(\pm 0,001) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,73) \quad (4.3.4)$$

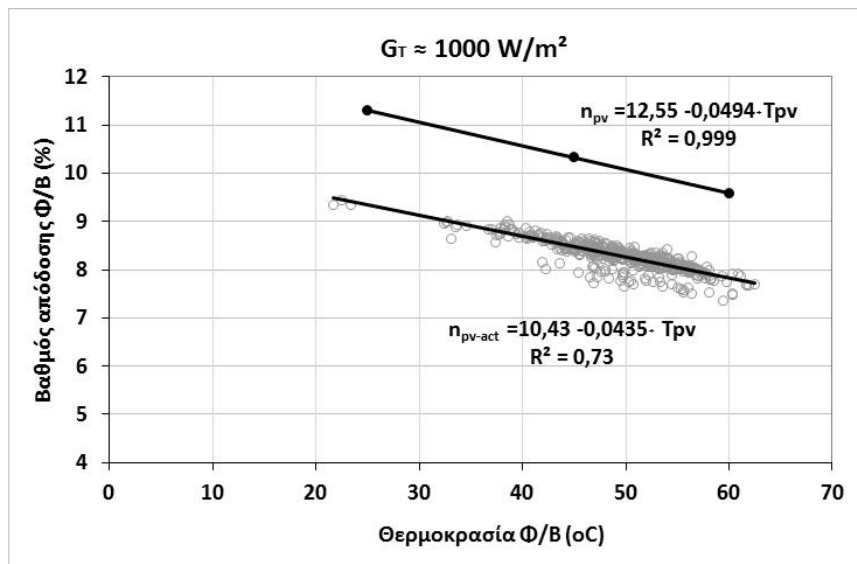
Η Εξίσωση 4.3.2, που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, υπολογίζει αντίστοιχα το βαθμό απόδοσης των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για συνθήκες εργαστηρίου (STC), σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή, ως εξής:

$$n_{pv} = 12,55 (\pm 0,03) - 0,0494 (\pm 0,0006) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,999) \quad (\text{Εξίσωση 4.3.2})$$

Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β και για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m^2 , όπως προκύπτει από τις Σχέσεις 4.3.2 και 4.3.4 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.20. Η πειραματική Εξίσωση υπολογισμού του βαθμού απόδοσης των Φ/Β προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα ($N=518$) με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000W/m^2 . Αντίστοιχα, η θεωρητική Εξίσωση προέκυψε από τις τρεις τιμές του βαθμού απόδοσης των Φ/Β που δίνει ο κατασκευαστής (STC) για θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β 25°C , 45°C και 60°C (Πίνακας 4.1.1).

Ο ρυθμός μεταβολής της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με τη θερμοκρασία των Φ/Β που δίνεται από τον κατασκευαστή (συνθήκες STC), διαφέρει σημαντικά στη περίπτωση λειτουργίας υπό συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα, η μέση τιμή της απόδοσης των Φ/Β, όπως εκτιμήθηκε για τη λειτουργία τους σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος παρόμοιες με αυτές του εργαστηρίου (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000W/m^2 , κ.λ.π.), διαπιστώνεται ότι είναι κατά μέσο όρο 18,1% (με διακύμανση από 14,8% ÷ 24,5%) χαμηλότερη από αυτή που προκύπτει για τις τεχνικές προδιαγραφές σε συνθήκες εργαστηρίου. Το ποσοστό αυτό (18,1%) αντιστοιχεί σε μείωση της απόδοσης των Φ/Β περίπου δύο ποσοστιαίες μονάδες, σε σχέση με αναμενόμενη θεωρητική απόδοσή τους για ακτινοβολία $G_{Tref} = 1000\text{W/m}^2$.

Αντίστοιχες πειραματικές μελέτες για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β, τα οποία λειτουργούν σε εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος παρόμοιες με αυτές του εργαστηρίου (STC), δείχνουν να καταλήγουν στο ίδιο συμπέρασμα, δηλαδή σε ποσοστιαία μείωση της απόδοσης Φ/Β περίπου 7% ÷ 25%, ανάλογα με τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία[87,95,145].

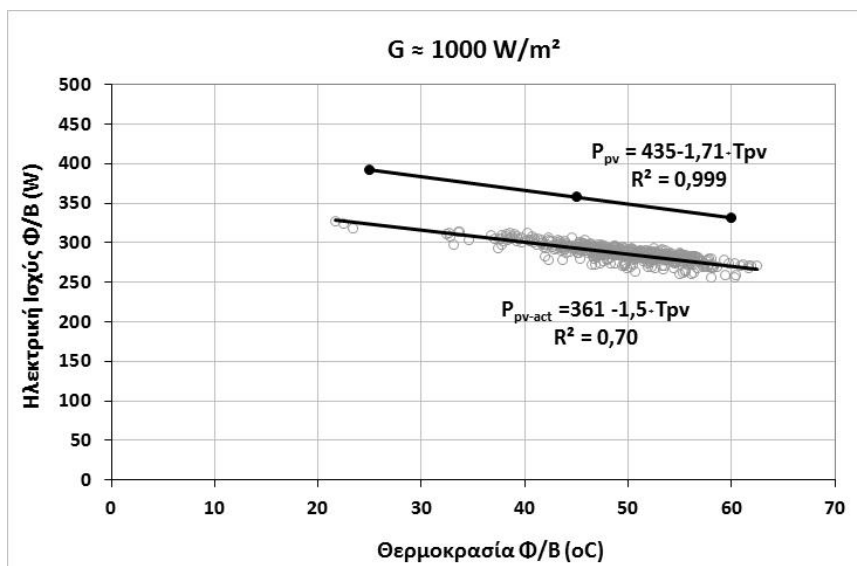


Σχήμα 4.3.20: Βαθμός απόδοσης Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000W/m².

Παρόμοια, προσδιορίστηκαν οι σχέσεις που υπολογίζουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β και για ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας 1.000 W/m², όπως προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις (Εξίσωση 4.3.5) και από τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή (Εξίσωση 4.3.6):

$$P_{pv-act} = 261(\pm 2) - 1,50(\pm 0,04) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,7) \quad (4.3.5)$$

$$P_{pv} = 435(\pm 1) - 1,71(\pm 0,02) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,999) \quad (4.3.6)$$



Σχήμα 4.3.21: Ηλεκτρική ισχύς Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m².

Η πειραματική Εξίσωση υπολογισμού της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος των Φ/Β (P_{pv-act}) προέκυψε από τις μετρήσεις (N=518) για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1.000 W/m². Αντίστοιχα, η θεωρητική Εξίσωση προέκυψε από τις τρεις τιμές της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος, τις οποίες δίνει ο κατασκευαστής για θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β 25°C, 45°C και 60°C (Πίνακας 4.1.1) και $G_{Tref} = 1000 \text{ W/m}^2$. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των Φ/Β (Watt) σε

συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β και για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1.000 W/m^2 , όπως προκύπτει από τις σχέσεις 4.3.5 και 4.3.6 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.21.

Τόσο η απόλυτη τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (Watt) όσο και ο ρυθμός μεταβολής (%) της παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που δίνει ο κατασκευαστής για συνθήκες εργαστηρίου. Η μετρούμενη μέση τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι $286,6 \text{ W}$, περίπου 64 W χαμηλότερη από την αναμενόμενη μέση ηλεκτρική ισχύ βάσει των τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή, για συνθήκες εργαστηρίου (STC), η οποία είναι $350,5 \text{ W}$. Η ποσοστιαία μέση απόκλιση κυμαίνεται από $14,7\%$ έως $24,3 \%$ και μέσο όρο $18,2 \%$.

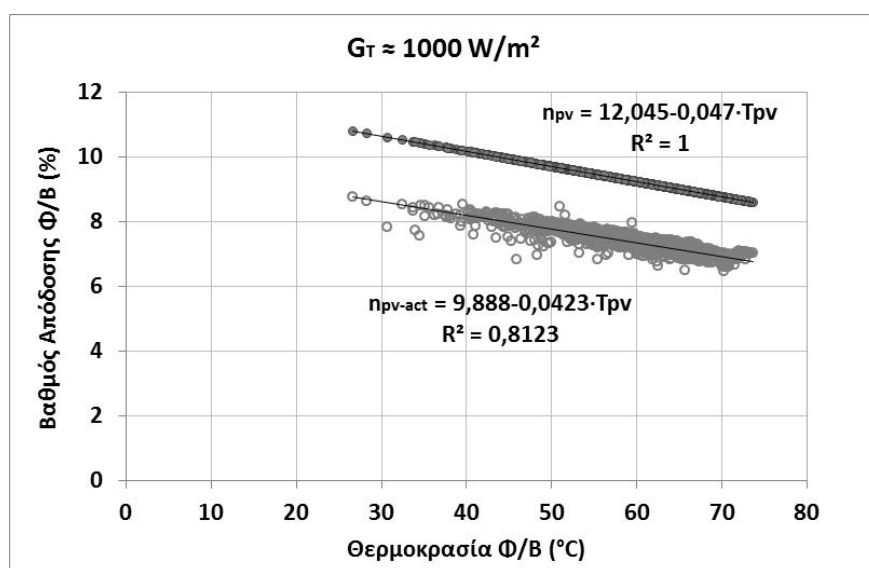
Φ/Β Μονάδα στην περιοχή CEN-Caradache

Αντίστοιχα, από τα δεδομένα της μονάδας στην περιοχή του Cadarache, υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β και για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m^2 . Η πειραματική Εξίσωση υπολογισμού του βαθμού απόδοσης (η_{pv-act}) των Φ/Β προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα ($N=1461$) που αντιστοιχούν σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m^2 , ως εξής:

$$\eta_{pv-act} = 9,88(\pm 0,03) - 0,0423(\pm 0,0005) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,812) \quad (4.3.7)$$

Η θεωρητική Εξίσωση προέκυψε από τα στοιχεία του κατασκευαστή (Πίνακας 4.1.3) ως εξής:

$$\eta_{pv} = 12,045(\pm 0,0) - 0,047(\pm 0,0) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 1) \quad (4.3.8)$$



Σχήμα 4.3.22: Βαθμός απόδοσης Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m^2 , για τη Φ/Β μονάδα στη περιοχή του Cadarache

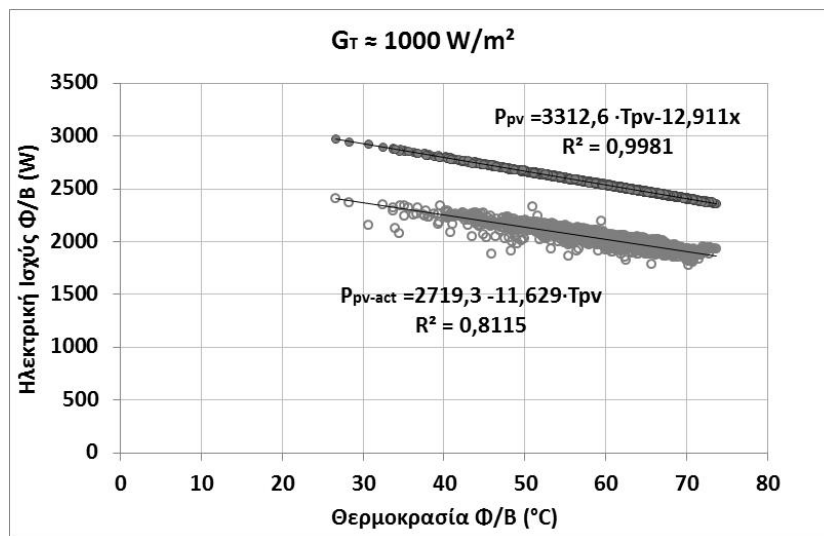
Ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β (στο Cadarache), όπως προκύπτει από τις σχέσεις 4.3.7 και 4.3.8 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.21. Και στην περίπτωση της Φ/Β εγκατάστασης στο Cadarache, ο ρυθμός μεταβολής της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με τη θερμοκρασία των Φ/Β που δίνεται από τον κατασκευαστή (συνθήκες STC), διαφέρει σημαντικά στη περίπτωση λειτουργίας υπό συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικότερα, η μέση τιμή της απόδοσης των Φ/Β για τη λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος παρόμοιες με αυτές του εργαστηρίου (STC), διαπιστώνεται ότι είναι κατά μέσο όρο $20,3\%$ (με διακύμανση

από 12,3% ÷ 31,0%) χαμηλότερη από αυτή που προκύπτει για συνθήκες εργαστηρίου. Το ποσοστό 20,3% αντιστοιχεί σε μείωση της απόδοσης των Φ/Β περίπου δύο ποσοστιαίες μονάδες, σε σχέση την αντίστοιχη αναμενόμενη θεωρητική απόδοση για $G_{Tref} = 1000 \text{ W/m}^2$.

Παρόμοια, προσδιορίστηκαν για τα Φ/Β του Cadarache και οι σχέσεις που υπολογίζουν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ των Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β και για ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας 1.000 W/m^2 , όπως προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις (Εξίσωση 4.3.9) και από τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή (Εξίσωση 4.3.10):

$$P_{pv-act} = 2719(\pm 9) - 11,63(\pm 0,15) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,811) \quad (4.3.9)$$

$$P_{pv} = 3313(\pm 1) - 12,91(\pm 0,015) \cdot T_{pv} \quad (R^2 = 0,998) \quad (4.3.10)$$



Σχήμα 4.3.23: Ηλεκτρική ισχύς Φ/Β σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία των Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m^2 , για τη Φ/Β μονάδα στη περιοχή του Cadarache

Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς των Φ/Β (Watt), όπως προκύπτει από τις σχέσεις 4.3.9 και 4.3.10 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3.23. Τόσο η απόλυτη τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (W) όσο και ο ρυθμός μεταβολής της παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές (STC). Η μέση τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος που προέκυψε από τις μετρήσεις είναι $2026,7 \text{ W}$, περίπου 517 W χαμηλότερη από την αναμενόμενη μέση ηλεκτρική ισχύ που προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή (STC), η οποία εκτιμήθηκε στα $2543,6 \text{ W}$. Η ποσοστιαία μέση απόκλιση κυμαίνεται κατά μέσο όρο 20,3%, όπως και η ενεργειακή απόδοση (%).

Εκτός από τις κλιματικές παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση των Φ/Β, τις τεχνικές παραμέτρους και τις παραμέτρους θέσης των Φ/Β, οι οποίες διαφοροποιούν την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ (W) τους σε συνθήκες λειτουργίας εξωτερικού περιβάλλοντος, υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία των Φ/Β όπως για παράδειγμα οι επικαθίσεις στερεών σωματιδίων, η υγρασία κ.λ.π.[93-94], οι οποίες όπως δεν μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και να ποσοτικοποιηθεί η επίδρασή τους.

4.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ Φ/Β ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΝΤΕΛΗΣ

Από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων της Φ/Β εγκατάστασης στην Παλαιά Πεντέλη, προέκυψαν οι αναλυτικές σχέσεις που περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες και οι οποίες προσεγγίζουν με πολύ καλά αποτελέσματα τον υπολογισμό της θερμοκρασία των Φ/Β, της πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά των Φ/Β, καθώς και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Οι αναλυτικές σχέσεις αυτές συγκρίνονται και με τις αντίστοιχες θεωρητικές ή εμπειρικές σχέσεις της βιβλιογραφίας, οι οποίες συνήθως επαληθεύονται για συγκεκριμένα όρια τιμών των φυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιούν ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Ειδικά για τις σχέσεις υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης, γίνεται και περαιτέρω ανάλυση στη υποενότητα 4.5 Ορισμένες από τις αναλυτικές σχέσεις (π.χ. της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου) προέκυψαν και από την προσαρμογή των μετρήσεων της Πεντέλης σε άλλες θεωρητικές ή εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, προκειμένου για την περαιτέρω αξιολόγησή τους.

4.4.1. Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/Β

Η μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια των Φ/Β (T_{pv}) εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα (T_{air}) και σε μικρότερο βαθμό από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) και την ταχύτητα του ανέμου (V). Αυτό προκύπτει και από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients) των ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίοι είναι για τη θερμοκρασία του αέρα 0,74, για την ηλιακή ακτινοβολία 0,33 και για την ταχύτητα του αέρα -0,11 αντίστοιχα. Η γραμμική συσχέτιση της θερμοκρασία του Φ/Β με τις ως άνω αναφερόμενες παραμέτρους που προέκυψε έχει την ακόλουθη μορφή:

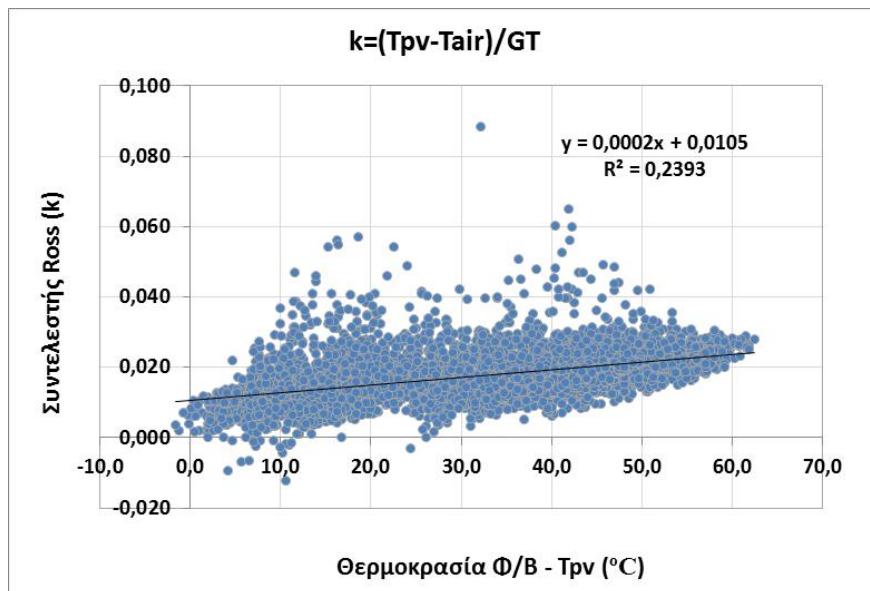
$$T_{pv} = 2,08(\pm 0,13) + 1,038(\pm 0,004) \cdot T_{air} + 0,0182(\pm 0,0001) \cdot G_T - 1,13(\pm 0,02) \cdot v_w \quad (4.4.1)$$

$$(R^2 = 0,96)$$

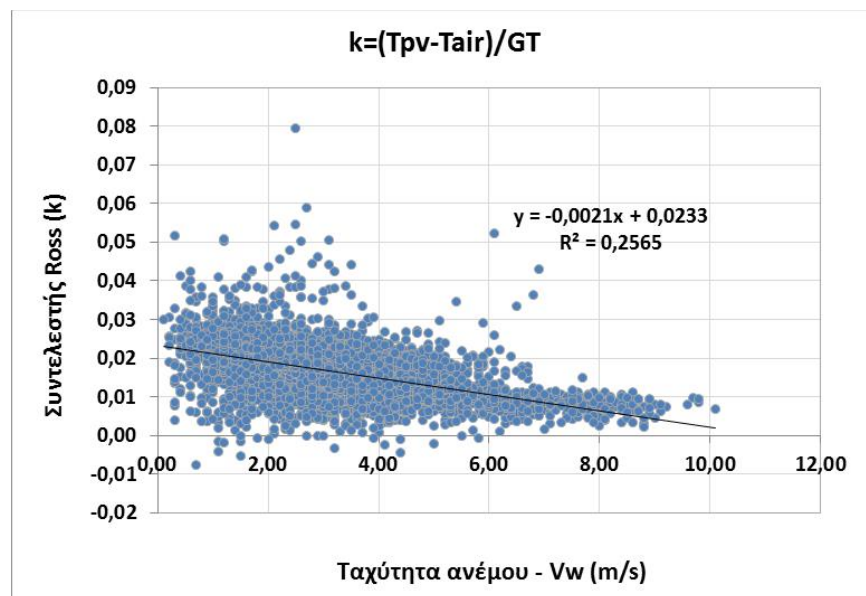
Οι μονάδες είναι: ($^{\circ}\text{C}$) για τη θερμοκρασία του Φ/Β, T_{pv} και του αέρα T_{air} , (W/m^2) για την ηλιακή ακτινοβολία G_T και (m/sec) για την ταχύτητα του ανέμου v_w .

Από όλες τις γραμμικές και πολυωνυμικές συσχετίσεις που μελετήθηκαν, η Εξίσωση 4.4.1 δίνει το μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και συσχέτισης (R). Επιπλέον, οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των $0,4^{\circ}\text{C}$ έως $5,3^{\circ}\text{C}$ για το 95% των μετρήσεων, $0,4^{\circ}\text{C}$ έως $7,3^{\circ}\text{C}$ για το 99% των μετρήσεων και μόλις το 1% υπερβαίνει τους $7,3^{\circ}\text{C}$ και φτάνει μέχρι $11,1^{\circ}\text{C}$, ενώ η μέση τιμή των υπολοίπων είναι $2,3^{\circ}\text{C}$.

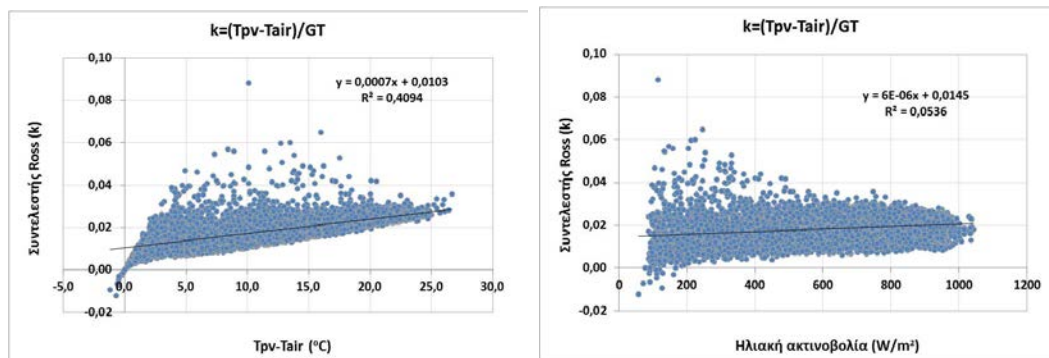
Η ταχύτητα του ανέμου έχει μια θετική επίδραση στην απόδοση των Φ/Β, καθώς μειώνει τη θερμοκρασία τους, η οποία δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, σε σύγκριση με τις αρνητικές επιδράσεις που έχει η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του αέρα, όσον αφορά τη θερμοκρασία του Φ/Β. Αντίστοιχες μελέτες Φ/Β εγκαταστάσεων σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος δίνουν παρόμοιες εξισώσεις με την εξίσωση 4.4.1 για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του Φ/Β, από τις οποίες προκύπτει ότι η τιμή του συντελεστή της ταχύτητας του ανέμου είναι μεταξύ $-1,30$ και $-1,65$ [70, 146-149]. Ωστόσο, η ποσοτικοποίηση της επίδρασης του ανέμου στη θερμοκρασία των Φ/Β είναι δύσκολη, δεδομένου ότι η ταχύτητα του αέρα είναι μια δυναμική παράμετρος με έντονη μεταβλητότητα. Επισημαίνεται ότι, οι συνήθεις μέθοδοι καταγραφής της ταχύτητας του ανέμου δεν θα μπορούσαν να παρέχουν άμεση σύμπτωση της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου με τη θερμοκρασία των Φ/Β. Επίσης, η κατεύθυνση του ανέμου που μελετήθηκε, ως προς την προσανατολισμένη νότια επιφάνεια των Φ/Β, δεν φαίνεται να παρουσιάζει καμία αξιολογη επίδραση για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των Φ/Β.



Σχήμα 4.4.1: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της θερμοκρασίας του Φ/Β (Πεντέλη)



Σχήμα 4.4.2: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (Πεντέλη)



Σχήμα 4.4.3: Συντελεστής Ross (k) συναρτήσει της διαφοράς T_{pv}-T_{air} και G_T (Πεντέλη)

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση του Ross: $T_{pv} = T_{air} + k \cdot G_T \Rightarrow k = (T_{pv} - T_{air}) / G_T$ (Εξίσωση 2.2.16) και τις μετρήσεις από τη Φ/Β εγκατάσταση στην Πεντέλη, υπολογίστηκε και ο μέσος

όρος της τιμής της παραμέτρου k (συντελεστής Ross), η οποία είναι 0,017. Η διακύμανση των τιμών του συντελεστή είναι από 0,010 έως 0,028 για το 85% των μετρήσεων. Χαμηλότερες τιμές του συντελεστή k παρατηρούνται για χαμηλές τιμές της θερμοκρασία του Φ/Β και υψηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου (Σχήματα 4.4.1 έως 4.4.3).

4.4.2. Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η απόδοση των Φ/Β σε συνθήκες λειτουργίας εξωτερικού περιβάλλοντος αποκλίνουν σε σχέση με την απόδοση σε συνθήκες εργαστηρίου (STC). Από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων προέκυψε ότι, ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του Φ/Β και σε μικρότερο βαθμό από την αέρια μάζα (AM) και τον συντελεστή $\tau_a(\theta)$. Η επίδραση αυτή επιβεβαιώνεται και από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (BETA) των ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίοι είναι για τη θερμοκρασία του Φ/Β 0,85, για την αέρια μάζα -0,39 και για το συντελεστή $\tau_a(\theta)$ 0,32 αντίστοιχα. Η γραμμική συσχέτιση του βαθμού απόδοσης του Φ/Β με τις ως άνω αναφερόμενες παραμέτρους που προέκυψε έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\eta_{pv-act} = 6,2(\pm 0,2) - 0,0312(\pm 0,0004) \cdot T_{pv} - 0,176(\pm 0,007) \cdot AM + 4,2(\pm 0,2) \cdot \tau_a(\theta) \quad (4.4.2)$$

$$(R^2 = 0,53)$$

Η Εξίσωση 4.4.2 δίνει έναν ικανοποιητικό συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και συσχέτισης (R), αλλά όχι πολύ υψηλό. Ωστόσο, η ποσοστιαία μέση απόκλιση της υπολογιζόμενης τιμής της απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με τις μετρούμενες υπολογίστηκε στο 3,3%. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των 0,004 έως 0,005 (δηλαδή 0,4% έως 0,5%) για το 95% των μετρήσεων, 0,004 έως 0,007 (δηλαδή 0,4% έως 0,7%) για το 99% των μετρήσεων και μόλις το 1% υπερβαίνει το 0,7% και φτάνει μέχρι 1,2%.

Ο συνδυασμός των εξισώσεων 4.3.2 και 4.4.2, δίνει την ακόλουθη Εξίσωση υπολογισμού του βαθμού απόδοσης των Φ/Β για συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος σε συνάρτηση και με τον βαθμό απόδοσης των Φ/Β σε συνθήκες εργαστηρίου, με τυποποιημένους συντελεστές βήτα (BETA), 0,85, -0,39 και 0,32, για το η_{pv} , AM και $\tau_a(\theta)$ αντίστοιχα:

$$\eta_{pv-act} = -1,7(\pm 0,2) + 0,631(\pm 0,008) \cdot \eta_{pv} - 0,76(\pm 0,007) \cdot AM + 4,2(\pm 0,2) \cdot \tau_a(\theta) \quad (4.4.3)$$

$$(R^2 = 0,53)$$

Εναλλακτικά λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 4.4.1 και 4.4.2, ο βαθμός απόδοσης όπως προκύπτει από την ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων μπορεί να υπολογιστεί και από την Εξίσωση:

$$\eta_{pv-act} = 8,0(\pm 0,2) - 3,82(\pm 0,07) \cdot 10^{-2} \cdot T_{air} - 3,3(\pm 0,2) \cdot 10^{-4} \cdot G_T + 0,8(\pm 0,3) \cdot 10^{-2} \cdot v - 0,235(\pm 0,009) \cdot AM + 2,4(\pm 0,2) \cdot \tau_a(\theta)$$

$$(R^2 = 0,51)$$

$$(4.4.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα που προέκυψαν από την ανάλυση και τον προσδιορισμό της Εξίσωσης 4.4.4, φαίνεται ότι, η απόδοση των Φ/Β επηρεάζεται κυρίως από τη θερμοκρασία του αέρα (T_{air}) (0,74) και την αέρια μάζα (AM) (-0,45), ενώ σε μικρότερο βαθμό το γινόμενο $\tau_a(\theta)$ (0,18), την ηλιακή ακτινοβολία (G_T) (-0,16) και την ταχύτητα του ανέμου (v) (0,021). Η αέρια μάζα (AM) εξαρτάται από τη θέση (γεωγραφικό πλάτος), το χρόνο και την εποχή (δεδομένου ότι εξαρτάται από τη ζενιθιακή γωνία του ήλιου), ενώ έχει σημαντική επίδραση τόσο από την άμεση αλλά και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία αν και είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β, έχει περιορισμένη επίδραση στο βαθμό απόδοσης των Φ/Β (%), σε σύγκριση με τη θερμοκρασία του αέρα και την αέρια μάζα. Η ποσοστιαία μέση απόκλιση της

υπολογιζόμενης τιμή της απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με τις μετρούμενες υπολογίστηκε στο 3,4%. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των 0,028 έως 0,0864 (δηλαδή 2,8% έως 8,6%) για το 95%.

Άλλη μία αναλυτική Εξίσωση για τον υπολογισμό της πραγματικής απόδοσης των Φ/Β, η οποία περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β σε συνθήκες STC και μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους κρυσταλλικών Φ/Β, είναι ο λόγος της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης η_{pv-act} των Φ/Β προς την απόδοση του Φ/Β η_{pv} (Εξίσωση 4.3.2.) που προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Φ/Β (Πίνακας 4.1.3), ως εξής :

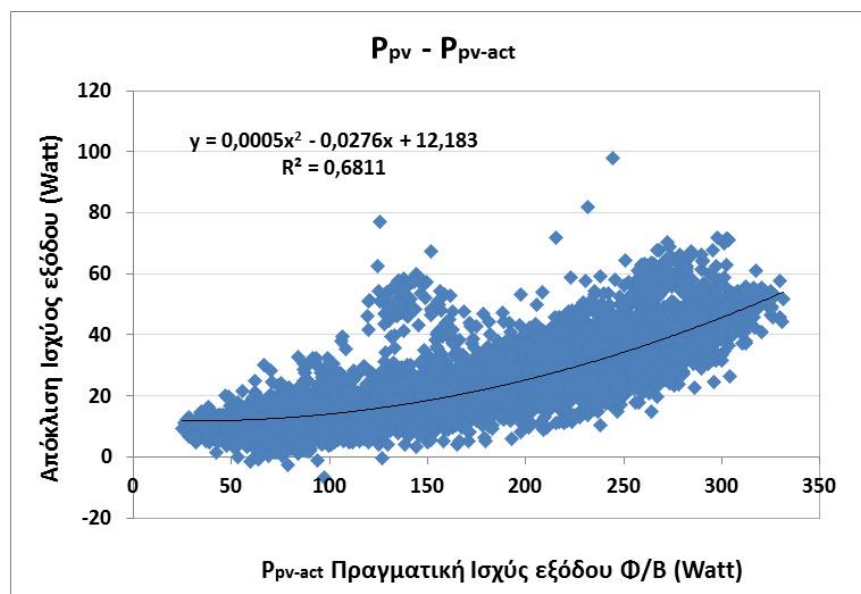
$$\frac{\eta_{pv-act}}{\eta_{pv}} = 0,44(\pm 0,01) - 2,66(\pm 0,05) \cdot 10^{-7} \cdot G_T^2 + 2,9(\pm 0,7) \cdot 10^{-7} \cdot G_T \cdot T_{air} - 3,66(\pm 0,07) \cdot 10^{-4} \cdot G_T - 0,0154(\pm 0,0006) \cdot AM + 0,32(\pm 0,01) \cdot \tau_a(\theta)$$

$$(R^2 = 0,68) \quad (4.4.5)$$

Η Εξίσωση αυτή δίνει πολύ καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης. Η μέση ποσοστιαία απόκλιση των τιμών του λόγου (η_{pv-act}/η_{pv}) που προκύπτουν από την Εξίσωση 4.4.5, ως προς τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις υπολογίστηκε στο 2,4%. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των 0,002 έως 0,054 (δηλαδή 0,2% έως 5,4%) για το 95% των μετρήσεων της Πεντέλης.

4.4.3. Ισχύς Εξόδου Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος

Η πραγματική ισχύς εξόδου P_{pv-act} των Φ/Β είναι συνάρτηση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης τους η_{pv-act} . Κατά συνέπεια, χρησιμοποιώντας μία από τις αναλυτικές σχέσεις 4.4.2 έως 4.4.5 που προέκυψαν από την ανάλυση των μετρήσεων, σε συνδυασμό με την Εξίσωση 2.2.4, όπου $\eta_{pv} = \frac{P_{pv}}{G_T \cdot A_{pv}} \Rightarrow P_{pv-act} = G_T \cdot A_{pv} \cdot \eta_{pv}$, μπορεί να υπολογίζεται η πραγματική ισχύς εξόδου για μια δεδομένη στιγμή με δεδομένες κλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 4.4.4: Διαφορά της θεωρητικής και πραγματικής τιμής ισχύος εξόδου του Φ/Β (Πεντέλη)

Η εφαρμογή των μετρήσεων της Πεντέλης στη θεωρητική Εξίσωση 2.2.25 για τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύς εξόδου των Φ/Β, η οποία περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του

Φ/Β σε συνθήκες STC, όπου $P_{pv-act} = A_{pv} \cdot G_T \cdot \alpha(\theta)_n \cdot n_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})]$, δεν προσεγγίζει με αρκετή ακρίβεια τις μετρήσεις. Οι τιμές της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου (Watt) που προκύπτουν από τη θεωρητική Εξίσωση 2.2.25 παρουσιάζουν απόκλιση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των μετρήσεων της ισχύος, η οποία κυμαίνεται από 0 έως και 97,7 Watt, με μέση τιμή 28 Watt (Σχήμα 4.4.4). Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε τιμές ποσοστιαίας μέσης απόκλιση από 0,2% έως 38,1% και με μέσο όρο 12,6%. Σε περίπτωση αντικατάστασης του γινομένου $G_T \cdot \alpha(\theta)_n$ με την ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια του Φ/Β όπως προκύπτει από την Εξίσωση 2.2.14, τότε ο μέσος όρος της απόκλισης μειώνεται ελάχιστα στο 12,0%.

Η εμπειρική Εξίσωση της μεθοδολογίας PVUSA (Εξίσωση 2.2.26), δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για τις μετρήσεις της Φ/Β μονάδας στη Πεντέλη, όπου οι συντελεστές a, b, c και d που προκύπτουν έχουν ως εξής:

$$P_{pv-act} = -15,7(\pm 0,4) \cdot G_T + -5,6(0,13) \cdot 10^{-5} \cdot G_T^2 + 0,0012(\pm 0,0001) \cdot G_T \cdot v_w + 0,00133(\pm 0,00001) \cdot G_T \cdot T_{air}$$

$$(R^2 = 0,99) \quad (4.4.6)$$

Η Εξίσωση αυτή υπολογίζει με αρκετά καλή ακρίβεια την πραγματική ισχύ εξόδου των Φ/Β. Η μέση ποσοστιαία απόκλιση των τιμών ισχύος (P_{pv-act}) που προκύπτουν από την Εξίσωση 4.4.6, ως προς τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις υπολογίστηκε στο 3,4%. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των -12,7 Watt έως 25,5 Watt για το 98% των μετρήσεων της Πεντέλης.

Επίσης, η εμπειρική Εξίσωση της μεθοδολογίας MotherPV (Εξίσωση 2.2.29), η οποία υπολογίζει τον αδιάστατο λόγο Coef εξόδου των Φ/Β. δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα για τις μετρήσεις της Φ/Β μονάδας στη Πεντέλη, όπου οι συντελεστές A, B, C και D που προκύπτουν έχουν ως εξής:

$$Coef = \frac{P_{pv-act}}{P_{ref}} \cdot \frac{G_{Tref}}{G_T} = A + B \cdot \ln(G_T) + C \cdot (G_T - 1) + D \cdot (T_{pv} - 25) \Rightarrow$$

$$Coef = 0,09(\pm 0,01) + 0,129(0,003) \cdot \ln(G_T) - 0,00019(\pm 0,00006) \cdot (G_T - 1) - 0,00271(\pm 0,00004) \cdot (T_{pv} - 25)$$

$$(R^2 = 0,45) \quad (4.4.7)$$

Η μέση ποσοστιαία απόκλιση των τιμών Coef που προκύπτουν από την Εξίσωση 4.4.7, ως προς τιμές που προκύπτουν από τις μετρήσεις υπολογίστηκε στο 3,2%. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των -0,07 έως 0,07 για το 95% των μετρήσεων της Πεντέλης (P_{out} και P_{ref} σε W, G_T σε W/m^2 , T_{pv} σε $^{\circ}C$).

Μεταφέροντας στην ως άνω εμπειρική Εξίσωση την ηλιακή ακτινοβολία του πρώτου μέρους της εξίσωσης στο δεύτερο μέρος, προκύπτει η ακόλουθη Εξίσωση, ως εξής:

$$\frac{P_{out}}{P_{ref}} = A1 + B1 \cdot \ln(G_T) \cdot G_T + C1 \cdot (G_T - 1) \cdot G_T + D1 \cdot (T_{pv} - 25) \cdot G_T \Rightarrow$$

$$\frac{P_{pv-act}}{P_{ref}} = -0,0079(\pm 0,0009) + 0,000153(0,000006) \cdot \ln(G_T) \cdot G_T - 2,41(\pm 0,04) \cdot 10^{-7} \cdot (G_T - 1) \cdot G_T -$$

$$- 2,99(\pm 0,03) \cdot 10^{-6} \cdot (T_{pv} - 25) \cdot G_T$$

$$(R^2 = 0,99) \quad (4.4.8)$$

Η μέση ποσοστιαία απόκλιση που προκύπτει από την Εξίσωση 4.4.8, είναι σχεδόν μηδενική. Οι τιμές των υπολοίπων (residuals) που προκύπτουν είναι της τάξεως των -0,05 έως 0,15 για το σύνολο των μετρήσεων της Πεντέλης (P_{out} και P_{ref} σε W, G_T σε W/m^2 , T_{pv} σε $^{\circ}C$).

4.5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΝΤΕΛΗΣ ΜΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

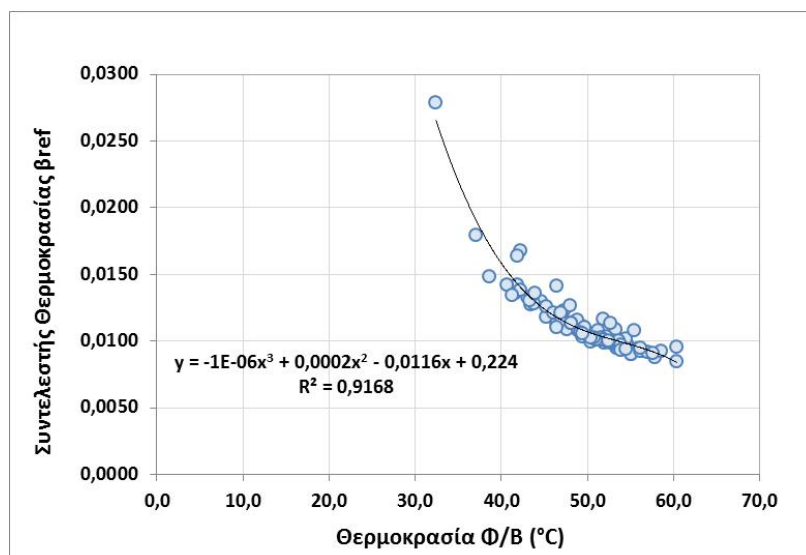
Η αναλυτική Εξίσωση 4.4.4 που προέκυψε από τις μετρήσεις της Φ/Β μονάδας στην Πεντέλη υπολογίζει την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β (%) με πολύ καλή προσέγγιση στις πειραματικές μετρήσεις, καθώς η μέση ποσοστιαία (%) απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών του βαθμού απόδοσης σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι της τάξεως του 2%. Η ποσοστιαία απόκλιση αυτή είναι μικρή και πολύ ικανοποιητική σε σχέση με τις ποσοστιαίες αποκλίσεις που προκύπτουν από την προσαρμογή των πειραματικών μετρήσεων, θερμοκρασία του αέρα, ταχύτητα του ανέμου και ηλιακή ακτινοβολία, σε άλλες θεωρητικές σχέσεις της βιβλιογραφίας [73-75,88,150-152] και οι οποίες κυμαίνονται από 19,5% [152] και 23,9% [73] οι χαμηλότερες τιμές έως και 67,5% [74] η υψηλότερη μέση τιμή ποσοστιαίας απόκλισης. Οι ως άνω θεωρητικές σχέσεις βασίζονται κυρίως σε υπολογισμούς του βαθμού απόδοσης σε συνάρτηση με τους θεωρητικούς συντελεστές θερμοκρασίας (β_{ref}) και ηλιακής ακτινοβολίας (γ_{ref}), οι οποίοι καθορίζονται από μετρήσεις σε συνθήκες εργαστηρίου και συγκεκριμένες παραδοχές, οι οποίες αφορούν τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κ.λ.π.

$$n_{pv} = n_{Tref} \cdot [1 - \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - T_{ref})] \quad \text{για } \beta_{ref}=0,0045 \text{ [73]} \quad (\text{Εξίσωση 2.2.21})$$

$$n_{pv} = n_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref}) + \gamma \cdot \log_{10} G_T] \quad \text{για } \beta_{ref}=0,0043, \gamma_{ref}=0,12 \text{ [74]} \quad (\text{Εξίσωση 2.2.20})$$

$$n_{pv} = n_{Tref} \cdot [1 - a_1(T_{pv} - T_{ref}) + a_2 \cdot \ln(G_T / 1000)] \quad \text{για } a_1=0,005 \text{ και } a_2=0,052 \text{ [152]} \quad (4.5.1)$$

Αντιστρόφως, εφαρμόζοντας στις διάφορες θεωρητικές σχέσεις της βιβλιογραφίας [73-75,88,150-152] τις πειραματικές μετρήσεις από την Φ/Β εγκατάσταση στη Πεντέλη, προκειμένου να προσδιοριστούν αντιπροσωπευτικοί συντελεστές θερμοκρασίας (β_{ref}), ηλιακής ακτινοβολίας (γ_{ref}) κ.λ.π., οι βαθμοί απόδοσης που προκύπτουν από την ανάλυση είναι πολύ υψηλότεροι, σε σχέση με εκείνους που προσδιορίζονται από τα πειραματικά δεδομένα, με μέσες τιμές ποσοστιαίων αποκλίσεων από 5,8% έως και 18,6%.



Σχήμα 4.5.1: Διακύμανση του συντελεστή θερμοκρασίας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m², (τιμές από Πεντέλη)

Ταυτόχρονα, οι υπολογισθείσες τιμές των συντελεστών (β_{ref}) και (γ_{ref}) από τις μετρήσεις της μονάδας στην Πεντέλη είναι εντελώς διαφορετικές από τις θεωρητικές τιμές των συντελεστών των Φ/Β (Πίνακας 4.1.3), αλλά και αυτών που δίνονται ως αντιπροσωπευτικοί στη βιβλιογραφία

για τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β (Πίνακας 2.2.4). Η διακύμανση του συντελεστή θερμοκρασίας, για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας παρόμοιες με την ακτινοβολία αναφοράς $G_{Tref} = 1000 \text{ W/m}^2$, παρουσιάζουν μια γραμμική συσχέτιση με τη θερμοκρασία του Φ/Β, με τιμές που κυμαίνονται από 0,0048 έως 0,0216 με μέση τιμή 0,0087, περίπου 2 φορές μεγαλύτερη από την τιμή του κατασκευαστή, $\beta_{ref} = 0,0043$. Γενικότερα τα Φ/Β, ακόμα και αυτά με μικρές ονομαστικές τιμές συντελεστή θερμοκρασίας (0,0035-0,0045), τα οποία είναι εγκατεστημένα ελεύθερα (εκτεθειμένα στον άνεμο), κατά τη λειτουργία τους δίνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές, με μέση τιμή να είναι αρκετές φορές τριπλάσια από την ονομαστική.

Αντίθετα, η αδιάστατη εμπειρική Εξίσωση που αναπτύχθηκε από τους Durish et al [87] και άλλες παρόμοιες εργασίες που επακολούθησαν[95], για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης των Φ/Β, λαμβάνουν υπόψη τις περισσότερες από τις κύριες μετεωρολογικές παραμέτρους όπως, η θερμοκρασία του αέρα (T_{air}), η αέρια μάζα (AM) και η ηλιακή ακτινοβολία (G_T) που καταγράφονται σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, με τρόπο παρόμοιο με την παρούσα υπό μελέτη πειραματική εγκατάσταση. Ωστόσο, η εφαρμογή των σχέσεων αυτών υπολογίζει πολύ μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από αυτούς που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις της Πεντέλης, με μέση τιμή ποσοστιαίας απόκλισης 27,8%.

$$\eta_{pv} = \rho \cdot [a \cdot \frac{G_T}{G_o} + (\frac{G_T}{G_o})^m] \cdot [1 + r \cdot \frac{T_{pv}}{T_{ref}} + s \cdot \frac{AM}{AM_o} + (\frac{AM}{AM_o})^u] \quad (\text{Εξίσωση 2.2.23})$$

Σημειώνεται ότι η ταχύτητα του ανέμου, η οποία δεν συμπεριλαμβάνεται στην εμπειρική Εξίσωση των Durish et al. (Εξίσωση 2.2.23)[4], παρόλο που δεν είναι και η πιο σημαντική παράμετρος και με δυσκολία καταγράφεται η επίδραση της στη λειτουργία των Φ/Β, είναι απαραίτητη για τον ακριβή υπολογισμό του βαθμού απόδοσης τους. Επιπλέον, η χρήση του συντελεστή $\tau_a(\theta)$ στην Εξίσωση 4.4.4, ο οποίος σχετίζεται με τον τύπο των Φ/Β, τα υλικά κατασκευής (διαπερατότητα γυαλιού και απορροφητικότητα Φ/Β), και τη γωνιά κλίσης και δεν λαμβάνεται υπόψη στην Εξίσωση των Durish et al. [87], παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς για την εκτίμηση του βαθμού απόδοσης του Φ/Β, επεκτείνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής και μοντελοποίηση της Εξίσωσης 4.4.4, σε διάφορες κλίσεις Φ/Β (β).

Η Εξίσωση 4.4.4 μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β, σε οποιαδήποτε περιοχή με διαφορετικό γεωγραφικό πλάτος (διαφορετική μάζα αέρα), κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου, ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας), εποχή και διάφορες κλίσεις Φ/Β, δηλαδή διαφορετικές τιμές του συντελεστή $\tau_a(\theta)$. Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος τιμών, τόσο των πειραματικών μετρήσεων (στην περιοχή της Πεντέλης), όσο και των υπολογιζόμενων παραμέτρων βάσει των μετρήσεων (πίνακες 4.2.1 και 4.3.1), συμπεραίνεται ότι η Εξίσωση 4.4.4 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του βαθμού απόδοσης πολυκρυσταλλικών Φ/Β, με παρόμοιες τεχνικές προδιαγραφές (STC), τα οποία λειτουργούν σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος, σε περιοχές με μικρά έως και μεσαία γεωγραφικά πλάτη ($\varphi = 5^\circ \div 45^\circ$), με πολύ καλή ακρίβεια.

4.6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΓΑΛΛΙΑ

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης και της συγκριτικής αξιολόγησης των μετρήσεων από τις δύο Φ/Β πειραματικές εγκαταστάσεις, επαληθεύουν ορισμένες αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.4, καθώς και μια σειρά άλλων σχέσεων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και οι οποίες περιλαμβάνουν αδιάστατους παράγοντες που σχετίζονται και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β σε συνθήκες STC.

4.6.1. Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/Β

Η εκτίμηση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του Φ/Β με τη χρήση της Εξίσωση Ross (Εξίσωση 2.2.16) δεν είναι πάντα εφικτή, καθώς όπως φαίνεται από τις μετρήσεις, στην πράξη ο συντελεστής k μεταβάλλεται συνεχώς, ανάλογα με τη θέση της Φ/Β μονάδα (σε επαφή με τον αέρα, με άλλη επιφάνεια, με στέγη κ.λ.π.) και συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Οι μετρήσεις από τις δύο Φ/Β μονάδες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά τον συντελεστή k , αλλά και τη διακύμανση της θερμοκρασίας του Φ/Β. Ο προσδιορισμός των σταθερών συντελεστών της Εξίσωσης 4.4.1 από τις μετρήσεις του Cadarache, δίνει διαφορετικές τιμές από αυτές που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων της Πεντέλης (Πίνακας 4.6.1).

Πίνακας 4.6.1: Σταθεροί συντελεστές και τυπικά σφάλματα της Εξίσωσης 4.4.1, για τις μετρήσεις σε Πεντέλη και Cadarache

	Τεταγμένη	Συντελεστής T_{air}	Συντελεστής G_T	Συντελεστής V_w	Τυπικό σφάλμα	R^2
Παλαιά Πεντέλη	2,08 ($\pm 0,13$)	1,038 ($\pm 0,004$)	0,0182 ($\pm 0,0001$)	-1,13 ($\pm 0,02$)	$\pm 2,8$	0,96
Cadarache	-2,64 ($\pm 0,03$)	1,166 ($\pm 0,001$)	0,0325 ($\pm 0,0004$)	-0,783 ($\pm 0,007$)	$\pm 4,6$	0,91

Μονάδες Παραμέτρων: T_{pv} και T_{air} σε ($^{\circ}C$), G_T σε (W/m^2), V_w σε (m/s)

Η διαφορά των τιμών των σταθερών συντελεστών οφείλεται κυρίως στο γεγονός, ότι στην περιοχή του Cadarache οι θερμοκρασίες της επιφάνειας των Φ/Β που καταγράφηκαν ήταν υψηλότερες σε σχέση με την περιοχή της Πεντέλης. Η διαφορά των θερμοκρασιών των Φ/Β φαίνεται να σχετίζεται και με τις ταχύτητες του ανέμου, όπου στο Cadarache είναι κατά πολύ χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στην Πεντέλη, με μέσο όρο για την περιοχή του Cadarache ήταν 1,51 m/sec και για την Πεντέλη 3,1m/sec. Οι χαμηλότερες τιμές ταχύτητας ανέμου, εκτός από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες της περιοχής του Cadarache, οφείλονται και στο γεγονός ότι η Φ/Β μονάδα είναι τοποθετημένη μπροστά από λυόμενη κτιριακή κατασκευή, η οποία ανακόπτει την ταχύτητα του ανέμου.

4.6.2. Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος

Η ανάλυση των δεδομένων από τις δύο Φ/Β μονάδες οδήγησε στη δημιουργία ορισμένων σχέσεων για τον υπολογισμό της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης τους (η_{pv-act}), οι οποίες περιλαμβάνουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β σε συνθήκες STC, όπως είναι η ονομαστική ενεργειακή απόδοση η_{ref} και η αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση η_{pv} σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β (Εξίσωση 4.3.2). Συνεπώς οι σχέσεις αυτές μπορούν να

χρησιμοποιηθούν και από διαφορετικού τύπου κρυσταλλικά Φ/Β με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 4.6.2 δίνονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β, που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και επαληθεύονται με μεγάλη ακρίβεια από τις μετρήσεις των Φ/Β και των δύο περιοχών, Πεντέλης και Cadarache.

Η ανάλυση των δεδομένων δείχνει ότι, η χρήση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει πάνω στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β (S_{pv}), η οποία υπολογίζεται στην περίπτωση που είναι γνωστή η άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (Εξίσωση 2.2.14), δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Στη πράξη όμως, συνήθως είναι διαθέσιμες οι τιμές της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας και του μέσου συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$ που προσεγγίζει τον συντελεστή $\tau_a(\theta)_b$ για τη άμεση ηλιακή ακτινοβολία, είναι πιο εύκολη η χρήση των εξισώσεων 1, 3, 6, 7 και 10. Επίσης οι σχέσεις 5, 6, 9 και 10 μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις περισσότερες περιπτώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμες τιμές της ταχύτητας του ανέμου.

Πίνακας 4.6.2: Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης (%) των Φ/Β. Τιμές σταθερών συντελεστών και τυπικά σφάλματα για την περιοχή της Πεντέλης και του Cadarache

Εξίσωση 1: $\eta_{pv-act} = a + b \cdot \eta_{pv} + c \cdot \log_{10}(G_T \cdot (\tau_a)_b) + d \cdot AM + e \cdot Vw$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,003	0,81	0,0000048	-0,00284	-0,00037	±0,004	0,51
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,01)	(± 2,7·10 ⁻⁷)	(±5,2·10 ⁻⁵)	(±3,4·10 ⁻⁵)		
BETA		1,074	0,234	-0,625	-0,102		
Cadarache							
Συντελεστές	-0,0325	1,1098	0,00000997	-0,003340	-0,000824	±0,004	0,62
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0002)	(± 0,0023)	(± 5,3·10 ⁻⁸)	(±9,5·10 ⁻⁶)	(±6,3·10 ⁻⁶)		
BETA		1,244	0,419	-0,606	-0,178		
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{pv} (από 0 έως 1), G_T σε (W/m ²), Vw σε (m/s)							
Εξίσωση 2: $\eta_{pv-act} = a + b \cdot \eta_{pv} + c \cdot \log_{10}(S_{pv}) + d \cdot AM + e \cdot Vw$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	-0,030	0,895	0,0097	-0,00256	-0,00045	±0,004	0,57
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,01)	(±0,00027)	(±5,0·10 ⁻⁵)	(±3,2·10 ⁻⁵)		
BETA		1,182	0,434	-0,563	-0,12136		
Cadarache							
Συντελεστές	-0,0522	1,103	0,00986	-0,003419	-0,000829	±0,004	0,63
Τυπικό σφάλμα	(± 0,003)	(± 0,002)	(± 4,7·10 ⁻⁵)	(±9,3·10 ⁻⁶)	(±6,3·10 ⁻⁶)		
BETA		1,234	0,418	-0,621	-0,179		
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{pv} (από 0 έως 1), S_{pv} σε (W/m ²), Vw σε (m/s)							
Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα από -0,028 έως 0,034 και μέσο όρο -0,002. Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά							

αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,028 έως 0,019 και μέσο όρο -0,0001. Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση 1 με λίγο μεγαλύτερες τιμές υπολοίπων.

$$\text{Εξίσωση 3: } \frac{\eta_{pv-act}}{\eta_{ref}} = a + b \cdot \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - 25) + c \cdot \log_{10}(G_T \cdot (\tau_a)_b) + d \cdot AM + e \cdot Vw$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,634	-0,89	0,084	-0,0220	-0,0040	±0,031	0,51
Τυπικό σφάλμα	(± 0,006)	(± 0,01)	(±0,0024)	(±0,0005)	(±0,0003)		
BETA		-1,180	0,443	-0,574	-0,121		
Cadarache							
Συντελεστές	0,615	-1,120	0,0935	-0,03062	-0,00745	±0,037	0,64
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,002)	(± 0,0004)	(±8,5·10 ⁻⁵)	(±5,7·10 ⁻⁵)		
BETA		-1,253	0,450	-0,605	-0,175		

Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{ref} (από 0 έως 1), T_{pv} σε (°C), G_T σε (W/m²), Vw σε (m/s)

$$\text{Εξίσωση 4: } \frac{\eta_{pv-act}}{\eta_{ref}} = a + b \cdot \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - 25) + c \cdot \log_{10}(S_{pv}) + d \cdot AM + e \cdot Vw$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,644	-0,90	0,082	-0,0262	-0,0040	±0,031	0,57
Τυπικό σφάλμα	(± 0,007)	(± 0,01)	(±0,0024)	(±0,0005)	(±0,0003)		
BETA		-1,196	0,425	-0,574	-0,124		
Cadarache							
Συντελεστές	0,632	-1,107	0,0891	-0,03403	-0,00768	±0,037	0,63
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,002)	(± 0,0004)	(±9,3·10 ⁻⁵)	(±5,8·10 ⁻⁵)		
BETA		-1,239	0,409	-0,628	-0,181		

Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{ref} (από 0 έως 1), T_{pv} σε (°C), S_{pv} σε (W/m²), Vw σε (m/s)

Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα από -0,26 έως 0,34 και μέσο όρο -0,027.

Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,22 έως 0,24 και μέσο όρο 0,028.

Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση 3 με ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές υπολοίπων.

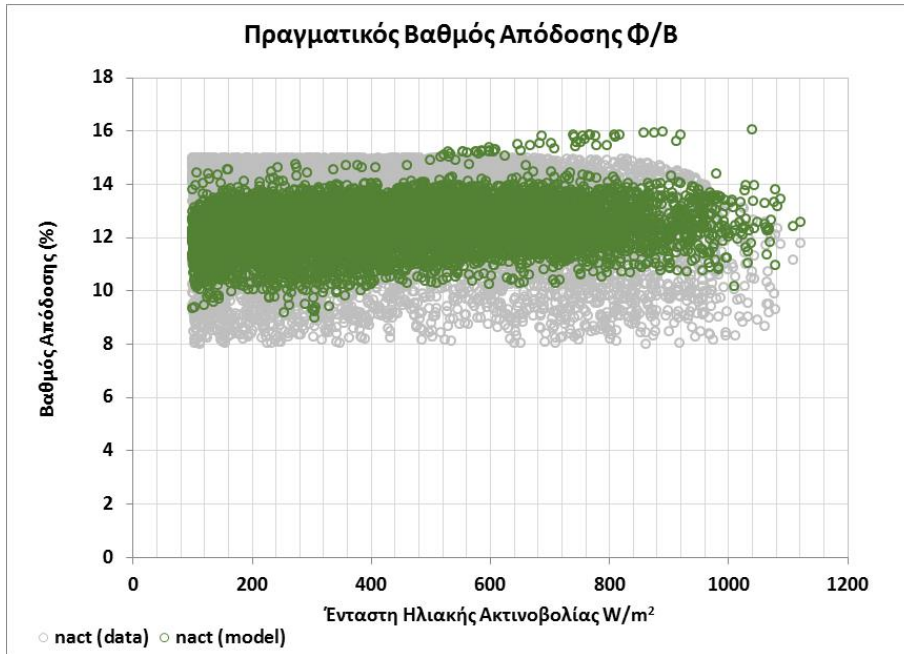
$$\text{Εξίσωση 5: } \frac{\eta_{pv-act}}{\eta_{ref}} = a + b \cdot \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - 25) + c \cdot \log_{10}(S_{pv}) + d \cdot AM$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,645	-0,853	0,076	-0,0254		±0,031	0,56
Τυπικό σφάλμα	(± 0,007)	(± 0,009)	(±0,0024)	(±0,0005)			

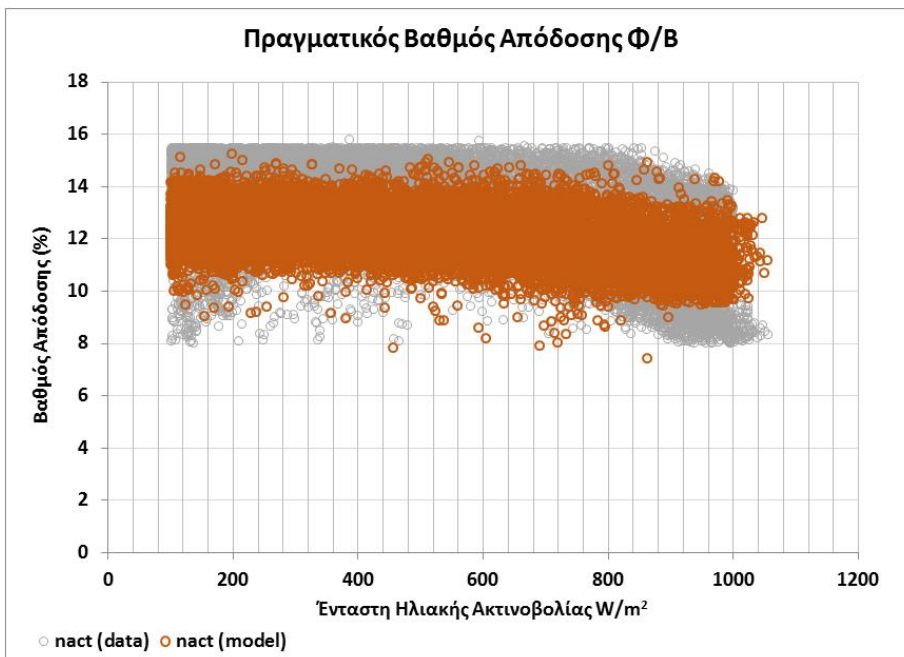
BETA		-1,127	0,393	-0,557			
Cadarache							
Συντελεστές	0,610	-1,159	0,0942	-0,03300		±0,037	0,60
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,002)	(± 0,0004)	(±9,6·10 ⁻⁵)			
BETA		-1,298	0,432	-0,609			
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{ref} (από 0 έως 1), T_{pv} σε (°C), S_{pv} σε (W/m ²)							
<p>Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα από -0,25 έως 0,31 και μέσο όρο -0,021. Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,23 έως 0,21 και μέσο όρο 0,0123. Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση 6 με σχεδόν ίδιες τιμές υπολοίπων.</p>							
Εξίσωση 6: $\frac{\eta_{pv-act}}{\eta_{ref}} = a + b \cdot \beta_{ref} \cdot (T_{pv} - 25) + c \cdot \log_{10}(G_T \cdot (\tau\alpha)_b) + d \cdot AM$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,644	-0,856	0,076	-0,0251		±0,032	0,56
Τυπικό σφάλμα	(± 0,007)	(± 0,009)	(±0,0024)	(±0,0005)			
BETA		-1,130	0,402	-0,549			
Cadarache							
Συντελεστές	0,598	-1,185	0,0988	-0,03252		±0,038	0,62
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(± 0,002)	(± 0,0004)	(±9,4·10 ⁻⁵)			
BETA		-1,327	0,475	-0,600			
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{ref} (από 0 έως 1), T_{pv} σε (°C), G_T σε (W/m ²)							
Εξίσωση 7: $Dn = \eta_{pv} - \eta_{pv-act} = a + b \cdot (G_T \cdot (\tau\alpha)_b) + c \cdot AM + d \cdot Vw$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d		Τυπικό σφάλμα	R²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,0169	-0,0000070	0,00372	0,00059		±0,004	0,66
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0002)	(±2,3·10 ⁻⁷)	(±5,7·10 ⁻⁵)	(±3,1·10 ⁻⁵)			
BETA	-0,276	0,592	0,131	-0,276			
Cadarache							
Συντελεστές	0,01992	-0,00000791	0,003403	0,000898		±0,004	0,61
Τυπικό σφάλμα	(±3,6·10 ⁻⁵)	(±3,6·10 ⁻⁸)	(±9,1·10 ⁻⁶)	(±6,3·10 ⁻⁶)			
BETA	-0,337	0,585	0,197	-0,337			
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{pv} (από 0 έως 1), G_T σε (W/m ²), Vw σε (m/s)							
<p>Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης, δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα από -0,035 έως 0,028 και μέσο όρο 0,0014. Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache, δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,025 έως 0,017 και μέσο όρο 0,0029. Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση 8 με σχεδόν παρόμοιες τιμές υπολοίπων.</p>							

Εξίσωση 8: $Dn = n_{pv} - n_{pv-act} = a + b \cdot S_{pv} + c \cdot AM + d \cdot Vw$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d		Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,0170	-0,0000073	0,00372	0,00059		±0,004	0,66
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0002)	(±2,3·10 ⁻⁷)	(±5,7·10 ⁻⁵)	(±3,1·10 ⁻⁵)			
BETA		-0,279	0,592	0,131			
Cadarache							
Συντελεστές	0,01979	-0,00000807	0,003462	0,000891		±0,004	0,61
Τυπικό σφάλμα	(±3,6·10 ⁻⁵)	(±3,8·10 ⁻⁸)	(±9,1·10 ⁻⁶)	(±6,3·10 ⁻⁶)			
BETA		-0,326	0,595	0,196			
Μονάδες παραμέτρων: n_{pv-act} , και n_{pv} (από 0 έως 1), S_{pv} σε (W/m ²), Vw σε (m/s)							
Εξίσωση 9: $\frac{n_{pv-act}}{n_{pv}} = a + b \cdot S_{pv} + c \cdot S_{pv} \cdot T_{pv} + d \cdot AM$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d		Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,829	0,000084	-0,00000083	-0,0295		±0,034	0,55
Τυπικό σφάλμα	(± 0,002)	(±3,7·10 ⁻⁶)	(±6,2·10 ⁻⁸)	(±0,0005)			
BETA		0,421	-0,257	-0,616			
Cadarache							
Συντελεστές	0,7954	0,0001562	-0,00000203	-0,02894		±0,04	0,44
Τυπικό σφάλμα	(±0,0003)	(±9,3·10 ⁻⁷)	(±1,4·10 ⁻⁸)	(±9,3·10 ⁻⁵)			
BETA		0,767	-0,670	-0,606			
Μονάδες παραμέτρων: n_{pv-act} , και n_{pv} (από 0 έως 1), S_{pv} σε (W/m ²), T_{pv} σε (°C), Vw σε (m/s)							
<p>Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,04 έως 0,04 για το 95% των μετρήσεων. Επίσης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα από -0,07 έως 0,065 για 95% των μετρήσεων και μέσο όρο -0,0225.</p> <p>Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν υπόλοιπα που κυμαίνονται περίπου από -0,05 έως 0,05 για το 95% των μετρήσεων, ενώ ταυτόχρονα δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,08 έως 0,07 για 95% των μετρήσεων και μέσο όρο 0,0176.</p> <p>Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση 10 με σχεδόν παρόμοιες τιμές υπολοίπων.</p>							
Εξίσωση 10: $\frac{n_{pv-act}}{n_{pv}} = a + b \cdot G_T \cdot (\tau_a)_b + c \cdot G_T \cdot (\tau_a)_b \cdot T_{pv} + d \cdot AM$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d		Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,829	0,000083	-0,00000085	-0,0294		±0,034	0,55
Τυπικό σφάλμα	(± 0,002)	(±3,7·10 ⁻⁶)	(±6,2·10 ⁻⁸)	(±0,0005)			
BETA		0,434	-0,272	-0,615			
Cadarache							

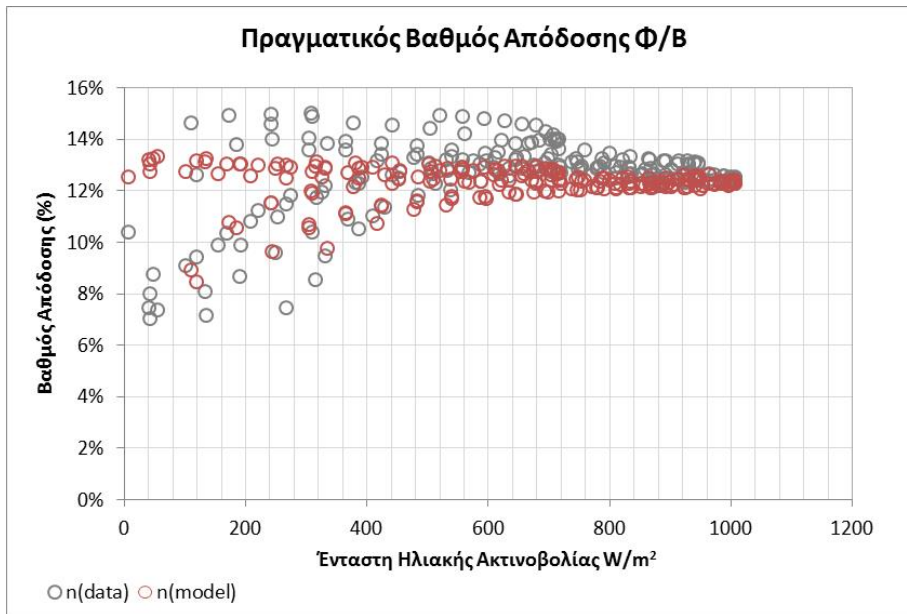
Συντελεστές	0,7932	0,0001611	-0,00000211	-0,02848		
Τυπικό σφάλμα	(±0,0003)	(±8,9·10 ⁻⁷)	(±1,4·10 ⁻⁸)	(±9,2·10 ⁻⁵)		±0,04
BETA		0,837	-0,731	-0,596		0,45
Μονάδες παραμέτρων: η_{pv-act} , και η_{pv} (από 0 έως 1), G_T σε (W/m ²), T_{pv} σε (°C), V_w σε (m/s)						



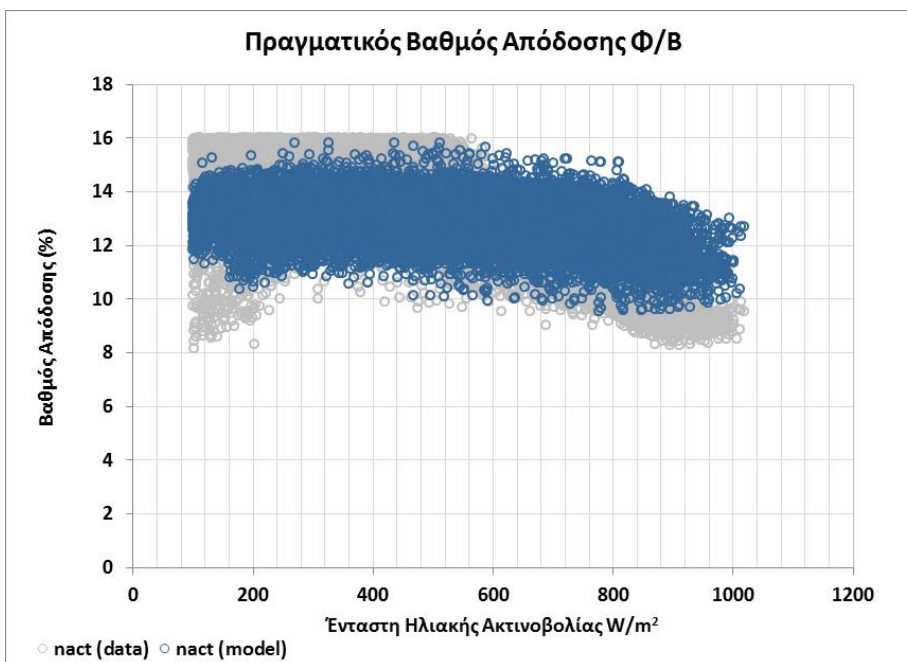
Σχήμα 4.6.1: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/Β, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (πράσινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{ref}=15,0\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=746,4kW$). Μέση απόκλιση τιμών 3% (μέγιστη διακύμανση -20% έως 21%)



Σχήμα 4.6.2: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/Β, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (πορτοκαλί χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($\eta_{ref}=15,7\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=5,87kW$). Μέση απόκλιση τιμών 6% (μέγιστη διακύμανση -22% έως 25%)



Σχήμα 4.6.3: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/Β, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (κόκκινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($n_{ref}=15,54\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=497kW$). Μέση απόκλιση τιμών 1% (μέγιστη διακύμανση από -12% έως 14%)



Σχήμα 4.6.4: Πραγματικός βαθμός απόδοσης Φ/Β, από μετρήσεις (γκρι χρώμα), υπολογιζόμενος (κόκκινο χρώμα). Ονομαστικός βαθμός απόδοσης ($n_{ref}=16,2\%$), ονομαστική ισχύς ($P_{max}=5,985kW$). Μέση απόκλιση τιμών 2% (μέγιστη διακύμανση από -18% έως 22%)

Οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β (Πίνακας 4.6.2), εφαρμόστηκαν και σε δεδομένα από εμπορικές Φ/Β μονάδες, σε δύο Ελληνικές περιοχές και σε δύο Φ/Β μονάδες σε περιοχές της Αγγλίας, για χρονική περίοδο από ένα έως δύο έτη ανά περίπτωση Φ/Β μονάδας. Οι μετρήσεις των Φ/Β μονάδων αυτών δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστες, καθώς δεν είναι γνωστή η ακρίβεια των μετρήσεως, η βαθμονόμηση του εξοπλισμού καταγραφής, ο συγχρονισμός των οργάνων μέτρησης κ.λ.π. Ωστόσο, ακόμα και αυτές οι μετρήσεις επαληθεύουν τις εμπειρικές σχέσεις σε μεγάλο βαθμό και ιδιαίτερα δε για

τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας άνω των 150 W/m², όπου παρέχουν σχετικά καλά αποτελέσματα.

Στα Σχήματα 4.6.1 έως 4.6.4 απεικονίζεται ο μετρούμενος και ο υπολογιζόμενος πραγματικός βαθμός απόδοση βάσει της αναλυτικής Εξίσωσης 6 (Πίνακας 4.6.2), των τεσσάρων εμπορικών Φ/Β μονάδων. Η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών του βαθμού απόδοσης σε σχέση με τον μετρούμενο στις εμπορικές μονάδες, που αναφέρονται στις λεζάντες των επιμέρους Σχημάτων αφορά το 95% των τιμών του δείγματος. Οι μετρήσεις των εμπορικών Φ/Β μονάδων με ακραίες αποκλίσεις που καταγράφηκαν είναι αναμενόμενες, καθώς η συχνότητα μετρήσεων σε όλες σχεδόν τις μονάδες ήταν της τάξεως των 15 min, ενώ η απόκριση των οργάνων μέτρησης δεν είναι πάντα ίδια. Ιδιαίτερα δε στην περίπτωση ημερών με έντονη και συνεχή διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αναμενόμενη και η εμφάνιση ακραίων τιμών, λαμβανομένου δε και της ενδεχόμενης έλλειψης βαθμονόμησής των οργάνων αυτών.

4.6.3. Ισχύς Εξόδου Φ/Β σε Συνθήκες Περιβάλλοντος

Από την ίδια ανάλυση των δεδομένων από τις δύο Φ/Β μονάδες προέκυψαν ορισμένες σχέσεις για τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος εξόδου (P_{pv-act}) των Φ/Β, οι οποίες περιλαμβάνουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β σε συνθήκες STC, όπως είναι η ονομαστική μέγιστη ισχύς εξόδου (P_{max} ή P_{ref}) και η αναμενόμενη ισχύς εξόδου P_{pv} σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του Φ/Β (Εξίσωση 4.3.6). Συνεπώς οι σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και από διαφορετικού τύπου κρυσταλλικά Φ/Β με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Στον Πίνακα 4.6.3 δίνονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ισχύος εξόδου των Φ/Β, που προέκυψαν από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και επαληθεύονται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια από τις μετρήσεις των Φ/Β και των δύο περιοχών, Πεντέλης και Cadarache.

Πίνακας 4.6.3: Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ισχύος εξόδου των Φ/Β. Τιμές σταθερών συντελεστών και τυπικά σφάλματα για την περιοχή της Πεντέλης και του Cadarache

Εξίσωση 1: $\frac{P_{pv-act}}{P_{max}} = a + b \cdot G_T \cdot \ln(G_T) + c \cdot G_T \cdot (G_T - 1) + d \cdot G_T \cdot (T_{pv} - 25)$							
Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	-0,00793	0,0001534	-0,000000241	-0,00000299		±0,017	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0009)	(±6,2·10 ⁻⁷)	(±3,8·10 ⁻⁹)	(±3,0·10 ⁻⁸)			
BETA		1,504	-0,398	-0,164			
Cadarache							
Συντελεστές	0,01529	0,0001262	-0,0000000907	-0,000003478		±0,019	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0001)	(±1,1·10 ⁻⁷)	(± 7,5·10 ⁻¹⁰)	(±6,7·10 ⁻⁹)			
BETA		1,339	-0,156	-0,230			
Μονάδες παραμέτρων: P_{pv-act} , και P_{max} σε (Watt), G_T σε (W/m ²), T_{pv} σε (°C)							
<p>Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,05 έως 0,06 για το 99% των μετρήσεων. Επίσης δίνουν καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα -0,07 έως 0,02 για το 98% των μετρήσεων και μέσο όρο -0,022.</p> <p>Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,04 έως 0,03 για το 98% των μετρήσεων. Επίσης δίνουν καλά</p>							

αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,06 έως 0,04 και μέσο όρο -0,023.
 Η Εξίσωση αυτή είναι παρόμοια με την εμπειρική Εξίσωση INES/CEA.

$$\text{Εξίσωση 2: } \frac{P_{pv-act}}{P_{max}} = a + b \cdot G_T \cdot (\tau\alpha)_b + c \cdot G_T \cdot (\tau\alpha)_b \cdot \eta_{pv}$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	0,0036	0,000038	0,00735			±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0006)	(±6,5·10 ⁻⁶)	(±6,6·10 ⁻⁵)				
BETA		0,049	0,947				
Cadarache							
Συντελεστές	-0,00300	0,000015	0,00780			±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(±9,7·10 ⁻⁵)	(±1,1·10 ⁻⁶)	(±1,2·10 ⁻⁵)				
BETA		-0,021	1,017				

Μονάδες παραμέτρων: P_{pv-act}, και P_{max} σε (Watt), η_{pv} (από 0 έως 1), G_T σε (W/m²),

$$\text{Εξίσωση 3: } \frac{P_{pv-act}}{P_{max}} = a + b \cdot S_{pv} + c \cdot S_{pv} \cdot \eta_{pv}$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							
Συντελεστές	-0,0035	0,000166	0,00634			±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0006)	(±6,4·10 ⁻⁶)	(±6,7·10 ⁻⁵)				
BETA		0,208	0,790				
Cadarache							
Συντελεστές	-0,0040	0,000150	0,00645			±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0001)	(±1,3·10 ⁻⁶)	(± 1,4·10 ⁻⁵)				
BETA		0,201	0,795				

Μονάδες παραμέτρων: P_{pv-act}, και P_{max} σε (Watt), η_{pv} (από 0 έως 1), S_{pv} σε (W/m²),

Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,03 έως 0,03. Επίσης δίνουν καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα -0,04 έως 0,07 για το 98% των μετρήσεων και μέσο όρο -0,0034.

Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,04 έως 0,03. Επίσης δίνουν καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,07 έως 0,05 και μέσο όρο -0,0047.

Το ίδιο ισχύει και για τη εξίσωση 2 με σχεδόν παρόμοιες τιμές υπολοίπων. Οι εξισώσεις 2 και 3 θα μπορούσαν να είναι μια εναλλακτική μορφή της εμπειρικής Εξίσωσης INES/CEA.

$$\text{Εξίσωση 4: } \frac{P_{pv-act}}{P_{max}} = a + b \cdot S_{pv} + c \cdot S_{pv}^2 + d \cdot S_{pv} \cdot T_{pv}$$

Σταθεροί συντελεστές	a	b	c	d	e	Τυπικό σφάλμα	R ²
Παλαιά Πεντέλη							

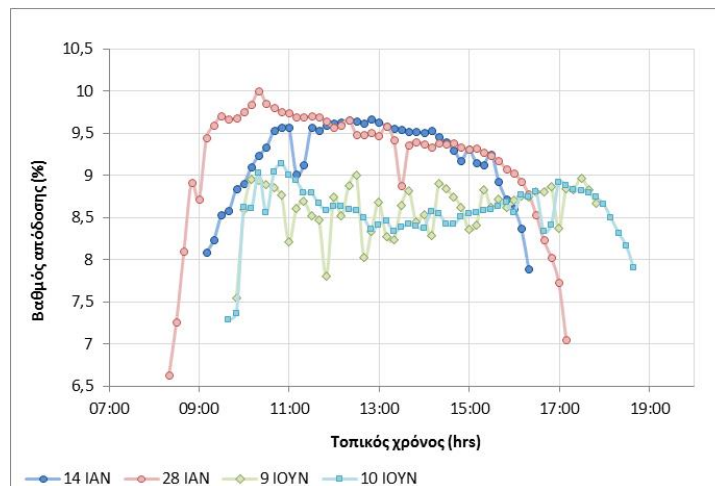
Συντελεστές	-0,027	0,001067	-0,000000110	-0,00000280		±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,001)	(±3,9·10 ⁻⁶)	(±3,6·10 ⁻⁹)	(±3,1·10 ⁻⁸)			
BETA		1,338	-0,156	-0,216			
Cadarache							
Συντελεστές	0,0045	0,0008855	0,0000000527	-0,000003231		±0,02	0,99
Τυπικό σφάλμα	(± 0,0001)	(±7,5·10 ⁻⁷)	(±7,8·10 ⁻¹⁰)	(±7,2·10 ⁻⁹)			
BETA		1,189	0,075	-0,291			
Μονάδες παραμέτρων: P _{pv-act} , και P _{max} σε (Watt), η _k (από 0 έως 1), S _{pv} σε (W/m ²),							
<p>Παρατήρηση: Οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις της Πεντέλης δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,02 έως 0,023 για το 98% των μετρήσεων. Επίσης δίνουν καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις του Cadarache με υπόλοιπα -0,07 έως 0,09 για το 98% των μετρήσεων και μέσο όρο -0,017.</p> <p>Αντίστοιχα οι σταθεροί συντελεστές που προέκυψαν από τις μετρήσεις του Cadarache δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με υπόλοιπα που κυμαίνονται από -0,08 έως 0,04 για το 98% των μετρήσεων. Επίσης δίνουν καλά αποτελέσματα και για τις μετρήσεις της Πεντέλης με υπόλοιπα από -0,07 έως 0,035 για το 95% των μετρήσεων και μέσο όρο -0,018.</p> <p>Η Εξίσωση αυτή είναι μια πιο απλοποιημένη μορφή της εμπειρικής Εξίσωση της μεθοδολογίας PVUSA.</p>							

Για κάθε τύπο κρυσταλλικού Φ/Β, η πραγματική ισχύς εξόδου (P_{pv-act}) μπορεί αν υπολογιστεί απευθείας από την Εξίσωση 4.3.3 εφόσον έχει υπολογιστεί η πραγματική ενεργειακή απόδοση του (η_{pv-act}) με μία από τις σχέσεις του Πίνακα 4.6.2.

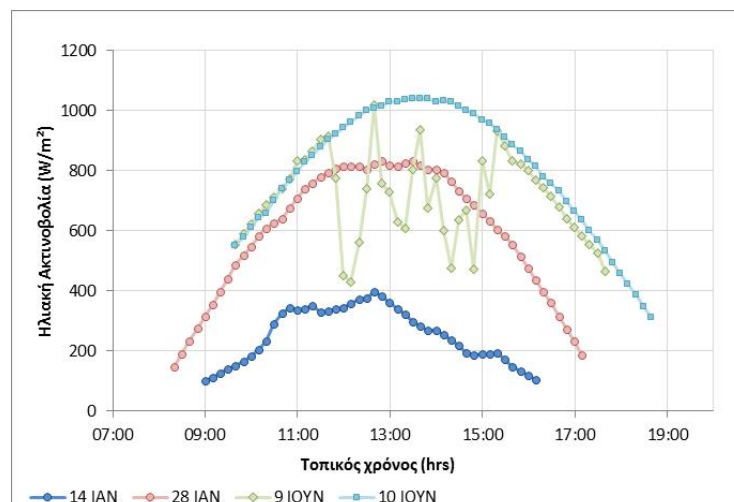
4.7. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας, ακολουθώντας μια κατανομή σχεδόν συμμετρική ως προς το ηλιακό μεσημέρι. Τις πρωινές και απογευματινές ώρες, η ενεργειακή απόδοση (%) για ένα Φ/Β (Σχήμα 4.7.1), με σταθερή κλίση και νότιο προσανατολισμό, παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές της, λόγω της μεγαλύτερης γωνίας πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και τις μεγαλύτερες τιμές της αέριας μάζας (AM). Παράλληλα η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β μεταβάλλεται ανάλογα και με την εποχή (Σχήμα 4.7.1), καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του αέρα (T_{air}) και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) (Σχήμα 4.7.2), λόγω μείωσης των τιμών της ζενιθιακής γωνίας.

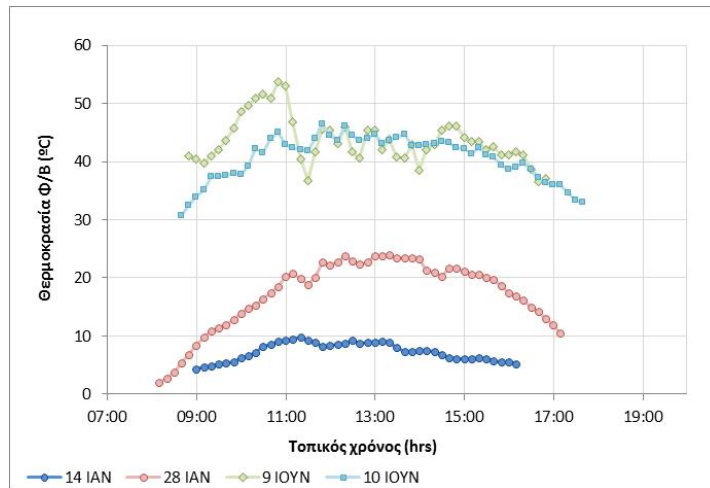
Η απόδοση του Φ/Β κατά τη διάρκεια δύο ημερών το μήνα Ιανουάριο (Σχήμα 4.7.1), στις 14/1 (νεφοσκεπής ημέρα) και 28/1 (αίθρια ημέρα), με μεγάλη διαφορά στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήμα 4.7.2), αλλά με παρόμοιες θερμοκρασίες αέρα, διαφοροποιείται ελάχιστα. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχήμα 4.7.3) είναι περίπου 10 K μεγαλύτερη την αίθρια μέρα (28/1) σε σχέση με τη νεφοσκεπή ημέρα (14/1), παρόλη τη διαφορά της έντασης στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό αποδεικνύει και την αρκετά μεγάλη συσχέτιση της θερμοκρασίας του Φ/Β με τη θερμοκρασία του αέρα.



Σχήμα 4.7.1: Ημερήσια διακύμανση της ενεργειακής απόδοσης του Φ/Β (Πεντέλη)

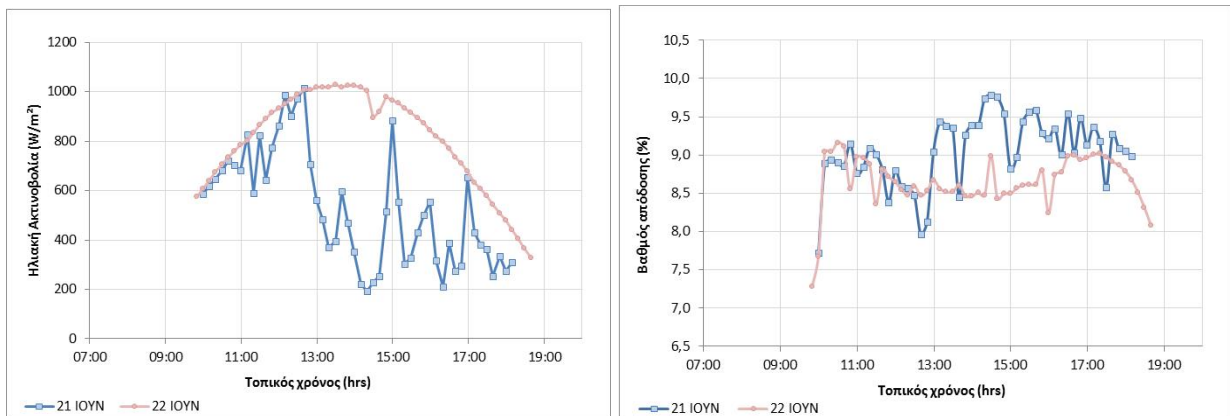


Σχήμα 4.7.2: Ημερήσια διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο Φ/Β (Πεντέλη)



Σχήμα 4.7.3: Ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας του Φ/Β (Πεντέλη)

Οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του Φ/Β είναι κατά πολύ μεγαλύτερες τη θερινή περίοδο, διπλάσιες ή και τριπλάσιες ανάλογα και με τα επίπεδα ηλιοφάνειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενεργειακή απόδοση (%) του Φ/Β να καταγράφεται χαμηλότερη κατά τη διάρκεια μια αίθριας ημέρα σε σχέση με μια νεφοσκεπή (Σχήμα 4.7.5), έως και 1,5 ποσοστιαία.



Σχήμα 4.7.4: Ημερήσια διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας (αριστερά) και του βαθμού απόδοσης του Φ/Β (δεξιά), από μετρήσεις Πεντέλης

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ Φ/Β ΣΕ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ – ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

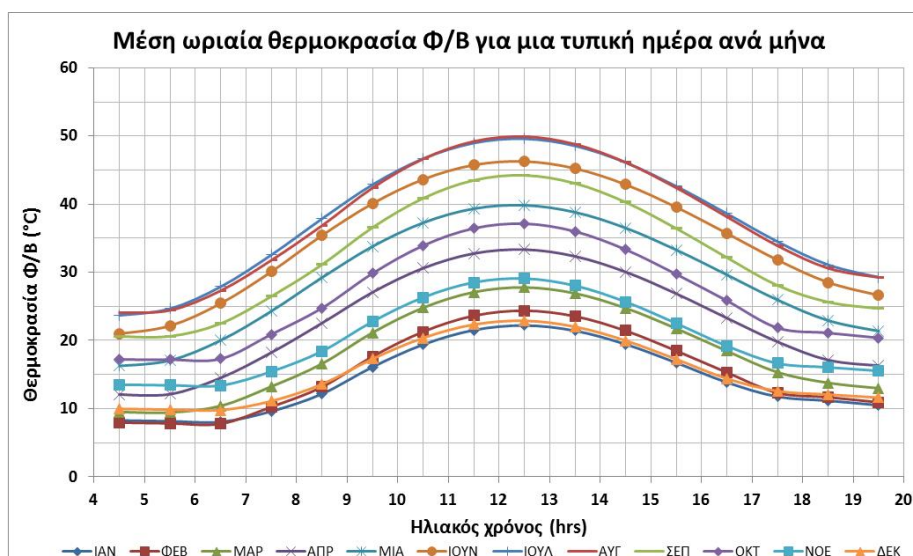
Η πραγματική απόδοση των Φ/Β πέραν από τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες μιας περιοχής (τοπικό μικροκλίμα), τη μορφολογία / ανάγλυφο του εδάφους, αλλά και τα τεχνητά ή φυσικά εμπόδια που ενδεχομένως να υπάρχουν. Η Ελλάδα και κυρίως το ηπειρωτικό τμήμα της, παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο, με αρκετούς ορεινούς όγκους, μέσου και μεγάλου υψομέτρου, ενώ υπάρχουν και αρκετές επίπεδες περιοχές, χωρίς φυσικά εμπόδια στον ορίζοντα. Η εναλλαγή αυτή του τοπίου έχει ως συνέπεια τη διαφοροποίηση των κλιματικών συνθηκών, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ακόμα και σε τοπικό επίπεδο, δηλαδή μεταξύ δύο κοντινών περιοχών.

Η οροσειρά της Πίνδου που αναπτύσσεται με κύριο άξονα Βορρά-Νότου, επηρεάζει έντονα το κλίμα της βόρειο-δυτικής Ελλάδος και τα νησιά του Ιονίου σε μικρότερο βαθμό, αυξάνοντας τις νεφοσκεπείς και βροχερές ημέρες. Αυτό έχει ως συνέπεια η δυτική Ελλάδα να παρουσιάζει χαμηλότερα επίπεδα ετήσιας ηλιακής ενέργειας, αλλά και χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα.

Οι δύο βασικές παράμετροι που διαφοροποιούν την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β και κατά συνέπεια την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι τοπικές κλιματικές συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου) και το ποσοστό θέασης του Φ/Β προς τον ουράνιο θόλο που επηρεάζεται από τα διάφορα φυσικά (μορφολογία εδάφους) ή τεχνητά (κτίσματα κ.λ.π.) εμπόδια. Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύεται η επίδραση των παραμέτρων αυτών στη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, καθώς και στον προσδιορισμό της τελικής θέσης εγκατάστασης των Φ/Β, προκειμένου για τη μέγιστη ηλιακή αξιοποίηση.

5.1. ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της ωριαίας θερμοκρασίας του αέρα, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των διαθέσιμων κλιματικών δεδομένων στις διάφορες Ελληνικές περιοχές. Οι τιμές της μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας του αέρα που προκύπτουν από τις σχέσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β, με αρκετά καλή ακρίβεια.

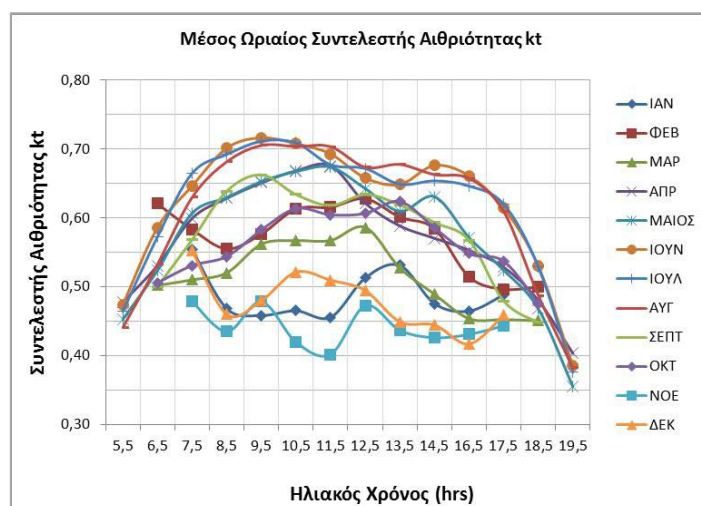


Σχήμα 5.1.1: Διακύμανση θερμοκρασίας Φ/Β στη διάρκεια μια τυπικής ημέρας ανά μήνα στην Αθήνα

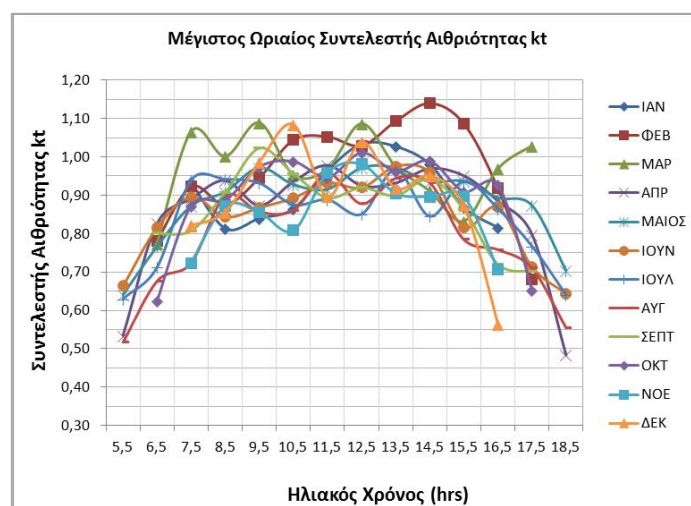
Στο ίδιο Κεφάλαιο δίνονται και οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, ανά μήνα, σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων της ΕΜΥ. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη διαστασιολόγησης ενός Φ/Β, στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, όπου απαιτείται η εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης τους καθώς και ο προσδιορισμός της βέλτιστης κλίσης, ανάλογα και με την εποχική χρήση ενός Φ/Β (ετήσια, θερινή ή χειμερινή).

5.1.1. Νέφωση και Διαθέσιμη Ηλιακή Ενέργεια στην Επιφάνεια Φ/Β

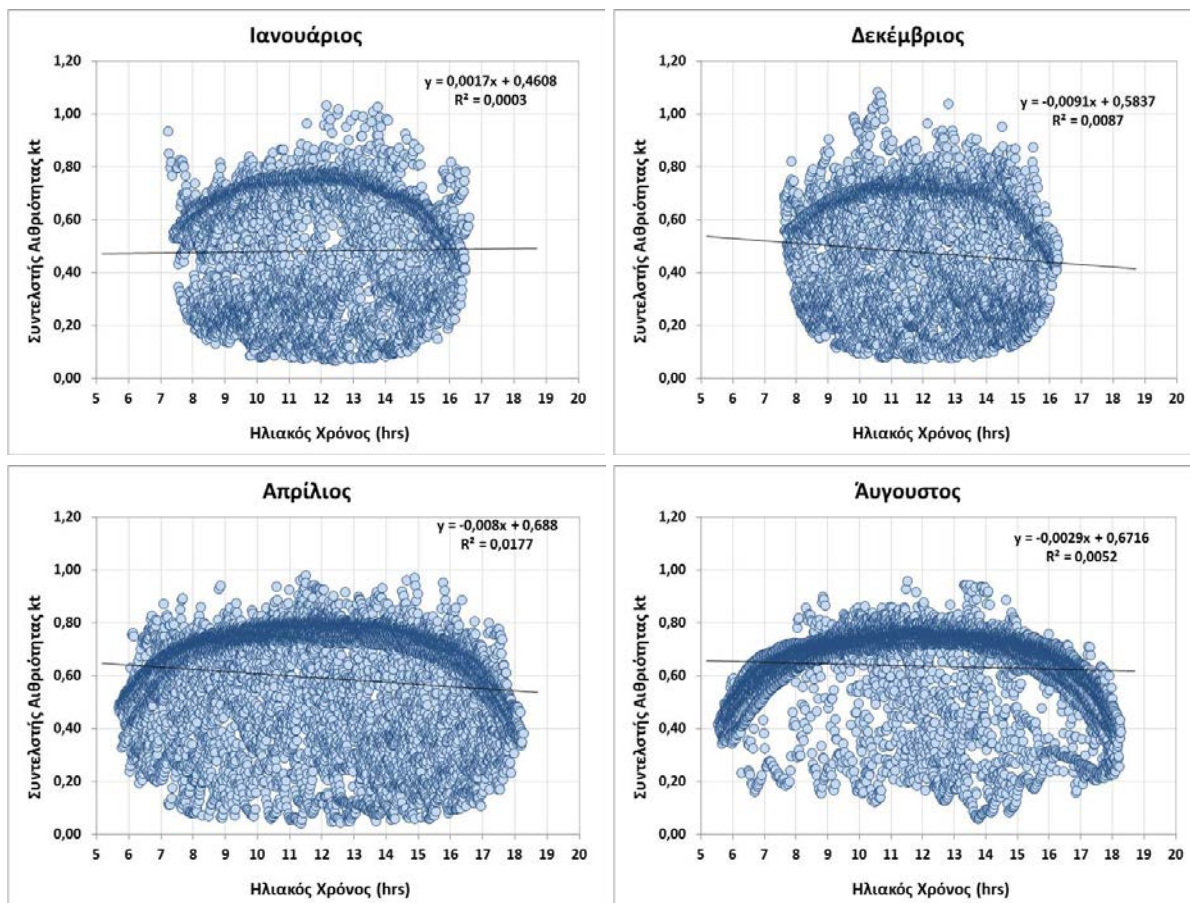
Στη διάρκεια μιας ημέρας η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις και ιδιαίτερα τις ημέρες με νέφωση (συνεχόμενη ή μερική, ελαφριά ή βαριά σύννεφα κ.λ.π.), οπότε και ο συντελεστής αιθριότητας (kt) (Σχήμα 5.1.2) διαφοροποιείται συνεχώς[41]. Οι μήνες Νοέμβριος, Δεκέμβριος και Ιανουάριος (Σχήμα 5.1.2 και 5.1.4) είναι συνήθως οι μήνες με το μεγαλύτερο ποσοστό χαμηλών τιμών του συντελεστή αιθριότητας[41,45,131,133]. Αντίθετα τον Αύγουστο (Σχήμα 5.1.4), η πλειοψηφία των ημερών παρουσιάζουν υψηλή αιθριότητα με μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή kt. Η εικόνα αυτή διαφοροποιείται κατά τις αίθριες μέρες (Σχήμα 5.1.3), όπου ακόμα και τους χειμερινούς μήνες, οι τιμές του συντελεστή αιθριότητας τις μέρες αυτές είναι πολύ υψηλές και τις μεσημεριανές ώρες μπορεί να φτάσει από 0,85 έως 0,95.



Σχήμα 5.1.2: Μέσος ωριαίος συντελεστής αιθριότητας για κάθε μήνα (μετρήσεις Πεντέλη)



Σχήμα 5.1.3: Μέγιστος ωριαίος συντελεστής αιθριότητας για κάθε μήνα (μετρήσεις Πεντέλη)



Σχήμα 5.1.4: Ωριαίος συντελεστής αιθριότητας (kt) για τους τέσσερις μήνες (μετρήσεις Πεντέλη)

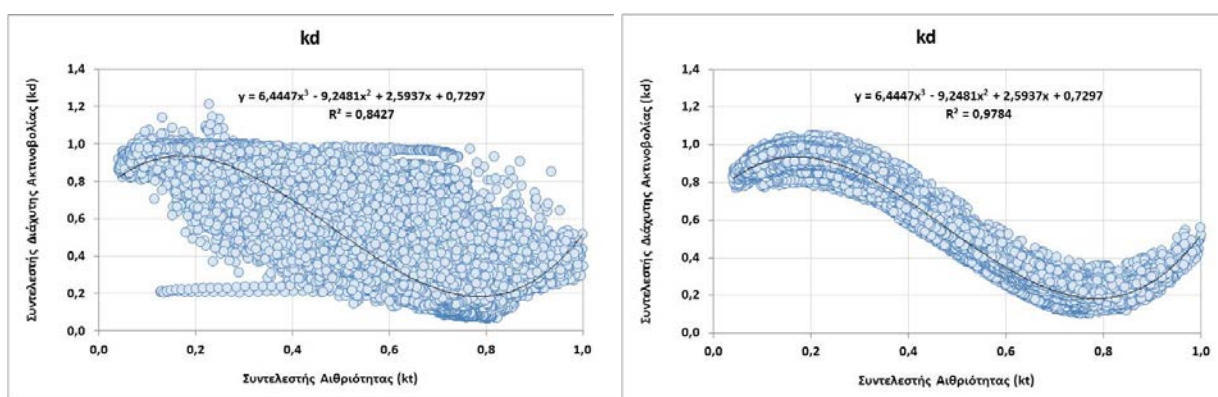
Η ένταση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας διαμορφώνεται κάθε φορά από το ποσοστό νεφοκάλυψης του ουράνιου θόλου και κυρίως από τη θέαση του ηλιακού δίσκου (άμεση ηλιακή ακτινοβολία) στην υπό μελέτη περιοχή. Πέραν όμως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, η σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας (διάχυτη, άμεση ή ανακλώμενη) διαφοροποιεί και το τελικό ποσό ακτινοβολίας που τελικά διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα του Φ/Β. Ο συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας (kd) είναι άλλη μία παράμετρο που πρέπει να προσδιοριστεί για τον υπολογισμό της τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας S_{pv} (Εξίσωση 2.2.14). Ο συντελεστής kd μπορεί να υπολογιστεί με πολύ καλή ακρίβεια από τις σχέσεις 2.1.9 και 2.1.10 όταν είναι γνωστός ο συντελεστής αιθριότητας (kt) ή η ηλιακή ακτινοβολία σε συνθήκες καθαρού ουρανού I_c . Ο συντελεστής αιθριότητας kt μπορεί να εκτιμηθεί για συγκεκριμένη χρονική περίοδο βάσει των ατμοσφαιρικών μοντέλων πρόγνωσης που υπάρχουν διαθέσιμα σήμερα και τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους δορυφόρους.

Η ανάλυση στιγμιαίων μετρήσεων της έντασης της ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Πεντέλης, για διάρκεια ενός έτους (107.000 σειρές μετρήσεων), δείχνει να επαληθεύει τις εμπειρικές σχέσεις 2.1.9 και 2.1.10. Από τις μετρήσεις αυτές διεξάχθηκε και η ακόλουθη εμπειρική Εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή kd σε συνάρτηση με τον συντελεστή αιθριότητας kt, τη σχετική υγρασία αέρα (RH) και το συνημίτονο της ζενιθιακής γωνίας που περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους της γεωγραφικής θέσης της περιοχής και της χρονικής περιόδου (ώρα, ημέρα και εποχή).

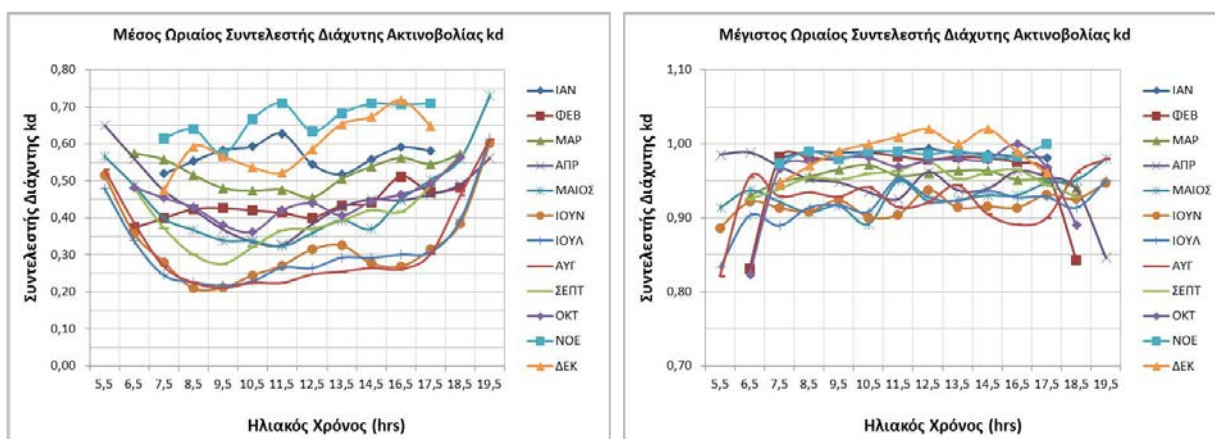
$$k_d = 0,445 (\pm 0,004) + 2,52 (\pm 0,002) \cdot \left(\frac{RH}{100}\right) + 2,93 (\pm 0,02) \cdot k_t - 9,47 (\pm 0,06) \cdot k_t^2 + 6,40 (\pm 0,04) \cdot k_t^3 + 0,081 (\pm 0,002) \cdot \text{συν}(\theta_z)$$

$$(R^2 = 0,86) \quad \text{Τυπικό σφάλμα } (\pm 0,108) \quad (5.1.1)$$

Η μεταβολή του συντελεστή διάχυτης ακτινοβολίας k_d εξαρτάται κυρίως από τον συντελεστή αιθριότητας k_t , ενώ η σχετική υγρασία και η ζενιθιακή γωνία φαίνεται ότι επιδρούν σε πολύ μικρότερο βαθμό. Αυτό προκύπτει και από τους τυποποιημένους συντελεστές BETA των ανεξάρτητων μεταβλητών, οι οποίοι είναι για τη σχετική υγρασία 0,165, για το συνημίτονο θ_z είναι 0,067, ενώ για το k_t , k_t^2 και k_t^3 είναι 2,04, -6,62 και 3,82 αντίστοιχα. Η Εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολύ καλή προσέγγιση για τιμές του συντελεστή αιθριότητας (k_t) μικρότερες από 0,8. Για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή k_t , οι συντελεστές διάχυτης ακτινοβολίας k_d που προκύπτουν από την Εξίσωση είναι λίγο αυξημένοι σε σχέση με τις μετρήσεις. Ωστόσο, αυτό στην πράξη μπορεί να συμβεί και ιδιαίτερα σε συνθήκες πλήρους νεφοκάλυψης του ουράνιου θόλου, με ελαφριά σύννεφα, όπου κάποιες χρονικές στιγμές ο ηλιακός δίσκος γίνεται ορατός, οπότε καταγράφεται και υψηλός συντελεστής αιθριότητας (k_t) αλλά και υψηλός συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας (k_d) λόγω σκέδασης και ανάκλασης των νεφών[41]. Για το λόγο αυτό οι υψηλές τιμές του συντελεστή αιθριότητας δεν οδηγούν πάντα σε χαμηλές τιμές του συντελεστή διάχυτης (Σχήμα 5.1.5, αριστερό διάγραμμα). Στο Σχήμα 5.1.5 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή k_d όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις (αριστερό διάγραμμα) και όπως προέκυψαν από την Εξίσωση 5.1.1 (δεξιό διάγραμμα), συναρτήσει του k_t .



Σχήμα 5.1.5: Συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το συντελεστή αιθριότητας (k_t), από μετρήσεις ενός έτους στην Πεντέλη (αριστερά), όπως προκύπτει από την αναλυτική Εξίσωση 5.1.1 (δεξιά)



Σχήμα 5.1.6: Μέσος ωριαίος (αριστερά) και μέγιστος (δεξιά) συντελεστής διάχυτης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με τον ηλιακό χρόνο (μετρήσεις ενός έτους στην περιοχή Πεντέλη)

Από την ανάλυση των μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας (ολικής και διάχυτης), στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίστηκε η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη συλλεκτική επιφάνεια ενός κρυσταλλικού Φ/Β (S_{pv}), με νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0$), σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίσεις (β) 10°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° και 50°, με τη χρήση της θεωρητικής εξίσωσης 2.2.14. Στη συνέχεια

προσδιορίστηκε η αναλυτική Εξίσωση που υπολογίζει το λόγο (S_{pv}/I_{β}) της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στη συλλεκτική επιφάνεια ενός Φ/Β, προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην κεκλιμένη γυάλινη επιφάνεια (I_{β}). Οι υπολογισμοί έγιναν για χρονική περίοδο 5 λεπτών, για γεωγραφικά πλάτη που αντιπροσωπεύουν τις Ελληνικές περιοχές από 35° έως 41°. Η Εξίσωση 5.1.2 που υπολογίζει το λόγο (S_{pv}/I_{β}), μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολύ καλή ακρίβεια για πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά Φ/Β, στα γεωγραφικά πλάτη που αναφέρθηκαν και με τους σταθερούς συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών (α_0 έως α_6) για συγκεκριμένη κλίση Φ/Β, για κάθε χρονική περίοδο όπως δίνονται στον Πίνακα 5.1.1.

$$\frac{S_{pv}}{I_{\beta}} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot I_{\beta} + \alpha_2 \cdot R_b + \alpha_3 \cdot \tan(\theta)_b + \alpha_4 \cdot AM + \alpha_5 \cdot AM^{1,2} + \alpha_6 \cdot k_t \quad (5.1.2)$$

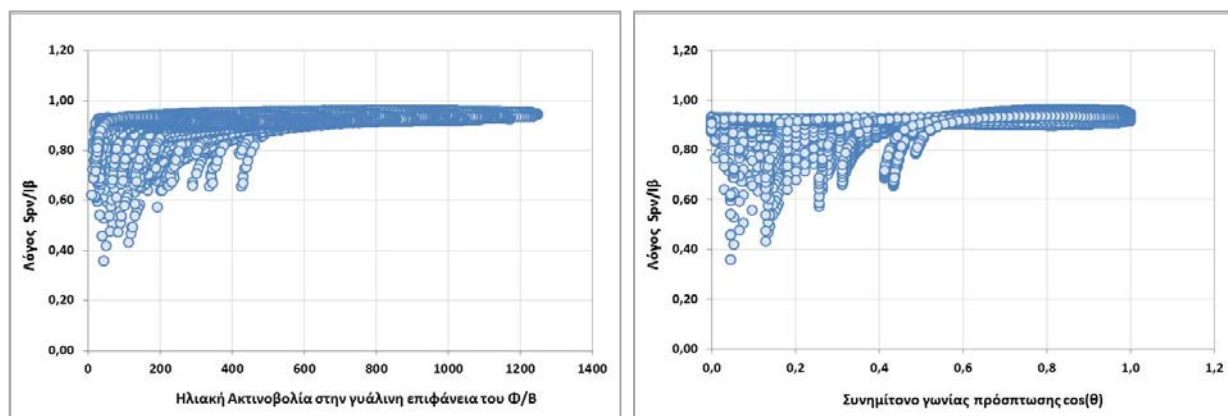
Πίνακας 5.1.1: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.2, για τον υπολογισμό του λόγου S_{pv}/I_{β}

Σταθεροί συντελεστές								R ²
β	α0	α1	α2	α3	α4	α5	α6	
10	0,06	0,000306	-0,153	0,82	0,463	-0,257	-0,316	0,87
20	0,622	0,000234	-0,008	0,190	0,301	-0,186	-0,266	0,87
25	0,701	0,000221	0,006	0,110	0,276	-0,173	-0,259	0,86
30	0,768	0,000209	0,0146	0,047	0,252	-0,161	-0,250	0,86
35	0,839	0,000191	0,0234	-0,019	0,221	-0,145	-0,231	0,85
40	0,873	0,000181	0,0251	-0,047	0,202	-0,134	-0,219	0,82
50	0,879	0,000186	0,0213	-0,042	0,193	-0,128	-0,225	0,78
Τυπικά σφάλματα παραμέτρων								
β	α0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	Συνολικό
10	0,02	3,22E-06	0,004	0,02	0,005	0,003	0,003	0,022
20	0,007	2,53E-06	0,002	0,008	0,003	0,002	0,003	0,021
25	0,005	2,32E-06	0,001	0,005	0,003	0,002	0,003	0,020
30	0,004	2,16E-06	0,0009	0,004	0,003	0,001	0,003	0,020
35	0,003	2,07E-06	0,0008	0,003	0,002	0,001	0,003	0,846
40	0,003	2,09E-06	0,0007	0,003	0,002	0,001	0,003	0,021
50	0,003	2,08E-06	0,0006	0,003	0,002	0,001	0,003	0,023
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA) των σταθερών συντελεστών								
β		x1	x2	x3	x4	x5	x6	
10		0,990	-0,336	0,983	9,419	-8,476	-0,238	
20		0,852	-0,038	0,258	6,728	-6,712	-0,220	
25		0,837	0,035	0,165	6,331	-6,436	-0,220	
30		0,823	0,107	0,081	5,951	-6,159	-0,219	
35		0,794	0,206	-0,040	5,451	-5,789	-0,211	
40		0,780	0,254	-0,109	5,145	-5,534	-0,206	
50		0,791	0,250	-0,109	4,835	-5,190	-0,209	

Οι μονάδες της ηλιακής ακτινοβολίας S_{pv} και I_{β} είναι σε W/m^2 . Με την Εξίσωση αυτή υπολογίζεται η τελική προς αξιοποίηση ηλιακή ακτινοβολία (S_{pv}) σε μια δεδομένη χρονική στιγμή που λαμβάνεται υπόψη από τη μεταβλητή της αέριας μάζας AM (Εξίσωση 2.1.29), και του γεωμετρικού παράγοντα R_b (Εξίσωση 2.1.26 για $\gamma=0$), για δεδομένες συνθήκες νέφωσης που λαμβάνονται υπόψη από το συντελεστή αιθριότητας κτ.

Στο Σχήμα 5.1.7 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (S_{pv}/I_{β}) σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία στη γυάλινη επιφάνεια του Φ/Β (αριστερό διάγραμμα) και σε συνάρτηση με το

συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης ($\cos\theta$), βάσει των μετρήσεων. Η γωνία πρόσπτωση διαφοροποιεί τους συντελεστές διαπερατότητας-απορροφητικότητας $\tau_a(\theta)$ για την άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια είναι μια ανεξάρτητη μεταβλητή που επιδρά σημαντικά στο λόγο (S_{pv}/I_β). Το ίδιο ισχύει και για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην γυάλινη επιφάνεια του Φ/B (I_β), όπου για τιμές κάτω από 500 W/m^2 (Σχήμα 5.1.7 αριστερά), φαίνεται να επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την τιμή του λόγου S_{pv}/I_β .



Σχήμα 5.1.7: Λόγος S_{pv}/I_β σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία (I_β) στη γυάλινη επιφάνεια του Φ/B (αριστερά) και τη γωνία πρόσπτωσης (θ) (δεξιά)

5.1.2. Θερμοκρασία Επιφάνειας Φ/B και Ενεργειακή Απόδοση

Η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του Φ/B , η οποία διαφοροποιείται συνεχώς στη διάρκεια της ημέρας. Από τις διαθέσιμες μετρήσεις των Φ/B μονάδων καταγράφηκε συνεχής μεταβολή (αυξομείωση) του συντελεστή Ross (k) βάσει της Εξίσωσης 2.2.16. Ωστόσο εφαρμόζοντας ένα μέσο συντελεστή (k) στο σύνολο των μετρήσεων, η απόκλιση των υπολογιζόμενων τιμών της θερμοκρασίας από τη μετρούμενη κυμαίνεται από -4°C έως 5°C για πάνω από το 90% των μετρήσεων.

Στην πράξη, ο μέσος συντελεστής k μιας εγκατάστασης Φ/B μπορεί να προσδιοριστεί με μετρήσεις ακριβείας για ένα αρχικό μικρό χρονικό διάστημα, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ώστε να μπορεί να γίνεται η πρόβλεψη της πραγματικής θερμοκρασίας το Φ/B ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες κάθε χρονικής στιγμής.

Βάσει των κλιματικών δεδομένων για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές προσδιορίστηκε η αναλυτική Εξίσωση που υπολογίζει τη μέση ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας των Φ/B , για μια μέση τυπική ημέρα του κάθε μήνα, όπως προκύπτει:

α) για μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα, στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, υπολογισμένες από την αναλυτική Εξίσωση 3.3.3 και τους αντίστοιχους σταθερούς συντελεστές (Πίνακας 3.3.3),

β) για μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένη γυάλινη επιφάνεια Φ/B , στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, υπολογισμένες από την αναλυτική Εξίσωση 3.2.2 και τους αντίστοιχους σταθερούς συντελεστές (Πίνακας 3.2.3),

γ) για τιμές του συντελεστή Ross, 0,020, 0,035, 0,055,

δ) για τοποθέτηση Φ/B με βέλτιστη κλίση (β) ανά περιοχή και νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0$).

Η αναλυτική Εξίσωση που προέκυψε είναι της μορφής:

$$T_{pv} = x_0 + x_1 \cdot \varphi + x_2 \cdot L + x_3 \cdot T_i + x_4 \cdot T_i^2 + x_5 \cdot T_i^3 + x_6 \cdot T_i^4 \quad (5.1.3)$$

Πίνακας 5.1.2: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της **μέσης ωριαίας** θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,02$ (Φ/Β ελεύθερα εγκατεστημένα, εκτεθειμένα στον άνεμο)

Σταθεροί συντελεστές (συντελεστής Ross, $k=0,02$)								R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ	210	-1,48	0,03	-60	8,5	-0,48	0,0093	0,94
ΦΕΒ	195	-1,20	0,04	-60	8,5	-0,48	0,0094	0,96
ΜΑΡ	163	-0,93	0,03	-52	7,7	-0,44	0,0086	0,98
ΑΠΡ	110	-0,59	0,21	-39	6,1	-0,36	0,0071	0,98
ΜΑΙΟΣ	85	-0,25	0,14	-33	5,4	-0,33	0,0065	0,98
ΙΟΥΝ	72	-0,03	0,14	-30	5,1	-0,31	0,0062	0,99
ΙΟΥΛ	85	-0,02	0,13	-34	5,7	-0,34	0,0068	0,99
ΑΥΓ	117	-0,18	0,05	-44	6,9	-0,41	0,0081	0,99
ΣΕΠΤ	159	-0,59	0,20	-55	8,4	-0,49	0,0096	0,98
ΟΚΤ	206	-1,02	0,13	-66	9,6	-0,55	0,0108	0,97
ΝΟΕΜ	219	-1,43	0,13	-65	9,2	-0,52	0,0102	0,96
ΔΕΚ	211	-1,57	0,11	-59	8,3	-0,47	0,0092	0,94
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	Συνολικό
ΙΑΝ	5,9	0,03	0,03	2,1	0,3	0,01	0,0003	1,4
ΦΕΒ	5,5	0,03	0,03	1,9	0,3	0,01	0,0003	1,3
ΜΑΡ	4,4	0,02	0,02	1,5	0,2	0,01	0,0002	1,0
ΑΠΡ	4,4	0,02	0,02	1,6	0,2	0,01	0,0002	1,0
ΜΑΙΟΣ	4,5	0,02	0,02	1,6	0,2	0,01	0,0002	1,1
ΙΟΥΝ	3,6	0,02	0,02	1,3	0,2	0,01	0,0002	0,8
ΙΟΥΛ	3,5	0,02	0,02	1,2	0,2	0,01	0,0002	0,8
ΑΥΓ	3,8	0,02	0,02	1,3	0,2	0,01	0,0002	0,9
ΣΕΠΤ	4,4	0,02	0,02	1,5	0,2	0,01	0,0002	1,0
ΟΚΤ	5,0	0,03	0,02	1,8	0,2	0,01	0,0003	1,2
ΝΟΕΜ	5,7	0,03	0,03	2,0	0,3	0,01	0,0003	1,3
ΔΕΚ	5,8	0,03	0,03	2,1	0,3	0,01	0,0003	1,4
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	
ΙΑΝ		-0,447	0,010	-43	152	-175	66	
ΦΕΒ		-0,338	0,012	-40	142	-164	62	
ΜΑΡ		-0,241	0,009	-32	119	-139	52	
ΑΠΡ		-0,145	0,058	-22	89	-107	41	
ΜΑΙΟΣ		-0,058	0,037	-18	76	-93	35	
ΙΟΥΝ		-0,008	0,035	-15,8	68,4	-85,0	32,5	
ΙΟΥΛ		-0,005	0,032	-18	74	-91	35	
ΑΥΓ		-0,037	0,012	-22	87	-105	40	
ΣΕΠΤ		-0,128	0,048	-28	107	-127	48	
ΟΚΤ		-0,242	0,034	-37	135	-158	60	
ΝΟΕΜ		-0,390	0,039	-42	149	-173	65	
ΔΕΚ		-0,487	0,039	-43	153	-177	67	

Πίνακας 5.1.3: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της **μέσης ωριαίας** θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,035$ (Φ/Β ελεύθερα εγκατεστημένα με ανεμοπροστασία)

Σταθεροί συντελεστές (συντελεστής Ross, $k=0,035$)								R ²
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	
ΙΑΝ	299	-1,58	-0,02	-95	13,5	-0,76	0,0151	0,96
ΦΕΒ	283	-1,31	0,03	-95	13,7	-0,78	0,0154	0,97
ΜΑΡ	241	-1,07	0,03	-84	12,4	-0,72	0,0142	0,98
ΑΠΡ	171	-0,75	0,27	-65	10,2	-0,60	0,0119	0,99
ΜΑΙΟΣ	139	-0,39	0,20	-56	9,2	-0,55	0,0110	0,99
ΙΟΥΝ	123	-0,14	0,19	-53	8,8	-0,53	0,0107	0,99
ΙΟΥΛ	139	-0,12	0,16	-59	9,6	-0,58	0,0115	0,99
ΑΥΓ	183	-0,28	0,08	-73	11,5	-0,68	0,0135	0,99
ΣΕΠΤ	242	-0,72	0,26	-91	13,7	-0,80	0,0159	0,99
ΟΚΤ	305	-1,16	0,17	-106	15,5	-0,89	0,0176	0,98
ΝΟΕΜ	317	-1,59	0,15	-103	14,8	-0,84	0,0167	0,97
ΔΕΚ	300	-1,68	0,10	-94	13,3	-0,76	0,0150	0,96
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	Συνολικό
ΙΑΝ	6,7	0,04	0,03	2,4	0,3	0,02	0,0003	1,58
ΦΕΒ	6,5	0,03	0,03	2,3	0,3	0,02	0,0003	1,54
ΜΑΡ	5,3	0,03	0,02	1,9	0,2	0,01	0,0003	1,24
ΑΠΡ	5,5	0,03	0,03	1,9	0,3	0,01	0,0003	1,29
ΜΑΙΟΣ	5,8	0,03	0,03	2,1	0,3	0,01	0,0003	1,38
ΙΟΥΝ	4,9	0,03	0,02	1,7	0,2	0,01	0,0002	1,14
ΙΟΥΛ	4,7	0,03	0,02	1,7	0,2	0,01	0,0002	1,11
ΑΥΓ	4,7	0,03	0,02	1,7	0,2	0,01	0,0002	1,12
ΣΕΠΤ	5,3	0,03	0,02	1,9	0,2	0,01	0,0003	1,24
ΟΚΤ	6,3	0,03	0,03	2,2	0,3	0,02	0,0003	1,48
ΝΟΕΜ	6,5	0,03	0,03	2,3	0,3	0,02	0,0003	1,53
ΔΕΚ	6,4	0,03	0,03	2,2	0,3	0,02	0,0003	1,50
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	
ΙΑΝ		-0,335	-0,005	-47,6	169,9	-196,9	74,6	
ΦΕΒ		-0,250	0,006	-42,7	154,7	-180,4	68,4	
ΜΑΡ		-0,183	0,007	-34,0	127,2	-150,2	57,0	
ΑΠΡ		-0,118	0,048	-24,2	95,7	-115,5	44,1	
ΜΑΙΟΣ		-0,059	0,034	-20,2	82,9	-101,6	38,9	
ΙΟΥΝ		-0,021	0,031	-18,1	76,5	-94,6	36,3	
ΙΟΥΛ		-0,017	0,026	-19,6	81,0	-99,4	38,0	
ΑΥΓ		-0,039	0,013	-23,2	92,8	-112,4	42,9	
ΣΕΠΤ		-0,101	0,041	-29,8	114,2	-136,3	52,0	
ΟΚΤ		-0,183	0,030	-39,3	144,8	-170,2	64,8	
ΝΟΕΜ		-0,296	0,032	-45,4	163,8	-191,1	72,7	
ΔΕΚ		-0,368	0,024	-48,5	173,1	-201,1	76,4	

Πίνακας 5.1.4: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για τον υπολογισμό της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β για κάθε μήνα, για τις Ελληνικές περιοχές. Ισχύει για συντελεστή Ross, $k=0,055$ (Φ/Β ενσωματωμένα σε επιφάνειες, π.χ. κεκλιμένη στέγη)

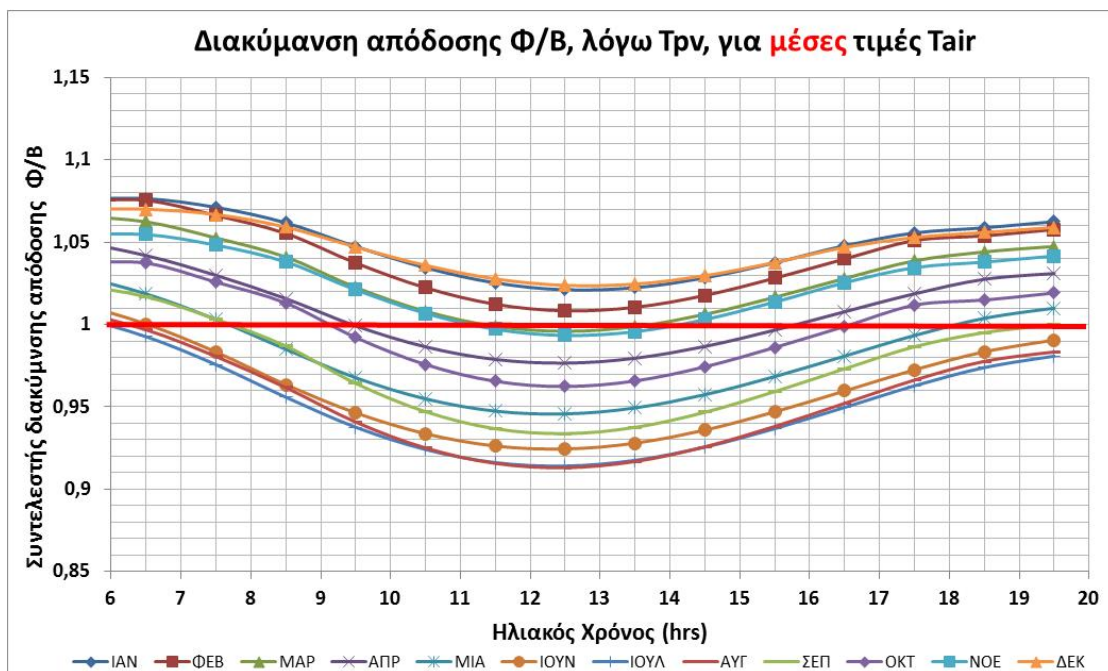
Σταθεροί συντελεστές (συντελεστής Ross, $k=0,055$)								R ²
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	
ΙΑΝ	418	-1,71	-0,08	-142	20,1	-1,15	0,0227	0,97
ΦΕΒ	400	-1,45	0,01	-142	20,5	-1,18	0,0233	0,98
ΜΑΡ	345	-1,25	0,04	-126	18,7	-1,09	0,0216	0,99
ΑΠΡ	251	-0,95	0,34	-99	15,5	-0,92	0,0182	0,99
ΜΑΙΟΣ	211	-0,58	0,28	-88	14,2	-0,85	0,0170	0,99
ΙΟΥΝ	191	-0,29	0,25	-84	13,8	-0,83	0,0166	0,99
ΙΟΥΛ	212	-0,25	0,21	-91	14,9	-0,89	0,0178	0,99
ΑΥΓ	270	-0,43	0,12	-111	17,5	-1,04	0,0207	0,99
ΣΕΠΤ	353	-0,90	0,33	-138	20,9	-1,22	0,0243	0,99
ΟΚΤ	438	-1,35	0,23	-160	23,4	-1,35	0,0268	0,99
ΝΟΕΜ	448	-1,80	0,18	-155	22,2	-1,27	0,0253	0,98
ΔΕΚ	418	-1,83	0,08	-141	20,0	-1,14	0,0226	0,98
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x0	x1	x2	x3	x4	x5	x6	Συνολικό
ΙΑΝ	8,2	0,04	0,04	2,9	0,4	0,02	0,0004	1,92
ΦΕΒ	8,1	0,04	0,04	2,9	0,4	0,02	0,0004	1,92
ΜΑΡ	6,7	0,04	0,03	2,4	0,3	0,02	0,0003	1,59
ΑΠΡ	7,1	0,04	0,03	2,5	0,3	0,02	0,0004	1,68
ΜΑΙΟΣ	7,8	0,04	0,04	2,8	0,4	0,02	0,0004	1,85
ΙΟΥΝ	6,7	0,04	0,03	2,4	0,3	0,02	0,0003	1,58
ΙΟΥΛ	6,6	0,03	0,03	2,3	0,3	0,02	0,0003	1,55
ΑΥΓ	6,2	0,03	0,03	2,2	0,3	0,02	0,0003	1,47
ΣΕΠΤ	6,7	0,04	0,03	2,4	0,3	0,02	0,0003	1,57
ΟΚΤ	8,2	0,04	0,04	2,9	0,4	0,02	0,0004	1,94
ΝΟΕΜ	7,9	0,04	0,04	2,8	0,4	0,02	0,0004	1,86
ΔΕΚ	7,3	0,04	0,03	2,6	0,3	0,02	0,0004	1,73
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών								
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	
ΙΑΝ		-0,255	-0,014	-49,7	178,4	-207,9	79,2	
ΦΕΒ		-0,191	0,002	-44,1	160,5	-188,1	71,7	
ΜΑΡ		-0,147	0,005	-35,0	131,2	-155,5	59,3	
ΑΠΡ		-0,102	0,042	-25,1	99,0	-119,8	45,8	
ΜΑΙΟΣ		-0,059	0,033	-21,3	86,8	-106,3	40,8	
ΙΟΥΝ		-0,029	0,028	-19,4	80,9	-99,7	38,3	
ΙΟΥΛ		-0,024	0,022	-20,7	84,8	-104,0	39,9	
ΑΥΓ		-0,039	0,013	-24,1	95,9	-116,3	44,5	
ΣΕΠΤ		-0,085	0,036	-30,8	117,9	-141,0	53,9	
ΟΚΤ		-0,146	0,028	-40,6	149,8	-176,6	67,5	
ΝΟΕΜ		-0,234	0,027	-47,2	171,0	-200,2	76,5	
ΔΕΚ		-0,282	0,014	-51,1	183,1	-213,6	81,5	

Η Εξίσωση 5.1.3 υπολογίζει τη μέση ωριαία θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L) και την τοπική ώρα (T_i) της ημέρας, για κάθε τυπική ημέρα ανά μήνα. Στους πίνακες 5.1.2, 5.1.3 και 5.1.4 δίνονται οι τιμές για τους σταθερούς συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.3, για συντελεστές Ross, 0,02, 0,035 και 0,055 αντίστοιχα.

Βάσει της θερμοκρασίας του Φ/Β και ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης του, δηλαδή για συγκεκριμένο συντελεστή Ross (πίνακες 5.1.2, 5.1.3 και 5.1.4), μπορεί να εκτιμηθεί και η μέση ωριαία ποσοστιαία διακύμανση του ονομαστικού βαθμού ενεργειακής απόδοσης (η_{ref}) των Φ/Β ανάλογα με τον συντελεστή θερμοκρασίας (β_{ref}), όπου συνήθως για κρυσταλλικά Φ/Β κυμαίνεται μεταξύ 0,0035 έως 0,006. Η μέση ωριαία διακύμανση (%) υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση για θερμοκρασία Φ/Β όπως προκύπτει από την Εξίσωση 5.1.3:

$$\Delta\eta_{pv, T_{pv}} = 1 - (T_{ref} - T_{pv}) \cdot \beta_{ref} \quad (5.1.4)$$

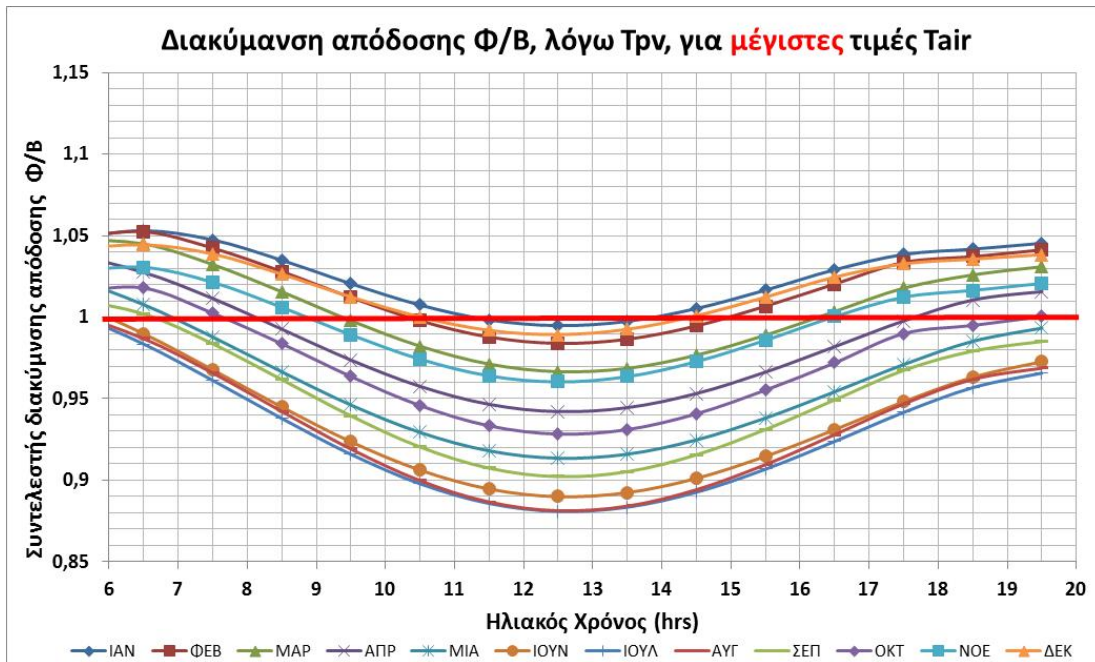
Στο Σχήμα 5.1.8 απεικονίζεται η εκτιμώμενη μέση ωριαία διακύμανση (για κάθε μήνα) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β. Η θερμοκρασία του Φ/Β υπολογίστηκε για μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρα, μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, συντελεστή θερμοκρασίας $\beta_{ref} = 0,0045$ και τοποθετημένο ελεύθερα ($k=0,02$), για την περιοχή της Αθήνας. Τους χειμερινούς μήνες, όπου η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλή, φαίνεται η θετική επίδραση που έχει στην ενεργειακή απόδοση του Φ/Β. Η διακύμανση του βαθμού απόδοσης δεν περιλαμβάνει την επίδραση από άλλες παραμέτρους όπως η διαπερατότητα – απορροφητικότητα των Φ/Β που εξετάζεται στη συνέχεια.



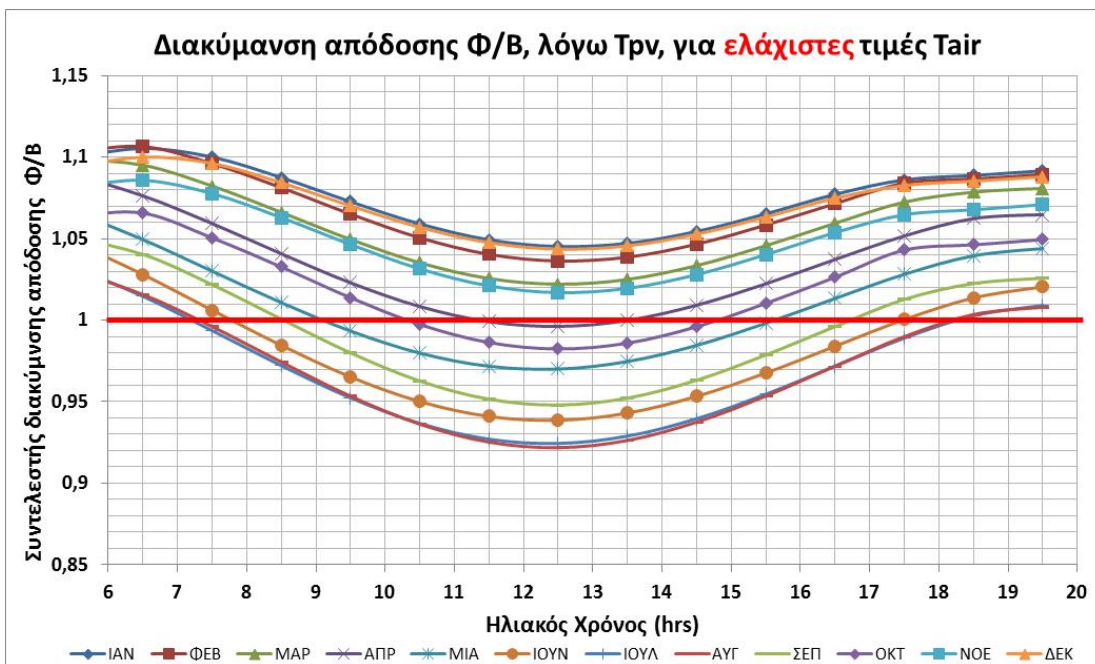
Σχήμα 5.1.8: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/Β, λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β, για μέσες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$)

Στα Σχήματα 5.1.9 και 5.1.10 απεικονίζεται η εκτιμώμενη μέση ωριαία διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β λόγω της θερμοκρασίας, υπολογισμένη με τις ίδιες παραμέτρους, αλλά για μέγιστες και ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα αντίστοιχα. Για ίδιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά χαμηλές θερμοκρασίες αέρα (Σχήμα 5.1.10), τους αντίστοιχους μήνες, είναι προφανής η αύξηση του συντελεστή διακύμανσης απόδοσης, όπου εμφανίζεται μεγαλύτερο ποσοστό τιμών πάνω από τη μονάδα (αύξηση της ενεργειακής

απόδοσης). Αντίστοιχα για τις μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας (Σχήμα 5.1.9), το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης τιμών είναι μικρότερες της μονάδας.



Σχήμα 5.1.9: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/Β, λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β, για μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$)



Σχήμα 5.1.10: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/Β, λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β, για ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$)

Στον Πίνακα 5.1.5 δίνεται η μέση μηνιαία και η μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση του ονομαστικού βαθμού ενεργειακής απόδοσης (η_{ref} %) κρυσταλλικών Φ/Β, από την επίδραση της θερμοκρασίας των Φ/Β. Οι μηνιαίες τιμές είναι οι μέσες σταθμισμένες τιμές διακύμανσης όπως προέκυψαν από τις αντίστοιχες ωριαίες (Εξίσωση 5.1.4) και αφορούν διαφορετικούς συντελεστές θερμοκρασίας Φ/Β (β_{ref}), σταθερό συντελεστή Ross, $k=0,020$ (Πίνακας 2.2.3) και μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας αέρα και ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 5.1.5: Ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (η_{ref}) του Φ/Β, σε επτά Ελληνικές περιοχές για συντελεστή Ross $k=0,02$, λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β

Συντελεστής θερμοκρασίας (β_{ref})	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μ.Ο.
Αθήνα ($\varphi=37,90$ °C) ($\beta=29^\circ$)													
-0,0035	2,0	1,5	0,4	-1,4	-3,6	-5,8	-6,9	-6,9	-5,0	-2,8	-0,3	1,7	-3,1
-0,0040	2,3	1,7	0,4	-1,6	-4,1	-6,6	-7,9	-7,9	-5,7	-3,2	-0,3	2,0	-3,5
-0,0045	2,6	1,9	0,5	-1,8	-4,7	-7,4	-8,8	-8,9	-6,5	-3,6	-0,3	2,2	-4,0
-0,0050	2,9	2,1	0,5	-2,0	-5,2	-8,3	-9,8	-9,9	-7,2	-4,0	-0,4	2,5	-4,4
-0,0055	3,2	2,3	0,6	-2,2	-5,7	-9,1	-10,8	-10,9	-7,9	-4,4	-0,4	2,7	-4,9
-0,0060	3,5	2,5	0,7	-2,5	-6,2	-9,9	-11,8	-11,9	-8,6	-4,8	-0,4	3,0	-5,3
Θεσσαλονίκη ($\varphi=40,52$ °C) ($\beta=30^\circ$)													
-0,0035	4,2	3,4	2,0	-0,1	-2,4	-4,6	-5,4	-5,3	-3,2	-0,7	1,9	3,9	-1,6
-0,0040	4,8	3,9	2,3	-0,1	-2,8	-5,2	-6,2	-6,0	-3,7	-0,9	2,1	4,4	-1,8
-0,0045	5,4	4,4	2,6	-0,1	-3,1	-5,9	-7,0	-6,8	-4,1	-1,0	2,4	5,0	-2,0
-0,0050	6,0	4,9	2,9	-0,1	-3,5	-6,5	-7,8	-7,5	-4,6	-1,1	2,7	5,6	-2,2
-0,0055	6,5	5,3	3,1	-0,1	-3,8	-7,2	-8,6	-8,3	-5,1	-1,2	2,9	6,1	-2,4
-0,0060	7,1	5,8	3,4	-0,2	-4,1	-7,8	-9,3	-9,0	-5,5	-1,3	3,2	6,7	-2,7
Ιωάννινα ($\varphi=39,70$ °C) ($\beta=29^\circ$)													
-0,0035	4,8	3,9	2,3	0,7	-1,9	-4,1	-5,1	-4,9	-2,5	-0,4	2,6	4,6	-1,1
-0,0040	5,5	4,5	2,6	0,8	-2,1	-4,7	-5,8	-5,7	-2,9	-0,5	2,9	5,3	-1,3
-0,0045	6,2	5,1	3,0	0,9	-2,4	-5,2	-6,6	-6,4	-3,2	-0,5	3,3	5,9	-1,4
-0,0050	6,9	5,6	3,3	1,0	-2,7	-5,8	-7,3	-7,1	-3,6	-0,6	3,7	6,6	-1,6
-0,0055	7,6	6,2	3,6	1,1	-2,9	-6,4	-8,0	-7,8	-3,9	-0,6	4,0	7,2	-1,7
-0,0060	8,3	6,7	3,9	1,2	-3,2	-7,0	-8,8	-8,5	-4,3	-0,7	4,4	7,9	-1,9
Ηράκλειο ($\varphi=35,33$ °C) ($\beta=26^\circ$)													
-0,0035	1,6	1,1	0,0	-1,7	-3,4	-5,0	-5,8	-5,8	-4,7	-2,9	-0,8	1,0	-2,9
-0,0040	1,8	1,3	0,1	-1,9	-3,9	-5,8	-6,6	-6,6	-5,3	-3,4	-1,0	1,2	-3,3
-0,0045	2,0	1,4	0,1	-2,2	-4,4	-6,5	-7,5	-7,5	-6,0	-3,8	-1,1	1,3	-3,8
-0,0050	2,2	1,6	0,1	-2,4	-4,8	-7,2	-8,3	-8,3	-6,7	-4,2	-1,2	1,5	-4,2
-0,0055	2,4	1,7	0,1	-2,7	-5,3	-7,9	-9,1	-9,1	-7,3	-4,6	-1,3	1,6	-4,6
-0,0060	2,7	1,9	0,1	-2,9	-5,8	-8,6	-10,0	-9,9	-8,0	-5,0	-1,4	1,8	-5,0
Μυτιλήνη ($\varphi=39,07$ °C) ($\beta=29^\circ$)													
-0,0035	2,9	2,3	0,9	-1,2	-3,5	-5,3	-6,0	-5,9	-4,4	-2,3	0,4	2,3	-2,6
-0,0040	3,4	2,6	1,0	-1,4	-4,0	-6,0	-6,9	-6,8	-5,0	-2,6	0,4	2,6	-3,0
-0,0045	3,8	3,0	1,2	-1,6	-4,5	-6,8	-7,8	-7,6	-5,7	-2,9	0,5	3,0	-3,4
-0,0050	4,2	3,3	1,3	-1,7	-5,0	-7,5	-8,6	-8,5	-6,3	-3,2	0,5	3,3	-3,8
-0,0055	4,6	3,6	1,4	-1,9	-5,5	-8,3	-9,5	-9,3	-6,9	-3,5	0,6	3,6	-4,2
-0,0060	5,0	4,0	1,6	-2,1	-6,0	-9,1	-10,4	-10,1	-7,6	-3,9	0,6	4,0	-4,5
Καλαμάτα ($\varphi=37,07$ °C) ($\beta=28^\circ$)													
-0,0035	2,0	1,5	0,3	-1,1	-3,2	-5,2	-5,9	-6,0	-4,5	-2,7	-0,2	1,8	-2,6
-0,0040	2,3	1,7	0,3	-1,2	-3,7	-5,9	-6,8	-6,8	-5,1	-3,1	-0,2	2,1	-3,0
-0,0045	2,6	1,9	0,4	-1,4	-4,1	-6,6	-7,6	-7,7	-5,7	-3,5	-0,2	2,3	-3,4
-0,0050	2,9	2,2	0,4	-1,6	-4,6	-7,4	-8,5	-8,5	-6,4	-3,9	-0,2	2,6	-3,7
-0,0055	3,2	2,4	0,4	-1,7	-5,0	-8,1	-9,3	-9,4	-7,0	-4,2	-0,3	2,9	-4,1
-0,0060	3,5	2,6	0,5	-1,9	-5,5	-8,8	-10,2	-10,2	-7,6	-4,6	-0,3	3,1	-4,5

Ρόδος ($\varphi=36,40\text{ }^{\circ}\text{C}$) ($\beta=28^{\circ}$)													
-0,0035	0,9	0,5	-0,7	-2,0	-3,7	-5,4	-6,2	-6,3	-5,3	-3,8	-1,4	0,6	-3,3
-0,0040	1,0	0,5	-0,8	-2,3	-4,2	-6,1	-7,0	-7,2	-6,1	-4,3	-1,6	0,6	-3,8
-0,0045	1,2	0,6	-0,9	-2,6	-4,8	-6,9	-7,9	-8,1	-6,9	-4,8	-1,9	0,7	-4,2
-0,0050	1,3	0,7	-1,0	-2,9	-5,3	-7,6	-8,8	-9,0	-7,6	-5,4	-2,1	0,8	-4,7
-0,0055	1,4	0,7	-1,2	-3,2	-5,8	-8,4	-9,7	-9,9	-8,4	-5,9	-2,3	0,9	-5,2
-0,0060	1,6	0,8	-1,3	-3,4	-6,4	-9,2	-10,6	-10,8	-9,2	-6,4	-2,5	1,0	-5,7

Πίνακας 5.1.6: Συντελεστές Εξίσωσης 5.1.5 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β

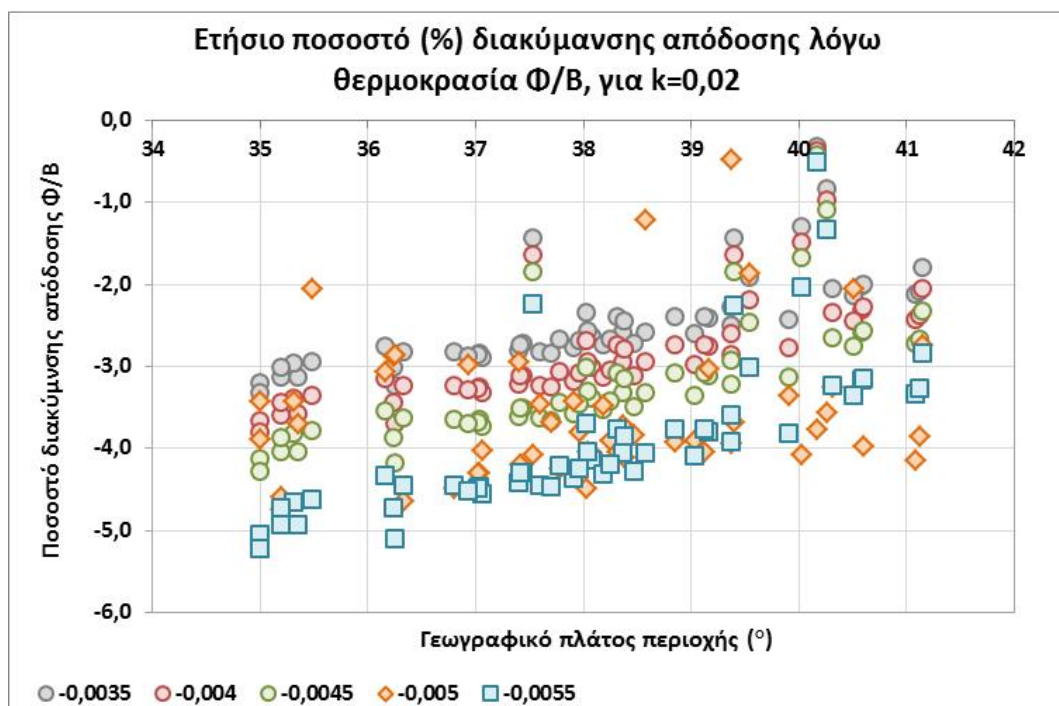
Συντελεστής θερμοκρασίας (β_{ref})	Σταθεροί συντελεστές				Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA)			R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁	x ₂	x ₃	
Συντελεστής Ross, k=0,02								
-0,0035	-10,7	0,21	0,00	0,0022	0,63	-0,02	0,64	0,96
-0,0040	-12,2	0,24	-0,01	0,0025	0,63	-0,02	0,64	0,96
-0,0045	-13,7	0,27	-0,01	0,0028	0,63	-0,02	0,64	0,96
-0,0050	-15,2	0,30	-0,01	0,0031	0,63	-0,02	0,64	0,96
-0,0055	-16,7	0,33	-0,01	0,0035	0,63	-0,02	0,64	0,96
Συντελεστής Ross, k=0,055								
-0,0035	-22,8	0,36	-0,03	0,0029	0,67	-0,06	0,53	0,90
-0,0040	-26,0	0,41	-0,03	0,0033	0,67	-0,06	0,53	0,90
-0,0045	-29,3	0,46	-0,04	0,0037	0,67	-0,06	0,53	0,90
-0,0050	-32,5	0,51	-0,04	0,0041	0,67	-0,06	0,53	0,90
-0,0055	-35,8	0,56	-0,04	0,0045	0,67	-0,06	0,53	0,90
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	Συνολικό %			
-0,0035	0,5	0,01	0,01	0,0001	0,12	Συντελεστής Ross, k=0,02		
-0,0040	0,6	0,01	0,01	0,0001	0,14			
-0,0045	0,7	0,01	0,01	0,0001	0,16			
-0,0050	0,7	0,01	0,01	0,0001	0,18			
-0,0055	0,8	0,02	0,01	0,0002	0,19			
-0,0035	1,2	0,03	0,02	0,0003	0,30	Συντελεστής Ross, k=0,055		
-0,0040	1,4	0,03	0,03	0,0003	0,34			
-0,0045	1,6	0,03	0,03	0,0003	0,38			
-0,0050	1,8	0,04	0,03	0,0004	0,43			
-0,0055	1,9	0,04	0,04	0,0004	0,47			

Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας (annual) διακύμανσης (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β n_{ref} , λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη Εξίσωση, η οποία έχει ως ανεξάρτητες μεταβλητές το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο της περιοχής (A , m).

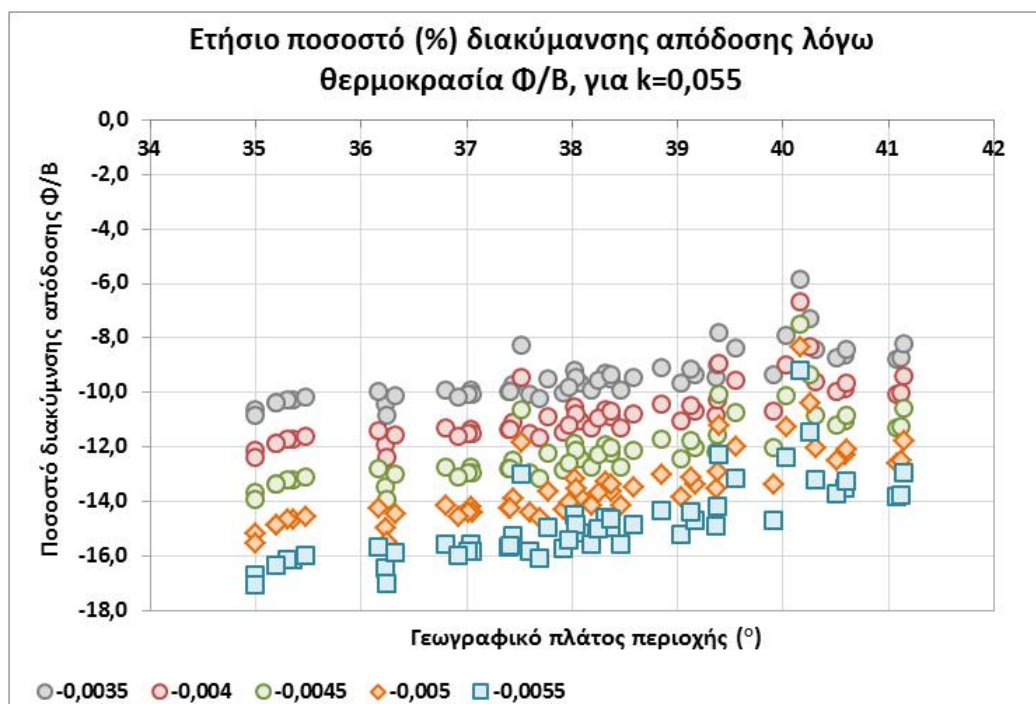
$$\Delta n_{pv, Trp, annual} = x_0 + x_1 \cdot \varphi + x_2 \cdot L + x_3 \cdot A \quad (5.1.5)$$

Οι μέσες σταθμισμένες ετήσιες τιμές της διακύμανσης της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β, που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της Εξίσωσης 5.1.5, προέκυψαν από ωριαία ανάλυση

των μέσων τιμών των κλιματικών δεδομένων (μέση ωριαία θερμοκρασία αέρα και ηλιακή ακτινοβολία), για τον υπολογισμό του ωριαίου ποσοστού διακύμανσης της απόδοσης των Φ/Β. Στον Πίνακα 5.1.6 δίνονται οι σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.1.5 για συγκεκριμένους συντελεστές θερμοκρασίας (β_{ref}) των Φ/Β και για δύο τιμές του συντελεστή Ross, 0,02 και 0,055.



Σχήμα 5.1.11: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β, για συντελεστή Ross, $k=0,02$

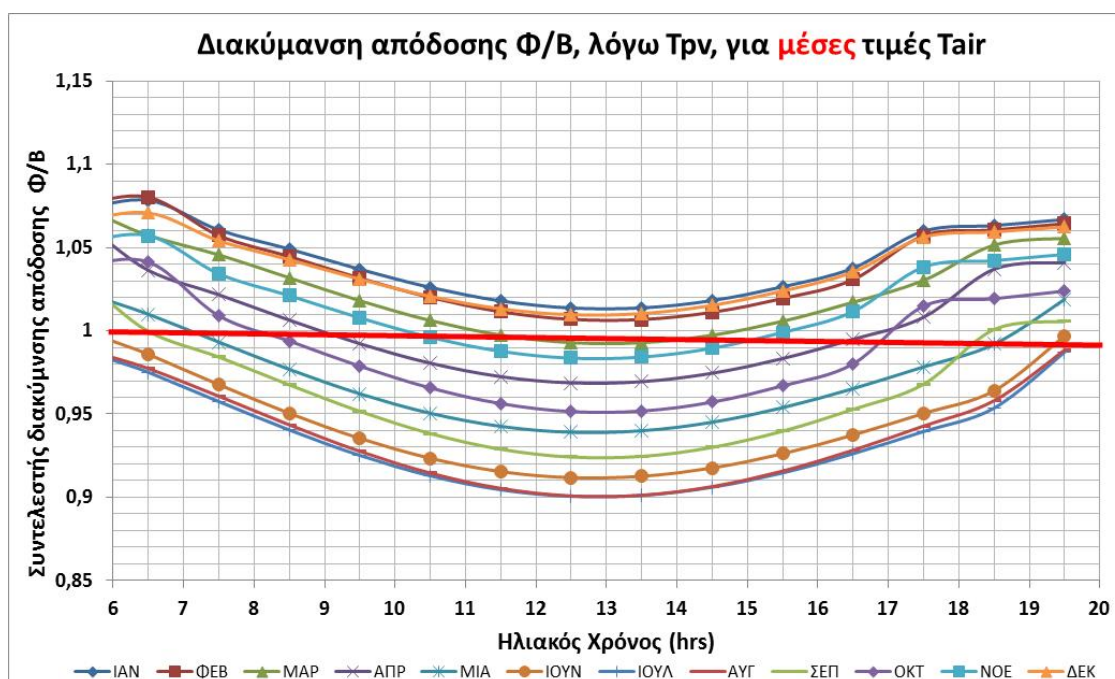


Σχήμα 5.1.12: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/Β, για συντελεστή Ross, $k=0,055$

Στο Σχήμα 5.1.11 απεικονίζεται το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/B , για το σύνολο των ελληνικών περιοχών, τιμές από τις οποίες προέκυψε η αναλυτική Εξίσωση 5.1.4. Τα ποσοστά υπολογίστηκαν για μέσες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα για τις Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (φ), για συντελεστές θερμοκρασίας $\beta_{ref}=0,0035$ έως $0,0055$, και συντελεστή Ross, $k=0,02$. Στο Σχήμα 5.1.12 απεικονίζονται τα αντίστοιχα ποσοστά για συντελεστή Ross, $k=0,055$. Είναι προφανές ότι για Φ/B ενσωματωμένα σε επιφάνειες ($k=0,055$), το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης του Φ/B (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας του Φ/B , αυξάνεται σημαντικά (Σχήμα 5.1.12).

Στην περίπτωση Φ/B τοποθετημένα σε περιστρεφόμενη βάση παρακολούθησης του ήλιου (μονού ή διπλού άξονα), η θερμοκρασία του Φ/B παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα Φ/B σταθερής κλίσης και προσανατολισμού, κυρίως τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περιστρεφόμενα Φ/B δέχονται μεγαλύτερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας τις πρωινές και απογευματινές ώρες σε σχέση με τα σταθερή κλίσης.

Στο Σχήμα 5.1.13 απεικονίζεται ο συντελεστής διακύμανσης της απόδοσης (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας του Φ/B , για τοποθέτηση πάνω σε περιστρεφόμενη βάση δύο αξόνων, δηλαδή για γωνία κλίση $\beta=\text{acos}(\theta_z)$. Η θερμοκρασία του Φ/B (T_{pv}) υπολογίστηκε για μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρα, μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, συντελεστή θερμοκρασίας $\beta_{ref} = 0,0045$ και τοποθετημένο ελεύθερα ($k=0,02$), για την περιοχή της Αθήνας.



Σχήμα 5.1.13: Συντελεστής ωριαίας διακύμανσης απόδοσης Φ/B με περιστρεφόμενη βάση, λόγω της θερμοκρασίας Φ/B , για μέσες τιμές θερμοκρασίας αέρα, για την Αθήνα, ($k=0,02$ και $\beta_{ref}=0,0043$)

5.2. ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β

Τα Φ/Β εγκαθίστανται συνήθως με νότιο προσανατολισμό και σταθερή κλίση και στην περίπτωση αυτή, το μεγάλο πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν φέρουν κινητά μέρη. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμος ελεύθερος χώρος, τα Φ/Β μπορούν να εγκατασταθούν σε κινητές βάσεις περιστροφής με συνεχή μεταβολή της γωνίας κλίσης (β) ή και του προσανατολισμού (γ). Σε κάθε περίπτωση η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα Φ/Β εξασφαλίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

5.2.1. Θέση Επιφάνειας Φ/Β και Ενεργειακή Απόδοση

Η κλίση και ο προσανατολισμός που τοποθετείται ένα Φ/Β διαφοροποιεί τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια της ημέρας. Η γωνία κλίσης (β) των Φ/Β είναι συνήθως σταθερή και επιλέγεται για βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ετήσια βάση (Σχήμα 3.2.6). Αν η χρήση των Φ/Β είναι εποχική (π.χ. κτίριο ξενοδοχείου) τότε η βέλτιστη κλίση υπολογίζεται για την περίοδο λειτουργίας τους. Η διακύμανση της γωνίας πρόσπτωσης (θ) διαφοροποιεί και το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά το γυάλινο κάλυμμα και φτάνει τελικά στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β.

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 2.2.6, 2.2.7, 2.2.12 και 2.2.13 υπολογίστηκε η διακύμανση του συντελεστή διαπερατότητας-απορροφητικότητας και η επίδραση (ποσοστιαία μείωση) στον ονομαστικό βαθμός απόδοσης των Φ/Β (η_{ref}), σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης (θ). Οι υπολογισμοί έγιναν για μέσες ωριαίες τιμές:

α) της γωνίας πρόσπτωσης (θ), Εξίσωση 4.3.1 και του συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$, Εξίσωση 2.2.6,

β) της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια Φ/Β, σύμφωνα με την αναλυτική Εξίσωση 3.2.2.,

καθώς και για τοποθέτηση των Φ/Β στη βέλτιστη κλίση (β) ανάλογα με την περιοχή (βέλτιστη αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας) και για νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0$)

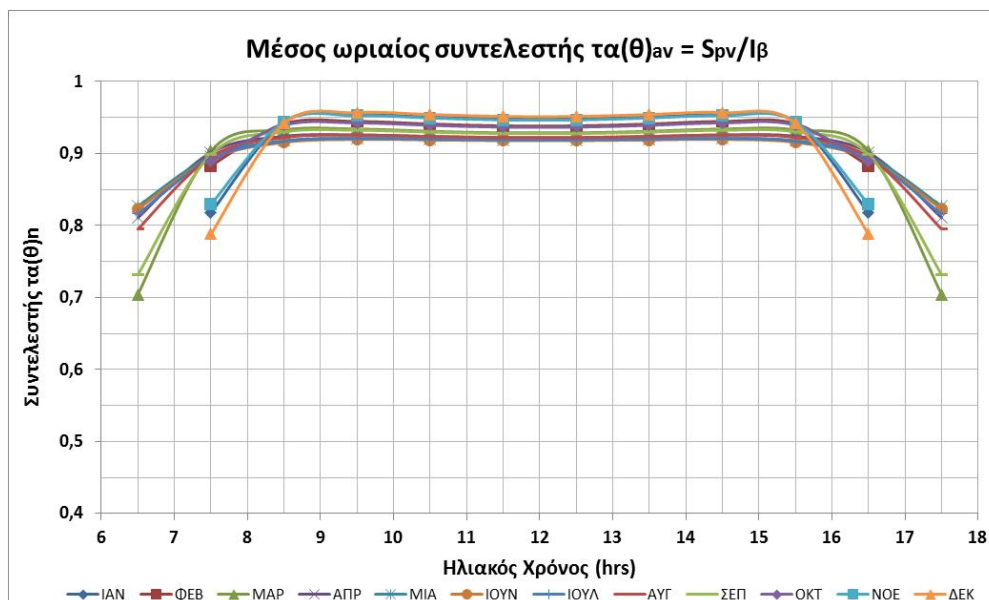
Ο συντελεστής διακύμανσης της ονομαστικής απόδοσης του Φ/Β (η_{ref}) λόγω της γωνίας πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη μέση τιμή του γινομένου $\tau_a(\theta)_{av}$ της γυάλινης επιφάνειας του Φ/Β (Εξίσωση 2.2.13), $S_{pv} = G_T \cdot \tau_a(\theta)_{av}$ ή $S_{pv} = I_\beta \cdot \tau_a(\theta)_{av}$.

Στο Σχήμα 5.2.1 απεικονίζεται ο μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί ταυτόχρονα και στον συντελεστή της ωριαίας διακύμανσης (για κάθε μήνα) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β λόγω της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β (περιοχή Αθήνας). Τι πρωινές και απογευματινές ώρες, όπου η γωνία πρόσπτωσης (θ) λαμβάνει μεγάλες τιμές φαίνεται η αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης του Φ/Β.

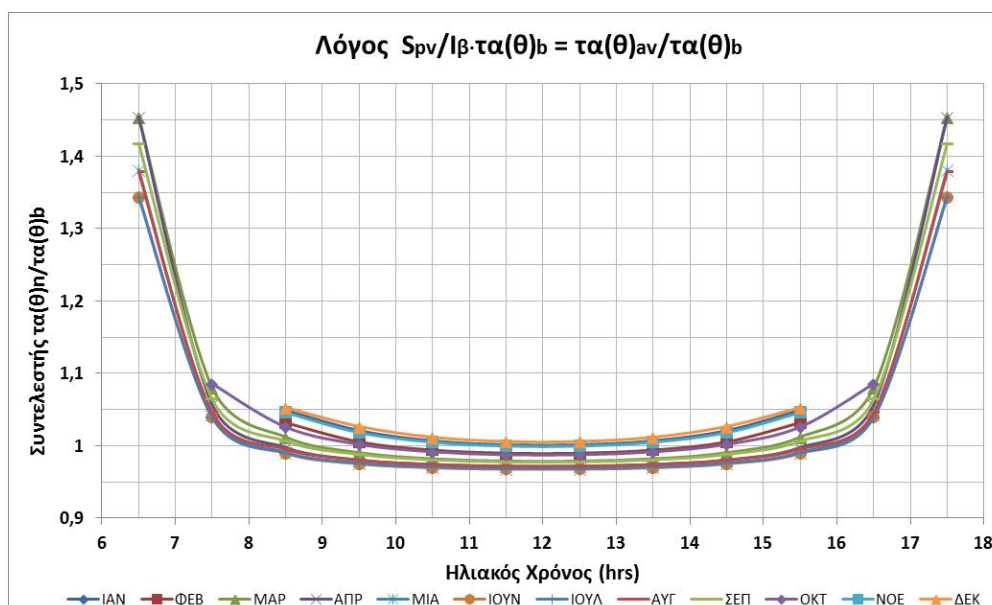
Ο μέσος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$, για δεδομένη χρονική στιγμή, μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 5.1.2, όταν είναι γνωστή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην κεκλιμένη επιφάνεια του Φ/Β. Στη πράξη, λόγω ευκολίας, σε όλες τις εμπειρικές και θεωρητικές σχέσεις, υπολογισμού της απόδοσης Φ/Β, χρησιμοποιείται το γινόμενο του συντελεστή $\tau_a(\theta)_b$ (για τη άμεση ηλιακή ακτινοβολία), με την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (I_β) στην κεκλιμένη επιφάνεια. Η απεικόνιση του συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$ λόγω γωνίας πρόσπτωσης, που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.1, είναι σχεδόν παρόμοια και για άλλες Ελληνικές περιοχές, με αμελητέες διαφορές.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει τελικά στην συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β (S_{pv} , Εξίσωση 2.1.14), εξαρτάται και από τα επιμέρους γινόμενα $\tau_a(\theta)$ (Σχέσεις 2.1.6 και 2.1.7), για την άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία. Οι συντελεστές για διάχυτη $\tau_a(\theta)_d$ και ανακλώμενη $\tau_a(\theta)_r$ ηλιακή ακτινοβολία εξαρτώνται μόνο από τη γωνία κλίσης (β) του Φ/Β (ποσοστό θέασης

ουράνιου θόλου) και είναι σταθεροί στην περίπτωση τοποθέτησης του Φ/Β με σταθερή γωνία κλίσης. Για το λόγο αυτό η S_{pv} παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε χρονικές περιόδους όπου το ποσοστό διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας (k_d) είναι υψηλότερο, ενώ παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές, σε σχέση με το γινόμενο $I_{\beta} \cdot \tau(\theta)_b$, κατά τις μεσημεριανές ώρες και συγκεκριμένα για γωνία πρόσπτωσης (θ) μικρότερη από 50° , για συνθήκες αιθριότητας. Για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης η S_{pv} λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές από το γινόμενο $I_{\beta} \cdot \tau(\theta)_b$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2.2 για την περιοχή της Αθήνας.



Σχήμα 5.2.1: Μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί και στη διακύμανση της απόδοσης Φ/Β λόγω της γωνία πρόσπτωσης, για σταθερή γωνία κλίσης ($\beta = \text{constant}$) Φ/Β, για την περιοχή της Αθήνα



Σχήμα 5.2.2: Λόγος $S_{pv}/(I_{\beta} \cdot \tau(\theta)_b)$ για βέλτιστη γωνία κλίσης Φ/Β, για την περιοχή της Αθήνας

Ωστόσο ο μέσος ετήσιος λόγος $S_{pv} / (I_{\beta} \cdot \tau(\theta)_b)$, λαμβάνοντας υπόψη τις μέσες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας εκτιμάται κοντά στη μονάδα, παρ' όλες τις διακυμάνσεις που παρουσιάζει στη διάρκεια της ημέρας στις διάφορες εποχές. Για το λόγο αυτό, κατά τους υπολογισμούς της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά αξιοποιείται από το Φ/Β μπορεί να λαμβάνεται

υπόψη και ο συντελεστής $\tau_a(\theta)_b$ της άμεσης ακτινοβολίας και γενικότερα το γινόμενο $\tau_a(\theta)_b$, ειδικά στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες οι επιμέρους τιμές της διάχυτης (I_d) και ανακλώμενης (I_r) ηλιακής ακτινοβολίας.

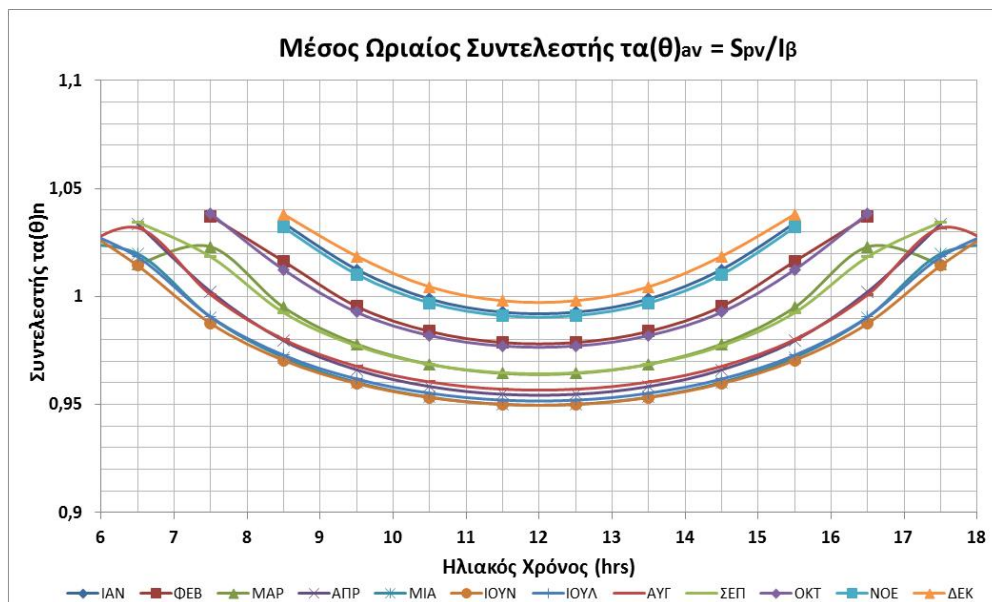
Στο Σχήμα 5.2.3 απεικονίζεται ο μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί ταυτόχρονα και στο συντελεστή της ωριαίας διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης του Φ/Β λόγω της γωνίας πρόσπτωσης (θ), στην περίπτωση μεταβλητής κλίσης ($\beta = \text{acos}(\theta_z)$) δύο αξόνων, για την περιοχή της Αθήνας. Σε αντίθεση με την περίπτωση σταθερής κλίσης Φ/Β, τα μεταβλητής κλίσης Φ/Β αξιοποιούν μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας (τελικό S_{pv}) τις πρωινές και απογευματινές ώρες καθώς:

α) η γωνία κλίσης του Φ/Β (β) τις ώρες αυτές λαμβάνει τις μεγαλύτερες τιμές,

β) ο συντελεστής $\tau_a(\theta)_g$ της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται αισθητά, σε σχέση με τις μεσημεριανές ώρες και λαμβάνει τιμές από 0,85 έως 0,9

γ) ο συντελεστής $\tau_a(\theta)_d$ της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνει υψηλές τιμές που κυμαίνονται από 0,9 έως 0,91 στη διάρκεια όλης της μέρας για όλες τις εποχές και

δ) ο συντελεστής (M) μετατροπής αέριας μάζας (air mass modifier) που χρησιμοποιείται ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας για τον υπολογισμό της τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας S_{pv} (Εξίσωση 2.2.14), λαμβάνει τιμές πάνω από τη μονάδα για τις πρωινές και απογευματινές ώρες που κυμαίνονται από 1,009 έως 1,050, για όλους τους μήνες και για όλες τις Ελληνικές περιοχές.



Σχήμα 5.2.3: Μέσος ωριαίος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ που αντιστοιχεί και στη διακύμανση της απόδοσης Φ/Β λόγω της γωνία πρόσπτωσης, για μεταβλητή γωνία κλίσης ($\beta = \text{acos}(\theta_z)$) Φ/Β (περιοχή Αθήνα)

Επιπλέον, η Εξίσωση 5.2.1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της **μέσης μηνιαίας** (monthly, mo) διακύμανσης (%) της ονομαστικής απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}), λόγω της γωνία πρόσπτωσης (θ), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), το υψόμετρο (A) και τη βέλτιστη κλίση (β) τοποθέτησης του Φ/Β όπως έχει υπολογιστεί ανά περιοχή. Το μηνιαίο ποσοστό μείωσης προκύπτει από τον ωριαίο συντελεστή διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}).

$$\Delta n_{pv,\theta,mo} = x_0 + x_1 \cdot \varphi + x_2 \cdot L - x_3 \cdot A + x_4 \cdot \beta \quad (5.2.1)$$

Οι σταθεροί συντελεστές x_0 , x_1 , x_2 , x_3 , και x_4 της Εξίσωσης 5.2.1 για κάθε μήνα, όπως υπολογίστηκαν από την ανάλυση των δεδομένων δίνονται στον Πίνακα 5.2.1. Η μέση ετήσια μείωση της ονομαστικής απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}), λόγω της γωνία πρόσπτωσης (θ) κυμαίνεται μεταξύ του 7,57% έως 8,00%, με μέση τιμή 7,76%.

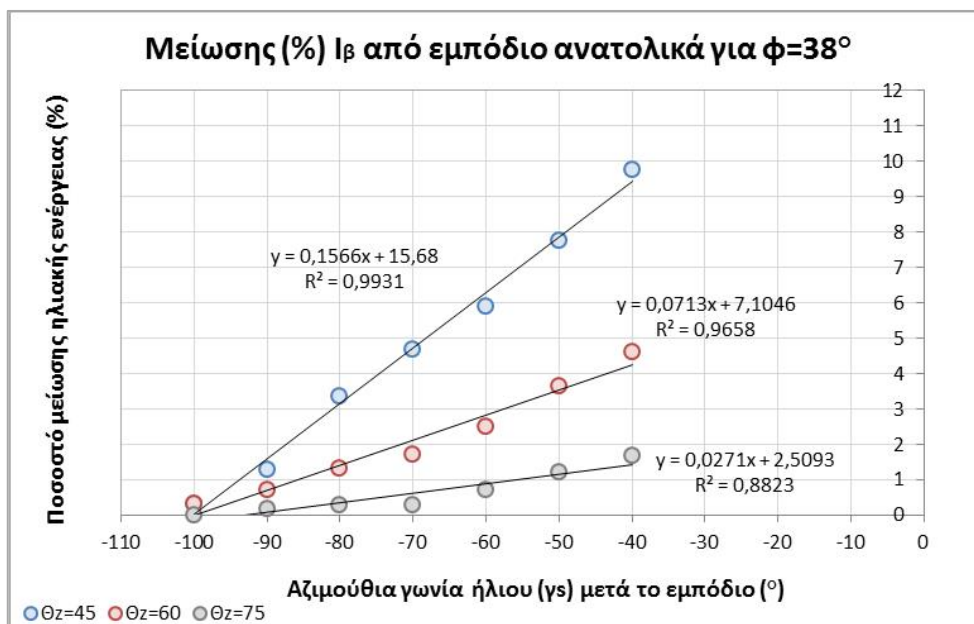
Πίνακας 5.2.1: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.2.1, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαία διακύμανσης (%) του ονομαστικού απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}) λόγω γωνίας πρόσπτωσης (θ)

Σταθεροί συντελεστές						R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	
ΙΑΝ	-10,53	0,062	-0,004	-0,00049	0,089	0,993
ΦΕΒ	-9,92	0,044	-0,002	-0,00056	0,070	0,990
ΜΑΡ	-10,16	0,051	0,001	-0,00050	0,024	0,993
ΑΠΡ	-8,93	0,018	-0,001	-0,00051	0,001	0,929
ΜΑΙΟΣ	-9,67	0,041	0,003	-0,00047	-0,022	0,967
ΙΟΥΝ	-9,68	0,044	0,003	-0,00045	-0,032	0,967
ΙΟΥΛ	-9,70	0,044	0,003	-0,00046	-0,029	0,965
ΑΥΓ	-9,68	0,042	0,002	-0,00048	-0,013	0,974
ΣΕΠΤ	-9,92	0,047	0,002	-0,00049	0,010	0,987
ΟΚΤ	-9,92	0,047	0,002	-0,00049	0,010	0,987
ΝΟΕΜ	-10,08	0,049	0,001	-0,00050	0,084	0,987
ΔΕΚ	-10,08	0,049	0,001	-0,00050	0,084	0,993
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Συνολικό
ΙΑΝ	0,089	0,0034	0,0017	0,000019	0,0038	0,022
ΦΕΒ	0,083	0,0032	0,0016	0,000018	0,0036	0,021
ΜΑΡ	0,057	0,0022	0,0011	0,000012	0,0024	0,022
ΑΠΡ	0,102	0,0040	0,0020	0,000021	0,0043	0,025
ΜΑΙΟΣ	0,068	0,0026	0,0013	0,000014	0,0029	0,017
ΙΟΥΝ	0,070	0,0027	0,0013	0,000015	0,0030	0,017
ΙΟΥΛ	0,068	0,0027	0,0013	0,000014	0,0029	0,017
ΑΥΓ	0,063	0,0025	0,0012	0,000013	0,0027	0,016
ΣΕΠΤ	0,056	0,0022	0,0011	0,000012	0,0024	0,014
ΟΚΤ	0,056	0,0022	0,0011	0,000012	0,0024	0,014
ΝΟΕΜ	0,078	0,0030	0,0015	0,000016	0,0033	0,014
ΔΕΚ	0,078	0,0030	0,0015	0,000016	0,0033	0,019
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών						
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	
ΙΑΝ		0,44	-0,03	-0,34	0,582	
ΦΕΒ		0,40	-0,02	-0,49	0,583	
ΜΑΡ		0,64	0,01	-0,62	0,278	
ΑΠΡ		0,35	-0,02	-0,96	0,013	
ΜΑΙΟΣ		0,81	0,07	-0,91	-0,406	
ΙΟΥΝ		0,90	0,07	-0,90	-0,601	
ΙΟΥΛ		0,90	0,06	-0,90	-0,538	
ΑΥΓ		0,80	0,04	-0,88	-0,231	
ΣΕΠΤ		0,70	0,03	-0,71	0,145	
ΟΚΤ		0,16	0,01	-0,16	0,033	
ΝΟΕΜ		0,39	0,01	-0,39	0,626	
ΔΕΚ		0,10	0,00	-0,10	0,156	

5.2.2. Φυσικά και Τεχνητά Εμπόδια Ηλιασμού

Μια άλλη παράμετρος που περιορίζει τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια σε μια περιοχή είναι τα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, τα οποία μπορεί να περιορίζουν ή να ανακόπτουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθώς και τμήμα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω περιορισμού της γωνίας θέασης του ουράνιου θόλου. Ως φυσικά εμπόδια θεωρούνται οι ορεινοί όγκοι, λόφοι ή και η παράπλευρη φύτευση (δένδρα) στην περιοχή εγκατάστασης των Φ/Β. Αντίστοιχα ως τεχνητά εμπόδια θεωρούνται οι τεχνητές κατασκευές, κτιριακές και άλλες υποδομές, τα οποία μπορεί να σκιάζουν τα Φ/Β στη διάρκεια κάποιων ωρών την ημέρα, καθώς και τα ίδια τα Φ/Β τα οποία πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση ώστε να μην αλληλοσκιάζονται στη διάρκεια της ημέρας και σε όλες τις εποχές.

Κατά το σχεδιασμό μιας Φ/Β εγκατάστασης, ανάλογα με τα φυσικά και τεχνητά εμπόδια που υπάρχουν στην περιοχή πρέπει υπολογίζεται για κάθε ώρα και για κάθε μήνα, η μέγιστη τιμή της ζενιθιακής γωνίας που η επιφάνεια των Φ/Β ξεκινάει να δέχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και η ελάχιστη ανατολικά (-) ή η μέγιστη δυτικά (+) αζιμούθια ηλιακή γωνία (γ_s) που εμφανίζεται το εμπόδιο. Στο Σχήμα 5.2.4 απεικονίζεται το ποσοστό μείωσης της ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (I_β), που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta =$ βέλτιστη), για $\varphi=38^\circ$ στο βόρειο ημισφαίριο, η οποία προκαλείται από φυσικό εμπόδιο (ορεινός όγκος) που βρίσκεται ανατολικά της περιοχής εγκατάστασης του Φ/Β. Το ποσοστό μείωσης εξαρτάται από την ελάχιστη αζιμούθια ηλιακή (γ) και μέγιστη ζενιθιακή γωνία (θ_z) πέρα της οποίας το Φ/Β ξεκινάει να δέχεται άμεσο ηλιασμό. Στην περίπτωση ύπαρξης εμποδίου, πριν τον άμεσο ηλιασμό το Φ/Β δέχεται μόνο διάχυτη.

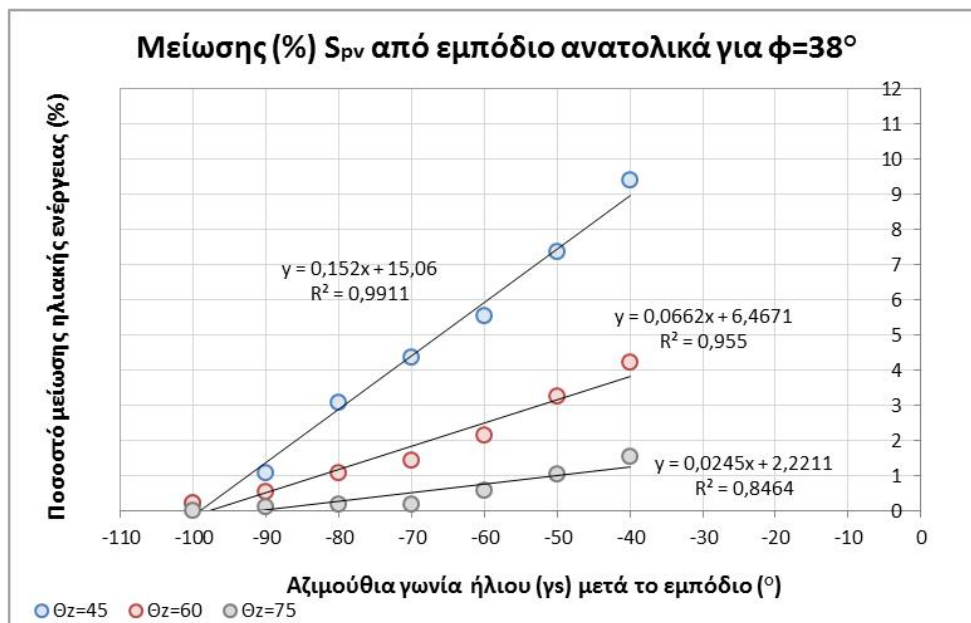


Σχήμα 5.2.4: Ποσοστό μείωσης της ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (I_β) λόγω φυσικού εμποδίου ανατολικά του Φ/Β (β , βέλτιστο για $\gamma=0^\circ$ και $\varphi=38^\circ$)

Αντίστοιχα στο Σχήμα 5.2.5 απεικονίζεται το ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (S_{pv}) που φτάνει στην επιφάνεια του Φ/Β, για κεκλιμένη επιφάνεια ($\beta =$ βέλτιστη), για $\varphi=38^\circ$ στο βόρειο ημισφαίριο, λόγω του ίδιου φυσικού εμποδίου που βρίσκεται ανατολικά της περιοχής εγκατάστασης του Φ/Β, ανάλογα με την ελάχιστη αζιμούθια ηλιακή γωνία (γ) και τη μέγιστη ζενιθιακή γωνία (θ_z) πέρα της οποίας το Φ/Β ξεκινάει να δέχεται άμεσο ηλιασμό.

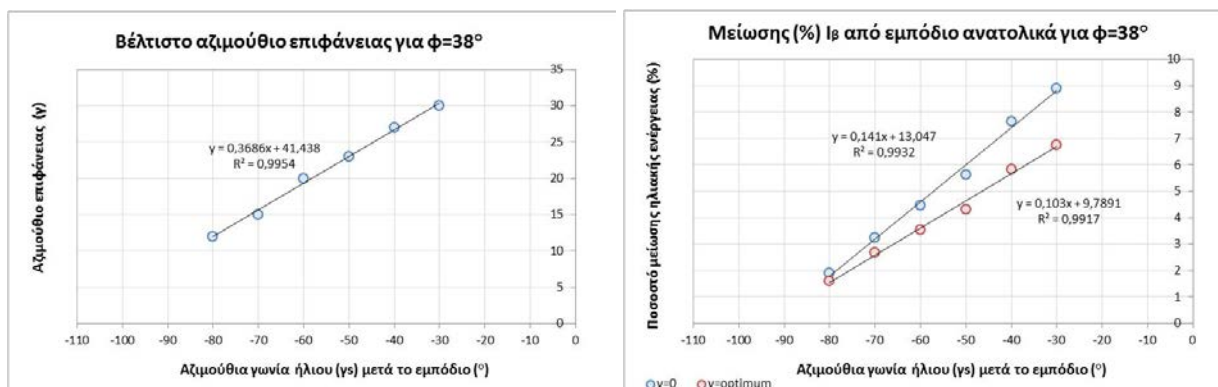
Τα ποσοστά μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (I_β) και (S_{pv}) που αναφέρονται στα Σχήματα 5.2.4 και 5.2.5 μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολύ καλή ακρίβεια και για τα υπόλοιπα

γεωγραφικά πλάτη των ελληνικών περιοχών. Επίσης τα ποσοστά μείωσης αυτά ισχύουν συμμετρικά και για φυσικά εμπόδια που βρίσκονται στη δυτική πλευρά της περιοχής των Φ/Β. Αν υπάρχουν φυσικά εμπόδια ανατολικά και δυτικά το συνολικό ποσοστό μείωσης υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους ποσοστών μείωσης, κατά περίπτωση είδους εμποδίου ανατολικά ή δυτικά της περιοχής του Φ/Β.



Σχήμα 5.2.5: Ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (S_{pv}) στο Φ/Β, λόγω φυσικού εμποδίου ανατολικά του Φ/Β (β , βέλτιστο για $\gamma=0^\circ$ και $\phi=38^\circ$)

Στην περίπτωση φυσικών ή τεχνητών εμποδίων ανατολικά της περιοχής εγκατάστασης των Φ/Β, τα οποία ανακόπτουν τον ηλιασμό και μειώνουν τη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, τα Φ/Β μπορούν να τοποθετηθούν με δυτικό προσανατολισμό ($\gamma+$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της μείωσης. Στο Σχήμα 5.2.6 απεικονίζεται ο βέλτιστος προσανατολισμός τοποθέτησης του Φ/Β (αριστερά) σε συνάρτηση με το αζιμούθιο του ήλιου τη στιγμή που ξεκινά να ηλιάζεται το Φ/Β και για σταθερή ζενιθιακή γωνία $\theta_z=50^\circ$ (υπολογίζεται βάσει του ύψους του εμποδίου). Στο ίδιο Σχήμα (δεξιά) δίνεται το ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην περίπτωση του εν λόγω εμποδίου, για τοποθέτηση του Φ/Β με νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0$) και με βέλτιστο προσανατολισμό ($\gamma=optimum$).

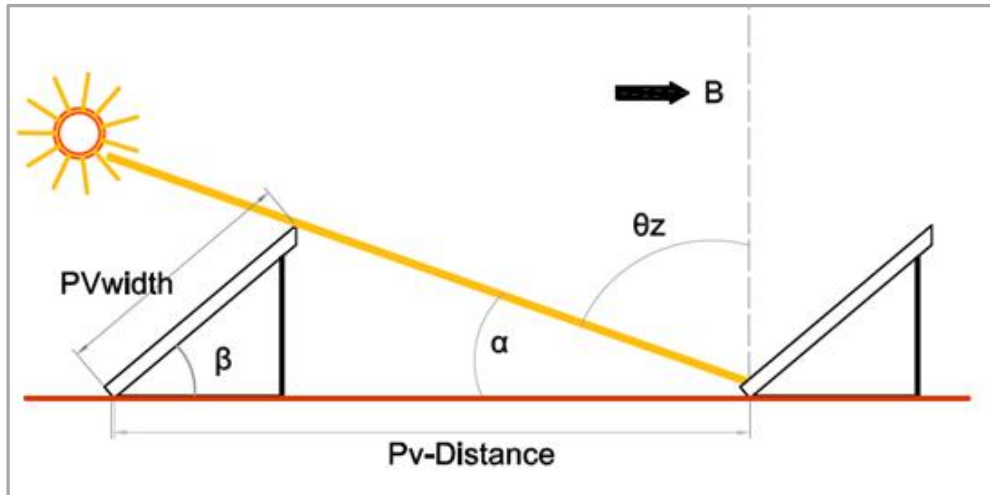


Σχήμα 5.2.6: Βέλτιστη αζιμούθια γωνία Φ/Β (με β = βέλτιστο και $\phi=38^\circ$) για εμπόδιο ανατολικά του Φ/Β (αριστερά) και ποσοστό μείωσης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (I_β), για διαφορετική αζιμούθια γωνία (γ) του εμποδίου και $\theta_z = 50^\circ$

Αλληλοσκίαση Φ/B

Τα Φ/B με σταθερή κλίση πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση για την αποφυγή αλληλοσκίασης μεταξύ τους. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των Φ/B (Σχήμα 5.2.7), το οποία τοποθετούνται σε οριζόντια επιφάνεια εδάφους ή δώμα, υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση, σε συνάρτηση με το πλάτος του Φ/B, τη γωνία κλίσης (β) και τη μέγιστη γωνία πρόπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (θ), η οποία καταγράφεται το μήνα Δεκέμβριο.

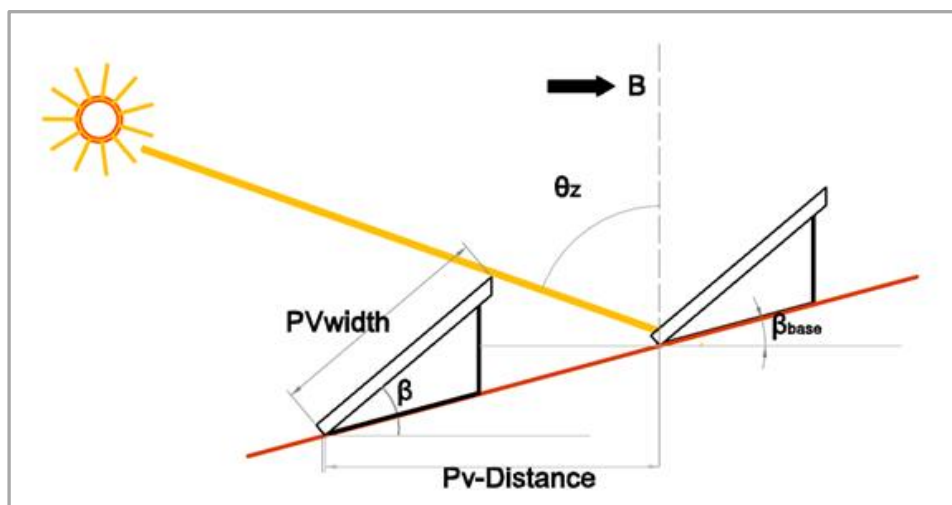
$$Pv\ distance = Pv\ width \cdot \cos(\beta) + Pv\ width \cdot \sin(\beta) \cdot \tan(\theta) \quad (5.2.2)$$



Σχήμα 5.2.7: Τοποθέτηση Φ/B σε απόσταση

Αντίστοιχα για Φ/B τοποθετημένα σε έδαφος ή σε στέγη με σταθερή κλίση (β_{base}), η ελαχίστη απόσταση μεταξύ Φ/B (Σχήμα 5.2.8) για την αποφυγή αλληλοσκίασης υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση, σε συνάρτηση του πλάτους του Φ/B, της γωνίας κλίσης (β) ως προς το οριζόντιο επίπεδο, της μέγιστης γωνίας πρόπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας (θ) και της γωνίας κλίσης της επιφάνειας (έδαφος ή στέγη) τοποθέτησης (β_{base}).

$$Pv\ distance = \frac{Pv\ width \cdot \cos(\beta) + Pv\ width \cdot \sin(\beta) \cdot \tan(\theta_z)}{1 - \tan(\beta_{base}) \cdot \tan(\theta_z)} \quad (5.2.3)$$



Σχήμα 5.2.8: Τοποθέτηση Φ/B σε απόσταση πάνω σε κεκλιμένο έδαφος ή στέγη

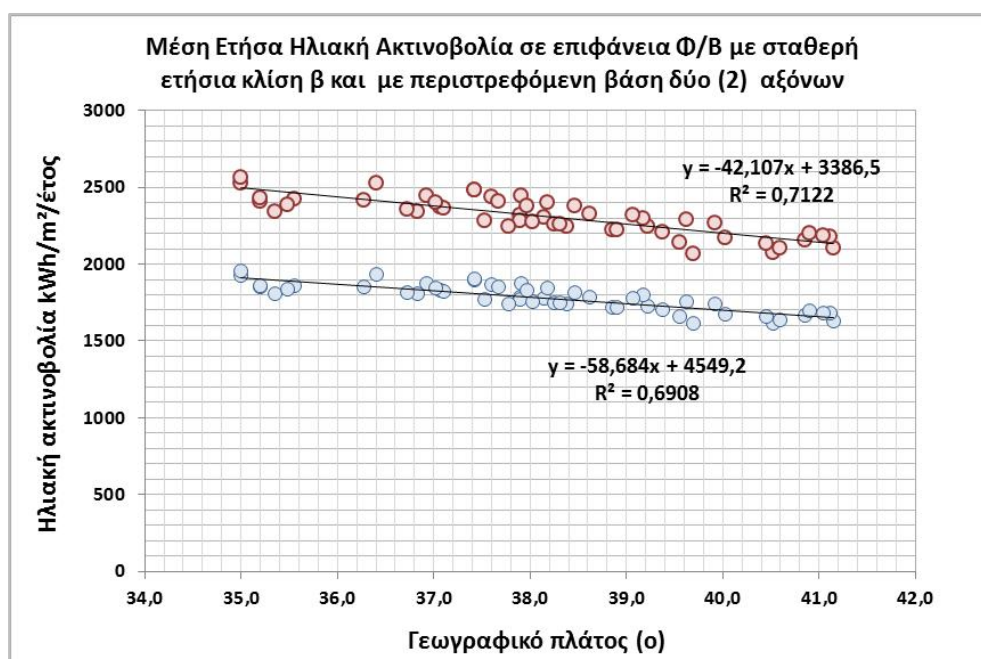
5.2.3. Φ/Β Μεταβαλλόμενου Προσανατολισμού και Κλίσης – Ενεργειακό Όφελος

Στην περίπτωση εγκατάστασης Φ/Β μεταβαλλόμενου προσανατολισμού ή/και κλίσης, καταγράφεται σημαντικό ενεργειακό όφελος, λόγω της αύξησης της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Βάσει ωριαίας ανάλυσης των κλιματικών δεδομένων των 60 ελληνικών περιοχών, προσδιορίστηκε το ποσοστό αύξησης της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας μεταξύ των περιπτώσεων εγκατάστασης Φ/Β:

α) Φ/Β εγκατεστημένα με σταθερή βέλτιστη κλίση (β) ανάλογα και με τις γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε περιοχής.

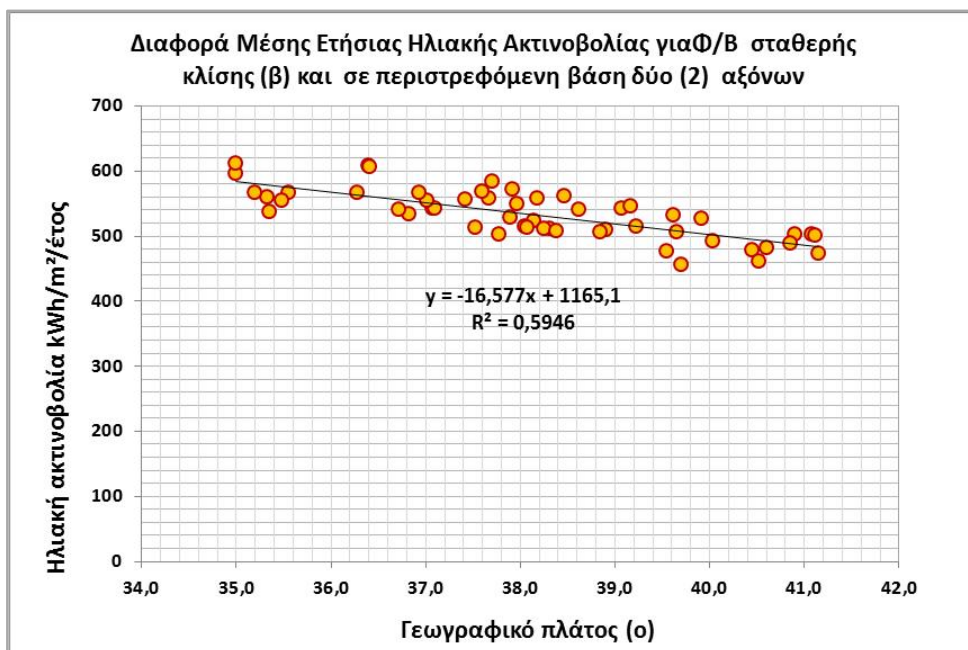
β) Φ/Β εγκατεστημένα σε βάση περιστροφής δύο (2) αξόνων, με παράλληλη προσαρμογή του προσανατολισμού (γ) και τη κλίσης (β) της επιφάνειας του Φ/Β, για κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας $\beta = \alpha \cos(\theta_z)$, όπου α , είναι το ηλιακό ύψος κάθε χρονική στιγμή σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή.

Η αύξηση της μέσης ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας ($H_{\beta,\gamma}$) στην περίπτωση τοποθέτησης των Φ/Β σε περιστρεφόμενη βάση (δύο αξόνων), σε σχέση με τα Φ/Β σε σταθερή βάση, κυμαίνεται σε ποσοστό από 28,2% έως 37,1% (Σχήμα 5.2.9). Η ποσοστιαία αυτή διαφορά αντιστοιχεί σε απόλυτες τιμές 455 έως 612 kWh/m²/yr, όπου οι χαμηλότερες τιμές αφορούν τις Ελληνικές περιοχές με το μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος όπως φαίνεται και από την τάση μείωσης της διαφοράς στο Σχήμα 5.2.10.

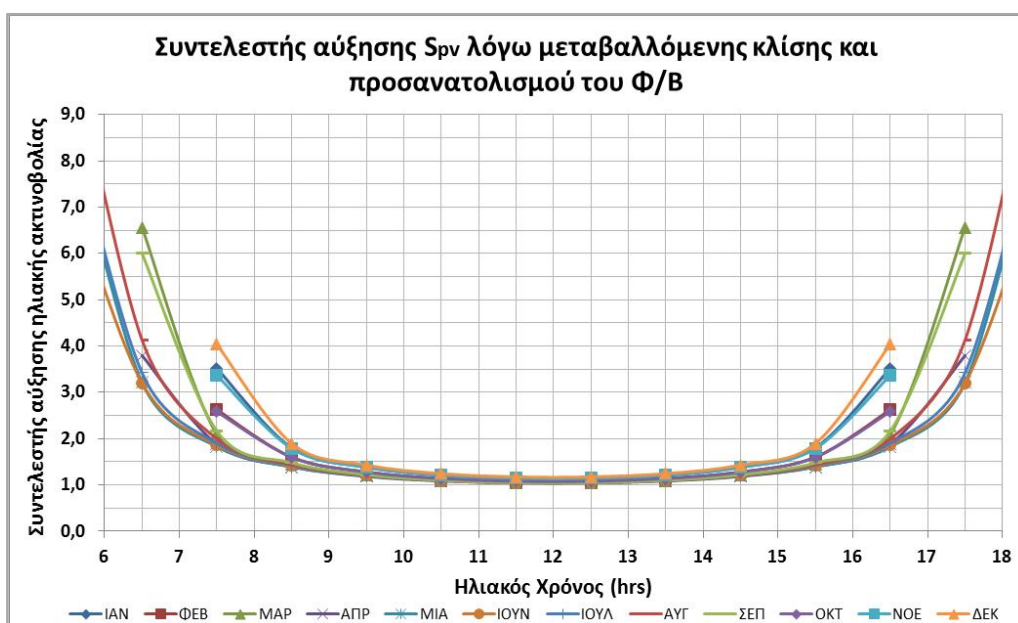


Σχήμα 5.2.9: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια Φ/Β με σταθερή ετήσια γωνία β (κόκκινα σημεία) και περιστρεφόμενη δύο αξόνων (μπλε σημεία)

Το ποσοστό αύξησης της τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας (S_{pv}) στην περίπτωση Φ/Β εγκατεστημένο σε περιστρεφόμενη βάση (μεταβαλλόμενος προσανατολισμός και γωνία κλίσης), διαφοροποιείται στη διάρκεια της ημέρας και εξαρτάται από τη σύσταση της ηλιακής ενέργειας (άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη). Στο Σχήμα 5.2.11 απεικονίζεται ο ωριαίος (ανά μήνα) συντελεστής αύξησης της ηλιακής ενέργειας ενός Φ/Β με σύστημα παρακολούθησης του ηλιακού δίσκου (δύο αξόνων), σε σχέση με το ίδιο Φ/Β σταθερής ετήσιας κλίσης. Το όφελος είναι κυρίως τις πρωινές και απογευματινές ώρες όπου αξιοποιείται όλη η διαθέσιμη άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Σε περιοχές όπου παρατηρείται υψηλή νέφωση το όφελος είναι χαμηλότερο στην περίπτωση Φ/Β με σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.



Σχήμα 5.2.10: Αύξηση ηλιακής ενέργειας στην περίπτωση περιστρεφόμενης επιφάνειας Φ/Β δύο αξόνων ($\beta = \text{acos}(\theta_z)$), σε σχέση με κεκλιμένη επιφάνεια σταθερής ετήσιας γωνίας κλίσης ($\beta = \text{const}$)

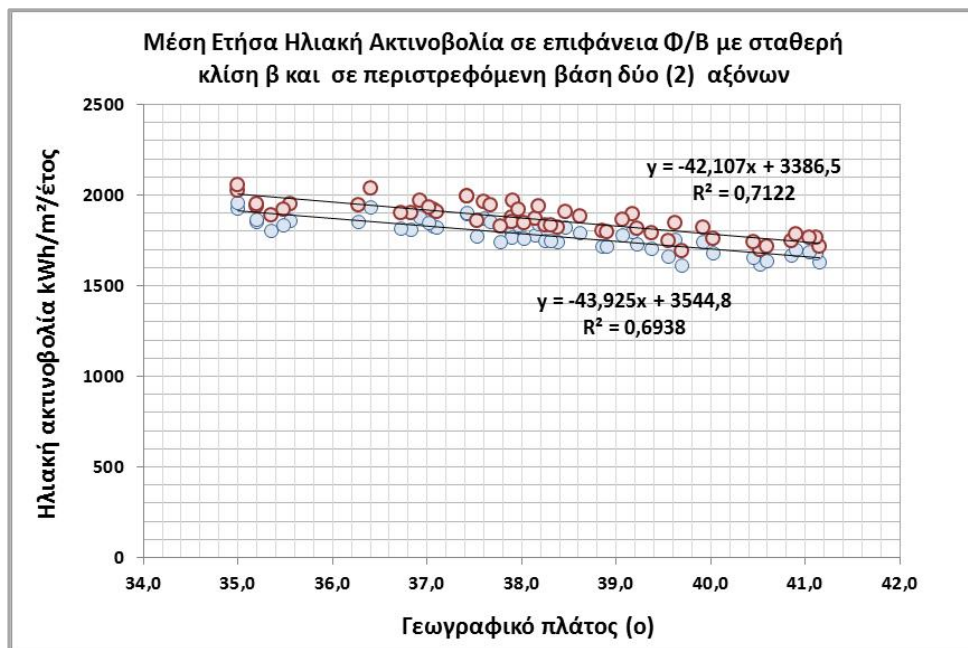


Σχήμα 5.2.11: Μέσος ωριαίος συντελεστής αύξησης τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας στην περίπτωση περιστρεφόμενης επιφάνειας Φ/Β δύο αξόνων ($\beta = \text{acos}(\theta_z)$), σε σχέση με κεκλιμένη επιφάνεια σταθερής ετήσιας γωνίας κλίσης ($\beta = \text{const}$), για την περιοχή της Αθήνας

Επισημαίνεται ότι το όφελος της επιπλέον ηλιακής ενέργειας μπορεί να μην είναι πάντα εφικτό, καθώς τέτοιου είδους συστήματα περιστρεφόμενης βάσης σε πολλές περιπτώσεις με έντονη ανεμόπτωση δεν μπορούν να λειτουργήσουν και τίθενται εκτός λειτουργίας, ειδικά σε περιοχές όπου επικρατούν συχνά υψηλές εντάσεις ανέμου. Επιπλέον, οι βάσεις αυτές διαθέτουν μηχανισμό για την περιστροφή τους και μπορεί να εμφανίζουν βλάβες, οι οποίες καθιστούν τους μηχανισμούς αυτούς εκτός λειτουργίας και κατ' επέκταση αδυναμία αξιοποίησης της βέλτιστης διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας.

Εναλλακτικά, στην περίπτωση μεταβολής της σταθερής κλίσης (β) σε μηνιαία βάση (Σχήμα 5.2.12), η αύξηση της προσπίπτουσας ετήσιας ηλιακής ενέργειας είναι της τάξεως του 4,6% έως

5,4% για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές, ποσοστό που αντιστοιχεί σε απόλυτες τιμές 77 έως 101 kWh/m²/yr.



Σχήμα 5.2.12: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένη επιφάνεια Φ/Β με σταθερή ετήσια γωνία β (κόκκινα σημεία) και με σταθερή μηνιαία γωνία δύο αξόνων (μπλε σημεία)

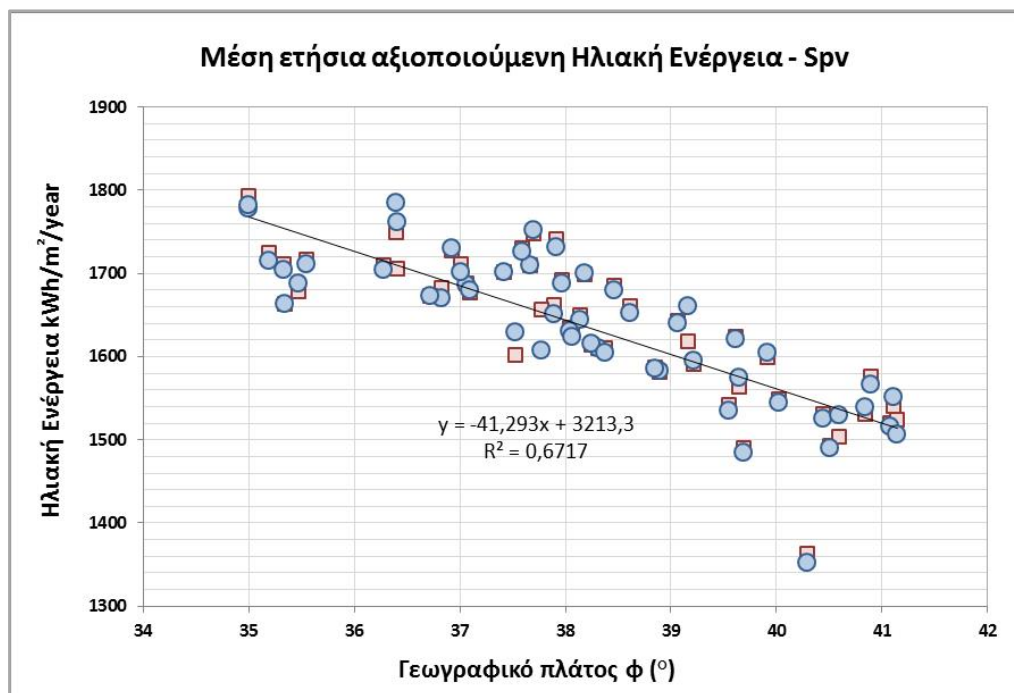
5.3. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Από την ανάλυση των κλιματικών δεδομένων και τον υπολογισμό της διακύμανσης των ωριαίων τιμών της αναμενόμενης ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες (Εξίσωση 3.2.2 και Πίνακας 3.2.4) με βέλτιστη κλίση (β), υπολογίστηκε και η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια ($S_{pv,total}$) που φτάνει τελικά στην συλλεκτική επιφάνεια ενός κρυσταλλικού Φ/Β προς αξιοποίηση, για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές. Η μέση ηλιακή ενέργεια ($S_{pv,total}$) στην επιφάνεια του Φ/Β, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διαστασιολόγηση Φ/Β για ετήσια λειτουργία, με σταθερή βέλτιστη κλίση και νότιο προσανατολισμό.

Η Εξίσωση 5.3.1 υπολογίζει τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια $S_{pv,total}$ (KWh/m²/yr) για βέλτιστη κλίση (β) των Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) και το γεωγραφικό μήκος (L) των ελληνικών περιοχών, τη κλίση (β) και τον μέσο ετήσιο συντελεστή αιθριότητας (kt), όπως προέκυψαν τα διαθέσιμα δεδομένα.

$$S_{pv,total} = 515(\pm 140) + 16,7(\pm 2,7) \cdot \beta - 25(\pm 3,0) \cdot \phi + 2845(\pm 147) \cdot kt + 2(\pm 1,2) \cdot L \quad \text{με } R^2=0,97 \quad (5.3.1)$$

Από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι ο συντελεστής αιθριότητας (kt) και το γεωγραφικό πλάτος ϕ είναι οι παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν την ετήσια ηλιακή ενέργεια $S_{pv,total}$, με συντελεστές BETA= 0,75 και -0,507 αντίστοιχα, ενώ ακολουθεί η κλίση (β) της κεκλιμένης επιφάνειας των Φ/Β με BETA=0,307 και το γεωγραφικό μήκος L με BETA=0,044. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 5.3.1 είναι $\pm 15,4$ KWh/m²/yr. Στο Σχήμα 5.3.1 απεικονίζεται η διακύμανση της εκτιμώμενης αξιοποιούμενης ετήσιας ηλιακής ενέργειας $S_{pv,total}$ στην Φ/Β επιφάνεια, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , όπως προκύπτει από την Εξίσωση 5.3.1.

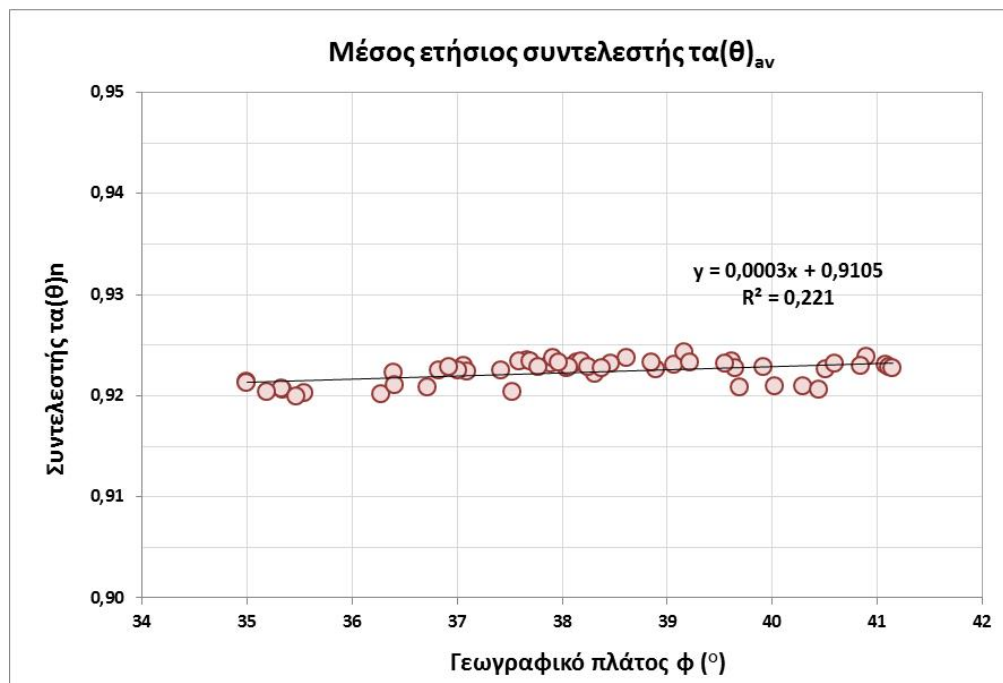


Σχήμα 5.3.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια S_{pv} , σε επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστη κλίση (β), για τις Ελληνικές περιοχές γεωγραφικού πλάτους ϕ , από μετρήσεις (γαλάζιο χρώμα), από Εξίσωση 5.3.1 (ροζ χρώμα)

Μια εναλλακτική Εξίσωση υπολογισμού της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β ($S_{pv,total}$), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο (A) των ελληνικών περιοχών, καθώς και τον συντελεστή αιθριότητας (kt), είναι η ακόλουθη.

$$S_{pv,total} = 304(\pm 222) - 10(\pm 2,7) \cdot \varphi + 0,5(\pm 1,6) \cdot L + 0,01(\pm 0,02) \cdot A + 3099(\pm 233) \cdot kt \quad \text{με } R^2=0,95 \quad (5.3.2)$$

Από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι ο συντελεστής αιθριότητας k_t (BETA 0,816) και το γεωγραφικό πλάτος φ (BETA -0,203), είναι οι παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν την ετήσια ηλιακή ενέργεια $S_{pv,total}$. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 5.3.2 είναι $\pm 20,4 \text{ kWh/m}^2/\text{yr}$.



Σχήμα 5.3.2: Μέσος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ για επιφάνειες Φ/B με βέλτιστες κλίσεις (β), για τις Ελληνικές περιοχές, γεωγραφικού πλάτους φ (ανάλυση μετρήσεων)

Στο Σχήμα 5.3.2 απεικονίζεται ο μέσος ετήσιος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$, που αντιστοιχεί στον λόγο $S_{pv,total}/H_\beta$ για τα κρυσταλλικά Φ/B με γυάλινο κάλυμμα, όπου H_β είναι η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια με βέλτιστη κλίση (Εξίσωση 3.2.2 και Πίνακας 3.2.3). Ο μέσος ετήσιος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ για τα κρυσταλλικά Φ/B με βέλτιστη κλίση για τις Ελληνικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$\tau_a(\theta)_{av} = 0,912(\pm 0,002) + 0,00050(\pm 7,8 \cdot 10^{-5}) \cdot \beta - 0,00004(\pm 7,1 \cdot 10^{-5}) \cdot \varphi - 0,00009(\pm 3,5 \cdot 10^{-5}) \cdot L - 0,000005(\pm 3,8 \cdot 10^{-7}) \cdot A \quad \text{με } R^2=0,85 \quad (5.3.3)$$

Από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι η γωνία κλίσης (β), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο (A) είναι οι παράμετροι που κυρίως επηρεάζουν την ετήσια ηλιακή ενέργεια $S_{pv,total}$, ενώ το γεωγραφικό πλάτος (φ) της περιοχής σε χαμηλότερο βαθμό. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 5.3.3 είναι $\pm 0,00045$.

Στην περίπτωση που είναι γνωστή η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο μιας περιοχής (H_0), η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (H_β) υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.2.4, σε συνάρτηση με τη βέλτιστη κλίση (β), το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), καθώς και το υψόμετρο (A) της περιοχής. Η βέλτιστη κλίση (β) προκύπτει αντίστοιχα από την Εξίσωση 3.2.3. Στη συνέχεια από τις σχέσεις 5.3.1 ή 5.3.2 υπολογίζεται και η ηλιακή ακτινοβολία που τελικά αξιοποιείται στη συλλεκτική επιφάνεια $S_{pv,total}$.

5.3.1. Διακύμανση Ενεργειακής Απόδοσης Φ/Β – Θεωρητική Προσέγγιση

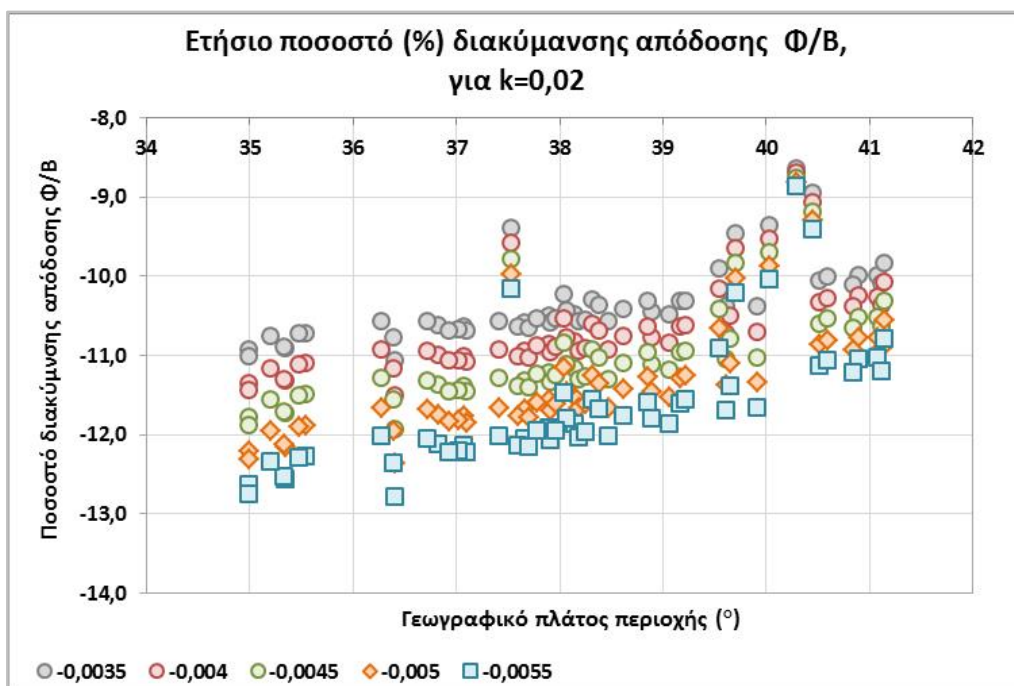
Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας (annual) διακύμανσης (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β n_{ref} , λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β και γωνία πρόσπτωσης (θ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη θεωρητική Εξίσωση, η οποία έχει ως ανεξάρτητες μεταβλητές το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο της περιοχής (A , m).

$$\Delta n_{pv,annual} = x_0 + x_1 \cdot \varphi + x_2 \cdot L + x_3 \cdot A \quad (5.3.4)$$

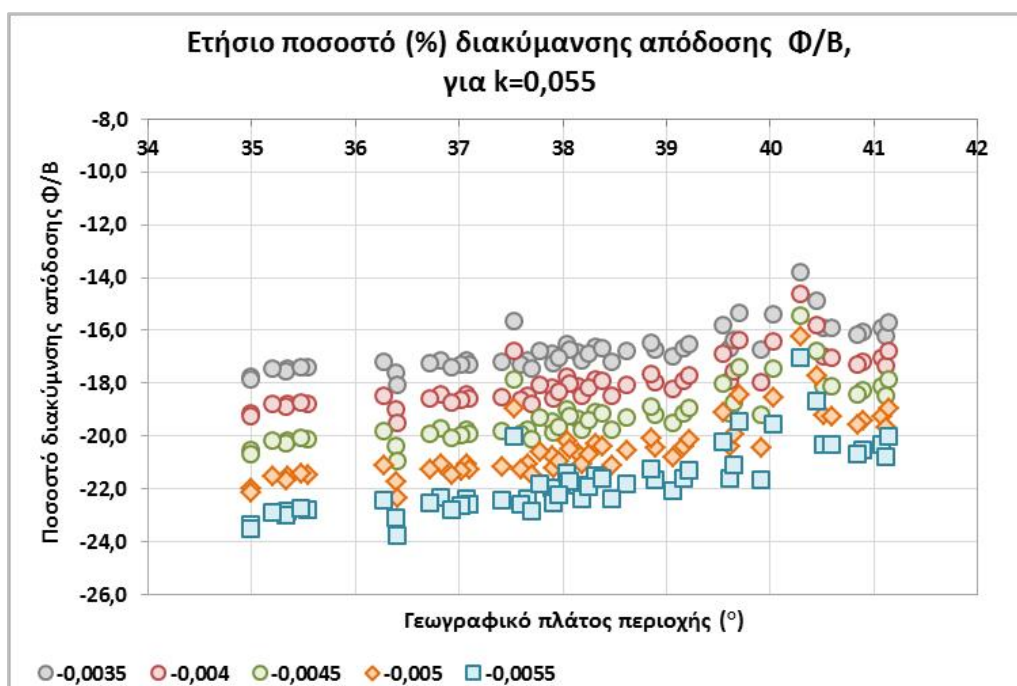
Πίνακας 5.3.1: Συντελεστές Εξίσωσης 5.3.4 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης της ονομαστικής απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}), λόγω β_{ref} και $\alpha(\theta)_{av}$.

Συντελεστής θερμοκρασίας (β_{ref})	Σταθεροί συντελεστές				Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA)			R ²			
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3				
	Συντελεστής Ross, k=0,02										
-0,0035	-16,7	0,16	-0,01	0,0019	0,59	-0,03	0,67	0,96			
-0,0040	-18,1	0,19	-0,01	0,0022	0,60	-0,02	0,67	0,96			
-0,0045	-19,5	0,22	-0,01	0,0025	0,61	-0,02	0,66	0,96			
-0,0050	-20,9	0,25	-0,01	0,0028	0,61	-0,02	0,66	0,96			
-0,0055	-22,4	0,28	-0,01	0,0030	0,61	-0,02	0,65	0,96			
Συντελεστής Ross, k=0,055											
-0,0035	-28,0	0,31	-0,03	0,0025	0,67	-0,07	0,53	0,91			
-0,0040	-31,1	0,35	-0,03	0,0029	0,67	-0,07	0,53	0,91			
-0,0045	-34,1	0,40	-0,03	0,0032	0,68	-0,07	0,53	0,91			
-0,0050	-37,1	0,45	-0,04	0,0036	0,68	-0,06	0,52	0,91			
-0,0055	-40,2	0,50	-0,04	0,0040	0,68	-0,06	0,52	0,91			
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών											
	x_0	x_1	x_2	x_3	Συνολικό %	Συντελεστής Ross, k=0,02					
-0,0035	0,4	0,01	0,01	0,0001	0,10						
-0,0040	0,5	0,01	0,01	0,0001	0,11						
-0,0045	0,5	0,01	0,01	0,0001	0,13						
-0,0050	0,6	0,01	0,01	0,0001	0,14						
-0,0055	0,6	0,01	0,01	0,0001	0,16						
-0,0035	1,0	0,02	0,02	0,0002	0,25				Συντελεστής Ross, k=0,055		
-0,0040	1,1	0,02	0,02	0,0002	0,28						
-0,0045	1,3	0,03	0,02	0,0003	0,32						
-0,0050	1,5	0,03	0,03	0,0003	0,36						
-0,0055	1,6	0,03	0,03	0,0003	0,39						

Η Εξίσωση αυτή βασίστηκε στις μέσες σταθμισμένες ετήσιες τιμές της διακύμανσης της ενεργειακής απόδοσης (%), οι οποίες προέκυψαν από ωριαία ανάλυση των μέσων τιμών των κλιματικών δεδομένων (μέση ωριαία θερμοκρασία αέρα T_{air} και ηλιακή ακτινοβολία S_{pv}), της θερμοκρασία του Φ/Β (T_{pv}) και του συντελεστή $\alpha(\theta)_{av}$ λόγω γωνίας πρόσπτωσης, για τον υπολογισμό του ποσοστού (%) μείωσης της απόδοσης των Φ/Β. Στον Πίνακα 5.3.1 δίνονται οι σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 5.3.4 για συγκεκριμένους συντελεστές θερμοκρασίας (β_{ref}) των Φ/Β και για δύο τιμές του συντελεστή Ross, $k=0,02$ και $0,055$.



Σχήμα 5.3.3: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), $k=0,02$

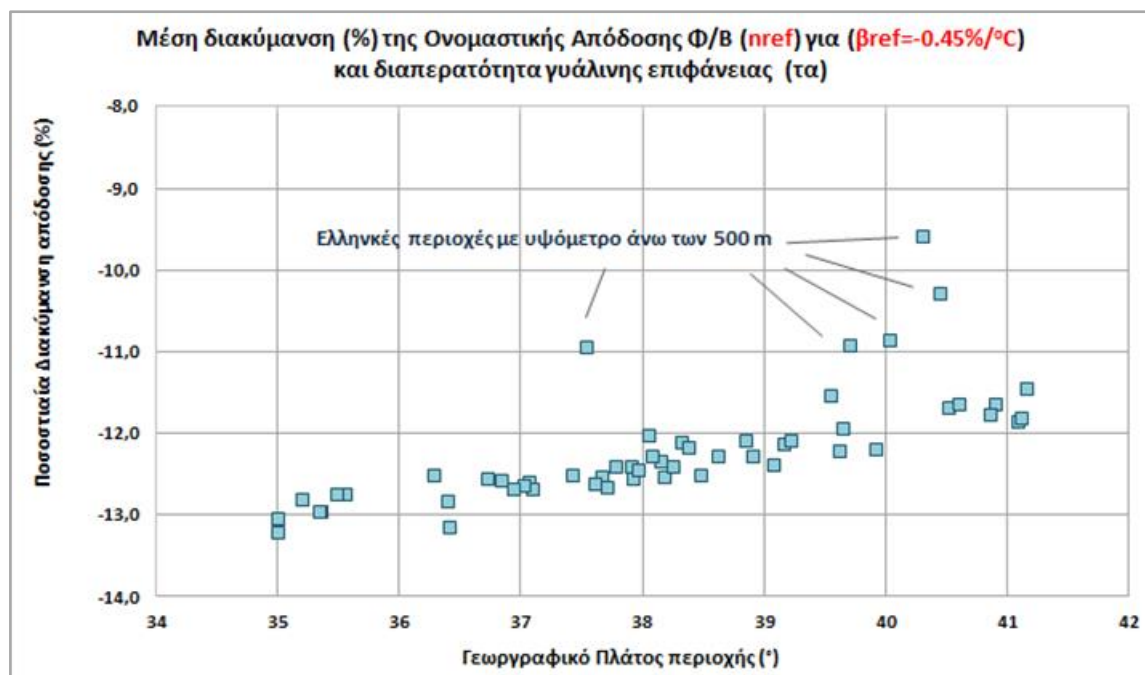


Σχήμα 5.3.4: Ετήσιο ποσοστό διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), για $k=0,055$

Στο Σχήμα 5.3.3 απεικονίζεται το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας Φ/B και της γωνίας πρόσπτωσης (θ), για το σύνολο των ελληνικών περιοχών, τιμές από τις οποίες προέκυψε η αναλυτική Εξίσωση 5.3.1. Τα ποσοστά υπολογίστηκαν για μέσες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αέρα για τις Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (ϕ), για συντελεστές θερμοκρασίας $\beta_{ref}=0,0045$ έως $0,0055$, και συντελεστή Ross, $k=0,02$. Στο Σχήμα 5.3.4 απεικονίζονται τα αντίστοιχα ποσοστά για συντελεστή Ross, $k=0,055$. Είναι προφανές ότι για Φ/B ενσωματωμένα σε επιφάνειες ($k=0,055$), το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού

απόδοσης (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας του Φ/Β και της γωνίας πρόσπτωσης (θ), αυξάνεται σημαντικά (Σχήμα 5.3.4), φτάνοντας μέχρι και 24% για τις νότιες Ελληνικές περιοχές.

Στο Σχήμα 5.3.5 απεικονίζεται η συνολική εκτιμώμενη ετήσια διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος και συγκεκριμένες παραδοχές (β_{ref} και $\tau_a(\theta)_{av}$). Είναι εμφανές ότι για το ίδιο γεωγραφικό πλάτος, οι περιοχές με μεγάλα υψόμετρα εμφανίζουν μικρότερη ετήσια ποσοστιαία μείωση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης, η οποία οφείλεται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα που επικρατούν.



Σχήμα 5.3.5: Διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης Φ/Β n_{ref} λόγω του συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$ και της θερμοκρασίας του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος των ελληνικών περιοχών

5.3.2. Διακύμανση Ενεργειακής Απόδοσης Φ/Β – Εφαρμογή Εμπειρικών Μοντέλων

Όστοςο η ποσοστιαία μείωση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης, στην πράξη, δηλαδή σε συνθήκες λειτουργίας εξωτερικού περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη, όπως διεξάχθηκε και από την επεξεργασία των μετρήσεων στις πειραματικές μονάδες (Κεφάλαιο 4). Για το λόγο αυτό, η μέση ετήσια ποσοστιαία (%) μείωση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β n_{ref} , υπολογίστηκε επίσης μέσω ωριαίας ανάλυσης και χρήση των εμπειρικών σχέσεων που διεξάχθηκαν από την ανάλυση των μετρήσεων των πειραματικών μονάδων (ενότητα 4.6.2, Πίνακας 4.6.2). Για την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες ωριαίες τιμές των κλιματικών δεδομένων (μέση ωριαία θερμοκρασία αέρα T_{air} και ηλιακή ακτινοβολία S_{pv}), της θερμοκρασία του Φ/Β (T_{pv}), του συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$ λόγω γωνίας πρόσπτωσης και της ωριαίας τιμής της αέρας μάζας (AM). Οι εμπειρικές σχέσεις του Πίνακα 4.6.2 δίνουν παρόμοιες τιμές της ποσοστιαίας (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}). Όστοςο εφαρμόζοντας την εμπειρική Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2, όπου δεν γίνεται χρήση της ταχύτητας του ανέμου, υπολογίστηκε η ωριαία μείωση του n_{ref} , καθώς και η μέση μηνιαία και τελικά η ετήσια ποσοστιαία μείωση του n_{ref} .

Από τις υπολογιζόμενες (Εξίσωση 5, Πίνακας 4.6.2) μέσες ωριαίες και μηνιαίες ετήσιες τιμές της διακύμανσης (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} , προέκυψε παρόμοια αναλυτική

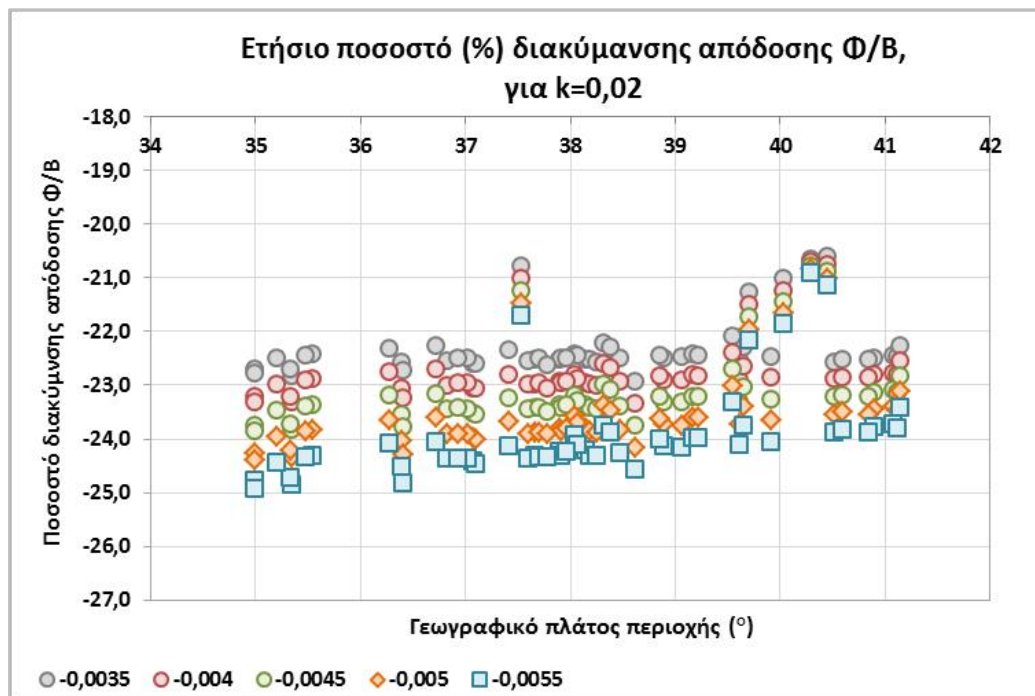
Εξίσωση με την 5.3.4, για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας διακύμανσης του n_{ref} και με σταθερούς συντελεστές όπως δίνονται στον Πίνακα 5.3.2, για διάφορες τιμές του συντελεστή θερμοκρασίας (β_{ref}) και για δύο τιμές του συντελεστή Ross, $k=0,02$ και $0,055$. Στον ίδιο Πίνακα δίνονται οι τυποποιημένοι συντελεστές BETA και τα επιμέρους και συνολικά τυπικά σφάλματα για τις τους σταθερούς συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών της Εξίσωσης 5.3.4.

Πίνακας 5.3.2: Συντελεστές Εξίσωσης 5.3.4 για τον υπολογισμό του μέσου ετήσιου ποσοστού (%) διακύμανσης της ονομαστικής απόδοσης του Φ/Β (n_{ref}). Εφαρμογή εμπειρικού μοντέλου.

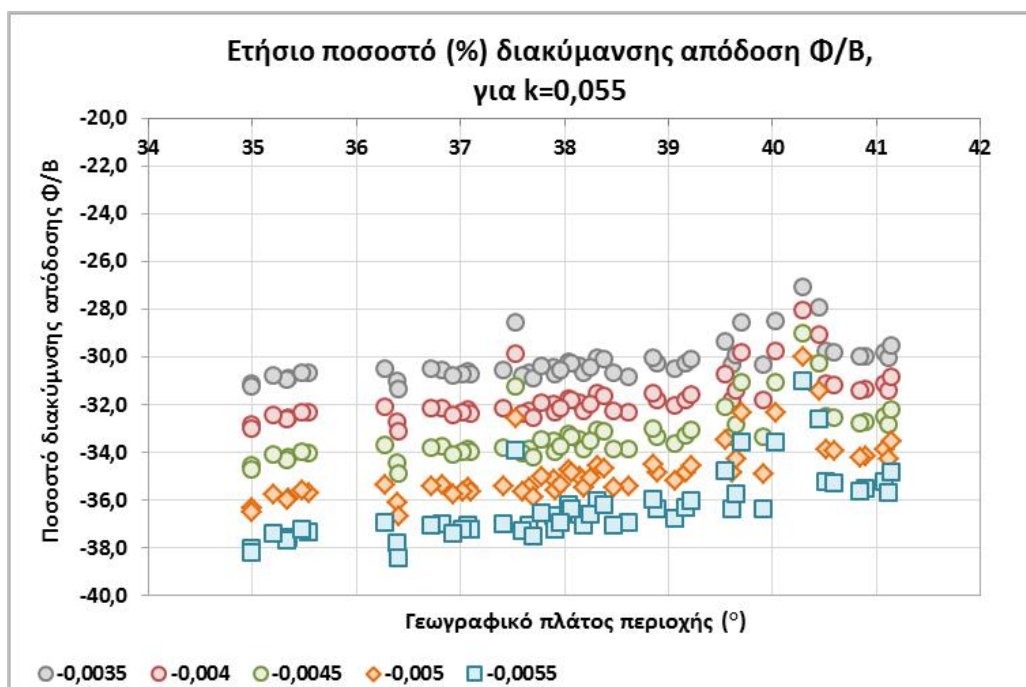
Συντελεστής θερμοκρασίας (β_{ref})	Σταθεροί συντελεστές				Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (BETA)			R ²
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁	x ₂	x ₃	
	Συντελεστής Ross, k=0,02							
-0,0035	-24,7	0,05	0,00	0,0028	0,18	0,01	0,94	0,96
-0,0040	-26,4	0,09	0,00	0,0032	0,26	0,01	0,91	0,97
-0,0045	-28,2	0,12	0,00	0,0035	0,32	0,00	0,88	0,97
-0,0050	-29,9	0,16	0,00	0,0039	0,36	0,00	0,86	0,98
-0,0055	-31,7	0,19	0,00	0,0042	0,39	0,00	0,84	0,98
Συντελεστής Ross, k=0,055								
-0,0035	-38,7	0,23	-0,02	0,0035	0,48	-0,06	0,73	0,94
-0,0040	-42,4	0,29	-0,03	0,0040	0,52	-0,06	0,70	0,93
-0,0045	-46,2	0,35	-0,03	0,0044	0,55	-0,06	0,68	0,93
-0,0050	-49,9	0,41	-0,04	0,0049	0,56	-0,06	0,66	0,93
-0,0055	-53,7	0,47	-0,04	0,0053	0,58	-0,06	0,65	0,93
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών								
	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	Συνολικό %			
-0,0035	0,4	0,01	0,01	0,0001	0,10	Συντελεστής Ross, k=0,02		
-0,0040	0,4	0,01	0,01	0,0001	0,10			
-0,0045	0,4	0,01	0,01	0,0001	0,11			
-0,0050	0,5	0,01	0,01	0,0001	0,12			
-0,0055	0,5	0,01	0,01	0,0001	0,13			
-0,0035	0,9	0,02	0,02	0,0002	0,21	Συντελεστής Ross, k=0,055		
-0,0040	1,0	0,02	0,02	0,0002	0,26			
-0,0045	1,2	0,02	0,02	0,0003	0,30			
-0,0050	1,4	0,03	0,03	0,0003	0,34			
-0,0055	1,6	0,03	0,03	0,0003	0,39			

Στο Σχήμα 5.3.6 απεικονίζεται το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), για το σύνολο των ελληνικών περιοχών, τιμές από τις οποίες προέκυψε η αναλυτική Εξίσωση 5.3.1 και οι οποίες υπολογίστηκαν αναλυτικά σε ωριαία βάση από την εμπειρική Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2. Τα ποσοστά υπολογίστηκαν για μέσες ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του Φ/Β και της αέριας μάζας, για τις Ελληνικές περιοχές με γεωγραφικό πλάτος (φ), για συντελεστές θερμοκρασίας $\beta_{ref}=0,0045$ έως $0,0055$, και συντελεστή Ross, $k=0,02$. Στο Σχήμα 5.3.7 απεικονίζονται τα αντίστοιχα ποσοστά για συντελεστή Ross, $k=0,055$. Είναι προφανές ότι για Φ/Β ενσωματωμένα σε επιφάνειες ($k=0,055$), το μέσο ετήσιο ποσοστό (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), αυξάνεται σημαντικά (Σχήμα 5.3.4), φτάνοντας μέχρι και 39% για τις νότιες Ελληνικές περιοχές.

Στους Πίνακες Γ.1 και Γ.2, του Παραρτήματος Γ δίνονται η μέση μηνιαία διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} , για $\beta_{ref}=0,0045$ και $k=0,02$, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2.



Σχήμα 5.3.6: Ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), $k=0,02$



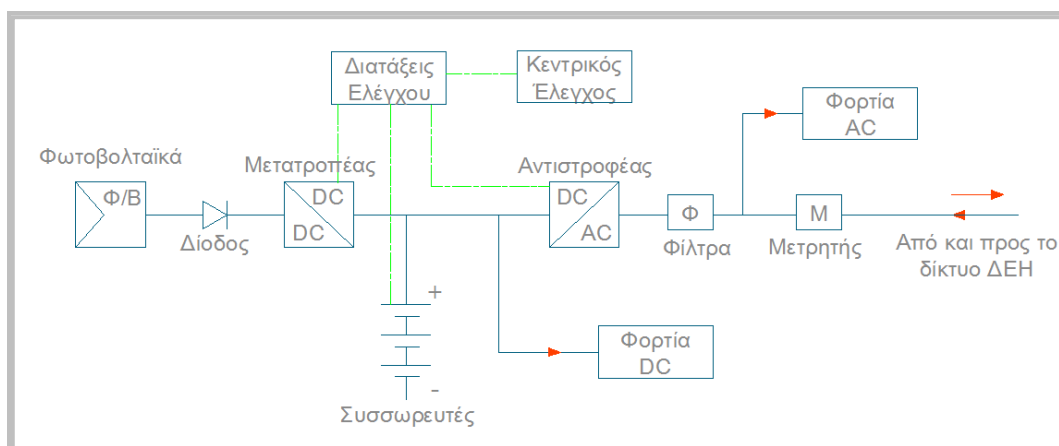
Σχήμα 5.3.7: Ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}), για $k=0,055$

6. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ Φ/Β ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 31/2010, η οποία ενσωματώθηκε στο Ελληνικό δίκαιο με το νόμο 4122/2013, ορίζει ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να μεριμνήσουν ώστε τα νέα κτίρια που θα κατασκευάζονται να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης. Ως κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ορίζονται τα κτίρια που έχουν την ελάχιστη απαίτηση για ενέργεια, εφαρμόζοντας τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως προκύπτουν από την αντίστοιχη μελέτη κόστους οφέλους για κάθε κράτος μέλος, η οποία θα καλύπτεται στο μεγαλύτερο μέρος της από ΑΠΕ. Στην κατεύθυνση αυτή, τα Φ/Β μπορούν να συμβάλουν θετικά στην υλοποίηση κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, καλύπτοντας μέρος ή το σύνολο των ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου. Ιδιαίτερα το πρόγραμμα συμψηφισμού ηλεκτρικής ενέργειας με την παραγωγή ηλεκτρισμού από Φ/Β, φαίνεται να καθιστά τεχνικά εφικτή και οικονομικά βιώσιμη την εγκατάσταση Φ/Β σε κτίρια. Ακόμα και η εφαρμογή αυτόνομων συστημάτων Φ/Β σε περιοχές χωρίς πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται όλο και πιο ελκυστική επένδυση, καθώς το κόστος των Φ/Β συνεχώς μειώνεται.

Οι εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων σε κτίρια μπορεί να είναι αυτόνομης λειτουργίας ή σε παράλληλη σύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα τοπικού δικτύου ή όχι. Σε περίπτωση μη ύπαρξης δικτύου ηλεκτροδότησης, η Φ/Β μονάδα σχεδιάζεται έτσι ώστε τα Φ/Β και οι συσσωρευτές να παρέχουν αυτονομία τουλάχιστον δύο ή τριών ημερών ή ακόμα περισσότερων ανάλογα με τη συχνότητα νεφοσκεπών ημερών στην περιοχή.

Οι αυτόνομες Φ/Β διατάξεις σε κτίρια αποτελούνται από τα Φ/Β πλαίσια (συχνά ομάδες Φ/Β πλαισίων) που περιλαμβάνουν Φ/Β στοιχεία σε παράλληλη ή σε σειρά σύνδεση, το μετατροπέα ρεύματος (από συνεχές σε εναλλασσόμενο), το σταθεροποιητή τάσης και τους συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγουν τα Φ/Β στοιχεία είναι συνεχές και συνήθως μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο, εκτός αν οι ηλεκτρικές συσκευές κατανάλωσης είναι συνεχούς ρεύματος (DC).



Στη συνδεσμολογία των Φ/Β στοιχείων παρεμβάλλονται επίσης ρυθμιστικές ή παρακαμπτήριες δίοδοι, οι οποίες εξασφαλίζουν την ροή του ρεύματος προς την επιθυμητή κατεύθυνση, από τα Φ/Β προς τις μπαταρίες. Τις βραδινές ώρες πρέπει να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει περίπτωση αποφόρτισης των συσσωρευτών μέσω των Φ/Β στοιχείων, δηλαδή να υπάρξει ροή ρεύματος από τις μπαταρίες προς τα Φ/Β. Επίσης εμποδίζεται η ροή ρεύματος προς κάποιο από τα στοιχεία που σκιάζεται από κάποιο άλλο που παράγει ρεύμα, όταν η συνδεσμολογία των Φ/Β στοιχείων γίνεται παράλληλα.

6.1. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΤΟΙΚΙΩΝ

Σύμφωνα με την στατιστική απογραφή των Ελληνικών κτιρίων το 2011, της Στατιστικής Υπηρεσίας, το 70,4% των κτιρίων κατοικιών ήταν μονοκατοικίες, το 15,0% διπλοκατοικίες και μόνο το 14,6% των κτιρίων πολυκατοικίες (με τρεις ή περισσότερα διαμερίσματα / κατοικίες)[153]. Η κατανομή των μονοκατοικιών και λοιπών κτιρίων διαφοροποιείται μεταξύ των Ελληνικών κλιματικών ζωνών (Πίνακας 6.1.1 [153]). Στα μεγάλα αστικά κέντρα της Αττικής (κλιματική ζώνη Α) και της Θεσσαλονίκης (κλιματική ζώνη Β), οι μονοκατοικίες καταλαμβάνουν χαμηλότερο ποσοστό το οποίο είναι 48% και 53% αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1.1: Ποσοστό κτιρίων (%) ανά αριθμό κατοικιών και κλιματική ζώνη, το 2011

Τύπος κτιρίου	Κλιματική Ζώνη			
	A	B	C	D
Μονοκατοικίες	78,4	64,7	73,2	77,5
Διπλοκατοικίες	13,6	16,5	13,5	13,8
Πολυκατοικίες με 3 ή περισσότερες κατοικίες	8,1	18,9	13,3	8,7

Πίνακας 6.1.2: Αριθμός μόνιμων κατοικιών και συνολική επιφάνεια ανά κατηγορία κτιρίου για το 2011

Επιφάνεια δαπέδου m ²	Αριθμός κατοικιών				
	Μονοκατοικίες	Διπλοκατοικίες	Πολυκατοικίες	Κτίριο με άλλη κύρια χρήση	Σύνολο κατοικιών
< 30	32,372	12,943	60,614	776	106,705
31-50	153,592	56,517	248,426	1,460	459,995
51-70	272,960	113,949	428,932	1,729	817,570
71-90	341,642	199,829	625,719	2,321	1,169,511
91-120	367,984	232,013	481,020	2,616	1,083,633
121-150	114,746	63,973	108,134	811	287,664
151-200	77,107	28,857	38,411	395	144,770
201-300	28,242	7,829	8,472	91	44,634
> 301	5,795	964	816	31	7,606
	Επιφάνεια κατοικιών (m ²)				
	Μονοκατοικίες	Διπλοκατοικίες	Πολυκατοικίες	Κτίριο με άλλη κύρια χρήση	Σύνολο επιφάνειας
< 30	825,957	331,156	1,574,822	17,848	2,749,784
31-50	6,912,670	2,527,149	11,009,334	63,481	20,512,635
51-70	17360,770	7,251,982	26,621,215	109,007	51,342,974
71-90	28,023,893	16,443,414	50,643,862	190,074	95,301,243
91-120	39,169,647	24,652,596	50,223,425	276,580	114,322,248
121-150	15,793,830	8,754,300	14,563,460	111,563	39,223,153
151-200	13,693,855	5,090,842	6,622,487	70,989	25,478,174
201-300	6,919,753	1,904,517	2,017,918	23,074	10,865,261
> 301	2,631,441	442,413	448,987	16,370	3,539,211

Από τα στοιχεία της στατικής απογραφής Ελληνικών κτιρίων του 2011[153], το πανόραμα απογραφικών δεδομένων 1991-2011 της Στατιστικής Υπηρεσίας[154] και της Οικοδομικής

δραστηριότητας στην Ελλάδα [155], εκτιμήθηκε η συνολική επιφάνεια (m²) δαπέδου των κανονικών (κατοικήσιμων) κατοικιών, ανά τύπο κατοικίας για το έτος 2011, όπως δίνονται στον Πίνακα 6.1.2. Περίπου το 60% των κατοικιών έχει επιφάνεια δαπέδου μεταξύ 70 m² και 120 m², ποσοστό που διαφοροποιείται ελάχιστα ανάλογα με τον τύπο κτιρίου, μονοκατοικία, διπλοκατοικία και πολυκατοικία.

Από τις κατοικίες αυτές ένα ποσοστό των μονοκατοικιών και διπλοκατοικιών έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης Φ/Β για ηλεκτροπαραγωγή:

- α) κυρίως στο δώμα ή τη στέγη εφόσον υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια και επαρκής ηλιασμός,
- β) στον περιβάλλοντα χώρο εφόσον υπάρχει διαθέσιμη ελεύθερη επιφάνεια στο οικόπεδο και επαρκής ηλιασμός, χωρίς φυσικά (φύτευση) ή τεχνητά εμπόδια.

Οι μονοκατοικίες και διπλοκατοικίες σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, πληρούν τις περισσότερες από τις αναφερόμενες προϋποθέσεις σε σχέση με αυτές εντός πυκνοδομημένου αστικού ιστού. Εφόσον σε περιοχές του αστικού πυκνοδομημένου ιστού ο συντελεστής δόμησης είναι χαμηλός, τότε υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης του δώματος ή στέγης των κτιρίων αυτών για την εγκατάσταση Φ/Β, εφόσον υπάρχει επαρκής ηλιασμός, λόγω απουσίας πολυώροφων κτιρίων.

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας για τις κατοικίες στην Ελλάδα το έτος 2011 ανέρχεται στις 55.347 GWh, εκ των οποίων το 31,9 % αντιστοιχεί σε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, το 39,8 % σε πετρέλαιο, το 7,3 % σε αέρια καύσιμα (κυρίως φυσικό αέριο και μικρή κατανάλωση υγραερίου), το 19,8 % σε ΑΠΕ συμπεριλαμβανομένης και της βιομάζας, ενώ το υπόλοιπο 1,2 % αφορά στερεά καύσιμα και συμπαραγωγή [156-157]. Στον Πίνακα 6.1.3 [153,157-158] δίνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το 2011 στην Ελλάδα, ανά κλιματική ζώνη για τον οικιακό τομέα, καθώς και το ποσοστό συμμετοχής (%) του οικιακού τομέα στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που ανέρχεται σε 17.623 GWh[153,156-159]. Το ίδιο έτος η κατανάλωση πετρελαίου και φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα είναι 21.402 GWh και 4.047 GWh αντίστοιχα[156-158].

Πίνακας 6.1.3: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κλιματική ζώνη, για το 2011

	Κλιματική Ζώνη Α	Κλιματική Ζώνη Β	Κλιματική Ζώνη Γ	Κλιματική Ζώνη Δ
Συνολική κατανάλωση ενέργειας (GWh/year)	6.455	28.272	12.137	1.419
Κατανάλωση οικιακού τομέα (GWh/year)	2.337	10,247	4,441	601
Ποσοστό κατανάλωσης (%)	36,2%	36,2%	36,6%	42,3%

Ωστόσο, η κατανάλωση ανά είδος καυσίμου διαφοροποιείται σημαντικά ανά κλιματική ζώνη, ανάλογα και με τη διαθεσιμότητα των καυσίμων. Για παράδειγμα στην Α και Δ κλιματική ζώνη δεν υπάρχει καθόλου κατανάλωση φυσικού αερίου καθώς δεν υπάρχει διαθέσιμος δίκτυο διανομής, ενώ η κατανάλωση βιομάζας είναι πιο αυξημένη στην Δ κλιματική ζώνη και στις ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, κυρίως λόγω χαμηλού κόστους αγοράς [153, 156-158]. Ειδικότερα, από την ανάλυση των στοιχείων της απογραφής των κτιρίων του 2011 [153] και των ενεργειακών στατιστικών [156-158] για την τελική κατανάλωση καυσίμων στις κατοικίες, υπολογίστηκε το ποσοστό χρήσης ανά είδος καυσίμου και κλιματική ζώνη για τη θέρμανση χώρων και ζεστού νερού χρήσης ΖΝΧ (Πίνακας 6.1.4 [160]). Ειδικότερα :

- α) το πετρέλαιο είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται στο μεγαλύτερο ποσοστό των Ελληνικών κατοικιών για τη θέρμανση χώρων σε όλες τις κλιματικές ζώνες,
- β) για την παραγωγή ΖΝΧ το μεγαλύτερο ποσοστό κατοικιών σε όλες τις κλιματικές ζώνες χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια, σε μικρότερο ποσοστό ηλιακή ενέργεια κυρίως στην κλιματική ζώνη Α και Β και σε ακόμα μικρότερο ποσοστό πετρέλαιο κυρίως στην κλιματική ζώνη Γ και Δ.

Πίνακας 6.1.4: Ποσοστό μόνιμων κατοικιών (%) ανά πηγή ενέργειας για θέρμανση χώρων και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, και κλιματική ζώνη για το 2015

	Κλιματική Ζώνη Α	Κλιματική Ζώνη Β	Κλιματική Ζώνη Γ	Κλιματική Ζώνη Δ
Σύνολο μόνιμων κατοικιών	564,599	2,247,314	1,168,944	141,231
Πηγή ενέργειας για θέρμανση χώρων				
Ηλεκτρική ενέργεια	16,8%	8,4%	6,0%	2,4%
Φυσικό αέριο	0,0%	8,7%	13,3%	0,0%
Πετρέλαιο	51,5%	71,5%	65,2%	62,4%
Άλλη πηγή ενέργειας (βιομάζα, ηλιακή κ.λ.π.)	17,6%	7,0%	13,8%	34,2%
Καμία πηγή ενέργειας (χωρίς θέρμανση)	14,1%	4,4%	1,6%	0,9%
Πηγή ενέργειας για ζεστό νερό χρήσης				
Ηλεκτρική ενέργεια	41,2%	54,2%	45,5%	41,2%
Φυσικό αέριο	0,0%	2,0%	10,7%	0,0%
Πετρέλαιο	2,6%	7,3%	18,2%	17,9%
Ηλιακή ενέργεια	51,9%	34,5%	20,8%	26,7%
Άλλο / καμία πηγή ενέργειας	4,2%	2,0%	4,7%	14,2%

Από τα στοιχεία της στατικής απογραφής κτιρίων στην Ελλάδα του 2011 [153,156], υπολογίστηκε ο αριθμός χρηστών ανά κατοικία, για τις κατοικίες που χρησιμοποιούν πετρέλαιο και φυσικό αέριο για την παραγωγή ΖΝΧ σε κάθε κλιματική ζώνη και ο οποίος ανέρχεται στα 2,74 άτομα/ κατοικία για την Α, Β και Δ ζώνη, ενώ για την Γ ζώνη είναι 2,65 άτομα/κατοικία[160]. Στη συνέχεια θεωρώντας ως μέση κατανάλωση ΖΝΧ τα 50 lt/άτομο [125], εκτιμήθηκε η κατανάλωση θερμικής ενέργειας (από πετρέλαιο και φυσικό αέριο) για την παραγωγή ΖΝΧ ανά κλιματική ζώνη (Πίνακας 6.1.5) και η συνολική, η οποία ανέρχεται σε 820,9GWh [160].

Πίνακας 6.1.5: Μέση πραγματική κατανάλωση ενέργειας στις κατοικίες ανά κλιματική ζώνη το 2011

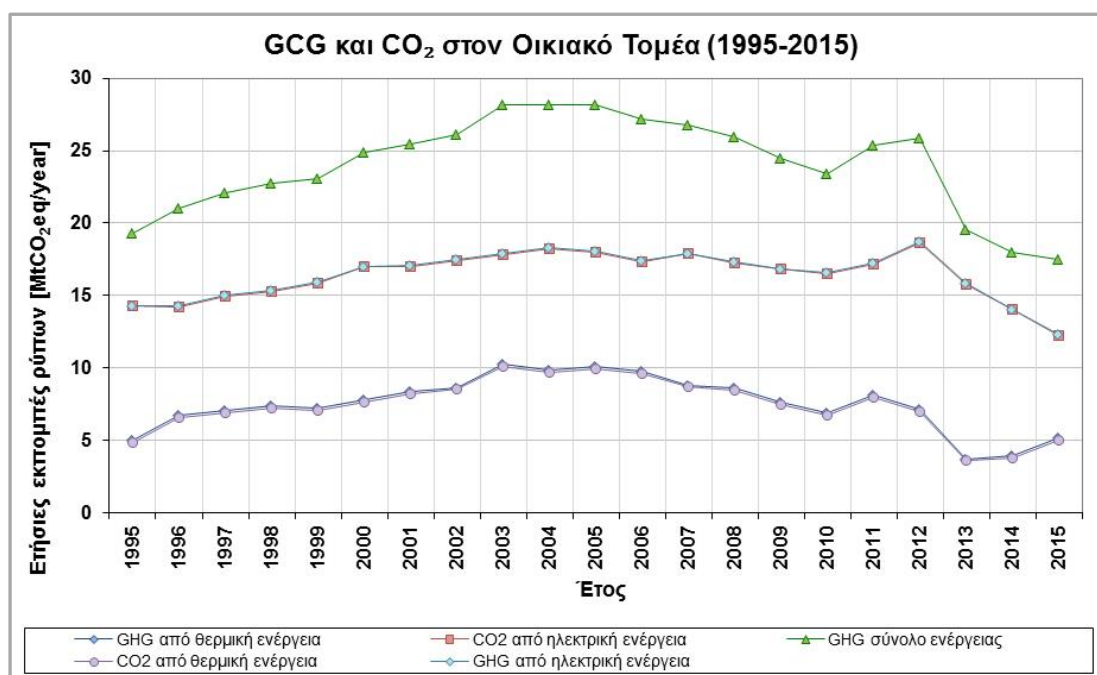
	Κλιματική Ζώνη Α	Κλιματική Ζώνη Β	Κλιματική Ζώνη Γ	Κλιματική Ζώνη Δ
Μέση επιφάνεια δαπέδου κατοικιών (m ²)	91,6	88,2	89,0	90,4
Θερμική Ενέργεια για Θέρμανση Χώρων				
Μόνιμες κατοικίες με χρήση πετρελαίου και φυσικού αερίου για θέρμανση χώρων	288.962	1.797.168	909.242	101.105
Συνολική θερμική ενέργεια (GWh _{th} /year)	1.601	12.893	8.975	1.190
Ειδική θερμική ενέργεια (kWh _{th} /m ² /year)	60,9	81,3	110,9	130,1
Θερμική Ενέργεια για Ζεστό Νερό Χρήσης				
Μόνιμες κατοικίες με χρήση πετρελαίου και φυσικού αερίου για θέρμανση χώρων και ζεστό νερό χρήσης*	21.270	200.842	335.461	28.924
Συνολική θερμική ενέργεια (GWh _{th} /year)	1.631	13.131	9.450	1.235
Ειδική θερμική ενέργεια (kWh _{th} /m ² /year)	71,5	94,7	126,8	147,7
Ηλεκτρική Ενέργεια για Κάθε Τελική Χρήση				
Μόνιμες κατοικίες με ηλεκτρισμός	564.599	2.247.314	1.168.944	141.231
Συνολική ηλεκτρική ενέργεια (GWh _{el} /year)	2.337	10.247	4.441	601
Ειδική ηλεκτρική ενέργεια (kWh _{el} /m ² /year)	45,2	51,7	42,7	47,1

* Ο αριθμός κατοικιών συμπεριλαμβάνεται και στην πιο πάνω περίπτωση κατοικιών με πετρέλαιο και φυσικό αέριο για θέρμανση χώρων..

Στον Πίνακα 6.1.5 δίνεται η μέση ετήσια πραγματική κατανάλωση θερμικής ενέργειας ($\text{kWh/m}^2/\text{έτος}$) για τις κατοικίες που καταναλώνουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο (Πίνακας 6.1.4) και η οποία υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τη μέση επιφάνεια των κατοικιών ανά κλιματική ζώνη (Πίνακας 6.1.2), την κατανάλωση πετρελαίου και φυσικού αερίου στον οικιακό τομέα, εκτός αυτής για την παραγωγή (ZNX) και τη διακύμανση της θερμοκρασίας αέρα (βαθμομέρες θέρμανσης) κατά τη χειμερινή περίοδο ανά κλιματική ζώνη[45,161-162]. Στο ίδιο Πίνακα δίνεται και η μέση κατανάλωση θερμικής ενέργειας (kWh/m^2) για τις κατοικίες που καταναλώνουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο για τη θέρμανση χώρων και την παραγωγή ZNX ταυτόχρονα, ανά κλιματική ζώνη.

Αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα (Πίνακας 6.1.2) και την επιφάνεια των μόνιμων κατοικήσιμων κατοικιών (Πίνακας 6.1.2), εκτιμήθηκε η ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/m^2) ανά κλιματική ζώνη όπως δίνεται στον Πίνακα 6.1.5 [160]. Η μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις κατοικίες παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή στην κλιματική ζώνη Β και οφείλεται στα αυξημένα ψυκτικά φορτία των αστικών περιοχών στην Αττική, καθώς και στο υψηλό ποσοστό κατοικιών που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό για την παραγωγή ZNX (Πίνακας 6.1.5).

Παρόμοιες έρευνες που έχουν γίνει για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας ειδικής κατανάλωσης ενέργειας στον οικιακό τομέα, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα κατανάλωσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας Πίνακας 1.2.1 και Σχήμα 1.2.10, για τον οικιακό τομέα[164-167]. Τα κτίρια του τριτογενή τομέα παρουσιάζουν μεγαλύτερες ειδικές καταναλώσεις θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (Πίνακας 1.2.2) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εγκατάσταση Φ/Β να είναι ακόμα πιο προσοδοφόρα.



Σχήμα 6.1.1: Διάταξη συστημάτων Φ/Β εγκατάστασης για αυτόνομη ή μη λειτουργία

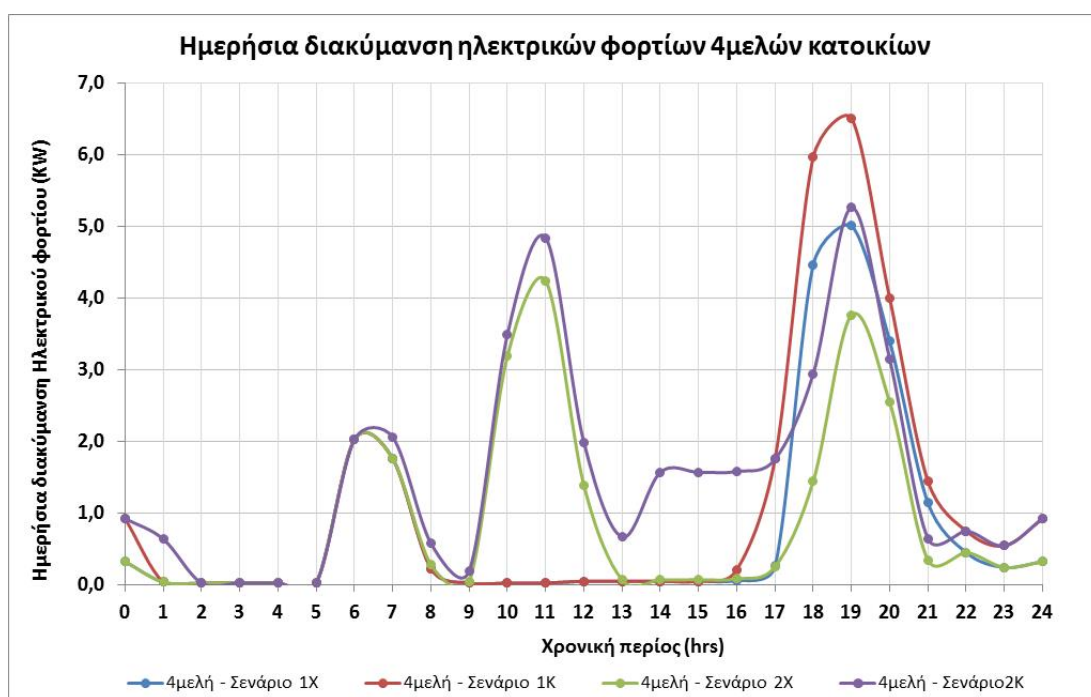
Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατανάλωσης ενέργειας συνήθως αποδίδεται μέσω των δεικτών εκπομπών ρύπων CO_2 και GHG που αντιστοιχούν στην πραγματική κατανάλωση ενέργειας και διαφοροποιούνται για τις διάφορες μορφές ενέργειας. Στην Ελλάδα την υψηλότερη τιμή καταλαμβάνουν οι εκλυόμενοι ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρισμού [156]. Οι εκπομπές CO_2eq που αφορούν την κατανάλωση θερμικής ενέργειας στα κτίρια είναι $0,264 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}_{\text{th}}$ όταν προέρχονται από τη καύση πετρελαίου και $0,196 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_{\text{th}}$ όταν προέρχονται από την καύση φυσικού αερίου[125]. Οι αντίστοιχοι δείκτες για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

διαφοροποιούνται και εξαρτώνται από τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο μίγμα καυσίμων της ηλεκτροπαραγωγής και το ποσοστό εισαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας[156-158]. Στην Ελλάδα το 2011 οι ρύποι από την κατανάλωση ηλεκτρισμού ανέρχονται σε 0,974 kgCO₂/kWh_{el}, το 2014 σε 0,817 kgCO₂/kWh_{el}, ενώ το 2015 μειώθηκαν περαιτέρω σε 0,699 kgCO₂/kWh_{el}.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στατιστικά δεδομένα[156-158], εκτιμήθηκε ότι κατά την περίοδο 1995 έως 2015, ο οικιακός τομέας κατανάλωσε κατά μέσο όρο για το 35% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε μέση ετήσια εκπομπή CO₂ περίπου 16,47 MtCO₂eq και μέση εκπομπή του συνόλου των ρύπων θερμοκηπίου GHG περίπου 16,53 MtCO₂eq (Σχήμα 6.1.1). Για την ίδια περίοδο ο οικιακός τομέας ευθύνεται κατά μέσο όρο για το 32% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης (θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας), το 22,3% των εκλυόμενων ρύπων CO₂ και το 19% του συνόλου των εκλυόμενων ρύπων GHG στην Ελλάδα, ποσοστά που αντιστοιχούν κατά μέσο όρο σε 23,98 MtCO₂eq εκλυόμενων ρύπων CO₂ και 24,19 MtCO₂eq εκλυόμενων ρύπων GHG (Σχήμα 6.1.1).

6.1.1. Ηλεκτρικά Φορτία Κτιρίων Κατοικιών

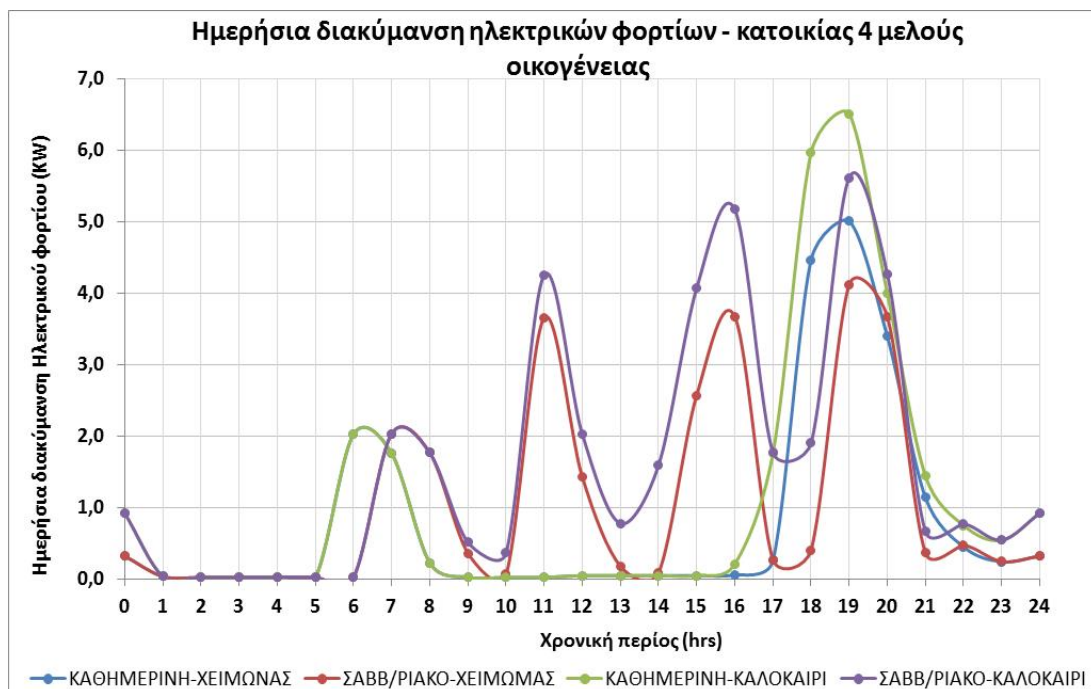
Τα ηλεκτρικά φορτία κτιρίων κατοικιών διαφοροποιούνται ανάλογα τον αριθμό, το είδος ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιούνται, την ισχύ τους και τη χρονική περίοδο λειτουργίας. Στον Πίνακα 6.1.6 δίνονται ενδεικτικές τιμές της ημερήσιας χρήσης ηλεκτρικών συσκευών μιας κατοικίας 4μελούς οικογένειας, με πλήρη ηλεκτρικό εξοπλισμό και κλιματισμό το καλοκαίρι.



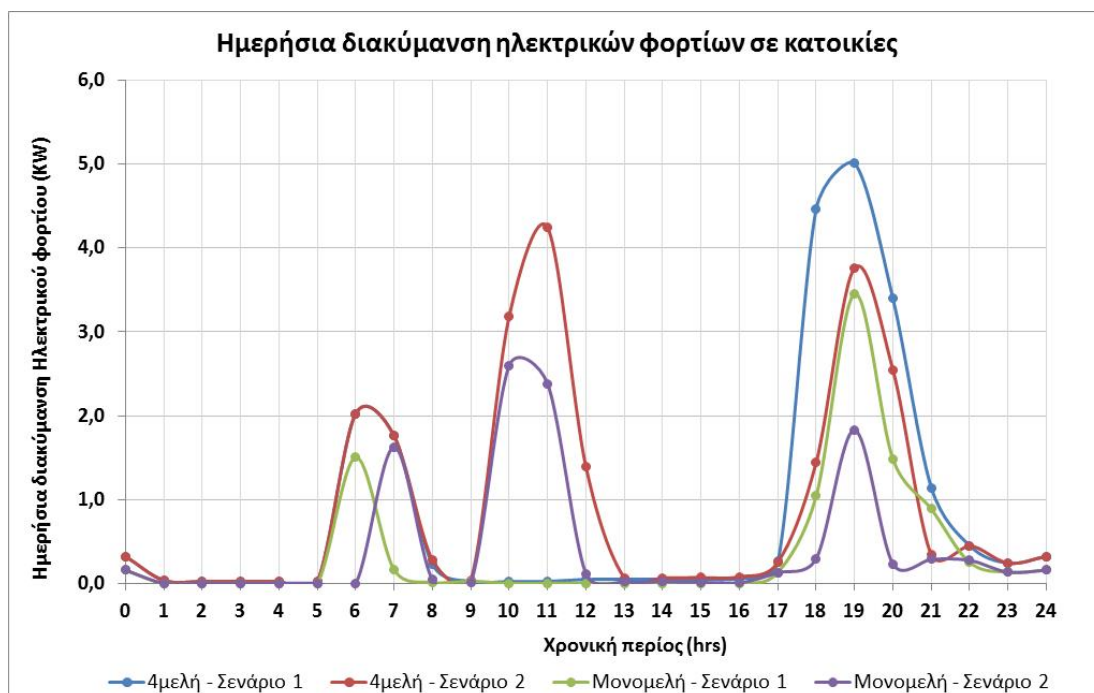
Σχήμα 6.1.2: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου σε 4-μελής κατοικίες, για δύο καθημερινές ημέρες το χειμώνα και το καλοκαίρι, με ή χωρίς παρουσία χρηστών κατά τη χρονική περίοδο 9:00 έως 16:00

Η διακύμανση της ηλεκτρικής ισχύος και της ηλεκτρικής ενέργειας που τελικά καταναλώνει μια κατοικία εξαρτάται καθαρά από τους χρήστες και ειδικότερα από τη συχνότητα χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών. Η κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στη διάρκεια της ημέρας διαφοροποιείται επίσης και από τις ώρες παραμονής των χρηστών μέσα στην κατοικία (εργαζόμενοι ή μη). Στο Σχήμα 6.1.2 απεικονίζεται η διακύμανση του ηλεκτρικού φορτίου για δύο κατοικίες με 4-μελείς οικογένειες, εργάσιμες ημέρες, που διαθέτουν τον εξοπλισμό του Πίνακα 6.1.6, με την ίδια ηλεκτρική ισχύ και διάρκεια λειτουργίας, αλλά με διαφορετικές ώρες

παραμονής στην κατοικία. Συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο (1) αφορά κατοικία χωρίς χρήστες από τις 9:00 το πρωί μέχρι τις 16:00 το απόγευμα, ενώ το δεύτερο σενάριο (2) αφορά κατοικία με συνεχή παραμονή χρηστών. Οι μεγάλες αιχμές των φορτίων αφορούν στο μαγείρεμα, στο ζεστό νερό και τα πλυντήρια ρούχων και πιάτων. Τους θερινούς μήνες το φορτίο επιβαρύνεται και από τη λειτουργία του κλιματιστικού.



Σχήμα 6.1.3: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου σε 4-μελής κατοικία, για καθημερινή μέρα, για Σαββατοκύριακο, χειμώνα και καλοκαίρι



Σχήμα 6.1.4: Ημερήσια διακύμανση ηλεκτρικού φορτίου για δύο 4-μελείς και δύο μονομελείς κατοικίες, για μια καθημερινή μέρα, με ή χωρίς παρουσία χρηστών κατά τη χρονική περίοδο 9:00 έως 16:00

Στο Σχήμα 6.1.3 απεικονίζονται συγκριτικά τέσσερα (4) σενάρια της ίδιας κατοικίας, με τον εξοπλισμό του Πίνακα 6.1.7 για μια καθημερινή ημέρα και μια ημέρα Σαββατοκύριακου, για δύο εποχές, χειμώνα και καλοκαίρι με κλιματιστικό σε λειτουργία. Η διαφοροποίηση της διακύμανσης του ηλεκτρικού φορτίου είναι σημαντική και είναι απαραίτητο να προσδιορίζεται σε περίπτωση μελέτης κάλυψης των ηλεκτρικών φορτίων. Ένα κομμάτι του φορτίου αιχμής από τις απογευματινές ώρες (17:00-20:00) των καθημερινών ημερών, έχει μεταφερθεί τις μεσημεριανές ώρες (11:00-13:00) του Σαββατοκύριακου. Τα φορτία αιχμής του Σαββατοκύριακου μοιράζονται σε δύο χρονικές περιόδους και είναι αυξημένα το καλοκαίρι λόγω κλιματισμού.

Επίσης, τα φορτία αιχμής κατοικιών με έναν χρήστη (εργαζόμενο και μη εργαζόμενο), όπου γίνεται χρήση λιγότερου ηλεκτρικού εξοπλισμού και κατά συνέπεια τα ηλεκτρικά φορτία (kW) είναι χαμηλότερα, εμφανίζονται με αντίστοιχες διακυμάνσεις του ημερήσιου φορτίου, όπως φαίνεται συγκριτικά στο Σχήμα 6.1.4, αλλά με χαμηλότερες τιμές ισχύος.

Πίνακας 6.1.6: Ηλεκτρικός εξοπλισμός 4-μελούς κατοικίας και ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση

Τύπος ηλεκτρικής συσκευής	Αριθμός μονάδων	Ισχύς ανά συσκευή (Watt)	Ημερήσια περίοδος λειτουργίας (hrs/day)		Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας (Wh/day)	
			Χειμώνα	Καλοκαίρι	Χειμώνα	Καλοκαίρι
Φωτισμός Κουζίνας	1	25	3,5	3,5	88	88
Φωτισμός Σαλονιού	1	25	7,1	7,1	178	178
Φωτισμός Υπνοδωματίου 1	1	25	6,6	6,6	165	165
Φωτισμός Υπνοδωματίου 2	1	25	5,6	5,6	140	140
Φωτισμός Υπνοδωματίου 3	1	25	3,4	3,4	85	85
Φωτισμός Γραφείου	1	25	1,7	1,7	43	43
Φωτισμός μπάνιου	1	11	3,6	3,6	40	40
Ψυγείο	1	250	3,3	3,3	825	825
Ηλεκτρική κουζίνα	1	1000	2,0	2,0	2000	2000
Ηλεκτρικός φούρνος	1	1500	0,5	0,5	750	750
Μίξερ	1	750	0,2	0,2	150	150
Φούρνος μικροκυμάτων	1	700	0,4	0,4	280	280
Καφετιέρα	1	500	0,5	0,5	250	250
Πλυντήριο πιάτων	1	1100	1,0	1,0	1100	1100
Πλυντήριο ρούχων	1	2500	2,0	2,0	5000	5000
Τηλεόραση	1	150	6,5	6,5	975	975
Υπολογιστής	1	200	2,0	2,0	400	400
Στέγνωμα μαλλιών	1	1200	0,3	0,3	360	360
Σίδερο ρούχων	1	1100	1,0	1,0	1100	1100
Κινητό τηλέφωνο	1	40	2,0	2,0	80	80
Φορτιστής μπαταρίας	1	40	2,0	2,0	80	80
Ραδιόφωνο	1	50	1,9	1,9	95	95
Ζεστό νερό Χρήσης	1	4000	1,4	1,4	5600	5600
Ανεμιστήρας οροφής	1	100	0,0	0,0	0	0
Αντλία θερμότητας	1	2500	0,0	2,3	0	6750
Συνολική ημερήσια κατανάλωση ενέργειας (Wh/day)					19.782,1	26.532,1

6.2. ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ

Η απαιτούμενη επιφάνεια των Φ/Β καθώς και ο αριθμός των Φ/Β, επιλέγεται βάσει της συνολικής ημερήσιας απαίτησης για ενέργεια του κτιρίου, την εποχική χρήση (ετήσια, θερινή ή χειμερινή), τον βαθμό απόδοσης των Φ/Β και τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή εγκατάστασης. Από το συνολικό αριθμό απαιτούμενων Φ/Β κυψελών και τον τρόπο σύνδεσης τους, υπολογίζονται οι καμπύλες (I-V), (P-V) και (η-V) της συνολικής διάταξης. Η τάση λειτουργίας επιλέγεται από την ισχύ των Φ/Β, όπου σε μικρής κλίμακας Φ/Β εγκαταστάσεις, για ισχύ εξόδου της Φ/Β εγκατάστασης μέχρι και 1 kW είναι συνήθως 24 Volt, ενώ για ισχύ εξόδου 2 kW είναι συνήθως 48 Volt, κ.λ.π.

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται και παραμετροποιείται η συνεισφορά των κρυσταλλικών Φ/Β στην κάλυψη των απαιτούμενων ηλεκτρικών φορτίων κατοικίας στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, προκειμένου για τη διαστασιολόγηση μιας εγκατάστασης Φ/Β για α) αυτόνομη λειτουργία και β) λειτουργία σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Προκειμένου για αξιολόγηση και διαστασιολόγηση ενός Φ/Β συστήματος, αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν όλες τις παράμετροι που απαιτούνται για ακριβείς υπολογισμούς, όπως η διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα (T_{air}), η αέρια μάζα (AM), η γωνία πρόσπτωσης (θ), η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια (G_s), ο συντελεστής $\tau_a(\theta)$, η ταχύτητα του ανέμου (v), κ.λ.π.

Ταυτόχρονα, θα πρέπει να προσδιοριστούν και όλες οι τεχνικές παράμετροι (τεχνικά χαρακτηριστικά) της Φ/Β εγκατάστασης, όπως ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β, του μετατροπέα, του ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος, οι απώλειες των καλωδιώσεων, κ.λ.π.

Τέλος προσδιορίζεται η αναμενόμενη διακύμανση του μέσου ημερήσιου φορτίου της υπό μελέτη κατοικίας. Η ηλεκτρική ενέργεια (kWh) που παράγεται από τα Φ/Β μπορεί να καλύπτει το σύνολο των αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών, σε περίπτωση αυτόνομου συστήματος Φ/Β ή μέρος αυτών, εφόσον υπάρχει και άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρικό δίκτυο, γεννήτρια κ.λ.π.).

6.2.1. Δεδομένα Μελέτης

Για τη διαστασιολόγηση της Φ/Β εγκατάστασης που θα καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες της κατοικίας, καθορίστηκαν οι ηλεκτρικές συσκευές και τα αντίστοιχα ημερήσια ηλεκτρικά φορτία, όπως δίνονται στον Πίνακα 6.2.1. Τα φορτία αυτά είναι αυξημένα, καθώς περιλαμβάνουν ηλεκτρικές καταναλώσεις όπως είναι το μαγείρεμα και το πλυντήριο ρούχων.

Πίνακας 6.2.1: Ηλεκτρικός εξοπλισμός κατοικίας και ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση

Είδος φορτίου	Ποσότητα είδους	Ισχύς ανά μονάδα (Watt)	Συνολική Ισχύ σε (Watt)	Ώρες λειτουργίας ανά ημέρα (hrs/day)	Συνολική κατανάλωση (Wh/day)	Χωρη/τητα συσσωρευτών (Ah/day)
Φωτισμός	15	25	375	3	1125	46,9
Ψυγείο	1	250	250	10	2500	104,2
Ηλεκτρική κουζίνα	1	1000	1000	1,5	1500	62,5
Φούρνος	1	1500	1500	1	1500	62,5
Πλυντήριο ρούχων	1	2500	2500	2,5	6250	260,4
Τηλεόραση	1	150	150	7	1050	43,8
Συσκευές μικρής ισχύος	1	300	300	1	300	12,5
Συσκευές μεγάλης ισχύος	1	1500	1500	1	1500	62,5
Σύνολο			7575		15725	655,2

Στον Πίνακα 6.2.1 εκτός από το τύπο συσκευών, την ηλεκτρική ισχύ ανά μονάδα συσκευής και τη συνολική ισχύ των ηλεκτρικών συσκευών (Watt), δίνεται επίσης ο εκτιμώμενος ημερήσιος χρόνος λειτουργίας των συσκευών, η εκτιμώμενη ημερήσια κατανάλωση (Wh/day) και η απαιτούμενη χωρητικότητα (Ah/day) συσσωρευτών σε περίπτωση αυτόνομου συστήματος Φ/Β.

Τα Φ/Β που θα καλύψουν τα ως άνω ηλεκτρικά φορτία θα τοποθετηθούν με νότιο προσανατολισμό και με βέλτιστη κλίση για κάθε περιοχή (κλίση μέγιστης αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας), χωρίς να δέχονται σκίαση από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια του περιβάλλοντα χώρου και δεν αλληλοσκιάζονται. Επιπλέον, για τη παρούσα μελέτη εφαρμογής ισχύουν τα εξής:

- Η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης και τελικής επιλογής της απαιτούμενης επιφάνειας των Φ/Β θα γίνει βάσει της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m²/day) για μια τυπική ημέρα κάθε μήνα, για κάθε περιοχή. Οι υπολογισμοί έγιναν βάσει της διακύμανσης των ωριαίων τιμών ηλιακής ενέργειας ανά περιοχή.
- Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β (συνθήκες STC) είναι 14%.
- Ο συντελεστής θερμοκρασίας των Φ/Β που επιλέχτηκε είναι: $\beta_{ref}=0,0060$.
- Ο συντελεστής Ross που επιλέγεται είναι $k=0,035$, για Φ/Β προστατευμένα από ανεμόπτωση. Στην πράξη αρκετές μονάδες Φ/Β τοποθετούνται σε στέγες και ο συντελεστής Ross είναι αρκετά μεγαλύτερος.
- Για τον υπολογισμό της μέσης πραγματικής απόδοσης (%) του Φ/Β για κάθε μήνα συνεκτιμήθηκε και η επίδραση της διακύμανσης της μέσης θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια της ημέρας για κάθε περιοχή, βάσει του συντελεστή θερμοκρασίας. Η ανάλυση της επίδρασης έγινε σε ωριαία βάση.
- Ο βαθμός απόδοσης του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος θεωρείται σταθερός και είναι 98 %.
- Η ενεργειακή απόδοση των μετατροπών (AC/DC) θεωρείται σταθερή και ίση με 97 %.
- Η ενεργειακή απόδοση των συσσωρευτών θεωρείται σταθερή και ίση με 98 %.
- Η ενεργειακή απόδοση (απώλειες αντίστασης) των καλωδίων θεωρείται ίση με 99 %.

6.2.2. Ηλιακή Ενέργεια προς Αξιοποίηση από Φ/Β

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση 3.2.2 για τον υπολογισμό της διακύμανσης των ωριαίων τιμών της αναμενόμενης ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες και τους αντίστοιχους συντελεστές του Πίνακα 3.2.4 (ηλιακή ενέργεια στη συλλεκτική επιφάνεια για βέλτιστη κλίση (β)), εκτιμήθηκε η μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που αναμένεται να αξιοποιηθεί τελικά από ένα κρυσταλλικό Φ/Β με βέλτιστη κλίση (β), για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές $H_{\beta}=S_{pv,total}$.

Βάσει των τιμών της τελικής προς αξιοποίηση μέση ετήσιας ηλιακής ενέργειας $S_{pv,total}$ (KWh/m²/yr), για τις Ελληνικές περιοχές, προέκυψε η αναλυτική Εξίσωση 6.2.1, η οποία υπολογίζει την $S_{pv,total}$, για βέλτιστη κλίση (β) των Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) και γεωγραφικό μήκος (L) της περιοχής, καθώς και το υψόμετρο (A σε m) της περιοχής.

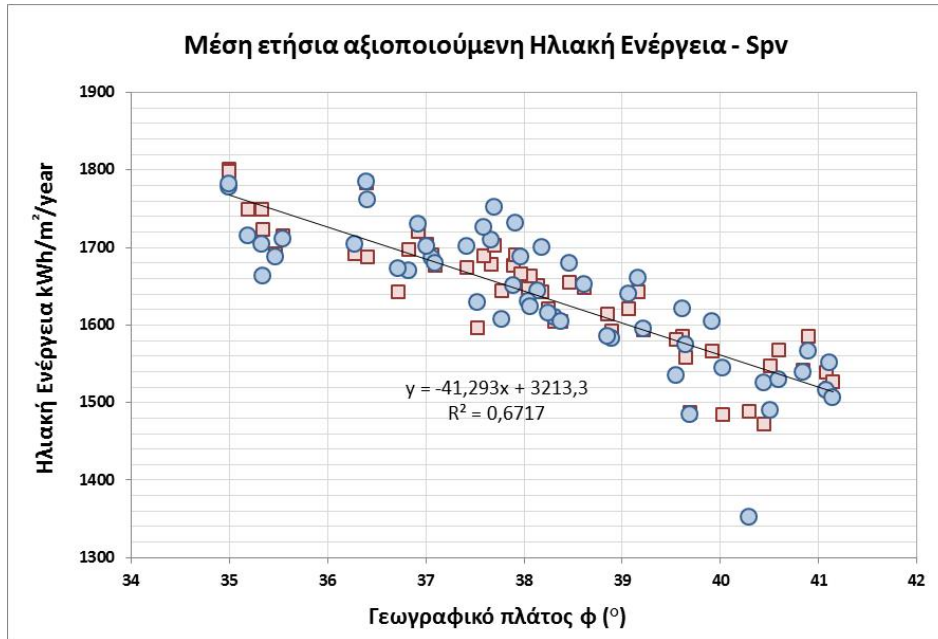
$$S_{pv,total} = 3031(\pm 153,8) + 27,3(\pm 6,5) \cdot \beta - 59(\pm 6) \cdot \varphi + 4,5(\pm 2,9) \cdot L - 0,15(\pm 0,035) \cdot A \quad (6.2.1)$$

με $R^2=0,83$

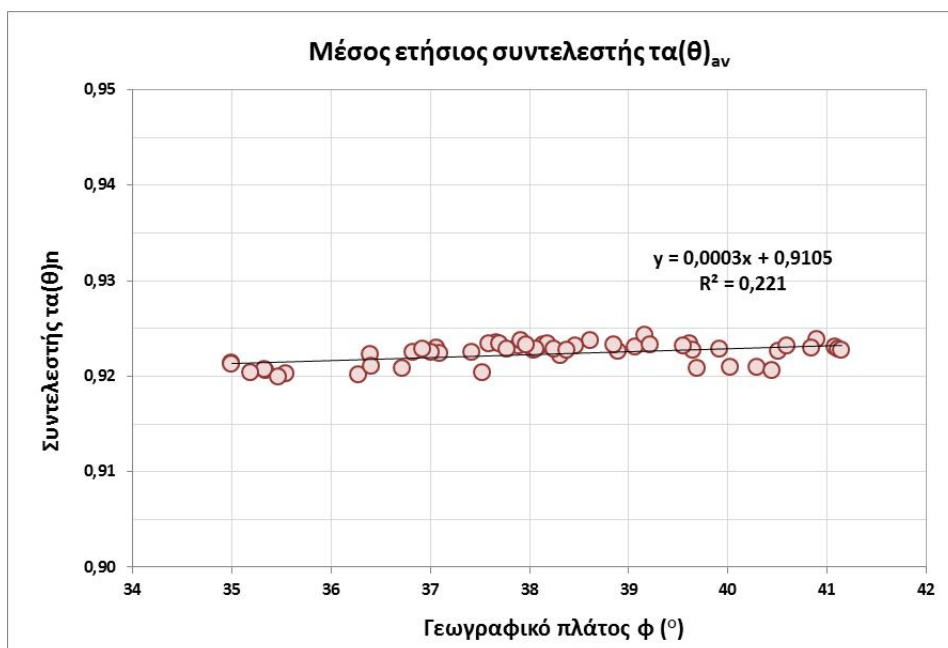
Από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων και τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι το γεωγραφικό πλάτος φ είναι η βασική παράμετρος που επηρεάζει την τιμή της τελικής αξιοποιούμενης μέσης αναμενόμενης ετήσιας ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες με $BETA= -1,17$, ακολουθεί η κλίση (β) της

κεκλιμένης επιφάνειας των Φ/Β με $BETA=0,49$, το υψόμετρο A με $BETA= -0,29$ ενώ το γεωγραφικό μήκος L με $BETA=0,1$ επηρεάζει σε πολύ μικρότερο βαθμό την τελική αξιοποιούμενη ηλιακή ενέργεια. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.1 είναι $\pm 37,8$ $KWh/m^2/yr$.

Στο Σχήμα 6.2.1 απεικονίζεται η διακύμανση της εκτιμώμενης αξιοποιούμενης ετήσιας ηλιακής ενέργειας $S_{pv,total}$ στην Φ/Β επιφάνεια, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , όπως προκύπτει από την Εξίσωση 6.2.1. Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.2.2 απεικονίζεται το ο μέσος ετήσιος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$, που αντιστοιχεί στον λόγο $S_{pv,total}/H_{\beta}$ για τα κρυσταλλικά Φ/Β με γυάλινο κάλυμμα.



Σχήμα 6.2.1: Μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια S_{pv} , σε επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστη κλίση (β), για τις Ελληνικές περιοχές γεωγραφικού πλάτους ϕ , από μετρήσεις (γαλάζιο χρώμα), από Εξίσωση 6.2.1 (ροζ χρώμα)

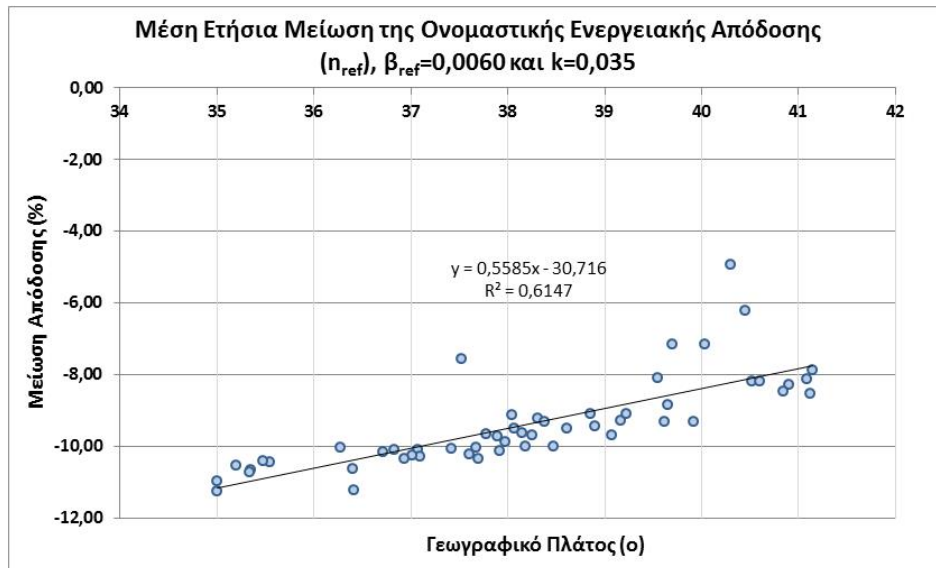


Σχήμα 6.2.2: Μέσος συντελεστής $\tau_a(\theta)_{av}$ για επιφάνειες Φ/Β με βέλτιστες κλίσεις (β), για τις Ελληνικές περιοχές, γεωγραφικού πλάτους ϕ (ανάλυση μετρήσεων)

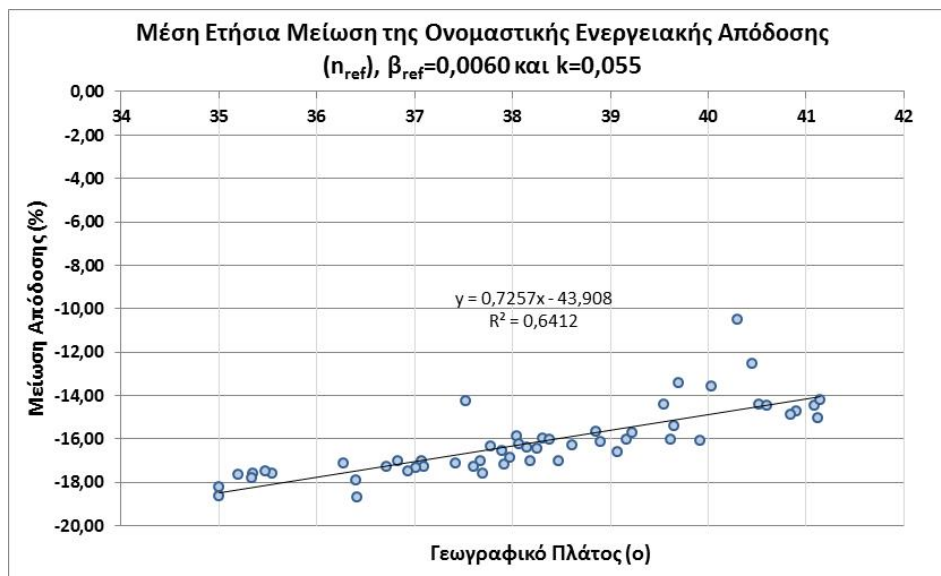
6.2.3. Ενεργειακή Απόδοση Φ/Β

Από τη μέση ωριαία θερμοκρασία του αέρα στη διάρκεια της ημέρας (ώρες ηλιοφάνειας) για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές με συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος (φ) και τη διακύμανση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας (G_T) υπολογίστηκε αρχικά η μέση ωριαία αναμενόμενη θερμοκρασία στην επιφάνεια των Φ/Β μέσω της Εξίσωσης 2.2.16, για συντελεστή Ross (k) 0,035:

$$T_{pv} = T_{air} + k \cdot G_T = T_{air} + 0,035 \cdot G_T \quad (\text{Εξίσωση 2.2.16})$$



Σχήμα 6.2.3: Μέση ετήσια διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασία του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για $\beta_{ref}=-0,006$ και **$k=0,035$**



Σχήμα 6.2.4: Μέση ετήσια διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασία του Φ/Β, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για $\beta_{ref}=-0,006$ και **$k=0,055$**

Στη συνέχεια από τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας των Φ/Β και του συντελεστή θερμοκρασία $\beta_{ref}=-0,0060$, υπολογίστηκε η μέση θεωρητική ποσοστιαία διακύμανση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} (Εξίσωση 2.2.21). Στο Σχήμα 6.2.3 απεικονίζεται η μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση (μείωση) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης στις διάφορες

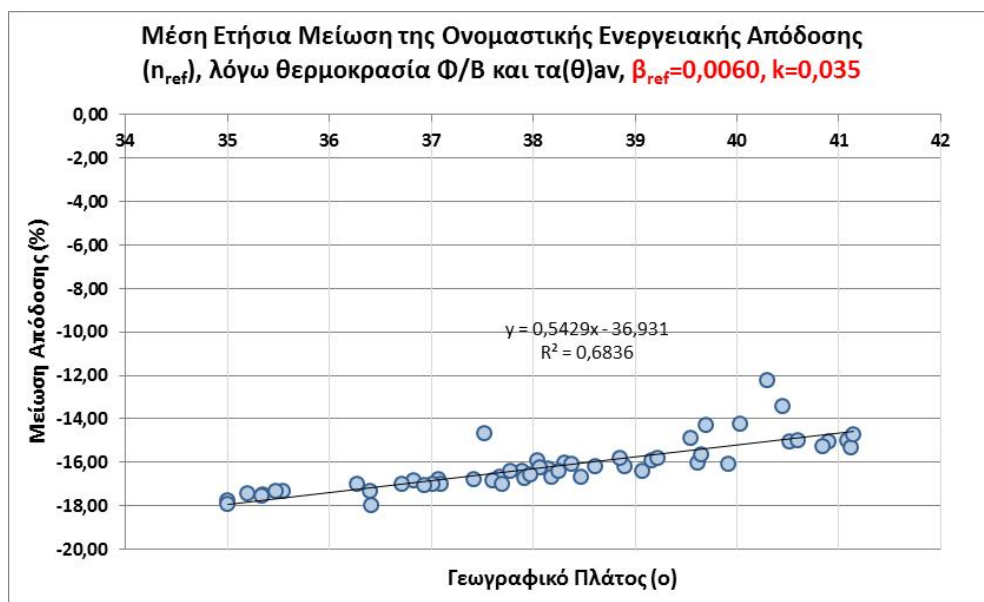
Ελληνικές περιοχές, όπως προέκυψε από την ωριαία ανάλυση των κλιματικών δεδομένων. Για τις νότιες περιοχές της Ελλάδας με υψηλές θερμοκρασίες, η μέση μηνιαία μείωση (%) της ενεργειακής απόδοσης λόγω της θερμοκρασίας υπερβαίνει και το 10%. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση Φ/Β με μεγαλύτερο συντελεστή Ross, π.χ. $k=0,055$ για ενσωματωμένα Φ/Β σε στέγες (Σχήμα 6.2.4).

Από την ανάλυση των διαθέσιμων κλιματικών δεδομένων και τις παραδοχές της παρούσας εφαρμογής προέκυψε η Εξίσωση 6.2.2, βάσει της οποίας υπολογίζεται η μέση μηνιαία (monthly, m_o) διακύμανση (%) της ονομαστικής απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}), λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειάς τους, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος (L), το υψόμετρο (A) και τη μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (T_{air}) κατά τις ώρες ηλιοφάνειας κάθε περιοχής, για κάθε μήνα του έτους.

$$\Delta n_{pv, Tpv, mo} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \phi + \alpha_3 \cdot L - \alpha_4 \cdot A + \alpha_5 \cdot T_{air} \quad (6.2.2)$$

Οι σταθεροί συντελεστές α_1 , α_2 , α_3 , α_4 και α_5 για κάθε μήνα, όπως υπολογίστηκαν από την ανάλυση των δεδομένων δίνονται στον Πίνακα 6.2.2. Για ορισμένες από τις μεταβλητές της Εξίσωσης 6.2.2, για κάποιους μήνες οι σταθεροί συντελεστές είναι μηδενικοί, λόγω μη επίδρασης τους στην τελική τιμή. Στον ίδιο πίνακα δίνονται οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού R^2 και των τυποποιημένων συντελεστών βήτα (BETA).

Η συνολική μείωση του βαθμού απόδοσης σχετίζεται κυρίως με τη θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β και με τον συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$. Εφόσον για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου (Εξίσωση 2.2.4 ή 2.2.25) χρησιμοποιηθεί η τελική αξιοποιούμενη ηλιακή ακτινοβολία $S_{pv, total}$, (Εξίσωση 6.2.1) στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β, τότε ο πραγματικός βαθμός απόδοσης θα είναι ο ονομαστικός του Φ/Β (n_{ref}) μειωμένος κατά το ποσοστό που αναλογεί στη θερμοκρασία του Φ/Β. Αν όμως ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου (P_{pv}) γίνει από την αρχική προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια του Φ/Β (H_B), τότε ο πραγματικός βαθμός που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι ο ονομαστικός (n_{ref}) μειωμένος λόγω της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του Φ/Β, καθώς και του συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$. Στο Σχήμα 6.2.5 δίνεται το συνολικό ετήσιο ποσοστό μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β.



Σχήμα 6.2.5: Μέσο ετήσιο ποσοστό (%) διακύμανσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης λόγω της θερμοκρασία του Φ/Β και συντελεστή $\tau_a(\theta)_{av}$, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), για $\beta_{ref}=-0,006$ και $k=0,035$

Πίνακας 6.2.2: Σταθεροί συντελεστές της Εξίσωσης 6.2.2, για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαία διακύμανσης (%) του ονομαστικού απόδοσης των Φ/Β (n_{ref}) λόγω της θερμοκρασίας της επιφάνειάς τους. Ισχύουν για $k=0,035$ και $\beta_{ref}=-0,006$

Σταθεροί συντελεστές						R ²
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	
ΙΑΝ	5,3	0,00	0,12	-0,0005	-0,75	0,91
ΦΕΒ	-34,4	0,80	0,13	0,0054	0,00	0,91
ΜΑΡ	-32,8	0,71	0,08	0,0040	0,00	0,91
ΑΠΡ	-26,4	0,56	-0,08	0,0043	0,00	0,93
ΜΑΙΟΣ	-24,5	0,36	-0,03	0,0047	0,00	0,84
ΙΟΥΝ	-21,3	0,19	-0,04	0,0034	0,00	0,76
ΙΟΥΛ	-22,1	0,16	-0,03	0,0032	0,00	0,72
ΑΥΓ	-26,5	0,24	0,02	0,0034	0,00	0,81
ΣΕΠΤ	-30,7	0,51	-0,08	0,0040	0,00	0,94
ΟΚΤ	-36,9	0,74	-0,01	0,0046	0,00	0,88
ΝΟΕΜ	11,1	0,00	-0,05	-0,0016	-0,91	0,96
ΔΕΚ	8,1	0,00	0,03	-0,0013	-0,77	0,96
Τυπικά σφάλματα σταθερών συντελεστών						
	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	Συνολικό
ΙΑΝ	1,1	0,00	0,05	0,0006	0,039	0,597
ΦΕΒ	2,2	0,05	0,04	0,0005	0,000	0,55
ΜΑΡ	2,0	0,04	0,04	0,0004	0,000	0,48
ΑΠΡ	1,6	0,03	0,03	0,0003	0,000	0,39
ΜΑΙΟΣ	2,1	0,04	0,04	0,0004	0,000	0,50
ΙΟΥΝ	1,8	0,04	0,03	0,0004	0,000	0,43
ΙΟΥΛ	1,8	0,04	0,03	0,0004	0,000	0,44
ΑΥΓ	1,5	0,03	0,03	0,0003	0,000	0,37
ΣΕΠΤ	1,4	0,03	0,03	0,0003	0,000	0,34
ΟΚΤ	2,5	0,05	0,05	0,0005	0,000	0,61
ΝΟΕΜ	0,9	0,00	0,03	0,0005	0,034	0,46
ΔΕΚ	0,8	0,00	0,03	0,0005	0,028	0,45
Τυποποιημένοι συντελεστές βήτα (ΒΕΤΑ) των σταθερών συντελεστών						
		α_2	α_3	α_4	α_5	
ΙΑΝ			0,12	-0,05	-1,016	
ΦΕΒ		0,78	0,14	0,51		
ΜΑΡ		0,81	0,11	0,44		
ΑΠΡ		0,68	-0,11	0,51		
ΜΑΙΟΣ		0,51	-0,04	0,65		
ΙΟΥΝ		0,38	-0,10	0,67		
ΙΟΥΛ		0,35	-0,06	0,69		
ΑΥΓ		0,51	0,05	0,68		
ΣΕΠΤ		0,67	-0,12	0,52		
ΟΚΤ		0,74	-0,01	0,45		
ΝΟΕΜ			-0,05	-0,13	-1,03	
ΔΕΚ			0,03	-0,11	-1,05	

Η συνολική μέση ετήσια διακύμανση (μείωση, %) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} , λόγω θερμοκρασίας Φ/Β και συντελεστή τα(θ)_{av}, για $\beta_{ref}=0,006$ και $k=0,035$, για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), το υψόμετρο (A) και τον μέσο ετήσιο συντελεστή αιθριότητας (k_t) κάθε περιοχής, σύμφωνα με την Εξίσωση 6.2.3.

$$\Delta n_{pv,annual} = -15,5(\pm 1,7) + 0,24(\pm 0,02) \cdot \varphi - 0,014(\pm 0,01) \cdot L + 0,0027(\pm 0,0002) \cdot A - 18,8(\pm 1,8) \cdot k_t \quad (6.2.3)$$

με $R^2=0,98$

Από τους τυποποιημένους συντελεστές BETA (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι το γεωγραφικό πλάτος (φ), το υψόμετρο (A σε m) και ο συντελεστής αιθριότητας (k_t) είναι οι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την τελική τιμή της ποσοστιαίας μείωσης (%) της απόδοσης (n_{ref}) με συντελεστές BETA 0,387, 0,427 και -0,399 αντίστοιχα, ενώ το γεωγραφικό μήκος L με BETA -0,025 επηρεάζει σε πολύ μικρότερο βαθμό την τελική τιμή. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.3 είναι $\pm 0,17$ % και οι τιμές των υπολοίπων -0,63% έως 0,28%.

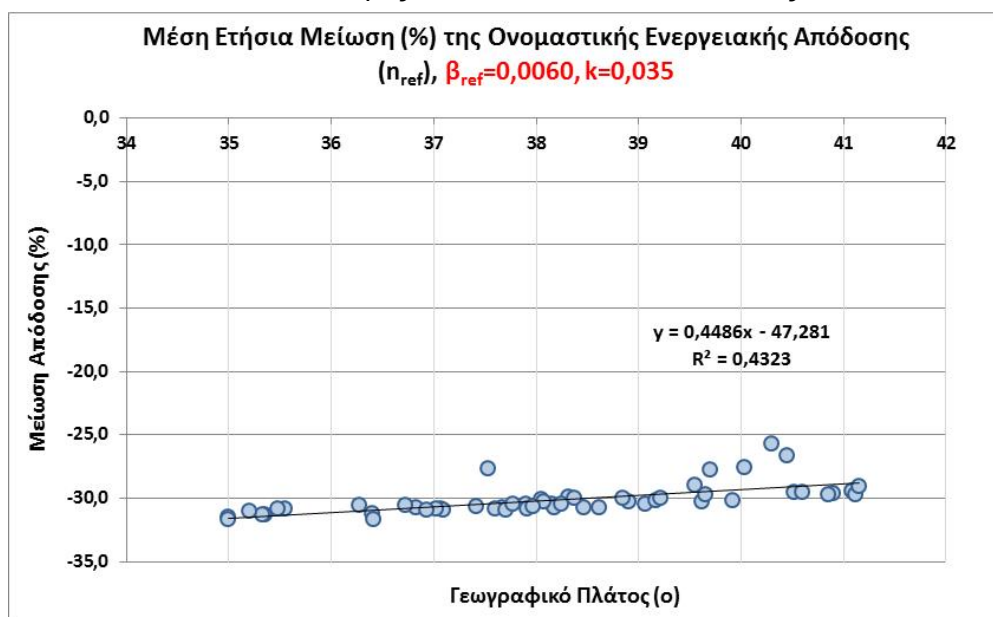
Ωστόσο όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 5.3, η θεωρητική προσέγγιση για τη μείωση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} (ενότητα 5.3.1) δίνει μικρότερες τιμές σε σχέση με την εμπειρική Εξίσωση που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις (ενότητα 5.3.2), με τη χρήση της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2. Η συνολική μέση ετήσια διακύμανση (μείωση, σε %) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} , όπως προκύπτει από την εμπειρική Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2, για $\beta_{ref}=-0,006$ και $k=0,035$, για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές μπορεί να υπολογιστεί σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), το γεωγραφικό μήκος (L), το υψόμετρο (A) και το μέσο ετήσιο συντελεστή αιθριότητας (k_t) κάθε περιοχής, σύμφωνα με την Εξίσωση 6.2.4.

$$\Delta n_{pv,annual,eq5} = -29,9(\pm 1,8) + 0,21(\pm 0,02) \cdot \varphi - 0,010(\pm 0,01) \cdot L + 0,0042(\pm 0,0002) \cdot A - 15,6(\pm 1,9) \cdot k_t$$

με $R^2=0,98$

(6.2.4)

Από τους τυποποιημένους συντελεστές BETA προκύπτει ότι το υψόμετρο (A σε m) είναι η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την τελική τιμή της ποσοστιαίας μείωσης (%) της απόδοσης (n_{ref}) με BETA=0,608, ακολουθούν το γεωγραφικό πλάτος (φ) και ο συντελεστής αιθριότητας (k_t) με συντελεστές BETA 0,317 και -0,304 αντίστοιχα, ενώ το γεωγραφικό μήκος L με BETA=-0,017 επηρεάζει σε πολύ μικρότερο βαθμό την τελική τιμή. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.4 είναι $\pm 0,16$ % και οι τιμές των υπολοίπων -0,567% έως 0,326%.



Σχήμα 6.2.6: Ποσοστό (%) μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης σύμφωνα με την Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ), για $\beta_{ref}=0,006$ και **$k=0,035$**

Στο Σχήμα 6.2.6 δίνεται το συνολικό ποσοστό μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εμπειρικής Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2. Σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση η μέση ετήσια μείωση (%) του ονομαστικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει από το εμπειρική Εξίσωση 5 είναι περίπου 1,7 έως 2,1 μεγαλύτερη.

6.2.4. Ελάχιστη Απαιτούμενη Επιφάνεια Φ/Β

Η απαιτούμενη επιφάνεια των Φ/Β προκύπτει από το ποσό των ηλεκτρικών φορτίων που πρόκειται να καλυφθούν. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης επιφάνειας Φ/Β για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις εγκατάστασης Φ/Β διαφοροποιείται ως ακολούθως:

α) προκειμένου για κατοικία με κάλυψη των ηλεκτρικών της αναγκών αποκλειστικά από Φ/Β εγκατάσταση (αυτόνομο σύστημα Φ/Β), επιλέγεται ως ελάχιστη επιφάνεια Φ/Β, η επιφάνεια που απαιτείται για την κάλυψη όλων των ηλεκτρικών φορτίων, για το μήνα με τη χαμηλότερη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Σε όλες τις Ελληνικές περιοχές, ο μήνας που προκύπτει με τη χαμηλότερη ηλιοφάνεια είναι ο Δεκέμβριος.

β) προκειμένου για κατοικία με Φ/Β εγκατάσταση σε σύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (πρόγραμμα συμψηφισμού), επιλέγεται η επιφάνεια Φ/Β ώστε η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το Φ/Β να είναι ίση ή μικρότερη με την ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της κατοικίας. Η περίσσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν συμψηφίζεται.

A. Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα

Από την ανάλυση των δεδομένων για τις Ελληνικές περιοχές υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια (A_{pv} , m^2) των Φ/Β προς το μέσο ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_d , kWh/day), δηλαδή ο λόγος (A_{pv}/L_d), ο οποίος υπολογίζεται σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_β , kWh/m²/yr) για βέλτιστη γωνία κλίσης (β), το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο (A , σε m) της κάθε περιοχής. Η απαιτούμενη επιφάνεια (A_{pv} , m^2) και ο λόγος (A_{pv}/L_d), υπολογίστηκε για δύο σενάρια:

α) το πρώτο βάσει της θεωρητικής προσέγγισης για μείωση της ονομαστικού βαθμού απόδοσης (Εξίσωση 6.2.3).

β) το δεύτερο για μείωση της ονομαστικού βαθμού απόδοσης όπως προέκυψε από τους αναλυτικούς υπολογισμούς βάσει της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2 και δίνεται σε ετήσια βάση από την Εξίσωση 6.2.4.

Πρώτο σενάριο: Η Εξίσωση 6.2.5 υπολογίζει τον λόγο A_{pv}/L_d συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών που αναφέρθηκαν, βάσει της θεωρητικής προσέγγισης:

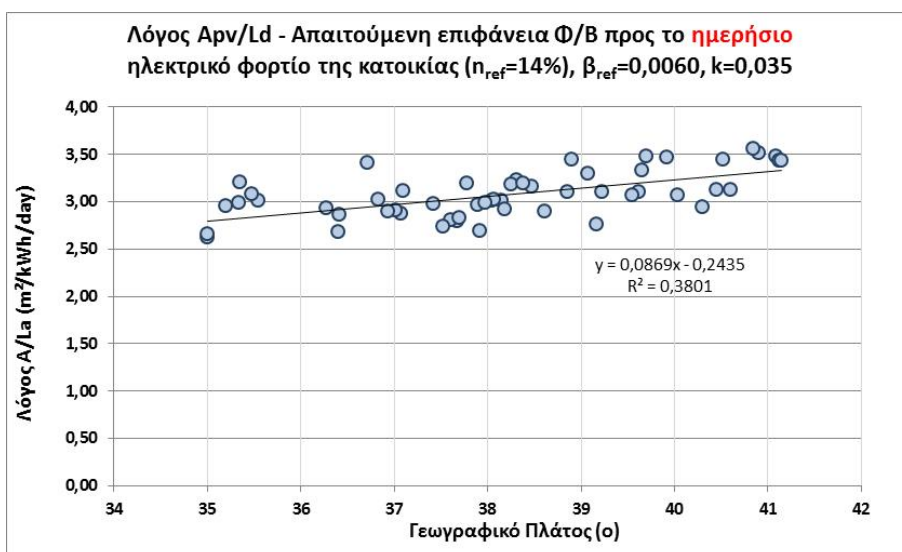
$$A_{pv} / L_d = 8,3(\pm 1,3) - 0,0029(\pm 0,0004) \cdot H_\beta - 0,02(\pm 0,02) \cdot \phi + 0,033(\pm 0,009) \cdot L - 0,0004(\pm 0,0001) \cdot A$$

με $R^2=0,76$ (6.2.5)

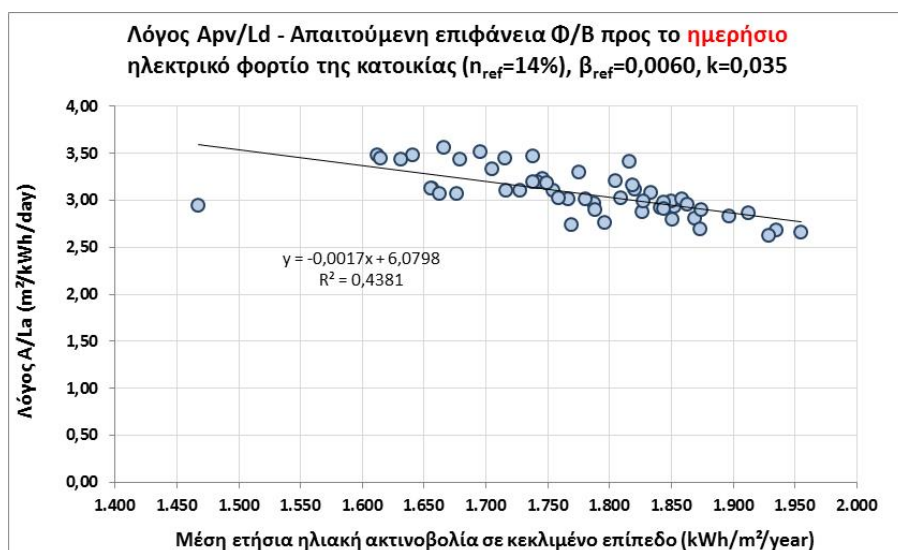
Από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την τελική τιμή το λόγου A_{pv}/L_d , με συντελεστές BETA -1,148, ενώ το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος L και το υψόμετρο (A σε m), με συντελεστές BETA -0,163, 0,270 και -0,271 που επηρεάζουν λιγότερο αλλά επίσης σημαντικά την τελική τιμή. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.5 είναι $\pm 0,12$ m²/(kWh/day) και οι τιμές των υπολοίπων κυμαίνονται από -0,31 έως 0,22 m²/(kWh/day).

Όσο μεγαλύτερο είναι το γεωγραφικό πλάτος, αυξάνεται και η απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων, ανάλογα πάντα και με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Στο Σχήμα 6.2.7 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_d) για κρυσταλλικό Φ/Β με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 14%, $\beta_{ref}=0,006$ και συντελεστή Ross, $k=0,035$, σε συνάρτηση με

το γεωγραφικό πλάτος ϕ των Ελληνικών περιοχών, για θεωρητική προσέγγιση της μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης η_{ref} . Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.2.8 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_d) , σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια με βέλτιστη κλίση (β) ανά περιοχή.



Σχήμα 6.2.7: Λόγος της απαιτούμενης επιφάνειας Φ/Β (A_{pv}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_d), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) των Ελληνικών περιοχών



Σχήμα 6.2.8: Λόγος της απαιτούμενης επιφάνειας Φ/Β (A_{pv}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_d), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_β)

Δεύτερο σενάριο: Η Εξίσωση 6.2.6 υπολογίζει τον λόγο A_{pv}/L_d συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών που αναφέρθηκαν, βάσει της εμπειρικής προσέγγισης υπολογισμού μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης:

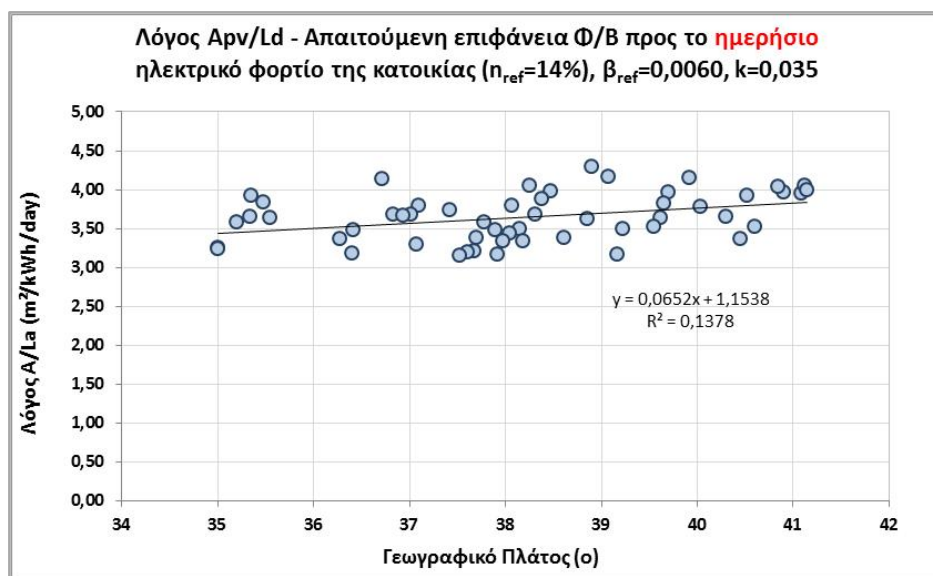
$$A_{pv} / L_d = 10,6 (\pm 1,9) - 0,0035 (\pm 0,0005) \cdot H_\beta - 0,06 (\pm 0,02) \cdot \phi + 0,062 (\pm 0,013) \cdot L - 0,0005 (\pm 0,0001) \cdot A$$

με $R^2=0,63$ (6.2.6)

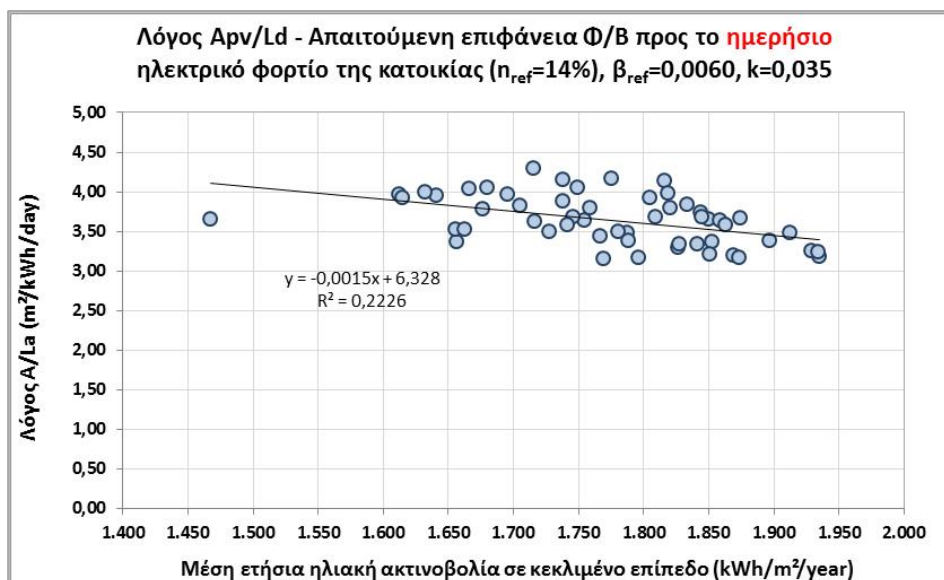
Από τους τυποποιημένους συντελεστές βήτα (standardized beta coefficients), προκύπτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την τελική τιμή του λόγου A_{pv}/L_d , με συντελεστές BETA -1,194, ενώ το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος L και

το υψόμετρο (A σε m), με συντελεστές BETA -0,353, 0,433 και -0,287 που επηρεάζουν λιγότερο αλλά επίσης σημαντικά την τελική τιμή. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.6 είναι $\pm 0,17 \text{ m}^2/(\text{kWh}/\text{day})$ και οι τιμές των υπολοίπων κυμαίνονται από -0,35 έως $0,34 \text{ m}^2/(\text{kWh}/\text{day})$.

Στο Σχήμα 6.2.9 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_d) για κρυσταλλικό Φ/Β με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 14%, $\beta_{ref}=0,006$ και συντελεστή Ross, $k=0,035$, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ των Ελληνικών περιοχών, για θεωρητική προσέγγιση της μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης n_{ref} . Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.2.10 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_d), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια με βέλτιστη κλίση (β) ανά περιοχή.



Σχήμα 6.2.9: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A_{pv}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_d), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) των Ελληνικών περιοχών, βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2



Σχήμα 6.2.10: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A_{pv}) προς το ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_d), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_β), βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2

Ο λόγος (A_{pv}/L_d) στην περίπτωση του δεύτερο σεναρίου, όπου εφαρμόζεται η εμπειρική Εξίσωση 5 του Πίνακα 4.6.2, αυξάνει καθώς η μείωση του ονομαστικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει είναι μεγαλύτερο, όπως ήδη αναφέρθηκε, στην παράγραφο 6.2.3.

Β. Φ/Β Συστήματα σε Σύνδεση με Τοπικό Δίκτυο (Συμψηφισμός)

Από την ανάλυση των δεδομένων για τις Ελληνικές περιοχές υπολογίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια (A_{pv} , m^2) των Φ/Β προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_a , MWh/yr), δηλαδή ο λόγος A_{pv}/L_a , ο οποίος υπολογίζεται σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_{β} , $kWh/m^2/yr$) για βέλτιστη γωνία κλίσης (β), το γεωγραφικό πλάτος (ϕ), το γεωγραφικό μήκος (L) και το υψόμετρο (A , σε m) της κάθε περιοχής. Η απαιτούμενη επιφάνεια (A_{pv} , m^2) και ο λόγος (A_{pv}/L_a), υπολογίστηκε για δύο σενάρια:

α) το πρώτο βάσει της θεωρητικής προσέγγισης για μείωση της ονομαστικού βαθμού απόδοσης (Εξίσωση 6.2.3).

β) το δεύτερο για μείωση της ονομαστικού βαθμού απόδοσης όπως προέκυψε από τους αναλυτικούς υπολογισμούς βάσει της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2 και δίνεται σε ετήσια βάση από την Εξίσωση 6.2.4.

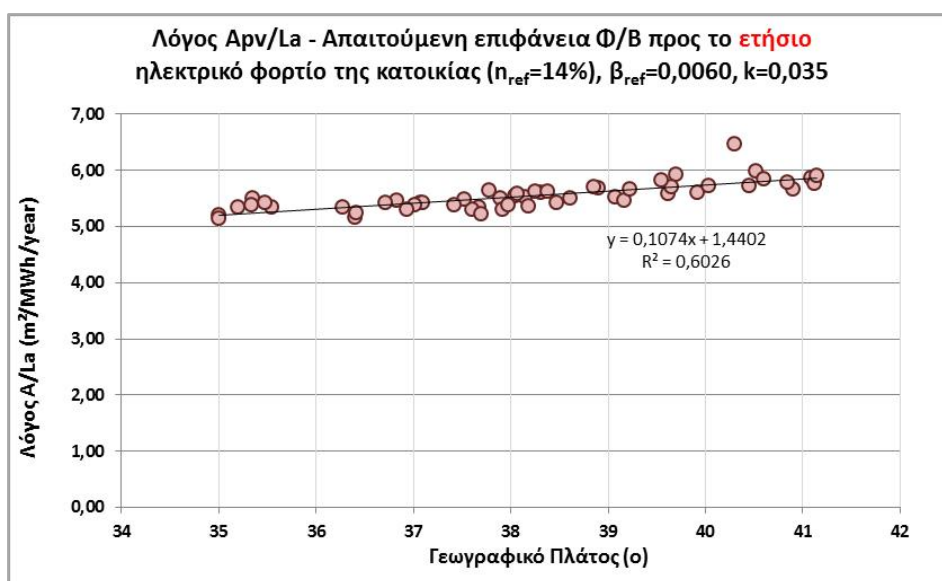
Πρώτο σενάριο: Η Εξίσωση 6.2.7 υπολογίζει τον λόγο A_{pv}/L_a συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών που αναφέρθηκαν, βάσει της θεωρητικής προσέγγισης:

$$A_{pv} / L_a = 11,5 (\pm 0,31) - 0,00296 (\pm 0,00009) \cdot H_{\beta} - 0,020 (\pm 0,004) \cdot \phi + 0,012 (\pm 0,002) \cdot L - 0,00012 (\pm 0,00003) \cdot A$$

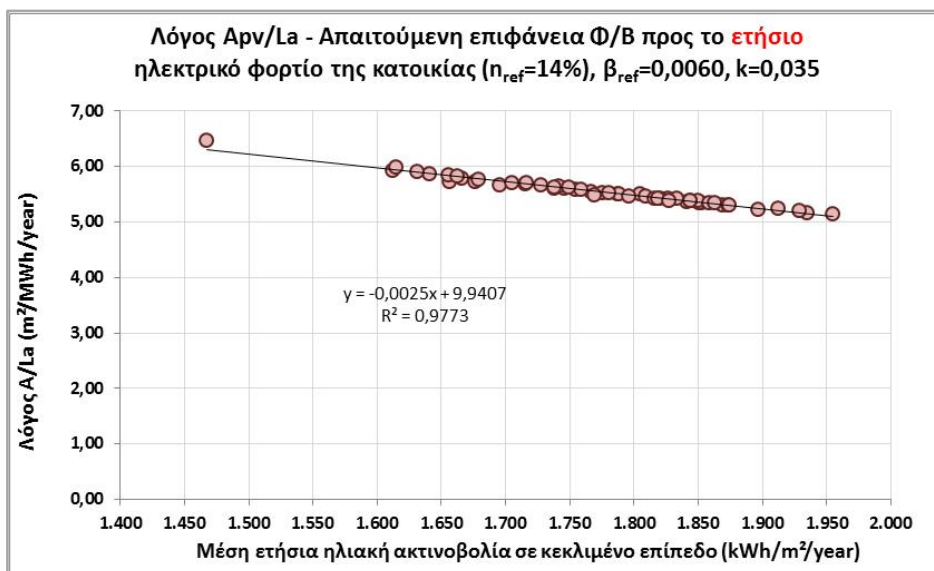
με $R^2=0,987$ (6.2.7)

Η παραπάνω Εξίσωση έχει πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης, γιατί η απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να καλυφθεί από το Φ/Β εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι και η πιο σημαντική ανεξάρτητη μεταβλητή με συντελεστή $BETA=-1,147$, ακολουθεί το γεωγραφικό πλάτος με $BETA=-0,141$, το υψόμετρο (A) με $BETA=-0,084$ και η λιγότερο σημαντική παράμετρος το γεωγραφικό πλάτος (L) με $BETA=0,010$. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.7 είναι $\pm 0,029 m^2/(MWh/year)$ και οι τιμές των υπολοίπων είναι $-0,04$ έως και $0,13 m^2/(kWh/day)$.

Στο Σχήμα 6.2.11 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_a) για κρυσταλλικό Φ/Β, με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 14%, $\beta_{ref}=0,006$ και συντελεστή Ross, $k=0,035$, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ των Ελληνικών περιοχών. Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.2.12 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_a) σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 6.2.11: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β (A_{pv}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_a), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) των Ελληνικών περιοχών



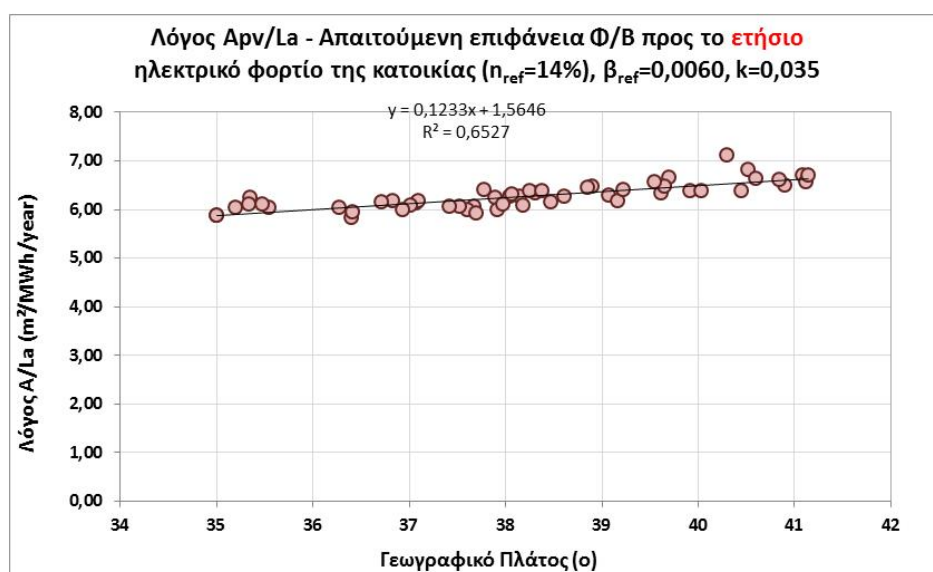
Σχήμα 6.2.12: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/B (A_{pv}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_a), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_β)

Δεύτερο σενάριο: Η Εξίσωση 6.2.8 υπολογίζει τον λόγο A_{pv}/L_a συναρτήσει των ανεξάρτητων μεταβλητών που αναφέρθηκαν, βάσει της εμπειρικής προσέγγισης υπολογισμού μείωσης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης:

$$A_{pv} / L_a = 13,0 (\pm 0,21) - 0,00337 (\pm 0,00006) \cdot H_\beta - 0,022 (\pm 0,003) \cdot \varphi + 0,004 (\pm 0,001) \cdot L - 0,00036 (\pm 0,00002) \cdot A$$

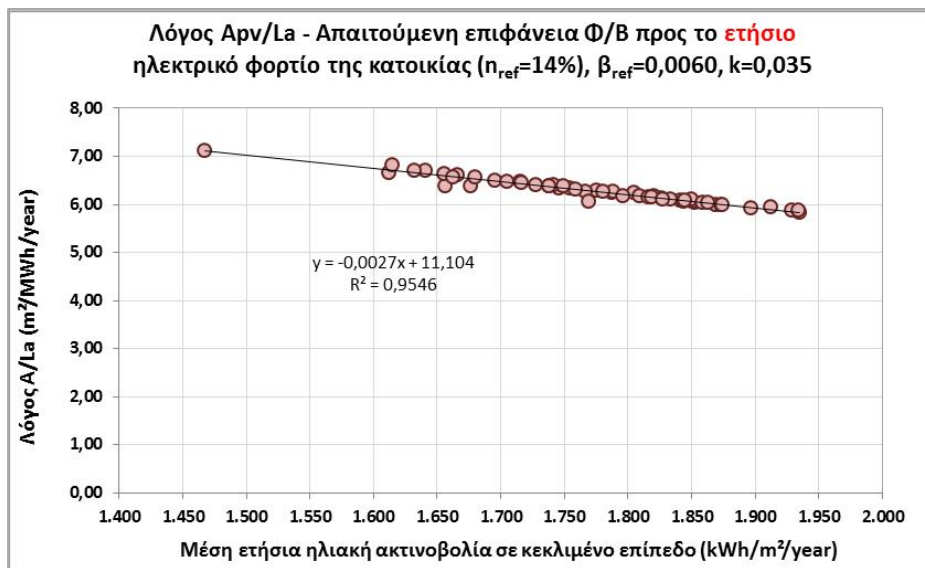
με $R^2=0,99$ (6.2.8)

Η παραπάνω Εξίσωση έχει πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης, γιατί η απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να καλυφθεί από το Φ/B εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια είναι και η πιο σημαντική ανεξάρτητη μεταβλητή με συντελεστή $BETA=-1,147$, ακολουθεί το γεωγραφικό πλάτος με $BETA=-0,141$, το υψόμετρο (A) με $BETA=-0,084$ και η λιγότερο σημαντική παράμετρος το γεωγραφικό μήκος (L) με $BETA=0,010$. Το τυπικό σφάλμα για την Εξίσωση 6.2.8 είναι $\pm 0,019 m^2/(MWh/year)$ και οι τιμές των υπολοίπων είναι $-0,04$ έως και $0,06 m^2/(kWh/day)$.



Σχήμα 6.2.13: Λόγος της απαιτούμενη επιφάνεια Φ/B (A_{pv}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_a), σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος (φ) των Ελληνικών περιοχών, βάσει Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2

Στο Σχήμα 6.2.13 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_a) για κρυσταλλικό Φ/Β, με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 14%, $\beta_{ref}=0,006$ και συντελεστή Ross, $k=0,035$, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος φ των Ελληνικών περιοχών. Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.2.14 απεικονίζεται η διακύμανση του λόγου (A_{pv}/L_a) σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο.



Σχήμα 6.2.14: Λόγος της απαιτούμενης επιφάνειας Φ/Β (A_{pv}) προς το ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο (L_a), σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο (H_{β}), βάσει της Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2

6.2.5. Οικονομοτεχνική Ανάλυση Επένδυσης

Το κόστος μιας Φ/Β εγκατάστασης διαμορφώνεται ανάλογα τον εξοπλισμό και κυρίως το σύστημα αποθήκευσης (εάν υπάρχει), στην περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας. Στην Ελλάδα το μέσος κόστος μιας μικρής οικιακής εγκατάστασης με Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου, συμπεριλαμβανομένου του κόστους σύνδεσης και εγκατάστασης, εκτιμάται σήμερα:

- α) για διασυνδεδεμένη μονάδα με το δίκτυο (συμψηφισμός) από 800 έως 1100 €/kW,
- β) για αυτόνομη λειτουργίας μονάδα με σύστημα αποθήκευσης (συσσωρευτές) από 2000 έως 4000 €/kW, ανάλογα τη χωρητικότητα των συσσωρευτών που θα επιλεγούν προκειμένου για αυτονομία 2 έως 4 ημερών.

Οι τιμές αυτές αφορούν πιστοποιημένα Φ/Β συστήματα και διαφοροποιούνται ανάλογα με τη χώρα προέλευσης, το βαθμό ενεργειακής απόδοσης και λοιπές τεχνικές παραμέτρους.

Ταυτόχρονα, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τον οικιακό τομέα είναι ενιαίο για όλες τις Ελληνικές περιοχές και συνήθως κυμαίνεται περίπου στα 0,17 ή 0,22 €/kWh, ανάλογα με την τετραμηνιαία κατανάλωση της κατοικίας. Ωστόσο, το κόστος παραγωγής στις διάφορες Ελληνικές περιοχές διαφοροποιείται σημαντικά, ανάλογα με τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (λιγνίτης ή φυσικό αέριο στην ηπειρωτική χώρα, πετρέλαιο στα νησιά, κ.λ.π.), την εποχή και την ώρα της ημέρας (φορτία αιχμής) και κυμαίνεται από 0,35 €/kWh_{el} έως 1,5 €/kWh_{el}, ή ακόμα και σε μεγαλύτερες τιμές σε μικρά νησιά.

Η οικονομική αξιολόγηση της εγκατάστασης Φ/Β έγινε με τη μεθοδολογία ανάλυσης Κόστους - Οφέλους. Υπολογίστηκε η καθαρή παρούσα αξία (Κ.Π.Α.) της επένδυσης αλλά και της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση πάντα με το κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού τοπικού δικτύου. Η αξιολόγηση έγινε βάσει του δείκτη κόστους

επένδυσης ανά μοναδιαία μείωση της απαιτούμενης συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες της κατοικίας. Ειδικότερα υπολογίστηκε η έντοκη περίοδος αποπληρωμής (απόσβεση - DPP)[167-169] της δαπάνης για την εγκατάσταση των Φ/Β, με τις εξής παραδοχές:

- ως κόστος επένδυσης λήφθηκε υπόψη μόνο το ιδιωτικό κεφάλαιο, δηλαδή το αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης. Δεν λήφθηκε υπόψη άλλο εξωτερικό κόστος, όπως το περιβαλλοντικό κόστος από την παραγωγή των Φ/Β, το κόστος επιπτώσεων υγείας κ.λ.π.
- η χρηματοδότηση έγινε με 100% με ίδια κεφάλαια.
- κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου έντοκης αποπληρωμής το κόστος συντήρησης θεωρήθηκε μηδενικό, για όλες τις Ελληνικές περιοχές.
- ως προεξοφλητικό επιτόκιο για την επένδυση θεωρήθηκε το 3% [167-169], το οποίο αντιπροσωπεύει ένα μέσο επιτόκιο σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό 244/2012.
- ως χρόνος ταμειακής ροής είναι τα 30 έτη [168-169], που αντιστοιχεί και σε ένα πραγματικό χρόνο ζωής των κρυσταλλικών Φ/Β.
- η ετήσια μέση αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε 0,5% [168-170].
- ως ποσοστό ετήσιας υποβάθμισης (degradation) της ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β θεωρήθηκε 0,5%. Σε περιοχές με αυξημένη υγρασία ή πολύ θερμό κλίμα, το ποσοστό υποβάθμισης της ενεργειακής απόδοσης είναι μεγαλύτερο.

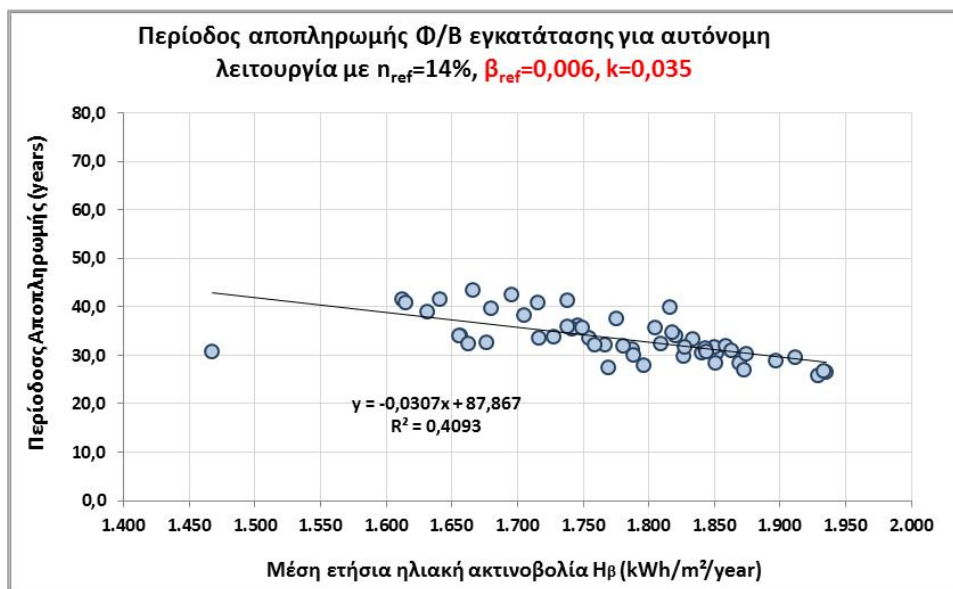
A. Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα

Ο προσδιορισμός της απαιτούμενης επιφάνειας Φ/Β μιας εγκατάστασης που λειτουργεί αυτόνομα με σύστημα αποθήκευσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την κάλυψη των ημερήσιων ηλεκτρικών αναγκών για διάστημα μεγαλύτερο των δύο ημερών, στην περίπτωση συνεχόμενων ημερών με νέφωση. Αυτό οδηγεί σε διαστασιολόγηση της Φ/Β εγκατάστασης με μεγαλύτερη επιφάνεια Φ/Β ή/και χωρητικότητα συσσωρευτών, σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε από τη χειρότερη ημέρα. Η περίσσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ακόμα και για τη χρήση αντλίας θερμότητας για το δροσισμό των χώρων του κτιρίου.

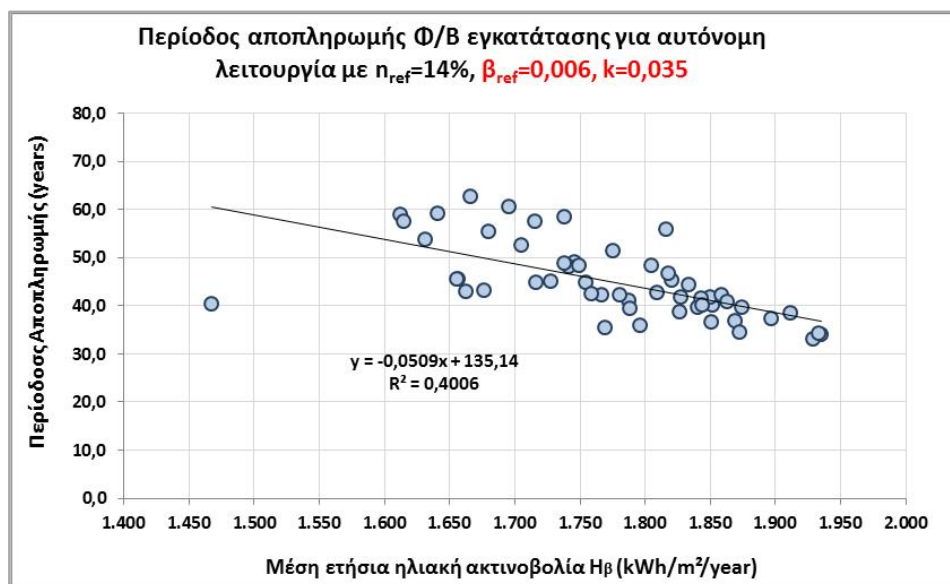
Το κόστος εγκατάσταση της Φ/Β μονάδας, συμπεριλαμβανομένου όλου του εξοπλισμού μετατροπής και αποθήκευσης (συσσωρευτές) ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε στα 2,5€/Watt, ενώ η περίοδος αποπληρωμής υπολογίστηκε για το χαμηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 0,17€/kWh. Παράλληλα θεωρήθηκαν δύο σενάρια αντικατάστασης συσσωρευτών κατά την περίοδο λειτουργίας των 30 ετών, με σημερινή παρούσα αξία, ανηγμένη στην ονομαστική ισχύ των Φ/Β, ίση με 0,50 €/Watt:

- α) στα 15 χρόνια, δηλαδή μία αντικατάσταση,
- β) στα 10 και 20 χρόνια, δηλαδή δύο αντικαταστάσεις.

Στα Σχήματα 6.2.15 και 6.2.16 απεικονίζεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της αυτόνομης εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία H_B , για τα σενάρια α) και β) αντικατάστασης των συσσωρευτών αντίστοιχα. Η περίοδος απόσβεσης των Φ/Β για τα αυτόνομα συστήματα διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ, τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης και άλλες τεχνικές παραμέτρους. Για τη συγκεκριμένη μελέτη η έντοκη περίοδος αποπληρωμής κυμαίνεται από 33 έως 63 χρόνια (για δύο αντικαταστάσεις συσσωρευτών) και 26 έως 44 χρόνια (για μία αντικατάσταση συσσωρευτών) και η οποία εξαρτάται από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία προς αξιοποίηση σε κάθε ελληνική περιοχή.



Σχήμα 6.2.15: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια Ηβ και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 15 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%



Σχήμα 6.2.16: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια Ηβ και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 10 και 20 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%

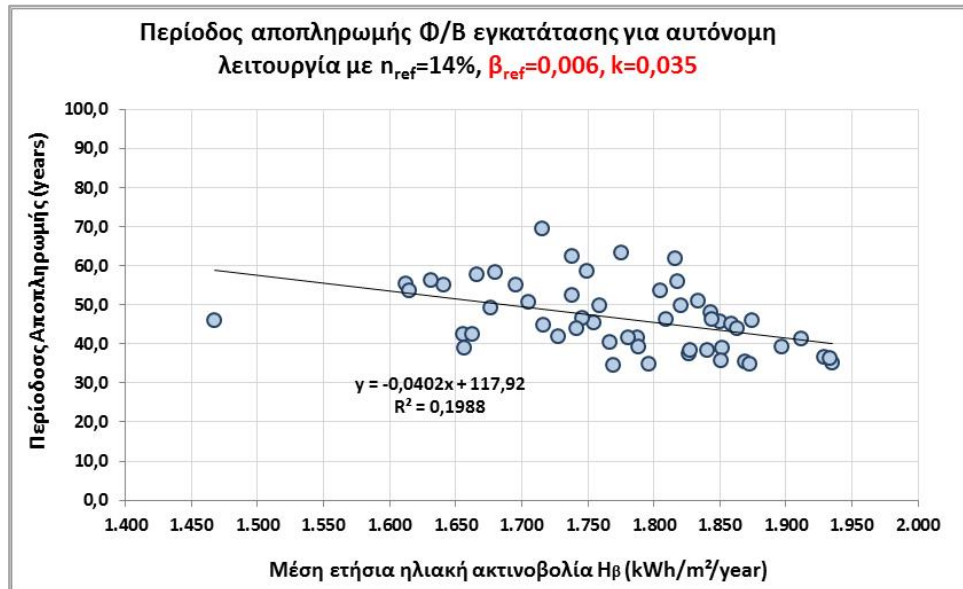
Επιπλέον, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της αυτόνομης εγκατάστασης Φ/Β, στην περίπτωση υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης βάσει τη εμπειρικής Εξίσωσης 5, του Πίνακα 4.6.2, ανέρχεται μεταξύ 35 και 70 χρόνια, στην περίπτωση μίας αντικατάστασης των συσσωρευτών στα 15 χρόνια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.17 σε συνάρτηση με τη μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία Ηβ (kWh/m²/yr) κάθε περιοχής. Αντίστοιχα για δύο αντικαταστάσεις των συσσωρευτών, στα 10 και 20 χρόνια, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής ανέρχεται από 45 έως και άνω των 110 χρόνων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.18.

Η χρηματοοικονομική ανάλυση για το Φ/Β σύστημα με αυτόνομη λειτουργία, έχει εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα στην περίπτωση που:

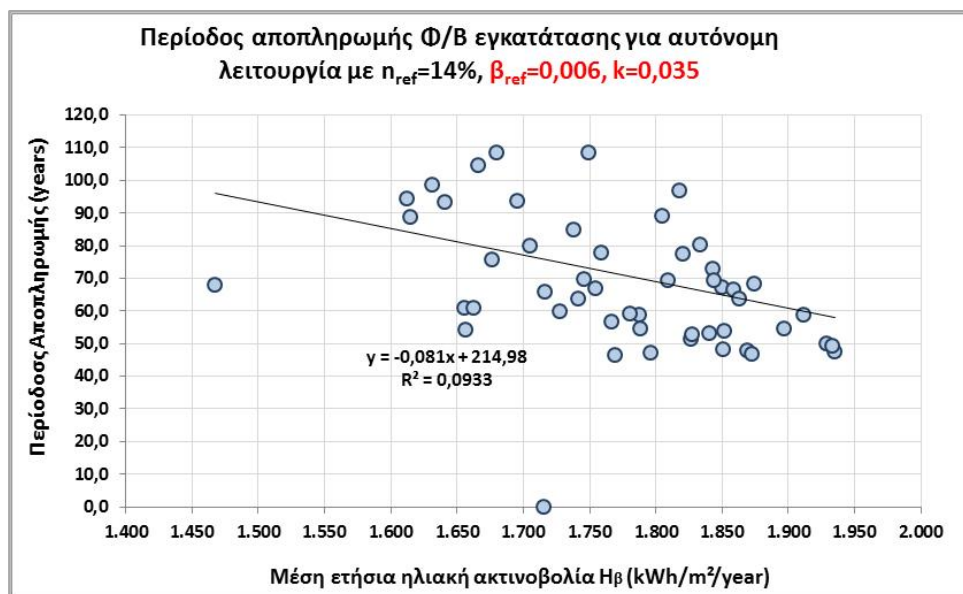
α) η επένδυση εξεταστεί σε σύγκριση με ένα εναλλακτικό σενάριο κάλυψης των ηλεκτρικών φορτίων, όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση ηλεκτρογεννήτριας, στην περίπτωση που δεν υπάρχει καθόλου ηλεκτροδότηση στο κτίριο.

β) εγκατασταθεί σύστημα δροσισμού/κλιματισμού των εσωτερικών χώρων, οπότε αυξάνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που αξιοποιείται κατά τους θερινούς μήνες, όπου τα Φ/Β παρουσιάζουν τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις περιπτώσεις αυτές η έντοκη περίοδος αποπληρωμής μπορεί να μειωθεί σημαντικά και η επένδυση να γίνει περισσότερο ελκυστική από οικονομικής απόψεως.



Σχήμα 6.2.17: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H_{β} και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 15 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2

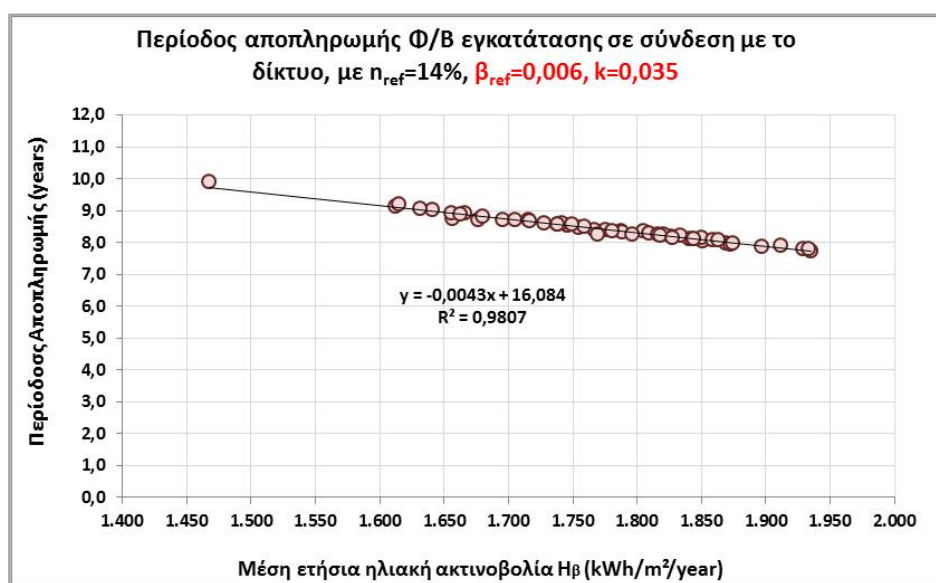


Σχήμα 6.2.18: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β σε συνάρτηση με την ηλιακή ενέργεια H_{β} και αντικατάσταση συσσωρευτών στα 10 και 20 χρόνια λειτουργίας, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2

Β. Φ/Β Συστήματα σε Σύνδεση με Τοπικό Δίκτυο

Στην περίπτωση κατοικίας που ηλεκτροδοτείται από το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, η εγκατάσταση Φ/Β για την κάλυψη μέρος ή του συνόλου των αναγκών σε ηλεκτρισμό, μπορεί να γίνει χωρίς τη χρήση συσσωρευτών, μέσω του προγράμματος συμψηφισμού. Ο συμψηφισμός ηλεκτρικής ενέργειας διενεργείται σε ετήσια βάση, σύμφωνα με την υπουργική απόφαση υπ' αριθμ. ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ. 24461 (ΦΕΚ Β' 3583/31.12.2014). Στην περίπτωση αυτή το κόστος εγκατάστασης Φ/Β υπολογίστηκε σε 1,0€/Watt καθώς δεν περιλαμβάνει συσσωρευτές, ενώ η έντοκη περίοδος αποπληρωμής έγινε για κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 0,10€/kWh, καθώς οι χρεώσεις δικτύων, ισχύος κ.λ.π., δεν συμψηφίζονται.

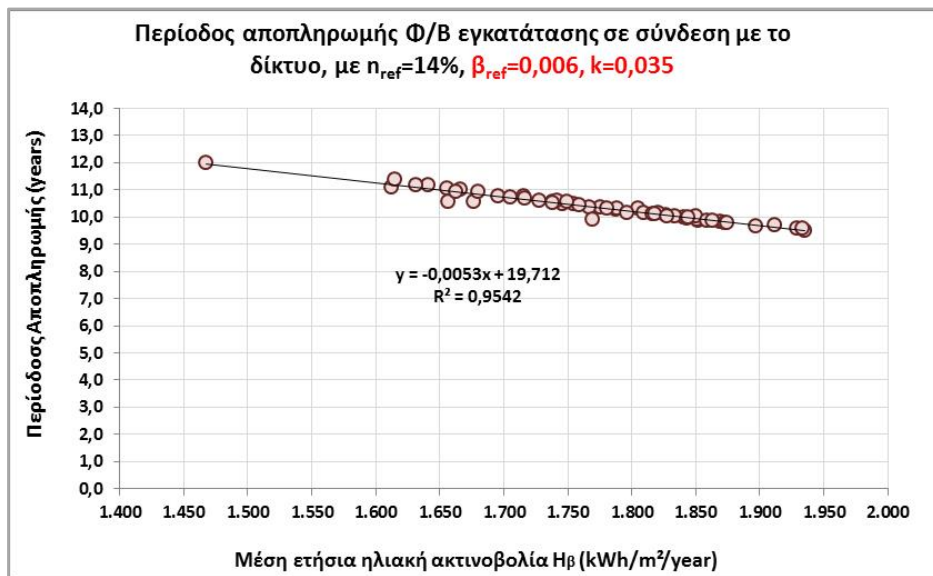
Στο Σχήμα 6.2.19 απεικονίζεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της Φ/Β εγκατάστασης σε σύνδεση με το δίκτυο, σε συνάρτηση με την ετήσια διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία H_{β} . Για τα Φ/Β που είναι διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής είναι κατά πολύ χαμηλότερη και κυμαίνεται από 8 έως 10 χρόνια, ανάλογα τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, καθιστώντας την επένδυση οικονομικά αποδοτική (βιώσιμη).



Σχήμα 6.2.19: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής των Φ/Β σε συνάρτηση με την τελική ηλιακή ενέργεια προς αξιοποίηση, για επιτόκιο 3%

Επιπλέον, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της εγκατάστασης Φ/Β, στην περίπτωση υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης βάσει τη εμπειρικής Εξίσωσης 5, του Πίνακα 4.6.2, ανέρχεται μεταξύ 9 και 12 χρόνια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.20. Στην περίπτωση εγκατάστασης Φ/Β σε σύνδεση με το δίκτυο, μέσω του προγράμματος συμψηφισμού, δεν διαφοροποιείται σημαντικά η έντοκη περίοδος αποπληρωμής, μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης και της προσέγγισης μέσω της εμπειρικής Εξίσωσης 5 του Πίνακα 4.6.2, γεγονός που επιβεβαιώνει και πάλι την οικονομική απόδοση της επένδυσης αυτής.

Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής που υπολογίστηκε στο πιο πάνω παράδειγμα, ισχύει για κάθε είδους επένδυση σε οποιαδήποτε κτιριακή εγκατάσταση, τόσο σε κτίρια κατοικιών όσο και κτίρια του τριτογενή τομέα (γραφεία, νοσοκομεία κ.λ.π.) καθώς το οικονομικό όφελος ανά kWh είναι ακριβώς το ίδιο, σύμφωνα με το ισχύον πρόγραμμα συμψηφισμού.



Σχήμα 6.2.20: Έντοκη περίοδος αποπληρωμής των Φ/Β σε συνάρτηση με την τελική ηλιακή ενέργεια προς αξιοποίηση, για επιτόκιο 3%, βάσει της Εξίσωσης 5, Πίνακας 4.6.2

6.3. ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ Φ/Β ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Μια πιο λεπτομερής οικονομοτεχνική ανάλυση, από αυτή που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό και το ενεργειακό κόστος για την κατασκευή των Φ/Β, καθώς και το περιβαλλοντικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα διαφοροποιούσε την έντοκη περίοδο αποπληρωμής, η οποία αναμένεται να έχει θετικό πρόσημο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα έχει ακόμα ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή πρωτογενούς ενέργειας (Σχήμα 1.2.6) και υψηλές τιμές εκλυόμενων ρύπων που επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η επιλογή χαμηλού προεξοφλητικού επιτοκίου 3% και 4% ή υψηλότερου 5% και 6%, όπως αναφέρονται στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό[168], ανάλογα με το βαθμό ασφάλειας που επιλέγεται να γίνει η εκτίμηση της οικονομικής αποδοτικότητας μιας Φ/Β επένδυσης, φαίνεται να παρουσιάζει μικρή αύξηση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής, για την περίπτωση Φ/Β σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ για το αυτόνομο σύστημα και ειδικά με την προσέγγιση μέσω της εμπειρικής Εξίσωσης 5, του Πίνακα 4.6.2, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής, αυξάνεται απαγορευτικά.

Τα αποτελέσματα της μελέτης της παραγράφου 6.2 μπορεί να χρησιμοποιηθούν επίσης και για τα **κτίρια του τριτογενή τομέα**, καθώς όλα τα δεδομένα, όπως το κόστος της εγκατάστασης, η απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β κ.λπ. είναι υπολογισμένα ανά μονάδα απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος (kW), η οποία διαμορφώνεται ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου που θέλουμε να καλύψουμε.

Για τα κτίρια του τριτογενή τομέα που διαθέτουν εμπορικά ή βιομηχανικά τιμολόγια ρεύματος (κυρίως μέσης τάσης), η επένδυση μιας Φ/Β εγκατάστασης μέσω συμψηφισμού είναι επίσης μια οικονομικά και ενεργειακά αποδοτική επένδυση. Αντίθετα η εγκατάσταση μιας Φ/Β μονάδας για αυτόνομη λειτουργία παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξημένη έντοκη περίοδο αποπληρωμής, ακόμα και για τα κτίρια του τριτογενή, καθιστώντας την επένδυση σε πολλές περιπτώσεις οικονομικά ασύμφορη. Ωστόσο, ακόμα και μια αυτόνομη Φ/Β μονάδα, στην περίπτωση μη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου, μπορεί να είναι η βέλτιστη επένδυση για την ηλεκτροδότηση ενός κτιρίου, σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο από ενεργειακής όσο και από οικονομικής απόψεως. Ειδικά σε περιοχές με πολύ υψηλές τιμές της ετήσιας διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας, η έντοκη περίοδος αποπληρωμής των 30 χρόνων (με μία αντικατάσταση των συσσωρευτών, Σχήμα 6.2.17), είναι κοντά στην ονομαστική διάρκεια ζωής των κρυσταλλικών Φ/Β. Στην πράξη πολλές κρυσταλλικές Φ/Β μονάδες λειτουργούν ακόμα και μετά από 50 χρόνια λειτουργίας, με την αναμενόμενη μείωση (υποβάθμιση) της ονομαστικής ενεργειακής απόδοσής τους.

Για τις Ελληνικές περιοχές, η εγκατάσταση Φ/Β μονάδων είναι μία ιδιαίτερα ενεργειακά αποδοτική επένδυση, κυρίως λόγω της υψηλής ηλιοφάνειας. Η συνεχής μείωση του κόστους αγοράς Φ/Β και η εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών θα συμβάλουν περαιτέρω και στην οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων, καθιστώντας τα ως ακόμα μία ανταγωνιστική τεχνολογία ΑΠΕ. Επιπλέον, η απλότητα της λειτουργίας τους (λόγω έλλειψης κινητών μερών), καθώς και η υψηλή προσδόκιμη διάρκεια ζωής τους, φαίνεται να συμβάλουν θετικά προς την κατεύθυνση αυτή.

Η εγκατάσταση Φ/Β σε κτίρια, μπορεί να συνεισφέρει στην ουσιαστική ενεργειακή τους αναβάθμιση σύμφωνα με τον ισχύοντα Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης και τα οριζόμενα στην οδηγία 31/2010[125,171], καθώς και τις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 27/2012[172], όπου οδηγούν στη μετατροπή των υφιστάμενων και σχεδιασμό των νέων κτιρίων σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης. Παρόλο που αρκετά από τα ηλεκτρικά φορτία ενός κτιρίου, τα οποία σχετίζονται με χρήσεις όπως το μαγείρεμα, το πλύσιμο, τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών και το φωτισμό (μόνο για κατοικίες), δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό

της ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακής κατάταξης ενός κτιρίου, η χρήση έστω και μικρής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β μειώνει σημαντικά την πρωτογενή ενέργεια ενός κτιρίου και βελτιώνει σημαντικά την ενεργειακή του κατάταξη.

Ειδικά τα κτίρια του τριτογενή τομέα που παρουσιάζουν υψηλά ηλεκτρικά φορτία και λειτουργούν κυρίως στη διάρκεια των ωρών ηλιοφάνειας (γραφεία, καταστήματα, σχολικά κτίρια), η χρήση Φ/Β για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ακόμα πιο ελκυστική επένδυση, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες λόγω κλιματισμού των χώρων.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διατριβή έχει ως στόχο την παραμετροποίηση / μοντελοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β για τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην Ελλάδα, μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων αναλυτικών εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες συσχετίζουν την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β με τα κλιματικά δεδομένα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Η ενεργειακή απόδοση των Φ/Β κατά τη λειτουργία τους σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι μια δυναμική κατάσταση, καθώς μεταβάλλεται συνεχώς στη διάρκεια της ημέρας, ενώ οι μεταβολές αυτές είναι ιδιαίτερα αισθητές τις ημέρες με έντονη ή μέτρια νέφωση. Ωστόσο, η πρόβλεψη του ηλιασμού μιας περιοχής, ακόμα και σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να γίνει με αρκετή ακρίβεια, δεδομένου της εξέλιξης της τεχνολογίας, όπως είναι οι δορυφορικές καταγραφές δεδομένων και τα υπολογιστικά μοντέλα πρόβλεψης και εξέλιξης των καιρικών συνθηκών.

Τόσο κατά τον σχεδιασμό (διαστασιολόγηση) όσο και κατά τη λειτουργία μιας Φ/Β μονάδας, είναι σημαντική η ακρίβεια της πρόβλεψης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου για την εκτίμηση της επαρκούς κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, για τις οποίες προορίζεται, καθώς και για την εκτίμηση της οικονομοτεχνικής βιωσιμότητας της επένδυσης μιας Φ/Β εγκατάστασης.

Η πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από τα Φ/Β σχετίζεται άμεσα με τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, καθώς και τη διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα μιας περιοχής. Οι μεγάλες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απόλυτη τιμή, αλλά ταυτόχρονα μειώνουν την ποσοστιαία ενεργειακή απόδοση τους, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία της επιφάνειάς τους. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας των Φ/Β επηρεάζεται άμεσα και από την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Η διακύμανση του βαθμού απόδοσης εξαρτάται και από άλλες γεωμετρικές παραμέτρους όπως είναι το γινόμενο της διαπερατότητας-απορροφητικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας από τα Φ/Β, καθώς, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται η τελική ποσότητα αυτής που φτάνει στη συλλεκτική επιφάνεια των Φ/Β προς αξιοποίηση.

Στην παρούσα διατριβή αρχικός στόχος ήταν η επεξεργασία των κλιματικών δεδομένων που διατέθηκαν από την ΕΜΥ για 60 Ελληνικές περιοχές, προκειμένου να προσδιοριστούν οι απαιτούμενες αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού:

- α) της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης ωριαίας διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα στις διάφορες Ελληνικές περιοχές, για συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες και υψόμετρα. Οι αναλυτικές σχέσεις υπολογίζουν την ωριαία διακύμανση της θερμοκρασίας του αέρα κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, δηλαδή 6:00 π.μ. με 19:00 μμ.
- β) της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες Ελληνικές περιοχές για συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες. Οι αναλυτικές σχέσεις υπολογίζουν τη μέση ωριαία διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, καθώς και σε κεκλιμένο επίπεδο, με βέλτιστη κλίση ανά γεωγραφική περιοχή, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις των μετρούμενων τιμών της ΕΜΥ και τη χρήση αναλυτικών σχέσεων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Παράλληλα γίνεται αναφορά σε εμπειρικά θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για δεδομένη χρονική στιγμή και για συγκεκριμένες συνθήκες αιθριότητας, από τη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και όπως προέκυψαν από την ανάλυση δεδομένων και μετρήσεων.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και να διερευνηθεί η εφαρμογή των υφιστάμενων από τη διεθνή βιβλιογραφία θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις δύο πειραματικών Φ/Β εγκαταστάσεων, που πληρούν τα πρότυπα δοκιμών. Η πρώτη πειραματική μονάδα είναι εγκατεστημένη στο χώρο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στην Πεντέλη και η δεύτερη στο Γαλλικό Κέντρο Ατομικής και

Εναλλακτικής Ενέργειας (CEA - Atomic Energy and Alternative Energy Commission of France) στο Κανταράς της Γαλλία, CEA-Cadarache. Οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης και της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου από τα Φ/Β που προέκυψαν από τις αναλύσεις των μετρήσεων (Πίνακες 4.6.2 και 4.6.3), επαληθεύτηκαν με πολύ καλή ακρίβεια, από τις μετρήσεις τεσσάρων ακόμα Φ/Β εγκαταστάσεων (εμπορικού σκοπού). Οι αναλυτικές σχέσεις περιλαμβάνουν ως ανεξάρτητες μεταβλητές, τα κλιματικά δεδομένα που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των Φ/Β, καθώς και τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των Φ/Β που δίνει ο κατασκευαστής υπό συνθήκες εργαστηρίου (STC).

Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, υπολογίστηκε η μέση ετήσια τιμή της ποσοστιαίας απόκλισης του πραγματικού βαθμού απόδοσης (%) των Φ/Β, σε λειτουργία υπό συνθήκες παρόμοιες με αυτές του εργαστηριακού ελέγχου (STC), σε σχέση με τον αναμενόμενο (Εξίσωση 2.2.21) και η οποία προέκυψε 18,1% για την Πεντέλη και 20,3% για το Κανταράς. Παράλληλα, η μέση ετήσια τιμή της ποσοστιαίας απόκλισης του πραγματικού βαθμού απόδοσης (%) των Φ/Β των πειραματικών μονάδων, σε σχέση με τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης η_{ref} των Φ/Β προέκυψε 22,8% για την Πεντέλη και 27,7% για το Κανταράς. Επιπλέον, υπολογίστηκε η μέση ετήσια τιμή της ποσοστιαίας απόκλισης της πραγματικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των Φ/Β, σε λειτουργία υπό συνθήκες παρόμοιες με αυτές του εργαστηριακού ελέγχου (STC), σε σχέση με την αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κατασκευαστή και η οποία προέκυψε 18,2% για την Πεντέλη και 20,3% για το Κανταράς.

Λαμβάνοντας υπόψη τις πιο πάνω αναλυτικές σχέσεις (Πίνακες 4.6.2 και 4.6.3) που διεξάχθηκαν για τον προσδιορισμό των ωριαίων κλιματικών δεδομένων, της ενεργειακής απόδοσης και ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των Φ/Β, αναπτύχθηκαν επιπλέον κατάλληλες αναλυτικές σχέσεις μοντελοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς των κρυσταλλικών Φ/Β, σε μηνιαία και ετήσια βάση, για τις κλιματικές συνθήκες των Ελληνικών περιοχών, λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β, όπως:

- α) ο συντελεστής θερμοκρασίας που δίνει ο κατασκευαστής,
- β) η γωνία κλίσης του Φ/Β ως προς το οριζόντιο επίπεδο της περιοχής,
- γ) ο προσανατολισμός της επιφάνειας τους,
- δ) η θέση εγκατάστασης τους, ελεύθερη εγκατάσταση χωρίς ανεμοπροστασία, ή ενσωματωμένα σε επιφάνειες, δώματα, κεκλιμένες στέγες κ.λ.π.,
- ε) την ύπαρξη τεχνητών ή φυσικών εμποδίων που περιορίζουν τον άμεσο ηλιασμό.

Με την εφαρμογή των εμπειρικών σχέσεων που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας διατριβής (Πίνακας 4.6.2), υπολογίστηκε η μέση ετήσια ποσοστιαία διακύμανση του πραγματικού βαθμού απόδοσης των κρυσταλλικών Φ/Β, στην περίπτωση εγκατάστασής τους στις Ελληνικές περιοχές, η οποία κυμαίνεται από 20% έως και 35% χαμηλότερα από τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης η_{ref} των Φ/Β, ανάλογα με την περιοχή (για σταθερή κλίση και προσανατολισμό Φ/Β) και με τον συντελεστή θερμοκρασίας. Αναλυτικά αποτελέσματα ανά περίπτωση και περιοχή παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ και αφορούν κρυσταλλικά Φ/Β με συνήθη τεχνικά χαρακτηριστικά.

Επιπλέον από τα πειραματικά δεδομένα και τα κλιματικά δεδομένα των Ελληνικών περιοχών, προσδιορίστηκαν διάφορες εμπειρικές αναλυτικές σχέσεις που υπολογίζουν μεταξύ άλλων:

- α) την τελική προς αξιοποίηση ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη συλλεκτική επιφάνεια ενός Φ/Β, σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια στη γυάλινη επιφάνεια των Φ/Β, σε συνάρτηση με το χρονική περίοδο, τους συντελεστές αιθριότητας, του συντελεστές διάχυτης ακτινοβολίας κ.λ.π.,

β) την επίδραση των διαφόρων επιμέρους παραμέτρων στην τελική ενεργειακή απόδοση των Φ/Β, όπως είναι η θερμοκρασία των Φ/Β, η γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, ο προσανατολισμός, η σκίασης από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια κ.λ.π.

Η παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται με μία μελέτη διαστασιολόγησης της εγκατάστασης κρυσταλλικών Φ/Β σε κτίρια, για τις διάφορες Ελληνικές περιοχές. Αρχικά έγινε επεξεργασία δεδομένων για τις καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας στις Ελληνικές κατοικίες και κτίρια του τριτογενή τομέα. Στη συνέχεια μελετήθηκε η περίπτωση αυτόνομης λειτουργίας των Φ/Β, καθώς και η περίπτωση σύνδεσής τους με το ηλεκτρικό δίκτυο (περίπτωση συμψηφισμού). Βάσει των κλιματικών δεδομένων των Ελληνικών περιοχών, προσδιορίστηκε η απαιτούμενη επιφάνεια Φ/Β για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των κτιρίων για κάθε ελληνική περιοχή, για συγκεκριμένα, αλλά συνήθη τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την οικονομοτεχνική αξιολόγηση της επένδυσης, μέσω της οποίας υπολογίστηκε η έντοκη περίοδος αποπληρωμής. Η χρήση Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις είναι μια οικονομικά βιώσιμη επένδυση για τις ελληνικές περιοχές, ειδικά όσον αφορά την περίπτωση συμψηφισμού ενέργειας, σε σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς το κόστος των Φ/Β στην Ελλάδα έχει περιοριστεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ενώ το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς. Αντίθετα, η χρήση Φ/Β συστήματος αυτόνομης λειτουργίας (μοναδική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας) σε κτίρια δεν είναι μια ελκυστική επένδυση, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους συσσωρευτών και λοιπού εξοπλισμού. Ωστόσο, στην περίπτωση κτιρίων απομακρυσμένων από το ηλεκτρικό δίκτυο, η επένδυση αυτή, σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις γίνεται οικονομικά ελκυστική.

Συμβολή της Διατριβής

Η χρήση κάθε μορφής τεχνολογίας ΑΠΕ στην χώρα μας είναι πλέον επιτακτική ανάγκη, καθώς οι σχετικές Ευρωπαϊκές Οδηγίες ορίζουν συγκεκριμένους στόχους και δράσεις, όπως:

- α) η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/28/ΕΚ για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Για την Ελλάδα ο στόχος που πρέπει να επιτευχθεί μέχρι το 2020 είναι το μερίδιο των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια ενέργεια να είναι 18% (από 6,9% το 2005), ενώ το νέο πλαίσιο του 2030 για το κλίμα και την ενέργεια της Ευρωπαϊκής Επιτροπής θέτει αυστηρότερα όρια. Το 2016 στην Ελλάδα η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ έφτασε μόλις το 10,9% (2,64 Mtoe) της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης (24,14 Mtoe), αρκετά μακριά από τους στόχους μας.
- β) η Ευρωπαϊκή Οδηγία 31/2010 για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων, βάσει της οποίας θα πρέπει να προωθηθούν και στη χώρα μας τα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης, δηλαδή κτίρια όπου οι ενεργειακές τους ανάγκες θα πρέπει να καλύπτονται σε μεγάλο ποσοστό από ΑΠΕ, στο βαθμό που αυτό είναι ενεργειακά και οικονομοτεχνικά αποδοτικό.
- γ) η Ευρωπαϊκή Οδηγία 27/2012 για την ενεργειακή απόδοση, βάσει της οποίας θα πρέπει να αναβαθμίζεται ενεργειακά ετησίως το 3% της επιφάνειας των δημοσίων κτιρίων. Επίσης επιβάλλεται και η διαδικασία των ενεργειακών ελέγχων, μέσω των οποίων αποτυπώνεται η πραγματική κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων.

Για την επίτευξη των εθνικών στόχων απαιτείται ακρίβεια υπολογισμών για την αξιολόγηση του ενεργειακού και οικονομικού οφέλους εφαρμογής των ΑΠΕ.

Επιπλέον η απελευθέρωση της παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα, δημιούργησε την ανάγκη εκτίμησης του κόστους αγοράς της παραγόμενης kWh η οποία εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα της παραγόμενης ενέργειας όσο και από τη διακύμανση της ημερήσιας ζήτησης ενέργειας. Το χρηματιστήριο ενέργειας επιβάλλει πλέον ακριβείς υπολογισμούς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, τόσο από τις συμβατικές όσο και τις εγκαταστάσεις Φ/Β, Α/Γ και λοιπών συστημάτων ΑΠΕ.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, αφορούν την ανάπτυξη αναλυτικών σχέσεων (μοντελοποίησης) του προσδιορισμού της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος και της απόκλιση αυτής από τη θεωρητικά αναμενόμενη ή τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης των Φ/Β, βάσει των θεμελιωδών θεωρητικών μοντέλων υπολογισμού. Μέσω των πειραματικών μετρήσεων προσδιορίστηκε η απόκλιση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης των Φ/Β σε σχέση με την αναμενόμενη σε συνάρτηση και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής και των κλιματικών συνθηκών δεδομένης χρονικής περιόδου. Οι αναλυτικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, από τις μετρήσεις των πειραματικών μονάδων, μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά:

- α) στην ορθή και ακριβή διαστασιολόγηση μιας Φ/Β εγκατάστασης κατά τη φάση σχεδιασμού της, υπολογίζοντας ακόμα και σε ωριαίο επίπεδο την αναμενόμενη μέση πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, την απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών κ.λ.π. Κατά τους υπολογισμούς λαμβάνονται υπόψη τα κλιματικά δεδομένα κάθε περιοχής, όπως προκύπτουν από τις αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις σε ωριαία βάση, καθώς και η επίδραση αυτών για τον προσδιορισμό της πραγματικής ενεργειακής τους απόδοσης, σε συνάρτηση πάντα και με τα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά των Φ/Β, (ενεργειακή απόδοση, ισχύς εξόδου, συντελεστής θερμοκρασίας κ.λ.π.). Η ακριβής διαστασιολόγηση είναι απαραίτητη ειδικά σε περιπτώσεις αυτόνομων Φ/Β συστημάτων για την κάλυψη των απαιτούμενων ηλεκτρικών φορτίων σε κτίρια και άλλες υποδομές με ανάγκες ηλεκτροδότησης.
- β) στον υπολογισμό της οικονομοτεχνικής βιωσιμότητας και της ενεργειακής συμβολής των Φ/Β συστημάτων στον σχεδιασμό νέων ή την μετατροπή υφιστάμενων κτιρίων, σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης στην Ελλάδα, σύμφωνα με την οδηγία 31/2010. Η δυνατότητα ωριαίας ανάλυσης και εκτίμησης της αναμενόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα κρυσταλλικά Φ/Β στις ελληνικές περιοχές, με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων, μπορεί να παρέχει ακριβείς υπολογισμούς για τη διαστασιολόγηση και κυρίως την οικονομοτεχνική αξιολόγηση μιας Φ/Β εγκατάστασης σε κτίρια κάθε χρήσης.
- γ) στην εκτίμηση / πρόβλεψη της αναμενόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας μιας Φ/Β εγκατάστασης (με καθορισμένα ονομαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά) ηλεκτροπαραγωγής, ανάλογα με τη περιοχή εγκατάστασή τους, λαμβάνοντας υπόψη την πρόβλεψη της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή καθώς και των λοιπών κλιματικών συνθηκών. Η πρόβλεψη των επιμέρους κλιματικών συνθηκών γίνεται σήμερα με μεγάλη ακρίβεια, με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων, καθώς και των δορυφορικών δεδομένων και παρατηρήσεων.

Παράλληλα οι αναλυτικές σχέσεις (εμπειρικά μοντέλα) υπολογισμού της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο (βέλτιστη γωνία κλίσης ανά γεωγραφική περιοχή), της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας του αέρα, που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής, καθώς και των αναλυτικών σχέσεων υπολογισμού της τελικής αξιοποιούμενης ηλιακής ενέργειας στη συλλεκτική επιφάνεια του Φ/Β, του γινομένου της διαπερατότητας του γυάλινου καλύμματος και της απορροφητικότητας της συλλεκτικής επιφάνειας Φ/Β, κτλ που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 5 της διατριβής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- α) στη διαστασιολόγηση και άλλων ηλιακών συστημάτων, όπως είναι οι ηλιακοί συλλέκτες για την παραγωγή θερμού νερού, μια τεχνολογία ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Ελλάδα, καθώς παρουσιάζουν αρκετά υψηλή μέση ενεργειακή απόδοση.
- β) στη διαστασιολόγηση διαφόρων συστημάτων ψύξης και ιδιαίτερα συστημάτων ηλιακής ψύξης, όπου απαιτούνται ωριαία κλιματικά δεδομένα.
- γ) στη χρήση υπολογιστικών μεθόδων που βασίζονται σε δυναμικές προσομοιώσεις αξιολόγησης διαφόρων ενεργειακών συστημάτων, όπως είναι τα παθητικά ή ενεργειακά ηλιακά συστήματα που εφαρμόζονται σε κτίρια ή άλλες υποδομές.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ευρωπαϊκό Συμβούλιο - Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πολιτικές Αντιμετώπισης της Κλιματικής Αλλαγής. <http://www.consilium.europa.eu/el/policies/climate-change/>,
2. Ανακοίνωση Ευρωπαϊκή Επιτροπή «ΕΥΡΩΠΗ 2020 - Στρατηγική για έξυπνη, διατηρήσιμη και χωρίς αποκλεισμούς ανάπτυξη». EUR-Lex - 52010DC2020, 3.3.2010.
3. Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 «σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ», ΕΕ L 140, 5.6.2009.
4. Οδηγία 2009/29/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009 «για την τροποποίηση της οδηγίας 2003/87/ΕΚ με στόχο τη βελτίωση και την επέκταση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου της Κοινότητας», ΕΕ L 140, 5.6.2009.
5. Οδηγία 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 25ης Οκτωβρίου 2012 «για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των Οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των Οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ», ΕΕ L 315, 14.11.2012.
6. Οδηγία 2009/72/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 13ης Ιουλίου 2009 «σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και για την κατάργηση της οδηγίας 2003/54/ΕΚ», ΕΕ L 211/55, 14. 8.2009.
7. Οδηγία 2009/73/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 13ης Ιουλίου 2009 «σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά φυσικού αερίου και την κατάργηση της οδηγίας 2003/55/ΕΚ», ΕΕ L 211/94, 14. 8.2009.
8. Νόμος 3428/2005, (ΦΕΚ Α' 313), «Απελευθέρωση Αγοράς Φυσικού Αερίου».
9. Νόμος 3468/2006 (ΦΕΚ Α' 129/27.06.2006), «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και λοιπές διατάξεις».
10. Νόμος 3851/2010 (ΦΕΚ Α' 85/4.6.2010) «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.
11. Νόμος 4062/2012 (ΦΕΚ Α' 70), "Αξιοποίηση του πρώην Αεροδρομίου Ελληνικού - Πρόγραμμα ΗΛΙΟΣ - Προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/28/ΕΚ) - Κριτήρια Αειφορίας Βιοκαυσίμων και Βιορευστών (Ενσωμάτωση Οδηγίας 2009/30/ΕΚ)".
12. Υ.Α. 12323 (ΦΕΚ Β' 1079/4.6.2009), "Ειδικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε κτίρια, & ιδίως δώματα & στέγες κτιρίων".
13. Υ.Α. 24461 (ΦΕΚ Β' 3583/31.12.2014), "Εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ από σιτοπαραγωγούς με συμψηφισμό ενέργειας κατ' εφαρμογή του άρθρου 14Α του ν.3468/2006".
14. Νόμος 3855/2010 (ΦΕΚ Α' 95/23.6.2010), "Μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση, ενεργειακές υπηρεσίες και άλλες διατάξεις".
15. Ενεργειακό Ισοζύγιο για την Ελλάδα. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ). Αθήνα 2014. www.ypeka.gr.
16. Energy datasheets: EU28 countries. Energy Statistics 2018, Eurostat, EU Commission, DG ENER, Unit A4. 2018.
17. Energy, transport and environment indicators. Eurostat, European Commission. Edition 2017.
18. Έρευνα - Κατανάλωση Ενέργειας στα Νοικοκυριά, 1987-1988, Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος, Αθήνα 1993.
19. Δ. Λάλας, Κ.Α. Μπαλαράς, Α. Γαγλία, Ε. Γεωργοπούλου, Σ. Μοιρασγεντής, Ι. Σαραφίδης, Σ. Ψωμάς, "Διερεύνηση Υποστηρικτικών Πολιτικών για την προώθηση των μέτρων

- πολιτικής του ΥΠΕΧΩΔΕ Σχετικά με Μείωση των Εκπομπών CO₂ στον Οικιακό - Τριτογενή Τομέα”, Τελική Τεχνική Έκθεση, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΙΕΠΒΑ) - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, 2002.
20. C.A. Balaras, A.G. Gaglia, E. Georgopoulou, S. Mirasgedis, Y. Sarafidis, D.P. Lalas, “European Residential Buildings and Empirical Assessment of the Hellenic Residential Building Stock, Energy Consumption Emissions and Potential Energy Savings”, *Building & Environment*, 42(3), 1298-1314, 2007.
 21. Gaglia A.G., Balaras C.A., Mirasgedis S., Georgopoulou E., Sarafidis Y., Lalas D. P. «Empirical Assessment of the Hellenic Non-Residential Buildings, Energy Consumption, Emissions & Potential Energy Savings». *Energy Conversion and Management*, 48(4): 1160-1175, 2007.
 22. Μπαλαράς Κ., Γαγλία Α. «Εξοικονόμηση Ενέργειας - Ενεργειακή Αποδοτικότητα Κτιρίων, Εφαρμογή Ευρωπαϊκών Μεθοδολογιών & Λογισμικών Βελτίωσης της Ενεργειακής Αποδοτικότητας Κτιρίων». Σύνταξη εκπαιδευτικού υλικού στα πλαίσια του επιχειρησιακού προγράμματος «Εκπαίδευση Μηχανικών σε Τεχνολογίες Πληροφορικής & Επικοινωνιών - Κοινωνία της Πληροφορίας», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2009.
 23. Γαγλία Α. «Εξοικονόμηση Ενέργειας στις Ελληνικές Κατοικίες - Εφαρμογή ΑΠΕ». Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», Κεφάλαιο 6-Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αθήνα 2004.
 24. Χαραλαμπόπουλος Ν.Γ., Σταμούλος Θ., Γαγλία Γ.Α., Μελέτη Εγκατάστασης Α/Γ. Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Πειραιά. Αθήνα 1988.
 25. EU Energy in Figures - Statistical Pocketbook 2017. European Commission: Luxembourg, 2017. DOI: 10.2833/80717.
 26. Knight DM, Bell S. Pandora’s box: Photovoltaic energy and economic crisis in Greece. *J. Renewable Sustainable Energy* 2013; 5: 033110. DOI: 10.1063/1.4807477.
 27. Masson G, Orlandi S, Reking M. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018. European Photovoltaic Industry Association: Brussels, 2014.
 28. Ministry of Environment, «Energy Balance for Greece». 2015. http://195.251.42.2/cgi-bin/nisehist.sh?objtype=stats_query
 29. IEC 61215:2005, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval, International Electrotechnical Commission, 2nd edition, 2005.
 30. National Renewable Energy Laboratory. www.nrel.gov.
 31. Α. Γαγλία, Α. Αργυρίου, Σ. Λυκούδης, Κ.Α. Μπαλαράς, «Απόδοση Πειραματικής Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης - Βέλτιστης Κλίση Φωτοβολταϊκών και Ωφέλιμη Ηλιακή Ενέργεια στις Ελληνικές Περιοχές». 8^ο Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 29-31 Μαρτίου 2006.
 32. Wohlgemuth JH, Cunningham DW, Nguyen M, Miller J. Long term reliability of PV modules. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference: 1942-1946, 2005.
 33. Vazquez M, Rey-Stolle I. Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16: 419-433, 2008.
 34. Jordan DC, Kurtz SR. “Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics*”. *Research and Applications*, 21; 12-29, 2013.
 35. Spectrolab Inc, A Boeing Company, <http://www.spectrolab.com/index.htm>
 36. King RR, Bhusari D, Larrabee D, Liu X-Q, Rehder E, Edmondson K, Cotal H, Jones RK, Ermer JH, Fetzer CM, Law DC, Karam NH. Solar Cell Generations Over 40% Efficiency. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20; 801-815, 2012.

37. Ποταμίτης Γεώργιος, Μπαμπούρης Νικόλαος. «Φωτοβολταϊκά Συστήματα». Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Καβάλα 2006.
38. Α. Γ. Γαγλία. Σημειώσεις Εργαστηριακών Ασκήσεων του μαθήματος «Ήπιες Μορφές Ενέργειας». Θεματικές ενότητες: Ηλιακή Ακτινοβολία, Ηλιακοί Συλλέκτες, Φωτοβολταϊκά, Θερμοκήπια. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα. Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας. Αθήνα 1997.
39. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., «Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας», 1η έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2001.
40. Smil Vaclav. General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization. John Wiley Editions. pages 369, New York 1991.
41. Duffie A John., Beckman A. William, "Solar Engineering of Thermal Processes", fourth edition, 2013.
42. Μπαλαράς Κ.Α., Α.Α. Αργυρίου, Φ. Καραγιάννης, Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Εκδόσεις Σέλακ-4M Τεκδοτική, p. 479, (ISBN 960-8257-23-9), Αθήνα 2006.
43. Athina Gaglia, «Solar Radiation Theoretical and Experimentally Calculations' Models». Seminars' notes, Technical Institute of Piraeus. Athens, June 2008.
44. Αθηνά Γαγλία, Σίμων Κοντογιαννίδης, «Solar Data, Βάση Δεδομένων Ηλιακής Ακτινοβολίας». Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, ΙΕΠΒΑ, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, ISBN 978-960-6816-00-0, Αθήνα, Φεβρουάριος 2008.
45. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών», Αθήνα 2010.
46. Collares-Pereira, M. and A. Rabl, "The Average Distribution of Solar Radiation - Correlation Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values". Solar Energy, 22 : 155, 1979.
47. Liu, B. Y. H. and R.C. Jordan. "Daily Insolation on Surfaces Titled Toward and Equator". ASHRAE Journal, 3 (10): 53, 1962.
48. Klein, S. A. "Calculation of Monthly Average Insolation on Titled Surfaces". Solar Energy, 19: 325, 1977.
49. Liu, B. Y. H. and R.C. Jordan. "The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation". Solar Energy Journal, 4 (3), 1960.
50. H. Hottel, «A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres». Solar Energy, 18: 129-134, 1976.
51. Peter Würfel, »The Physics of Solar Cells«. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 3-527-40857-6. 2005.
52. Schoenberg, E. Theoretische Photometrie, Über die Extinktion des Lichtes in der Erdatmosphäre. In Handbuch der Astrophysik. Band II, erste Hälfte. Berlin: Springer. 1929.
53. Kasten, F. and Young, A. T. Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics, 28: 4735-4738, 1989.
54. Βόκας Γεώργιος. Κεφ. 6 - "Αυτοδύναμα Φωτοβολταϊκά Συστήματα". Βιβλίο της σειράς εκπαιδευτικών βοηθημάτων, Εκπαίδευσης από Απόσταση, Πρόγραμμα Εξειδίκευσης "Αποθήκευση και Εξοικονόμηση Ενέργειας" του Τ.Ε.Ι. Πειραιά, (1999).
55. Βαζαίος, Ε. (1987). Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας, Γ' έκδοση, Αθήνα.
56. IEC Central Office. Technical Report IEC-60904-3:2019; Photovoltaic Devices: Part 3. Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data; International Electrotechnical Commission.
57. IEC Central Office. International Standard - IEC 61215:2016; Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval; International Electrotechnical Commission.
58. Μιχάλης Γ. Βραχόπουλος, Αθηνά Γ. Γαγλία, Κοσμάς Α. Καββαδίας, Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, Κωνσταντίνος Α. Μπαλαράς. Θεματική Ενότητα ΔΕ4: "Τεχνολογίες

- Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας". Εκπαιδευτικό υλικό για την κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών Κτιρίων. Αποφάσεις ανάθεσης συγγραφής Α11/Σ18/2011 έως και Α29/Σ18/2011 της Δ.Ε. του Τ.Ε.Ε. Αθήνα 2011.
59. Γαγλία Γ. Α., «Ζεύξη Εναλλακτών Εδάφους- Αέρος με Φ/Β Στοιχεία - Πειραματική Μελέτη». Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολογίας, ΕΜΠ. Υπεύθυνος καθηγητής Ξενοφών Κακάτσιος. Αθήνα 2001.
 60. Sjerps-Koomen EA, Alsema EA, Turkemburg WC. A Simple Model for PV Module Reflection Losses under Field Conditions. *Solar Energy*, 57: 421-432, 1996.
 61. Fanney AH, Dougherty BP, Davis MW, in Proceeding of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, LA (May 20-2, 2002), "Evaluating Building Integrated Photovoltaic Performance Models".
 62. King, DL, Boyson WE, Kratochvil JE. "Photovoltaic Array Performance Model". Sandia National Laboratories Report SAND, 2004-3535, Aug. 2004.
 63. Krauter S, Hanitsch R. Actual optical and thermal performance of PV-modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41/42: 557-574, 1996.
 64. A. Hunter Fanney, Mark W. Davis, Brian P. Dougherty, David L. King, William E. Boyson, Jay A. Kratochvil. Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME* 128(2), 152-159. DOI: 10.1115/1.2192559
 65. W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman. Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance. *Solar Energy*, 80: 78-88, 2006.
 66. Ross RG. Interface Design Considerations for Terrestrial Solar Cell Modules. In: Proceedings of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Baton Rouge, LA, 15-18: 801-806, November 1976.
 67. Ross R.G, Smokler M.I. Flat-plate solar array project final report - Vol. VI: Engineering Sciences and reliability, in: Report DOE/JPL-1012-125, 1986.
 68. Buresch M. Photovoltaic energy systems. New York: McGraw-Hill; p. 76, 1983.
 69. Nordmann T, Clavadetscher L. Understanding temperature effects on PV system performance. In: Proceedings of the third world conference on photovoltaic energy conversion, Osaka, Japan, poster. p. 2243-2246, May 11-18; 2003.
 70. Risser VV, Fuentes MK. Linear regression analysis of flat-plate photovoltaic system performance data. In: Proceedings of the fifth E.C. photovoltaic solar energy conference, Athens, Greece, October 17-21; 623-627, 1983.
 71. Zondag H.A. Flat-plate PV-thermal collectors and systems - a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007. doi:10.1016/j.rser.2005.12.012.
 72. Photovoltaic systems concept study. Rep. AL0-2748-12. Spectrolab, Inc., Sylmar, CA 1977.
 73. Evans DL, Florschuetz LW. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. *Solar Energy*, 19: 255-262, 1977.
 74. Evans D. L. Simplified Method for Predicting Photovoltaic Array Output. *Solar Energy*, 27(6): 555-560, 1981.
 75. Siegel M.D, Kleins S.A., Beckman W.A. A Simplified Method for Estimating the Monthly - Average Performance of Photovoltaic Systems. *Solar Energy*, 26: 413-418, 1981.
 76. Garg HP, Agarwal RK. Some aspects of a PV/T collector/forced circulation flat plate solar water heater with solar cells. *Energy Conversion and Management* 36: 87-99, 1995.
 77. Evans DL, Florschuetz LW. Terrestrial concentrating photovoltaic power system studies. *Solar Energy*, 20: 37-43, 1978.
 78. RETScreen International, Photovoltaic Project Analysis. PV.22, 2001.
 79. Truncellito, N.T., Sattolo, A.J. An analytical method to simulate solar energy collection and storage utilizing a flat plate photovoltaic panel. General Electric Advanced Energy Department, 1979.

80. M.A. Green. *Solar-Cells-Operating Principles, Technology and System Applications*, Prentice-Hall, USA, 1982.
81. Masaya Itoh, Hideki Takahashi, Takeshi Fujii, Hideyuki Takakura, Yoshihiro Hamakawa, Yasuhiro Matsumoto. Evaluation of electric energy performance by democratic module PV system field test. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 67: 435-440, 2001.
82. C. Schwingshackla, M. Petittaa,b, J.E. Wagnera, G. Belluardoc, D. Moserc, M. Castellia,d, M. Zebischa and A. Tetzlaff. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation. *Energy Procedia*, 40: 77-86, 2013.
83. Yamawaki, T., Mizukami, S., Masui, T., Takahashi, H. Experimental Investigation on generated power of amorphous PV module for roof azimuth. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67: 369-377, 2001.
84. Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., Poggi, P. Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*, 25: 2854-2877, 2005.
85. Jie, J., Hua, Y., Wei, H., Gang, P., Jianping, L., Bin, J. Modelling of a novel Trombe wall with PV cells. *Building and Environment*, 42: 1544-1552, 2007.
86. Nishioka, K., Hatayama, T., Uraoka, Y., Fuyuki, T., Hagihara, R., Watanabe, M. Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 75:665-671, 2003.
87. Durisch W, Bitnar B, Mayor J, Kiess H, Lam K, Close J. Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation. *J Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91:79-84, 2007.
88. Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of Photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83: 614-624, 2009.
89. Zondag HA, de Vries DWde, van Helden WGJ, van Zolengen RJC, Steenhoven AA van. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. *Solar Energy*, 72(2):113-28. 2002.
90. Garg, H.P., Agarwal, R.K., Joshi, J.C. Experimental study on a hybrid photovoltaic-thermal solar water heater and its performance predictions. *Energy Conversion and Management*, 35(7):621-633, 1994.
91. Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y. Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable Energy* 32: 623-637, 2007.
92. Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 81: 498-511, 2007.
93. Kalogirou SA, Agathokleous R, Panayiotou G. On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance. *Energy*, 51: 439-446, 2013.
94. Kaldellis JK, Fragos P, Kapsali M. Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations. *Renewable Energy*; 36: 2717-2424, 2001.
95. Hamou S., Zine S, Abdellah R.. Efficiency of PV module under real working conditions. *Energy Procedia*, 50: 553-558, 2014.
96. Kou, Q., Klein, S.A., Beckman, W.A. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems. *Solar Energy* 64: 33-40, 1998.
97. Hendrie, S.D. Evaluation of combined photovoltaic/thermal collectors. In: *Proceedings of ISES Solar World Congress*, pp. 1865-1869, 28 May 28- 1June 1979, Atlanta, GA.
98. Chow, T.T., He, W., Ji, J. Hybrid Photovoltaic-Thermosyphon Water Heating System for Residential Application. *Solar Energy* 80: 298-306, 2006.
99. G. Rockendorf, R. Sillmann, L. Podlowski, B. Litzenburger, PV-hybrid and Thermoelectric collectors, *Solar Energy* 67 (4-6): 227-237, 1999.
100. Rosell, J.I., Ibanez, M. Modelling Power Output in Photovoltaic Modules for Outdoor Operating Conditions. *Energy Conversion and Management*, 47: 2424-2430, 2006.

101. Cesar Luiz de Azevedo Dias, David Alves Castelo Branco, Maurício Cardoso Arouca, Luiz Fernando Loureiro Legey. Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. *Renewable Energy*, 114 : 367-375, 2017.
102. D. Myers, Evaluation of the performance of the PVUSA rating methodology applied to dual junction PV technology: preprint, in: N.R.E. Laboratory (Ed.), American Solar Energy Society Annual Conference, National Renewable Energy Laboratory, Buffalo, New York, USA, 2009.
103. G.S. California, Incentive Eligible Photovoltaic Modules in Compliance with SB1 Guidelines, Incentive Eligible Photovoltaic Modules in Compliance with SB1 Guidelines, State of California - California Energy Commission & California Public Utilities Commission, California, EUA, 2016.
104. G. Makrides, B. Zinsser, G.E. Georghiou, M. Norton, in: D.V. Fthenakis (Ed.), Performance of Photovoltaics under Actual Operating Conditions, Third Generation Photovoltaics, INTECH Rijeka, p. 31, Croatia, 2012.
105. G. Belluardo, P. Ingenhoven, W. Sparber, J. Wagner, P. Weihs, D. Moser, Novel method for the improvement in the evaluation of outdoor performance loss rate in different PV technologies and comparison with two other methods, *Sol. Energy* 117 : 139-152, 2015.
106. Canadian Solar Inc, in: Canadian Solar Inc (Ed.), MAXPOWER CS6X-310|315|320|325P, Canadian Solar Guelph, Ontario, Canada, 2017.
107. Panasonic Eco Solution, in: P.E. Solution (Ed.), Hit Power 235S, Panasonic, Cupertino, CA, 2013.
108. G. Graditi, S. Ferlito, G. Adinolfi, Comparison of Photovoltaic plant power production prediction methods using a large measured dataset, *Renew. Energy* 90: 513-519, 2016.
109. A. Guérin de Montgareuil. Description of MotherPV, the new method developed at INES / CEA for the assessment of the energy production of photovoltaic modules. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2007, Milan.
110. Luis Fernando Mulcúe-Nieto, Llanos Mora-Lopez. A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries. *Solar Energy* 107:423-442, 2014.
111. N. Aste, C. Del Pero, F. Leonforte, M. Manfren, A simplified model for the estimation of energy production of PV systems, *Energy* 59: 503-512, 2013.
112. M. Almaktar, H. Abdul Rahman, M.Y. Hassan, I. Saeh, Artificial neural network based photovoltaic module temperature estimation for tropical climate of Malaysia and its impact on photovoltaic system energy yield, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 23 (3): 302-318, 2015.
113. F. Almonacid, C. Rus, P. Perez-Higueras, L. Hontoria, Calculation of the energy provided by a PV generator. Comparative study: conventional methods vs. artificial neural networks, *Energy* 36 (1): 375-384, 2011.
114. Häberlin H, Renken C. Grid Connected PV Plant Jungfrauoch (3454 m) in the Swiss Alps: Results of more than four Years of trouble-free Operation. Proceedings of the 2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion, 1-4. Vienna, Austria, 1998;.
115. Poissant Y, Thevenard D, Turcotte D. Performance monitoring of the Nunavut Arctic College PV systems: 9 years of reliable electricity generation, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Report CETC Number 2004-114, August 2004.
116. Bogdanski N, Herrmann W, Reil F, Köhl M, Weiss KA, Heck M. PV reliability (cluster II): results of a German four-year joint project—part II, results of three years module weathering in four different climates. Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, p. 4339-4343, 2010.
117. A. Limmanee, S. Songtraï, N. Udomdachanut, S. Kaewniyompanit, Y. Sato, M. Nakaishi, S. Kittisontirak, K. Sriprapha, Y. Sakamoto. Degradation analysis of photovoltaic modules under tropical climatic conditions and its impacts on LCOE. *Renewable Energy*; 102: 199-204, 2017.

118. D.C. Jordan, J.H. Wohlgemuth, S.R. Kurtz, Technology and climate trends in PV Module degradation, in: Proc. 27th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf., Frankfurt, Germany, 3118-3124, 2012.
119. A. Ndiaye, C.M.F. Kebe, A. Charki, P.A. Ndiaye, V. Sambou, A. Kobi, Degradation evaluation of crystalline-silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment, *Solar Energy*, 103: 70-77, 2014.
120. J.Y. Ye, T. Reindl, A.G. Aberle, T.M. Walsh, Performance degradation of various PV module technologies in tropical Singapore, *IEEE J. Photovolt.*, 4: 1288-1294, 2014.
121. K. Akhmad, A. Kitamura, F. Tamamoto, H. Okamoto, H. Takakura, Y. Hamakawa, Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystalline silicon PV modules, *Solar Energy. Material Solar Cells*, 46: 209-218, 1997.
122. T. H. Kim, N. C. Park, and D. H. Kim, The effect of moisture on the degradation mechanism of multi-crystalline silicon photovoltaic module, *Microelectron. Reliab.*, vol. 53, (9-11) : 1823-1827, 2013.
123. Meitzner R and Schulze S.H. Method for determination of parameters for moisture simulations in photovoltaic modules and laminated glass. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 144, pp. 23-28, Jan. 2016.
124. Manish Kumar, Arun Kumar. Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 78: 554-587, 2017.
125. Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων - Κ.Εν.Α.Κ., ΦΕΚ 407/9.4.2010,.
126. A. Mamara, A. A. Argiriou and M. Anadranistakis, «Homogenization of mean monthly temperature time series of Greece». *International Journal Climatology*. 33: 2649-2666 2013.
127. Γ. Κορνάρος. «Κλιματικά Στοιχεία των Σταθμών της ΕΜΥ - Περίοδος 1955 έως 1997». Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία - ΕΜΥ, Δ/ση Κλιματολογίας, Τμήμα Ελέγχου Επεξεργασίας. Αθήνα 1999.
128. A. P. Matzarakis and V. D. Katsoulis. "Sunshine duration hours over the Greek region". *Theor. Appl. Climatol.* 83, 107-120, 2006.
129. K. Zabara. "Estimation of the Global Solar Radiation In Greece" *Solar & Wind Technology Vol. 3, No. 4*, pp. 267-272, 1986
130. A. A. Flocas. "Estimation and Prediction of Global Solar Radiation over Greece". *Solar Energy Vol. 24*, pp. 63-70, 1980.
131. Α. Πελεκάνος και Κ. Παπαχριστόπουλος, "Σύνταξη πινάκων μετεωρολογικών στοιχείων για ηλιακές εφαρμογές των κυριότερων πόλεων της Ελλάδος". Πρακτικά Α' Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 20-22 Οκτωβρίου, 1982. Τόμος Α' σελ. ΜΕΤ 41 - ΜΕΤ 75.
132. Δ.Π. Λάλας, Δ.Κ. Πισιμάνης, Β.Α. Νοταρίδου, "Μέθοδοι υπολογισμού εντάσεως ηλιακής ακτινοβολίας σε αυθαίρετης κλίσεως επίπεδο και πίνακες για 30°, 45° και 60° στον Ελληνικό χώρο". *Τεχνικά Χρονικά - Β*, Τόμος 2, Τεύχος 3-4, 1982.
133. Βαζαίος, Ε. "Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας". Γ' έκδοση, Αθήνα (1987).
134. Jacovides, C., Kaltsounidis, N., Flocas, HA, Assimakopoulos, DN.,: Spectral investigation of the diffuse-to-direct solar beam irradiances ratio (UV-VIS) in the urban Athens atmosphere. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 104: 199-211, 2009.
135. M.C. Kotti, A.A. Argiriou, A. Kazantzidis. Estimation of direct normal irradiance from measured global and corrected diffuse horizontal irradiance. *Energy*, 70 (2014), 382-392.
136. Pierre Ineichen. Validation of Models that Estimate the Clear Sky Global and Beam Solar Irradiance. *Solar Energy*, 132: 332-344, 2016.
137. Mueller, R.W., Dagestad, K.F., Ineichen, P., Schroedter-Homscheidt, M., Cros, S., Dumortier, D., Kuhlemann, R., Olseth, J.A., Piernavieja, G., Reise, C., Wald, L., Heinemann, D.. Rethinking satellite based solar irradiance modelling - The SOLIS clear-sky module. *Rem. Sens. Environ*, 91: 160-174, 2004.

138. Rigollier, C., Bauer, O., Wald, L. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - with respect to the Heliosat method. *Solar Energy* 68 (1): 33-48, 2000.
139. Ineichen, P., Perez, R., 2002. A new airmass independent formulation for the linke turbidity coefficient. *Sol. Energy* 73 (3): 151-157, 2002.
140. Gueymard, C. Direct Solar Transmittance and Irradiance Predictions with Broadband Models. Part 1: Detailed Theoretical Performance Assessment. *Solar Energy* 74, 355-379, 2003. Corrigendum. *Sol. Energy* 76, 2004.
141. F. Antonanzas-Torres, J. Antonanzas, R. Urraca, M. Alia-Martinez, F.J. Martinez-de-Pison. Impact of atmospheric components on solar clear-sky models at different elevation: Case study Canary Islands. *Energy Conversion and Management* 109: 122-129, 2016.
142. Ineichen, P. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Sol. Energy* 80: 468-478, 2006.
143. Flocas H.A, Tolika K., Anagnostopoulou C., Patrikas I., Maheras P. and Vafiadis M. Evaluation of maximum and minimum temperature NCEP-NCAR reanalysis data over the Greek area. *Theoretical and Applied Climatology*, 80: 49-65, 2005.
144. Philipopoulos K, Deligiorgi D., Yiannikopoulou I. Flocas H A. A Dynamical-Statistical Downscaling Approach for Simulating Air Temperature Time Series. *Global Nest*, 15: 261-270, 2013.
145. Durisch W, Struss O, Robert K. Efficiency of selected photovoltaic modules under varying climatic conditions. *J. Renewable Energy*, 779: 1, 2000.
146. Skoplaki E, Palyvos JA. Operating Temperature of Photovoltaic Modules: A survey of Pertinent Correlations. *Renewable Energy*, 34: 23-29, 2009.
147. Lasnier F, Ang TG. *Photovoltaic engineering handbook*. New York: Adam Hilger; p.258, 1990.
148. Chenni R, Makhlof M, Kerbache T, Bouzid A. A detailed modelling method for photovoltaic cells. *Energy*, 32: 1724-30, 2007.
149. Kaldellis John K, Kapsali Marina, Kavadias Kosmas A. Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable Energy*, 66: 612-624, 2014.
150. Skoplaki E, A.G. Boudouvis, Palyvos JA. A Simple Correlation for the Operating Temperature of Photovoltaic Modules of Arbitrary Mounting. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92: 1393-1402, 2009.
151. Dubey S, Sarvaiya JN, Seshadri B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World - A Review. *Energy Procedia*, 33: 311-321, 2013.
152. Anis, W.R., Mertens, R.P., van Overstraeten, R.J. Calculation of solar cell operating temperature in a flat plate PV array. In: *Proceedings of Fifth EC Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 520-524, October 12-16, Athens, Greece, 1983.
153. Απογραφή Κτιρίων 2011. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος, Αθήνα 2015. <http://www.statistics.gr/el/2011-census-pop-hous>.
154. Πανόραμα απογραφικών δεδομένων 1991-2011. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος, Αθήνα 2016. <http://panorama.statistics.gr/statistics.gr>.
155. Στατιστική Οικοδομικής Δραστηριότητας 1997-2012. Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος. <http://dlib.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/>.
156. *Energy Statistics 2017*. Eurostat, EU Commission, DG ENER, Unit A4.
157. *EU Energy in Figures - Statistical Pocketbook 2015*, European Commission: Luxembourg, 2015.
158. Ενεργειακό Ισοζύγιο για την Ελλάδα. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ). www.ypeka.gr.
159. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΣΑ), Αθήνα 2019. <http://www.statistics.gr>.
160. Athina G. Gaglia, Evangelos N. Dialynas, Athanassios A. Argiriou, Effie Kostopoulou, Dimitris Tsiamitros, Dimitris Stimoniaris, Konstantinos M. Laskos, «Energy Performance of

- European Residential Buildings: Energy Use, Technical and Environmental Characteristics of the Greek Residential Sector - Energy Conservation and CO₂ Reduction». *Energy and Buildings*, 183: 86-104, 2019.
161. Φ.Ε.Κ. 362 Δ'. «Κανονισμός Θερμομόνωσης Κτιρίων - Κ.Θ.Κ.», Π.Δ. της 1.6/4.7.1979.
 162. Γαγλία, Α. Αργυρίου, Ε. Διαλυνάς, Ε. Κωστοπούλου, "Βαθμομημέρες θέρμανσης στην Ελλάδα - Κατηγοριοποίηση ανά χρήση κτιρίων". 11^ο Συνέδριο για τις ΑΠΕ, Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 14-16 Μαρτίου 2018.
 163. Έρευνα - Κατανάλωση Ενέργειας στα Νοικοκυριά, 1987-1988, Εθνική Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδος, Αθήνα 1993.
 164. Έρευνα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Νοικοκυριά 2011-2012. Δελτίο τύπου Εθνικής Στατιστικής Αρχής, Οκτώβριος 2013. www.statistics.gr.
 165. C.A. Balaras, A.G. Gaglia, E. Georgopoulou, S. Mirasgedis, Y. Sarafidis, D.P. Lalas, "European Residential Buildings and Empirical Assessment of the Hellenic Residential Building Stock, Energy Consumption Emissions and Potential Energy Savings", *Building & Environment*, 42(3): 1298-1314, 2007.
 166. Dascalaki E., Droutsas K., Gaglia A.G., Kontoyiannidis S., Balaras C.A. Data Collection and Analysis of the Building Stock and its Energy Performance-An example for Hellenic Buildings. *Energy & Buildings*, 42(8): 1231-1237, 2010.
 167. Walter Short, Daniel J. Packey and Thomas Holt. A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. National Renewable Energy Laboratory, prepared under Task No. AS026100, March 1995.
 168. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements.
 169. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements, (2012/C 115/01).
 170. EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050 - Reference Scenario 2013. European Commission, Directorate-General for Energy, Directorate-General for Climate Action and Directorate-General for Mobility and Transport, 2013.
 171. Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Μαΐου 2010 για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. L 153/13/18.6.2010.
 172. Οδηγία 2012/27/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Οκτωβρίου 2012, για την ενεργειακή απόδοση, την τροποποίηση των οδηγιών 2009/125/ΕΚ και 2010/30/ΕΕ και την κατάργηση των οδηγιών 2004/8/ΕΚ και 2006/32/ΕΚ. L 315/1/ 14.11.2012.

Α. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΡΩΤΟ

Α. Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών

Πίνακας Α.1: Σταθμοί μέτρησης της ΕΜΥ

Πόλη	Περιοχή (Νομός)	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Υψόμετρο Βαρομέτρου (m)
Αθήνα (Ελληνικό)	Αττικής	37 ⁰ 54'	23 ⁰ 45'	15,0
Αθήνα (Ν. Φιλαδέλφεια)	Αττικής	38 ⁰ 03'	23 ⁰ 40'	138,0
Αγρίνιο	Αιτωλοακαρνανίας	38 ⁰ 37'	21 ⁰ 23'	25,0
Αγχίαλος	Μαγνησίας	39 ⁰ 13'	22 ⁰ 48'	15,3
Αλεξανδρούπολη	Έβρου	40 ⁰ 51'	25 ⁰ 56'	3,5
Αλιάρτος	Βοιωτίας	38 ⁰ 23'	23 ⁰ 06'	110,0
Ανδραβίδα	Ηλείας	37 ⁰ 55'	21 ⁰ 17'	15,1
Άραξος	Αχαΐας	38 ⁰ 09'	21 ⁰ 25'	11,5
Άργος (Πυργέλα)	Αργολίδας	37 ⁰ 36'	22 ⁰ 47'	11,2
Αργοστόλι	Κεφαλληνίας	38 ⁰ 11'	20 ⁰ 29'	22,0
Άρτα	Άρτας	39 ⁰ 10'	21 ⁰ 00'	10,5
Βέλος	Κορινθίας	37 ⁰ 58'	22 ⁰ 45'	20,0
Δράμα	Δράμας	41 ⁰ 09'	24 ⁰ 09'	104,0
Έδεσσα	Πέλλας	40 ⁰ 58'	22 ⁰ 03'	30,0
Ζάκυνθος	Ζακύνθου	37 ⁰ 47'	20 ⁰ 54'	7,9
Ηράκλειο	Ηρακλείου	35 ⁰ 20'	25 ⁰ 11'	39,3
Θεσσαλονίκη (Μίκρα)	Θεσσαλονίκης	40 ⁰ 31'	22 ⁰ 58'	4,8
Ιεράπετρα	Λασιθίου	35 ⁰ 00'	25 ⁰ 44'	10,0
Ιωάννινα	Ιωαννίνων	39 ⁰ 42'	20 ⁰ 49'	484,0
Καλαμάτα	Μεσσηνίας	37 ⁰ 04'	22 ⁰ 00'	11,1
Καρδίτσα	Καρδίτσας	39 ⁰ 22'	20 ⁰ 48'	111,1
Καρπενήσι	Ευρυτανίας	38 ⁰ 54'	21 ⁰ 47'	1001,0
Κάρυστος	Εύβοιας	38 ⁰ 01'	24 ⁰ 25'	10,0
Καστοριά	Καστοριάς	40 ⁰ 27'	21 ⁰ 17'	660,9
Κέρκυρα	Κερκύρας	39 ⁰ 37'	19 ⁰ 55'	4,0
Κοζάνη	Κοζάνης	40 ⁰ 18'	21 ⁰ 47'	625,0
Κομοτηνή	Ροδόπης	41 ⁰ 07'	25 ⁰ 24'	30,0
Κόνιτσα	Ιωαννίνων	40 ⁰ 03'	20 ⁰ 45'	542,0
Κύθηρα	Αττικής	36 ⁰ 17'	23 ⁰ 10'	316,6
Κως	Δωδεκανήσου	36 ⁰ 47'	27 ⁰ 04'	129,0
Λαμία	Φθιώτιδας	38 ⁰ 51'	22 ⁰ 24'	17,4
Λάρισα	Λαρίσης	39 ⁰ 39'	22 ⁰ 27'	73,6
Λευκάδα	Λευκάδας	38 ⁰ 50'	20 ⁰ 43'	1,0
Λήμνος	Λέσβου	39 ⁰ 55'	25 ⁰ 14'	4,6
Μεθώνη	Μεσσηνίας	36 ⁰ 50'	21 ⁰ 42'	33,0
Μήλος	Κυκλάδων	36 ⁰ 43'	24 ⁰ 27'	182,0
Μυτιλήνη	Λέσβου	39 ⁰ 04'	26 ⁰ 36'	4,0
Νάξος	Κυκλάδων	37 ⁰ 06'	25 ⁰ 23'	9,8
Ξάνθη	Ξάνθης	41 ⁰ 08'	24 ⁰ 53'	43,0
Πάρος	Κυκλάδων	37 ⁰ 01'	25 ⁰ 08'	33,5
Πάτρα	Αχαΐας	38 ⁰ 15'	21 ⁰ 44'	1,0

Πόλη	Περιοχή (Νομός)	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Υψόμετρο Βαρομέτρου (m)
Πολύγυρος	Χαλκιδικής	40 ⁰ 23'	23 ⁰ 26'	545,0
Πύργος	Ηλείας	37 ⁰ 40'	21 ⁰ 18'	12,0
Ρέθυμνο	Ρεθύμνου	35 ⁰ 21'	24 ⁰ 31'	7,0
Ρόδος	Δωδεκανήσου	36 ⁰ 24'	28 ⁰ 07'	11,5
Σάμος	Σάμου	37 ⁰ 42'	26 ⁰ 55'	7,3
Σέρρες	Σερρών	41 ⁰ 05'	23 ⁰ 34'	34,5
Σητεία	Λασιθίου	35 ⁰ 12'	26 ⁰ 06'	115,6
Σκύρος	Ευβοίας	38 ⁰ 54'	24 ⁰ 33'	17,9
Σούδα	Χανίων	35 ⁰ 33'	24 ⁰ 07'	151,6
Σπάρτη	Λακωνίας	37 ⁰ 04'	22 ⁰ 25'	212,0
Σύρος	Κυκλάδων	37 ⁰ 25'	24 ⁰ 57'	72,0
Τανάγρα	Αττικής	38 ⁰ 19'	23 ⁰ 33'	140,1
Τρίκαλα	Θεσσαλίας	39 ⁰ 33'	21 ⁰ 46'	114,0
Τρίκαλα Ημαθίας	Ημαθίας	40 ⁰ 36'	22 ⁰ 33'	0,8
Τρίπολη	Αρκαδίας	37 ⁰ 32'	22 ⁰ 24'	650,9
Τυμπάκι	Ηρακλείου	35 ⁰ 00'	24 ⁰ 46'	6,7
Φλώρινα	Φλώρινας	40 ⁰ 48'	21 ⁰ 26'	617,0
Χαλκίδα	Εύβοιας	38 ⁰ 28'	23 ⁰ 36'	5,0
Χανιά	Χανίων	35 ⁰ 29'	24 ⁰ 07'	150,0
Χίος	Χίου	38 ⁰ 28'	26 ⁰ 08'	5,0
Χρυσούπολη	Καβάλας	40 ⁰ 54'	24 ⁰ 36'	5,4

Πίνακας Α.2: Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/m²/mo]

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχίαλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Άραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	60,0	77,1	123,6	168,0	207,4	220,3	224,9	205,5	160,0	113,1	74,3	59,4
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2

Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Πίνακας Α.3: Μέσος μηνιαίος συντελεστής αιθιριότητας (kt)

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα Ελληνικό)	0,44	0,47	0,48	0,53	0,57	0,62	0,63	0,64	0,59	0,54	0,48	0,43
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	0,45	0,46	0,49	0,52	0,56	0,60	0,61	0,62	0,61	0,55	0,46	0,42
Αγρίνιο	0,46	0,47	0,49	0,51	0,55	0,62	0,64	0,63	0,59	0,55	0,48	0,44
Αγχίαλος	0,45	0,46	0,47	0,51	0,55	0,61	0,62	0,62	0,58	0,50	0,45	0,42
Αλεξανδρούπολη	0,40	0,44	0,46	0,49	0,54	0,59	0,60	0,61	0,58	0,52	0,44	0,38
Αλιάρτος	0,37	0,42	0,47	0,54	0,60	0,62	0,63	0,64	0,60	0,51	0,45	0,39
Ανδραβίδα	0,48	0,49	0,53	0,54	0,58	0,63	0,65	0,65	0,61	0,57	0,51	0,46
Άραξος	0,44	0,47	0,49	0,53	0,57	0,61	0,62	0,62	0,60	0,54	0,47	0,43
Άργος (Πυργέλα)	0,48	0,49	0,52	0,54	0,59	0,64	0,65	0,65	0,61	0,56	0,50	0,45
Αργοστόλι	0,46	0,48	0,51	0,54	0,60	0,63	0,65	0,64	0,61	0,56	0,50	0,44
Άρτα	0,48	0,49	0,50	0,51	0,56	0,61	0,62	0,62	0,60	0,56	0,49	0,46
Ζάκυνθος	0,45	0,46	0,45	0,54	0,56	0,58	0,62	0,64	0,60	0,51	0,44	0,41
Ηράκλειο	0,42	0,45	0,49	0,56	0,60	0,64	0,65	0,64	0,62	0,54	0,49	0,42
Θεσσαλονίκη	0,41	0,43	0,44	0,49	0,52	0,57	0,60	0,59	0,55	0,48	0,42	0,39
Ιεράπετρα	0,46	0,49	0,54	0,58	0,61	0,64	0,64	0,64	0,62	0,58	0,55	0,48
Ιωάννινα	0,39	0,41	0,44	0,47	0,52	0,58	0,61	0,60	0,54	0,49	0,42	0,38
Καλαμάτα	0,47	0,48	0,51	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,55	0,50	0,44
Καστοριά	0,45	0,45	0,47	0,49	0,51	0,58	0,59	0,59	0,56	0,51	0,45	0,41
Κέρκυρα	0,43	0,46	0,49	0,52	0,57	0,61	0,63	0,63	0,59	0,53	0,46	0,42
Κομοτηνή	0,40	0,42	0,45	0,51	0,55	0,60	0,61	0,62	0,59	0,52	0,44	0,40
Κόνιτσα	0,41	0,41	0,47	0,48	0,56	0,57	0,62	0,62	0,56	0,51	0,46	0,42
Κόρινθος (Βέλο)	0,46	0,49	0,51	0,54	0,59	0,63	0,64	0,64	0,60	0,55	0,49	0,43
Κύθηρα	0,45	0,46	0,51	0,54	0,61	0,63	0,64	0,64	0,61	0,55	0,50	0,43
Λαμία	0,43	0,44	0,47	0,52	0,55	0,60	0,61	0,61	0,57	0,50	0,46	0,42
Λάρισα	0,41	0,44	0,47	0,52	0,56	0,61	0,62	0,62	0,58	0,50	0,44	0,39
Λήμνος	0,39	0,43	0,47	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,54	0,45	0,39
Μεθώνη	0,42	0,45	0,50	0,52	0,60	0,62	0,63	0,62	0,60	0,56	0,50	0,42
Μήλος	0,38	0,38	0,48	0,59	0,62	0,64	0,64	0,64	0,63	0,54	0,50	0,38
Μυτιλήνη	0,38	0,43	0,47	0,54	0,61	0,63	0,64	0,64	0,62	0,55	0,47	0,41
Νάξος	0,41	0,45	0,50	0,55	0,60	0,63	0,64	0,64	0,61	0,56	0,49	0,42
Πάρος	0,41	0,46	0,50	0,57	0,61	0,63	0,64	0,63	0,62	0,56	0,49	0,43
Πάτρα	0,39	0,43	0,51	0,50	0,58	0,62	0,62	0,62	0,60	0,53	0,45	0,41
Πύργος	0,48	0,49	0,52	0,54	0,58	0,62	0,64	0,64	0,60	0,57	0,51	0,45
Ρέθυμνο	0,40	0,45	0,47	0,55	0,61	0,63	0,64	0,63	0,61	0,49	0,51	0,40
Ρόδος	0,47	0,48	0,52	0,55	0,59	0,63	0,64	0,64	0,61	0,57	0,51	0,44
Σάμος	0,45	0,48	0,51	0,55	0,60	0,65	0,66	0,66	0,63	0,59	0,52	0,44
Σέρρες	0,40	0,44	0,46	0,49	0,53	0,58	0,60	0,60	0,57	0,50	0,43	0,39
Σητεία	0,43	0,46	0,50	0,55	0,60	0,64	0,65	0,65	0,62	0,55	0,50	0,43
Σκύρος	0,37	0,42	0,46	0,53	0,58	0,62	0,63	0,63	0,60	0,51	0,44	0,38
Σούδα	0,42	0,46	0,52	0,56	0,61	0,64	0,65	0,65	0,62	0,54	0,48	0,42
Σύρος	0,40	0,47	0,49	0,58	0,62	0,63	0,64	0,64	0,62	0,52	0,49	0,43
Τανάγρα	0,42	0,44	0,46	0,52	0,57	0,62	0,63	0,63	0,60	0,52	0,44	0,40
Τρίκαλα	0,45	0,46	0,45	0,49	0,52	0,58	0,59	0,59	0,56	0,49	0,45	0,43

(Ημαθίας)												
Τρίπολη	0,47	0,50	0,54	0,57	0,60	0,64	0,65	0,65	0,63	0,59	0,53	0,47
Τυμπάκιο	0,40	0,45	0,49	0,56	0,62	0,63	0,64	0,64	0,61	0,52	0,49	0,41
Χανιά	0,40	0,43	0,49	0,55	0,61	0,63	0,64	0,64	0,62	0,58	0,49	0,42
Χίος	0,46	0,50	0,48	0,48	0,56	0,59	0,60	0,60	0,57	0,51	0,47	0,38
Χρυσούπολη	0,44	0,47	0,48	0,53	0,57	0,62	0,63	0,64	0,59	0,54	0,48	0,43

Πίνακας Α.4: Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή (H_d) ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/m²/mo]

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	25,1	32,2	50,3	65,7	81,9	85,5	85,3	73,7	55,5	40,1	26,5	22
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	25,1	32	50,4	65,6	81,8	85,5	85,2	73,7	55,5	40,1	26,3	21,8
Αγρίνιο	24,6	31,7	50	65,2	81,9	85,8	85,5	73,6	55,1	39,5	25,9	21,4
Αγχίαλος	23,9	30,9	49,1	65,1	82,1	86,1	85,7	73,5	54,7	38,5	24,8	20,5
Αλεξανδρούπολη	21,4	29,1	47,5	64,2	82,2	86,8	86,2	73,2	53,6	37,1	23	18,3
Αλιάρτος	23,1	31	49,8	65,7	82,2	85,7	85,4	73,7	55,3	39,4	25,8	20,8
Ανδραβίδα	25,6	32,6	51	65,9	82	85,6	85,3	73,8	55,6	40,4	26,8	22,4
Αραξος	24,9	32,1	50,4	65,7	82	85,6	85,3	73,7	55,4	40	26,3	21,7
Άργος (Πυργέλα)	25,9	32,9	51,2	66	82	85,4	85,2	73,8	55,8	40,6	27,1	22,6
Αργοστόλι	25,1	32,1	50,6	65,8	82,1	85,7	85,4	73,7	55,4	40	26,4	21,8
Άρτα	25,4	32,2	49,8	65,9	81,8	85,3	85,2	73,8	55,7	40,1	26,3	21,8
Ζάκυνθος	24,3	31,4	49,7	65,1	82,1	86,1	85,6	73,5	54,8	39,1	25,4	21
Ηράκλειο	27,6	34,4	52,6	66,8	81,5	84,3	84,3	74,1	57,2	42,8	29,4	24,8
Θεσσαλονίκη	21,8	29,2	47,3	64,2	82	86,6	86,1	73,1	53,6	36,9	23,1	18,7
Ιεράπετρα	28,6	35,3	53,4	67,1	81,5	84,1	84,2	74,1	57,4	43,3	30,2	25,8
Ιωάννινα	22,4	29,6	48,1	64	81,8	86,2	85,8	73,4	54,1	38	23,9	19,3
Καλαμάτα	26,4	33,2	51,5	66	81,8	85,1	84,9	73,8	56,1	41,1	27,6	23,1
Καστοριά	22,5	29,7	48,1	64,3	81,7	86,6	86	73,2	53,7	37,4	23,5	19,1
Κέρκυρα	23,2	30,5	49,1	65	82,3	86,3	85,8	73,5	54,4	38,4	24,6	20,1
Κομοτηνή	21,1	28,5	47,1	64,3	82,4	87	86,3	73,2	53,4	36,8	22,8	18,2
Κόνιτσα	22,3	29,2	48,5	64,2	82,2	86,4	85,9	73,3	54	37,8	24,1	19,7
Κόρινθος (Βέλο)	25,4	32,5	50,7	65,9	82	85,5	85,3	73,7	55,6	40,2	26,6	22
Κύθηρα	27,1	33,7	52,1	66,4	81,8	84,7	84,6	73,9	56,7	41,9	28,5	23,9
Λαμία	24	31	49,4	65,3	82	85,9	85,5	73,5	54,8	38,9	25,3	20,8
Λάρισα	22,9	30,3	48,8	65,1	82,2	86,3	85,8	73,4	54,4	38,1	24,3	19,7
Λήμνος	22,1	29,9	48,6	65,1	82,4	86,5	85,9	73,4	54,3	38,2	24,1	19,3
Μεθώνη	23,4	30,7	49,4	65,2	82,5	86,4	85,9	73,4	54,4	38,5	25	20,5
Μήλος	25,1	31,6	51,3	66,6	81,9	85	84,9	73,9	56,4	41,3	28	22,5
Μυτιλήνη	22,8	30,5	49,2	65,4	82,3	86,1	85,7	73,6	54,9	39,1	25,3	20,4
Νάξος	25,5	32,7	51,3	66,2	81,9	85,2	85	73,9	56,1	41,1	27,5	22,7
Πάρος	25,5	33	51,4	66,4	82	85,1	84,9	73,8	56,2	41,2	27,6	23
Πάτρα	23,9	31,3	50,5	65,3	82,1	85,7	85,3	73,6	55,4	39,8	25,9	21,5
Πύργος	25,8	32,7	51,1	65,9	82	85,4	85,2	73,8	55,7	40,6	27	22,6
Ρέθυμνο	27,1	34,4	52,1	66,8	81,6	84,3	84,3	74	57,2	42,2	29,5	24,4
Ρόδος	27,1	33,9	52,2	66,5	81,7	84,8	84,7	73,9	56,6	41,9	28,5	23,9
Σάμος	25,5	32,6	51	66,1	82	85,5	85,3	73,9	55,8	40,6	27,1	22,5
Σέρρες	21,2	28,9	47,2	64,1	82,1	86,9	86,2	73,1	53,4	36,7	22,7	18,1
Σητεία	27,8	34,7	52,9	66,8	81,5	84,2	84,3	74,1	57,3	43	29,6	25
Σκύρος	22,8	30,5	49,1	65,4	82,1	86	85,6	73,6	54,9	39	25,1	20,3
Σούδα	27,4	34,3	52,8	66,8	81,6	84,4	84,4	74,1	57,1	42,6	29,1	24,5
Σύρος	24,9	32,7	50,9	66,3	82	85,3	85,1	73,8	55,9	51,9	27,2	22,6
Τανάγρα	24,4	31,5	49,7	65,5	82	85,7	85,4	73,7	55,3	39,6	25,7	21,2

Τρίκαλα (Ημαθίας)	22,3	29,6	47,5	64,2	81,9	86,7	86	73,2	53,6	37,1	23,4	19,1
Τυμπάκιο	25,8	32,5	50,8	65,7	81,6	85,3	85	73,7	55,8	40,6	27	22,7
Χανιά	28,7	35,4	53,4	67	81,5	84,1	84,2	74,1	57,5	43,3	30,1	25,7
Χίος	27	34,2	52,4	66,8	81,6	84,4	84,4	74	57,1	42,4	29,2	24,4
Χρυσούπολη	23,8	31,2	50,2	65,8	82,2	85,8	85,4	73,7	55,4	39,9	26,2	21,4

Πίνακας Α.5: Μέσος μηνιαίος συντελεστής διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας (kd)

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα Ελληνικό)	0,40	0,41	0,43	0,43	0,42	0,40	0,38	0,36	0,36	0,37	0,37	0,39
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	0,40	0,41	0,42	0,43	0,43	0,41	0,40	0,37	0,36	0,36	0,39	0,40
Αγρίνιο	0,39	0,40	0,42	0,44	0,43	0,40	0,38	0,37	0,36	0,36	0,37	0,39
Αγχίαλος	0,39	0,42	0,44	0,44	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,39	0,39	0,40
Αλεξανδρούπολη	0,42	0,42	0,44	0,45	0,45	0,42	0,41	0,38	0,37	0,37	0,40	0,42
Αλιάρτος	0,41	0,44	0,44	0,42	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,39	0,40	0,41
Ανδραβίδα	0,37	0,39	0,40	0,41	0,41	0,39	0,37	0,36	0,36	0,35	0,36	0,37
Αραξος	0,40	0,41	0,42	0,42	0,42	0,41	0,39	0,37	0,36	0,36	0,38	0,40
Άργος (Πυργέλα)	0,38	0,39	0,40	0,41	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,35	0,36	0,38
Αργοστόλι	0,39	0,40	0,41	0,42	0,40	0,39	0,38	0,36	0,36	0,36	0,36	0,39
Άρτα	0,39	0,40	0,41	0,44	0,43	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,38	0,39
Ζάκυνθος	0,38	0,40	0,45	0,41	0,43	0,43	0,39	0,36	0,36	0,37	0,39	0,40
Ηράκλειο	0,42	0,42	0,42	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,36	0,37	0,41
Θεσσαλονίκη	0,41	0,43	0,46	0,46	0,46	0,44	0,41	0,40	0,39	0,40	0,41	0,41
Ιεράπετρα	0,39	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,36	0,35	0,35	0,34	0,37
Ιωάννινα	0,43	0,45	0,46	0,47	0,46	0,43	0,40	0,39	0,40	0,40	0,41	0,43
Καλαμάτα	0,39	0,40	0,41	0,42	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,36	0,37	0,39
Καστοριά	0,39	0,42	0,43	0,46	0,47	0,43	0,42	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40
Κέρκυρα	0,40	0,41	0,42	0,43	0,42	0,40	0,39	0,37	0,37	0,37	0,38	0,40
Κομοτηνή	0,42	0,44	0,45	0,44	0,44	0,42	0,40	0,38	0,37	0,37	0,39	0,40
Κόνιτσα	0,42	0,45	0,43	0,47	0,43	0,43	0,40	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39
Κόρινθος (Βέλο)	0,39	0,39	0,41	0,42	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,36	0,37	0,40
Κύθηρα	0,40	0,42	0,41	0,41	0,39	0,39	0,38	0,36	0,35	0,36	0,37	0,40
Λαμία	0,40	0,42	0,43	0,43	0,43	0,41	0,40	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40
Λάρισα	0,42	0,42	0,44	0,43	0,43	0,41	0,40	0,38	0,37	0,39	0,40	0,41
Λήμνος	0,43	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,37	0,36	0,37	0,39	0,42
Μεθώνη	0,38	0,39	0,40	0,42	0,40	0,40	0,39	0,37	0,35	0,33	0,32	0,36
Μήλος	0,45	0,47	0,43	0,38	0,38	0,38	0,38	0,36	0,34	0,37	0,36	0,43
Μυτιλήνη	0,44	0,44	0,44	0,42	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35	0,36	0,38	0,41
Νάξος	0,42	0,42	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,35	0,37	0,41
Πάρος	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,38	0,38	0,36	0,35	0,35	0,37	0,40
Πάτρα	0,43	0,43	0,41	0,44	0,41	0,40	0,39	0,37	0,36	0,37	0,39	0,41
Πύργος	0,38	0,39	0,40	0,42	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35	0,36	0,38
Ρέθυμνο	0,44	0,42	0,44	0,41	0,39	0,39	0,38	0,36	0,36	0,40	0,36	0,42
Ρόδος	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,38	0,37	0,36	0,34	0,33	0,34	0,37
Σάμος	0,39	0,40	0,40	0,41	0,40	0,38	0,37	0,35	0,34	0,34	0,34	0,38
Σέρρες	0,42	0,43	0,45	0,45	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38	0,39	0,40	0,41
Σητεία	0,42	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,36	0,37	0,40
Σκύρος	0,45	0,44	0,45	0,43	0,42	0,40	0,39	0,37	0,36	0,38	0,40	0,43
Σούδα	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,38	0,37	0,35	0,35	0,36	0,38	0,40
Σύρος	0,42	0,42	0,41	0,39	0,40	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34	0,37	0,38
Τανάγρα	0,41	0,42	0,44	0,43	0,42	0,40	0,38	0,37	0,36	0,38	0,40	0,41
Τρίκαλα	0,39	0,41	0,45	0,46	0,46	0,43	0,42	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39

(Ημαθίας)												
Τρίπολη	0,39	0,42	0,42	0,43	0,44	0,41	0,40	0,38	0,36	0,37	0,37	0,38
Τυμπάκιο	0,39	0,42	0,42	0,43	0,44	0,41	0,40	0,38	0,36	0,37	0,37	0,38
Χανιά	0,39	0,39	0,39	0,40	0,39	0,38	0,37	0,35	0,35	0,34	0,35	0,38
Χίος	0,44	0,43	0,42	0,40	0,38	0,38	0,38	0,36	0,35	0,38	0,37	0,41
Χρυσούπολη	0,43	0,43	0,42	0,41	0,39	0,39	0,38	0,36	0,35	0,34	0,37	0,40

Β. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ

Β. Αποτελέσματα Ανάλυσης Κλιματικών Δεδομένων ΕΜΥ

Πίνακας Β.1: Μέση θερμοκρασία στη διάρκεια της ημέρας [°C] (ανατολή έως δύση ηλίου), ανά τρίωρο, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της ΕΜΥ, ανά τρίωρο.

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	6	8,1	7,8	9,5	12,5	17,1	21,9	24,5	24,6	20,9	17,3	13,4	9,8
	9	8,9	9,0	11,2	15,6	20,9	26,1	28,5	28,2	24,2	19,6	14,7	10,7
	12	12	12,6	14,7	18,3	23,5	28,7	31,4	31,6	27,5	23	17,6	13,2
	15	12,5	13,1	15,1	18,6	23,7	29	31,9	32	27,7	23,1	17,6	13,4
	18	11,1	11,7	13,8	17,2	22,3	27,6	30,4	30,4	25,6	21,1	16,0	12,0
Καβάλα	6	2,7	2,9	5,5	9,7	14,6	18,7	20,8	20,4	16,4	12,6	8,2	4,3
	9	3,5	4,1	7,2	12,7	18,6	23,3	25,4	24,7	19,7	14,7	9,5	5,1
	12	7,2	8,5	11,4	15,7	21,3	26	28,3	28,5	24,4	19,5	13,6	8,4
	15	8,7	9,7	11,9	16	21,4	26,2	28,7	28,8	24,7	19,8	14,4	9,7
	18	7,1	8,4	10,9	15,1	20,5	25,3	27,9	27,5	23,3	18,3	12,4	7,8
Μυτιλήνη	6	4,9	5,7	8,4	12,5	17,7	22,5	24,7	24	19,7	15,3	10,2	6,0
	9	7,9	7,9	9,3	12,6	16,5	20,9	23,2	23,1	19,8	16,7	12,7	9,9
	12	10,5	10,7	13,0	17	21,7	26,5	28,6	28,2	24,7	20,7	15,9	11,9
	15	11,0	11,5	14,2	18,3	23,5	28,6	30,7	30,4	26,5	21,9	16,4	12,3
	18	10,0	10,8	13,5	17,3	22,6	27,5	29,5	29,3	25,3	20,4	14,7	11,0
Ρόδος	6	9,0	9,2	11,1	14,8	19,7	24,7	26,7	26,3	22,4	18,5	13,7	10,5
	9	11,4	11,0	12,4	14,8	18,4	22,2	24,5	25,1	23,0	20,0	15,9	12,8
	12	12,5	12,1	13,9	16,7	20,8	24,6	26,7	27,3	24,9	21,7	17,1	14,0
	15	14,2	14,0	15,8	18,4	22,3	26,3	28,5	29,0	26,7	23,7	19,3	15,5
	18	14,3	14,3	16,2	18,7	22,7	27	29,2	29,5	27,2	23,9	19,3	15,5
Αγρίνιο	6	13,1	13,6	15,3	17,7	21,7	26,1	28,3	28,5	25,9	22,5	17,7	14,1
	9	12,2	12,3	13,6	15,9	19,7	24	26,2	26,5	24,2	21,0	16,8	13,6
	12	4,6	4,4	6,1	9,3	14,2	17,7	19,3	19,7	16,2	13,1	9,4	5,8
	15	5,1	5,7	8,4	13,3	19,1	23,7	25,1	24,7	20,1	15,9	11,1	7,4
	18	10,5	11,5	14,6	18,1	23,9	28,8	30,7	31,0	26,7	22,7	16,2	11,5
Καλαμάτα	6	12,7	13,6	16,4	19,5	25,6	30,8	32,9	33,2	28,4	24,3	17,7	13,1
	9	10,6	11,9	14,5	17,6	23,4	28,6	30,4	30,3	26,0	21,3	15,3	10,6
	12	7,0	8,0	10,5	13,9	19,3	23,7	25,4	25,1	20,8	17,3	12,4	8,4
	15	6,3	6,2	7,2	10,0	13,9	17,8	20,0	20,0	17,1	14,5	11,0	8,1
	18	7,5	7,7	9,6	13,4	19,2	23,9	25,7	25,1	21	17,2	12,6	9,1
Ιωάννινα	6	12,3	13,0	15,5	18,5	23,4	28,2	30,2	30,5	27,3	23,7	17,9	13,3
	9	14,2	14,2	15,9	18,5	23	27,9	30	30,2	27,1	23,9	18,9	14,9
	12	11,8	12,5	14,7	17,4	22,2	27,3	29,6	29,5	26	22,0	16,5	12,6
	15	8,7	9,3	11,0	13,7	18,3	22,9	25,1	25,0	21,5	18,0	13,4	10,0
	18	1,0	1,8	4,0	7,3	11,6	15,2	17,2	17,1	13,3	10,4	6,2	2,7
Ιωάννινα	6	1,4	2,4	5,4	9,9	16	20,7	23	21,8	16,5	12,3	7,1	3,5
	9	5,6	7,4	11,1	14,6	20,8	26,1	28,6	28,3	22,8	18,4	11,6	6,4
	12	8,5	9,9	13,2	16,0	22,1	27,5	30,2	30,2	24,6	20,3	13,6	8,5
	15	7,0	8,6	11,8	14,5	20	25,8	28,2	27,9	22,3	17,8	11,5	6,9
	18	4,3	5,6	8,5	11,4	16,3	21,4	23,7	23,2	18,3	14,4	9,2	5,2

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Άραξος	6	7,3	7,3	8,5	11,1	15,3	18,8	21	21,8	18,6	15,7	12,2	9,2
	9	8,1	8,5	10,4	14,3	19,4	24	26,1	26,3	21,8	18,0	13,5	10,0
	12	12,0	12,6	14,7	17,6	22,6	27,3	29,8	30,4	26,4	22,9	17,5	13,2
	15	13,0	13,3	15,3	18,2	23,2	27,9	30,4	30,9	26,6	23,2	18,0	1,0
	18	11,7	12,4	14,4	17,2	22	26,8	29,2	29,5	25,4	21,8	16,4	12,4
	21	9,3	9,8	11,8	14,5	18,9	23,4	25,7	26,2	22,4	18,7	14,1	10,7
Αλεξανδρο ύπολη	6	2,7	3,0	4,9	9,0	13,3	17,5	20,3	20,1	15,8	12,4	8,2	4,3
	9	3,6	4,3	7,0	12,6	18,2	23,3	25,9	24,9	20	14,9	9,4	5,2
	12	6,8	8,4	10,9	15,7	21,1	26,2	29	29,1	24,4	19,2	13,1	8,0
	15	7,9	9,3	11,6	16,3	21,6	26,6	29,7	30	25	19,7	13,7	8,7
	18	6,3	8,2	10,6	15,2	20,6	25,7	28,6	28,6	23,5	18,0	11,9	7,0
	21	4,5	5,5	7,8	12,2	17,0	22,1	24,9	24,5	19,5	15,0	10,0	5,8
Κοζάνη	6	0,5	0,9	3,6	7,0	12,0	16,6	18,6	18,6	14,5	10,7	5,4	1,7
	9	0,8	1,6	5,3	10,1	15,9	21,2	23,1	22,6	17,7	12,4	6,4	2,0
	12	4,3	6,0	9,9	13,6	19,4	25,1	27,2	26,9	22,2	17	10,2	4,9
	15	5,8	7,8	11,7	15,1	20,8	26,7	29	28,9	24,1	18,8	11,5	6,0
	18	4,3	6,7	10,7	14	19,7	25,9	28,2	27,4	22,5	17	9,7	4,4
	21	2,1	3,5	7,0	10,6	15,8	21,3	23,6	22,9	18,2	13,5	7,3	3,0
Κύθηρα	6	9,9	9,7	11	13,4	17,6	22,1	24,6	25	21,7	19,1	15,1	11,8
	9	10,8	10,7	12,1	15,1	19,6	24,8	27,5	27,5	23,7	20,5	16,3	12,5
	12	11,9	11,8	13,3	16,2	20,7	25,8	28,4	28,5	25	21,6	17,2	13,3
	15	11,8	11,9	13,3	16,2	20,5	25,5	28,1	28,0	24,7	21,4	17	13,3
	18	11,0	11,1	12,5	15,1	19,6	24,3	26,8	26,8	23,5	20	15,8	12,4
	21	10,5	10,5	11,6	14,1	18,2	22,7	25,1	25,3	22,3	19,5	15,5	12,1
Κέρκυρα	6	6,6	6,9	8,3	11,2	15,4	19,2	21,1	21,6	18,4	15,7	12,3	8,9
	9	7,4	7,9	9,8	13,7	19	23,2	25	25,1	20,8	17,4	13,3	9,6
	12	11,7	12,6	14,6	17,2	22,4	26,8	29,2	29,7	25,5	22,3	17,2	12,8
	15	13,3	13,5	15,4	17,9	23,4	27,9	30,6	31,1	26,2	22,7	17,8	13,9
	18	11,9	12,7	14,7	17,2	22,5	27,2	29,7	30,0	25,2	21,4	16,5	12,6
	21	9,0	9,9	11,8	14,6	19,4	23,9	26,2	26,4	21,8	18,3	14,1	10,4
Λάρισα	6	1,7	2,2	4,6	8,3	13,2	18,1	20,3	19,6	15,6	12	7,4	3,4
	9	2,1	3,0	6,5	12,2	18,3	24,2	25,7	24,4	19,3	14,1	8,3	3,9
	12	6,6	8,8	12,8	17,2	23,2	29,1	30,6	30,1	25,6	20,2	12,8	7,5
	15	9,2	11,3	14,8	18,8	24,7	30,7	32,3	31,8	27,4	22,1	14,8	9,6
	18	7,9	10,1	13,6	17,3	23	29	30,6	29,9	25,4	20,1	13,1	8,0
	21	4,7	6,4	9,4	13,1	18,4	24,1	25,9	25	20,6	16,1	10,4	5,8
Καστοριά	6	-1,0	-0,3	2,0	5,2	9,9	13,7	15,8	15,5	11,7	8,8	4,1	0,6
	9	-0,7	0,1	3,4	8,6	14,3	19,4	21,1	19,8	14,5	10,1	5,0	1,1
	12	2,8	4,9	9,1	13,3	19,1	24,6	26,8	26,5	21,2	16,1	9,1	3,8
	15	5,6	7,8	11,6	15,1	20,7	26,3	28,7	28,6	23,4	18,6	11,4	6,0
	18	4,6	6,8	10,7	14	19,6	25,4	28	27,5	22,4	17,2	9,9	4,8
	21	1,8	3,6	7,1	10,6	15,7	21	23,3	22,8	17,9	13,3	7,1	2,9
Θεσσαλονί κη (Μίκρα)	6	3,3	3,9	6,1	9,8	14,8	19,6	21,7	21,7	17,4	13,7	9,1	4,9

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
	9	4,1	4,5	7,3	12,3	18,2	23,3	25,2	24,6	19,8	14,9	9,9	5,7
	12	7,1	8,3	11,6	16	21,6	26,6	28,5	28,4	24,0	19,1	13,3	8,2
	15	8,5	10,1	13,4	17,7	23,5	29,0	31,0	30,8	25,9	20,5	14,4	9,4
	18	8,1	9,8	13,1	16,9	22,5	28,0	30,1	29,9	25,2	19,9	13,6	8,5
	21	5,4	6,9	9,8	13,8	19	24,4	26,5	26,1	21,4	16,6	11,3	6,6
Σκύρος	6	8,5	8,3	9,6	12,7	16,5	21,0	23,1	23,2	20,3	17,1	13,5	10,1
	9	9,3	9,2	10,9	14,5	19	23,7	25,5	25,1	22,3	18,6	14,4	10,9
	12	10,9	11,1	12,9	16,2	20,5	25,1	26,8	26,7	24,0	20,6	16,1	12,1
	15	10,9	11,2	13	16,6	20,9	25,6	27,5	27,1	24,2	20,5	16	12,2
	18	10,3	10,6	12,4	16,0	20,4	25,3	27,0	26,6	23,5	19,6	14,9	11,3
	21	9,1	9,2	10,7	14,0	18,1	22,9	24,8	24,6	21,4	18	14,0	10,7
Πύργος	6	7,8	6,5	7,6	10,1	14,3	17,3	19,6	20,3	17,6	14,4	11,8	6,8
	9	7,0	7,7	10,3	14,8	19,7	24,3	26,2	26,2	22	17,9	13,2	10,1
	12	12,7	13,3	15,7	18,6	23,5	28,2	30,8	31,5	27,5	23,9	18,2	13,8
	15	13,9	14,1	16	18,5	23,6	28,4	31,1	31,7	27,5	24	18,7	14,7
	18	11,9	12,5	14,6	17,2	22,2	26,6	29,3	29,9	25,6	21,8	16,3	12,4
	21	8,7	8,9	10,9	13,7	18,0	22,2	24,9	25,3	21,1	17,7	13,6	9,8
Ρέθυμνο	9	11,2	10,8	12,3	15,0	19,0	22,8	24,8	24,8	22,5	19,7	15,9	12,8
	12	12,8	12,8	14,3	16,8	20,5	24,4	26,4	26,6	24,4	21,7	17,7	14,3
	15	12,9	12,9	14,3	17	20,6	24,4	26,3	26,6	24,3	21,5	17,6	14,3
	18	11,6	11,8	13,2	16,3	19,5	23,7	25,1	25,4	22,8	20,1	16,1	13,1
Νάξος	6	11,3	10,9	11,8	13,9	17,5	21,4	23,5	23,6	21,6	19,1	15,3	12,5
	9	11,9	11,8	13,1	16	19,4	23,3	25	24,9	23,4	20,4	16,5	13,2
	12	13,2	13,1	14,7	17,6	20,8	24,7	26,2	26,2	24,7	21,8	18,0	14,4
	15	13,3	13,3	14,7	17,7	21	25	26,6	26,5	24,8	21,7	17,9	14,4
	18	12,6	12,5	13,9	16,7	20,4	24,5	26,3	26,1	23,8	20,7	16,9	13,6
	21	11,8	11,7	12,8	15,1	18,9	23,1	25,2	25,1	22,7	19,9	16,1	13
Νέα Φιλαδέλφεια	6	8,2	7,7	9,1	12,2	17,3	22,1	24,5	24,2	20,6	16,9	13,1	9,8
	9	7,9	8,1	10,3	14,8	21,1	26,4	28,6	27,9	23,2	18,4	13,4	9,5
	12	11,6	12,3	14,5	18,5	24,4	29,9	32,3	32,1	27,9	23	17,0	12,5
	15	12,1	12,6	14,8	18,6	24,5	30,1	32,6	32,2	27,7	22,8	17,0	12,8
	18	10,7	11,1	13	16,9	22,9	28,5	30,7	29,9	25,1	20,5	15,2	11,4
	21	9,1	9,1	11	14,7	20	25,2	27,5	27,1	22,9	18,7	14,0	10,6
Σέρρες	6	1,0	1,7	3,8	8,4	14,4	18,1	19,7	19,7	14,6	12,4	5,8	2,9
	9	2,2	3,6	7,1	12,4	19,0	23,6	25,1	24,4	19,2	13,1	8,1	3,2
	12	5,3	7,8	11,7	17,1	23,7	28,4	30,2	29,8	25	18,8	11,5	6,1
	15	7,5	10,2	13,9	18,8	25,2	30,2	32,1	31,8	27,1	21,2	13,6	8,1
	18	6,1	8,1	12,2	16,6	23,3	28,3	30,4	29,6	25,2	19,3	10,8	6,9
	21	3,9	6	8,7	13,4	19,6	24	26,2	25,6	20,6	16,1	8,9	5,2
Λήμνος	6	6,2	5,6	6,9	10,5	15,0	19,3	22,3	22,4	18,4	14,7	10,7	7,6
	9	7,0	6,7	9,0	13,4	18,7	23,8	25,9	25,1	21,6	16,9	12,1	8,5
	12	9,6	9,9	11,6	15,8	21,1	26,1	28,4	27,7	24,3	19,6	14,8	11,0
	15	9,9	10,2	11,9	16,1	21,7	27,2	29,5	28,9	24,8	19,7	14,7	11
	18	8,7	9,4	11,1	15,2	21	26,6	29,2	28,5	23,7	18,5	13,1	9,7

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
	21	7,0	7,2	8,7	12,4	17,4	22,7	25,3	24,7	20,2	15,9	11,5	8,6
Αρτα	9	6,8	7,4	10,3	14,4	20,7	25,2	26,4	26,5	21,9	17,4	12,1	8,4
	12	11,7	12,5	15,4	18,6	24,7	29,1	31,0	31,4	26,8	22,9	16,7	12,3
	15	13,9	14,1	16,4	19,2	25,2	29,7	31,8	32,1	27,4	23,8	18,0	13,9
	18	11,0	12,0	14,1	17,1	22,9	27,7	29,9	29	24,5	20,9	15,0	11,0
Αργοστόλι	6	9,7	9,2	10,0	12,5	16,8	20,3	22,6	23,9	20,7	18	14,9	11,8
	9	11,2	10,4	12,1	15,1	20	23,9	25,8	26,5	23,2	19,8	15,6	12,4
	12	13,6	13,3	14,6	17,1	21,9	25,8	28,0	28,8	25,6	22,7	18,2	14,8
	15	13,8	13,6	14,8	17,4	22,5	26,6	28,9	29,4	25,9	22,6	18,2	14,8
	18	12,6	12,7	13,8	16,4	21,8	26	28,2	28,9	24,9	21,4	16,9	13,5
	21	10,5	10,3	11,1	14,1	18,9	23,3	25,6	26,5	22,1	19,1	15,3	12,2
Άργος	9	6,0	6,2	8,8	13,1	18,4	22,7	24,4	24,0	20,2	16,4	11,4	7,7
	12	10,5	11,1	13,2	16,3	20,9	24,9	26,8	26,8	23,6	20,5	15,7	11,5
	15	11,4	11,6	13,3	16,3	20,7	24,8	26,9	27	23,8	20,8	16,3	12,3
	18	9,4	10,1	12	14,9	19,4	23,6	25,7	25,3	22,2	19,3	15,3	10,6
Λαμία	6	4,7	4,3	6,3	9,7	14,9	18,9	20,0	19,0	16,3	12,3	8,4	6,0
	9	5,0	5,3	8,2	13,5	20,1	25,2	26,3	25,0	20,4	15,5	10,2	6,2
	12	9,4	10,6	13,6	18,1	24,5	29,9	31,3	30,7	26,8	21,4	14,7	10,2
	15	11,3	12,3	14,9	18,9	25,2	30,8	32,1	31,5	27,7	22,4	16,0	11,7
	18	9,2	10,7	13,4	17,6	23,3	28,8	30,4	29,4	25,4	19,9	13,6	9,4
	21	6,6	7,2	9,9	13,7	19,3	24,1	25,6	24,3	20,6	15,6	10,6	7,8
Τανάγρα	6	5,3	4,7	6,0	9,2	14,3	18,8	21,2	20,8	17,3	13,7	9,8	6,9
	9	6,0	6,0	8,1	13,3	20	25,3	27,2	26	21,7	16,3	11,2	7,8
	12	10,0	10,8	13,0	17,2	23,8	29,0	31,1	30,4	26,4	21,4	15,5	11,2
	15	11,2	11,7	13,8	17,9	24,6	30,0	32,1	31,4	27,2	22,0	16,0	12,1
	18	9,4	10,4	12,6	16,7	22,8	28,3	30,7	30	25,5	19,9	14,1	10,3
	21	6,9	7,1	8,9	12,6	18,1	23,4	25,7	24,7	20,6	15,9	11,5	8,5
Ανδραβίδα	6	6,9	6,7	7,8	10,5	14,9	18,3	20,0	20,7	18,1	14,4	11,5	8,6
	9	7,9	7,9	9,7	14,2	19,7	23,9	25,3	25,6	21,7	17,2	12,9	9,8
	12	12,3	12,8	14,7	18	23,5	27,5	29,1	30,1	26,7	23,1	17,6	13,6
	15	13,6	13,6	15,3	18,3	24	28,1	29,9	30,7	26,9	23,4	18,2	14,5
	18	12,0	12,5	14,3	17,2	22,6	26,7	28,4	29,3	25,6	21,5	16,3	12,7
	21	9,1	9,4	10,9	13,9	18,9	22,9	24,6	25,2	21,6	17,6	13,6	10,5
Ιεράπετρα	9	11,7	11,4	13	15,8	19,9	23,6	25,8	25,8	23,6	20,7	16,9	13,3
	12	13,3	13,1	14,5	16,8	20,6	24,2	26,4	26,7	24,6	21,9	18,2	14,5
	15	13,2	13,1	14,5	16,9	20,7	24,5	26,6	26,9	24,6	21,9	18,1	14,4
	18	11,8	12,1	13,1	15,8	19,5	23,6	25,1	25,5	22,9	20,6	16,6	12,8
Τρίκαλα Ημαθίας	9	3,0	4,0	7,5	12,9	19,7	24,3	25,1	24,5	19,6	14,4	8,7	4,2
	12	6,2	8,2	12,2	17,2	23,6	28,1	29,3	29	24,6	18,9	12,0	6,9
	15	8,7	10,9	14,5	18,9	25	29,8	31,3	30,9	26,5	21,1	14,0	8,8
	18	7,4	9,0	12,5	16,9	22,6	27,8	29,7	28,3	24,1	18,3	11,9	6,9
Ηράκλειο	6	10,7	10,1	11,1	13,8	17,3	21,4	24,0	24,1	21,3	18,7	15,2	12,2
	9	11,9	11,8	13,4	16,9	21,1	25,3	27,3	27,1	24,4	21,3	17,1	13,4
	12	14,0	14,0	15,5	18,4	22,1	25,9	27,9	28,0	25,9	23,4	19,4	15,5

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
	15	13,9	13,9	15,5	18,5	22,1	26	28,1	28,1	25,9	23,1	19,0	15,4
	18	12,7	12,9	14,5	17,4	21	25,2	27,4	27,2	24,8	21,7	17,5	14,0
	21	11,4	11,3	12,6	15,2	18,8	23,2	25,5	25,4	22,9	19,9	16,0	12,9
Σαντορίνη (Θήρα)	6	11,0	10,8	11,7	13,9	17,6	21,6	24,0	24,0	21,4	18,7	15,2	12,5
	9	11,9	11,7	13,3	16,1	20,4	24,8	26,7	26,5	24	20,7	16,7	13,3
	12	13,3	13,3	14,8	17,5	21,7	26,2	28,1	28,1	25,6	22,4	18,3	14,6
	15	13,4	13,4	15	17,8	22	26,6	28,6	28,5	25,8	22,4	18,2	14,6
	18	12,5	12,5	14,1	16,6	20,8	25,4	27,4	27,3	24,5	21,0	17,0	13,6
	21	11,4	11,4	12,6	14,9	18,8	23	25,3	25,1	22,5	19,4	15,7	12,9
Μεθώνη	6	9,3	9,3	10,5	12,8	16,5	20	22,2	23,2	20,7	17,7	14,3	10,9
	9	10,7	10,9	12,6	15,4	19,4	23	25,1	26,1	23,6	20,4	16,1	12,3
	12	13,5	13,6	15	17,1	20,8	24,4	26,5	27,9	25,8	23,2	18,7	14,8
	15	13,8	13,9	15,2	17,5	21,2	25	27,2	28,4	26,1	23,2	18,5	14,9
	18	12,2	12,7	14,1	16,4	20,3	24	26,2	27,3	24,8	21,5	16,9	13,2
	21	10,3	10,8	12	14,3	18	21,7	23,9	25	22,6	19,3	15,2	11,7
Μήλος	6	9,8	9,5	10,6	13	17,1	21,5	23,7	23,6	21,1	18,2	14,5	11,2
	9	10,6	10,4	12,1	15,4	20,3	25,3	27,1	26,7	23,8	20,2	15,8	12,1
	12	12,0	12,0	13,9	17,5	22,5	27,4	29,1	28,8	26,1	22,3	17,5	13,3
	15	11,9	12,1	14	17,7	22,6	27,6	29,3	28,8	26	22	17,2	13,1
	18	10,7	10,8	12,5	15,7	20,3	25,4	27,1	26,5	23,6	19,8	15,4	11,9
	21	10,2	10,1	11,3	13,9	18	22,5	24,6	24,3	21,7	18,7	14,9	11,6
Αγχίαλος	6	4,4	4,5	6,4	9,8	14,4	19,1	21,0	20,7	17,2	14,0	9,8	5,9
	9	5,7	6,4	9,2	13,5	19,4	25	26,6	25,8	21,5	17,1	11,5	7,0
	12	9,1	10,3	13,1	16,8	22,3	27,9	29,8	29,6	25,7	21,0	15,0	10,0
	15	10,6	11,6	13,9	17,7	23,1	28,8	30,8	30,5	26,4	21,7	15,9	11,2
	18	9,1	10,5	13	16,6	21,9	27,4	29,7	29,2	25,1	20,3	14,3	9,6
	21	6,2	7,1	9,5	13,3	18,1	23,5	25,5	24,7	20,8	16,6	11,5	7,4
Ελευσίνα	6	6,7	6,5	8,3	11,4	16,5	21,5	24,5	24,4	20,3	16,5	12,1	8,3
	9	8,2	8,4	10,8	15,3	21,3	26,7	28,9	28,3	23,9	19,3	14,0	9,7
	12	11,4	11,7	14,3	18,3	24,2	29,7	32,0	31,6	27,4	22,8	17,2	12,5
	15	12,1	12,5	15,0	18,8	24,5	30,2	32,7	32,4	28	23,2	17,4	12,9
	18	10,4	11,2	13,5	17,1	22,5	28,1	30,6	30,2	25,7	21	15,6	11,3
	21	8,3	8,7	10,9	14,3	19,5	24,8	27,3	26,9	22,7	18,6	13,7	9,8
Σούδα	6	9,5	9,1	10,5	13	16,8	21	23,3	23,2	20,7	17,9	14,2	11,0
	9	10,8	10,6	12,6	16,2	21,1	25,9	27,9	27,5	24,3	20,6	16,0	12,3
	12	12,9	13,1	15,0	18,5	23,3	28,0	29,9	29,7	26,8	23,4	18,6	14,5
	15	13,0	13,3	15,3	18,7	23,5	28,4	30,4	30,0	26,8	23,2	18,4	14,5
	18	11,7	11,9	13,7	16,9	21,5	26,6	28,8	28,3	24,7	21,1	16,5	13,0
	21	10,3	10,2	11,7	14,4	18,5	23,1	25,2	24,9	22,0	19,0	15,0	11,9
Σάμος	6	8,8	8,5	9,8	12,7	16,9	21,7	24,4	24,5	20,7	17,3	13,2	10,4
	9	9,7	9,6	11,7	15,6	20,5	25,3	27,5	27,3	23,5	19,6	14,7	11,4
	12	12,0	11,9	14,1	17,6	22,8	27,9	30,6	30,5	26,5	22,5	17,4	13,4
	15	12,5	12,7	15	18,6	24,1	29,6	32,3	32,3	27,8	23,3	17,8	13,7
	18	11,4	11,9	14,1	17,5	23,0	28,3	31,0	30,9	26,1	21,6	16,1	12,5

Περιοχή	Τοπική ώρα	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
	21	9,9	10,0	11,7	14,8	19,9	25,2	28,1	27,9	23,1	19,0	14,3	11,4
Ζάκυνθος	6	7,5	7,5	8,4	10,9	14,7	18,9	21,1	21,6	18,6	16,0	12,7	9,3
	9	9,6	9,8	11,4	14,6	19,6	24,3	26,4	26,5	22,8	19,4	15,0	11,3
	12	12,9	13,3	14,9	17,6	22,5	27,3	29,6	30,1	26,5	23,2	18,2	14,1
	15	13,6	13,8	15,4	18,2	23,6	28,7	31,4	31,7	27,1	23,4	18,3	14,5
	18	12,1	12,5	14,4	17,1	22,5	27,7	30,6	30,8	26,0	21,8	16,8	13,0
	21	9,3	9,9	11,5	14	18,8	23,7	26,3	26,6	22,3	18,7	14,5	11,0
Τρίπολη	6	1,1	1,3	2,4	5,2	9,4	13,3	15,5	15,2	11,7	9,0	5,8	3,5
	9	1,6	2,6	5,1	9,6	15,5	20,9	22,8	21,7	16,6	12,2	6,8	3,3
	12	6,3	7,5	10,7	14,9	21	26,7	28,9	28,5	23,6	19,1	12,1	7,2
	15	8,9	9,7	12,6	16,1	22	27,8	30	29,6	25,2	20,8	13,9	8,9
	18	7,0	7,9	10,7	14	19,8	25,7	27,8	27,0	22,6	18,0	11,4	6,9
	21	4,2	4,8	6,9	10,1	15,4	20,7	23	22,2	17,9	13,8	9,0	5,4

Πίνακας Β.2: Τυπική απόκλιση των τιμών της μέσης θερμοκρασίας (Πίνακας Β.1) για κάθε μήνα και ελληνική περιοχή, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων της ΕΜΥ

Περιοχή	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	3,8	4,0	3,9	3,5	3,8	3,9	3,6	3,6	3,5	3,8	3,8	3,9
Αθήνα (Ν. Φιλαδέλφεια)	3,9	4,2	4,3	4,0	4,4	4,3	4,1	4,2	4,1	4,3	4,0	3,9
Αγρίνιο	4,6	4,9	5,1	4,8	5,1	5,1	5,1	5,3	5,2	5,3	4,8	4,4
Αγχίαλος	4,4	4,7	4,9	4,4	4,8	4,7	4,6	4,6	4,7	4,8	4,5	4,6
Αλεξανδρούπολη	4,5	4,8	4,7	4,4	4,6	4,7	4,6	4,6	4,7	4,7	5,1	5,3
Ανδραβίδα	4,0	4,1	4,2	4,2	4,4	4,4	4,2	4,2	4,1	4,6	4,2	3,9
Άραξος	3,8	3,9	4,0	3,8	4,1	4,3	4,2	4,0	3,9	4,2	4,1	3,7
Άργος (Πυργέλα)	4,7	5,0	4,9	4,3	4,8	5,2	5,5	5,4	5,0	4,9	4,7	4,6
Αργοστόλι	3,0	3,1	3,2	3,2	3,4	3,4	3,2	3,1	2,9	3,1	3,2	3,1
Άρτα	4,7	4,7	4,7	4,5	4,3	4,1	4,1	4,5	4,4	5,0	4,9	4,3
Ελευσίνα	4,0	4,3	4,4	4,1	4,5	4,5	4,1	4,0	4,1	4,3	4,1	4,0
Ζάκυνθος	3,9	3,9	3,9	3,9	4,4	4,6	4,6	4,4	4,1	4,1	4,1	3,8
Ηράκλειο	2,9	3,2	3,5	3,8	3,6	3,2	2,6	2,5	2,9	3,5	3,5	3,1
Θεσσαλονίκη (Μίκρα)	4,0	4,5	4,5	4,3	4,5	4,4	4,1	4,1	4,2	4,5	4,4	4,4
Ιεράπετρα	3,2	3,4	3,2	3,2	3,7	4,4	4,8	4,5	4,0	3,7	3,7	3,5
Ιωάννινα	4,5	4,8	5,0	4,8	5,2	5,5	5,7	5,6	5,1	5,1	4,8	4,3
Καλαμάτα	4,1	4,3	4,5	4,4	4,6	4,8	4,6	4,6	4,7	4,7	4,5	4,0
Καστοριά	4,9	5,3	5,8	5,4	5,4	5,6	5,8	5,7	5,5	5,5	5,0	4,8
Κέρκυρα	4,3	4,2	4,0	3,8	4,0	4,2	4,2	4,1	3,9	4,0	4,3	4,1
Κοζάνη	4,7	5,3	5,7	5,1	5,1	5,1	5,2	4,9	4,9	5,3	4,9	4,8
Κύθηρα	2,7	2,9	2,9	2,8	3,4	3,3	3,1	2,7	2,6	2,9	3,0	3,0
Λαμία	4,4	4,9	5,6	5,0	5,3	5,4	5,3	5,3	5,4	5,5	4,8	4,7
Λάρισα	4,7	5,3	5,7	5,2	5,7	5,5	5,2	5,2	5,3	5,5	4,8	4,9
Λήμνος	4,2	4,4	4,4	4,0	4,0	4,0	3,6	3,3	3,8	4,1	4,4	4,4
Μεθώνη	3,3	3,3	3,3	3,0	3,0	2,8	2,6	2,5	2,8	3,5	3,6	3,6
Μήλος	2,9	3,2	3,4	3,2	3,8	3,7	3,3	3,0	3,2	3,3	3,3	3,2
Μυτιλήνη	3,9	4,0	4,1	3,9	3,9	3,8	3,5	3,4	3,5	3,7	4,0	3,9
Νάξος	2,8	3,0	3,0	2,9	2,8	2,5	2,1	1,9	2,5	2,9	3,2	3,0
Πύργος	4,3	4,5	4,6	4,2	4,4	4,7	4,5	4,4	4,5	4,8	4,6	4,3
Ρέθυμνο	3,1	3,4	3,6	3,6	3,6	3,7	3,7	3,6	3,7	3,8	3,6	3,2
Ρόδος	2,8	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,5	2,3	2,3	2,8	3,1	2,8
Σάμος	3,9	4,0	3,8	3,8	4,2	4,2	3,8	3,7	3,7	3,8	4,2	4,0
Σαντορίνη	2,9	3,1	3,1	2,8	3,1	3,1	2,6	2,5	2,7	3,0	3,4	3,0
Σέρρες	4,3	4,8	5,2	5,0	5,1	4,7	4,7	4,7	5,2	5,3	4,9	4,4
Σκύρος	3,5	3,9	4,0	3,6	3,6	3,2	2,8	2,5	3,2	3,7	3,8	3,7
Σούδα	3,0	3,4	3,8	3,9	4,2	4,1	3,8	3,5	3,6	3,8	3,5	3,1
Τανάγρα	4,5	4,8	5,3	5,0	5,4	5,4	5,1	5,0	5,0	5,1	4,7	4,6
Τρίκαλα Ημαθίας	4,7	5,1	5,2	4,8	4,6	4,0	4,0	4,2	4,7	5,3	4,8	4,9
Τρίπολη	4,9	5,2	5,9	5,7	6,2	6,5	6,3	6,2	6,3	6,2	5,3	4,7
Χρυσούπολη	4,1	4,4	4,2	3,9	3,9	3,8	3,8	3,9	4,1	4,5	4,6	4,5

Γ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΤΡΙΤΟ

Γ. Αποτελέσματα Ανάλυσης Υπολογισμού Ενεργειακής Απόδοσης Φ/Β στις Ελληνικές Περιοχές.

Πίνακας Γ.1: Μέση ετήσια ποσοστιαία (%) διακύμανση του Ονομαστικού Βαθμού Απόδοσης n_{ref} του Φ/Β.
Εκτίμηση βάσει της σχέσης 5 (Πίνακας 4.6.2), για $\beta_{ref}=0,0045$ και $k=0,02$

Περιοχή	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μ.Ο.
Αθήνα, Ελληνικό	-22,1	-19,6	-19,8	-20,5	-23,1	-25,4	-26,7	-27,1	-25,7	-24,3	-24,2	-12,6	-23,4
Καβάλα	-21,8	-18,7	-19,0	-20,1	-23,0	-25,5	-26,8	-27,0	-25,2	-23,5	-23,7	-13,9	-23,1
Μυτιλήνη	-21,7	-19,0	-19,3	-20,5	-23,1	-25,6	-26,8	-27,0	-25,6	-24,0	-23,8	-11,8	-23,3
Ρόδος	-22,3	-19,9	-20,2	-20,9	-23,0	-25,4	-26,6	-26,8	-26,1	-25,7	-24,5	-13,5	-23,5
Αγρίνιο	-22,5	-19,3	-20,3	-22,6	-23,4	-25,7	-27,0	-28,0	-25,8	-24,0	-24,2	-12,2	-23,8
Καλαμάτα	-22,4	-20,0	-20,2	-20,7	-23,2	-25,4	-26,6	-27,1	-25,9	-24,7	-24,5	-13,3	-23,5
Ιωάννινα	-19,4	-17,1	-17,8	-18,6	-21,6	-24,4	-25,7	-25,8	-23,7	-22,1	-21,5	-9,7	-21,7
Άραξος	-22,1	-19,6	-19,9	-20,5	-23,1	-25,5	-26,7	-27,1	-25,7	-24,4	-24,2	-12,5	-23,4
Αλεξανδρούπολη	-21,6	-18,5	-18,9	-20,1	-22,9	-25,6	-26,8	-27,0	-25,3	-23,5	-23,6	-13,9	-23,2
Κοζάνη	-18,6	-16,2	-17,0	-18,1	-21,0	-23,8	-25,1	-25,2	-23,1	-21,3	-20,7	-8,6	-20,8
Κύθηρα Α/Δ	-21,7	-19,5	-19,8	-20,4	-22,8	-25,1	-26,2	-26,6	-25,5	-25,0	-23,9	-13,2	-23,2
Κέρκυρα	-22,0	-19,3	-19,6	-20,3	-23,2	-25,6	-26,8	-27,3	-25,5	-24,0	-24,0	-11,7	-23,3
Λάρισα	-21,5	-18,8	-19,2	-20,1	-22,9	-25,4	-26,6	-26,9	-25,2	-23,6	-23,5	-11,3	-23,0
Καστοριά	-18,5	-16,1	-17,0	-18,1	-21,0	-24,0	-25,2	-25,3	-23,0	-21,2	-20,6	-8,5	-20,9
Θεσσαλονίκη (Μίκρα)	-21,8	-18,8	-19,1	-20,1	-22,9	-25,5	-26,8	-27,0	-25,2	-23,6	-23,7	-14,3	-23,2
Σκύρος	-21,8	-19,1	-19,4	-20,4	-23,0	-25,5	-26,7	-27,0	-25,5	-23,9	-23,8	-12,0	-23,3
Πύργος	-22,3	-19,8	-20,1	-20,6	-23,2	-25,5	-26,7	-27,2	-25,8	-24,6	-24,4	-12,9	-23,4
Ρέθυμνο	-22,7	-20,4	-20,5	-21,1	-23,2	-25,4	-26,5	-27,0	-26,1	-25,6	-24,9	-14,5	-23,8
Νάξος	-22,2	-19,8	-20,0	-20,8	-23,1	-25,5	-26,7	-27,0	-25,9	-24,6	-24,3	-13,2	-23,5
Νέα Φιλαδέλφεια	-21,8	-18,9	-19,9	-20,1	-23,0	-25,3	-26,6	-27,6	-25,6	-23,7	-23,7	-12,0	-23,2
Σέρρες	-21,6	-18,5	-18,8	-20,0	-22,8	-25,5	-26,7	-27,0	-25,1	-23,4	-23,5	-13,7	-23,1
Λήμνος	-21,7	-18,8	-19,2	-20,3	-23,1	-25,6	-26,8	-27,1	-25,5	-23,8	-23,7	-11,4	-23,3
Άρτα	-22,1	-19,4	-19,7	-20,3	-23,1	-25,5	-26,7	-27,2	-25,5	-24,2	-24,1	-11,8	-23,2
Αργοστόλι	-22,1	-19,6	-19,9	-20,5	-23,2	-25,5	-26,7	-27,2	-25,7	-24,4	-24,2	-12,5	-23,4
Αργος	-22,3	-19,8	-20,0	-20,6	-23,2	-25,5	-26,7	-27,2	-25,8	-24,5	-24,3	-12,9	-23,5
Λαμία	-21,9	-19,3	-19,6	-20,4	-23,0	-25,5	-26,7	-27,0	-25,5	-24,0	-23,9	-12,0	-23,2
Τανάγρα	-21,3	-18,9	-19,2	-20,0	-22,7	-25,2	-26,4	-26,7	-25,2	-23,7	-23,4	-11,9	-23,0
Ανδραβίδα	-22,3	-19,8	-20,0	-20,6	-23,2	-25,5	-26,7	-27,2	-25,8	-24,5	-24,3	-12,7	-23,4
Ιεράπετρα	-22,8	-20,5	-20,7	-21,2	-23,1	-25,3	-26,5	-26,9	-26,2	-26,0	-25,0	-14,6	-23,7
Τρίκαλα Ημαθίας	-21,9	-18,8	-19,1	-20,1	-23,0	-25,5	-26,7	-27,0	-25,2	-23,6	-23,7	-14,4	-23,2
Ηράκλειο	-22,5	-20,3	-20,4	-21,0	-23,1	-25,3	-26,5	-26,9	-26,1	-25,7	-24,7	-14,3	-23,7
Σαντορίνη (Θήρα)	-22,2	-19,9	-20,0	-20,7	-23,1	-25,6	-26,9	-27,3	-26,2	-25,2	-24,3	-13,5	-23,8
Μεθώνη	-22,2	-19,9	-20,1	-20,6	-23,1	-25,3	-26,5	-27,0	-25,8	-24,6	-24,3	-13,3	-23,5
Μήλος	-21,4	-19,2	-19,5	-20,4	-22,7	-25,1	-26,3	-26,6	-25,5	-24,0	-23,6	-12,9	-23,2
Αγχίαλος	-21,9	-19,2	-19,4	-20,3	-23,0	-25,5	-26,7	-27,1	-25,5	-23,9	-23,8	-11,8	-23,2
Ελευσίνα	-21,9	-19,4	-19,7	-20,4	-23,0	-25,4	-26,6	-27,0	-25,6	-24,2	-24,0	-12,5	-23,3
Σούδα	-22,0	-19,8	-20,1	-20,6	-22,8	-25,1	-26,3	-26,7	-25,7	-25,2	-24,1	-13,7	-23,4
Σάμος	-22,0	-19,5	-19,8	-20,7	-23,1	-25,5	-26,8	-27,0	-25,9	-24,5	-24,2	-12,7	-23,4
Ζάκυνθος	-22,3	-19,8	-19,9	-20,6	-23,1	-25,3	-26,6	-27,2	-25,8	-24,4	-24,2	-12,9	-23,5
Τρίπολη	-19,0	-17,0	-17,8	-18,5	-21,1	-23,9	-25,1	-25,3	-23,6	-22,1	-21,2	-10,3	-21,2

Χίος	-21,9	-19,3	-19,6	-20,6	-23,1	-25,5	-26,8	-27,0	-25,8	-24,2	-24,0	-12,2	-23,4
Χανιά	-22,0	-19,8	-20,0	-20,6	-22,8	-25,1	-26,3	-26,7	-25,7	-25,1	-24,1	-13,8	-23,4
Τυμπάκι	-22,9	-20,6	-20,7	-21,2	-23,2	-25,4	-26,6	-27,0	-26,3	-26,2	-25,0	-14,6	-23,9
Σύρος	-21,8	-19,4	-19,7	-20,6	-23,0	-25,3	-26,5	-26,9	-25,7	-24,2	-24,0	-12,7	-23,2
Σητεία	-22,2	-20,0	-20,1	-20,7	-22,8	-25,1	-26,3	-26,6	-25,8	-25,4	-24,3	-14,0	-23,5
Πάτρα	-22,1	-19,6	-19,9	-20,4	-23,2	-25,5	-26,7	-27,1	-25,7	-24,3	-24,2	-12,5	-23,5
Πάρος	-22,1	-19,7	-19,9	-20,7	-23,1	-25,4	-26,6	-26,9	-25,9	-24,5	-24,2	-13,1	-23,4
Κόρινθος	-22,1	-19,6	-19,9	-20,5	-23,1	-25,5	-26,7	-27,1	-25,7	-24,4	-24,2	-12,6	-23,4
Κόνιτσα	-19,1	-16,7	-17,5	-18,4	-21,5	-24,2	-25,6	-25,7	-23,5	-21,8	-21,2	-9,2	-21,4
Κομοτηνή	-21,5	-18,4	-18,7	-20,1	-22,9	-25,5	-26,8	-26,9	-25,2	-23,3	-23,4	-13,6	-23,1
Τρίκαλα	-21,4	-18,7	-19,1	-19,9	-22,7	-25,2	-26,3	-26,7	-25,0	-23,5	-23,4	-11,2	-22,7
Κάλυμνος	-22,1	-19,7	-20,0	-20,9	-23,1	-25,4	-26,6	-26,9	-25,9	-24,6	-24,3	-13,2	-23,4
Δράμα	-21,2	-18,1	-18,5	-19,8	-22,6	-25,3	-26,6	-26,7	-24,9	-23,0	-23,1	-13,4	-22,8
Αλιάρτος	-21,5	-19,0	-19,3	-20,2	-22,8	-25,3	-26,5	-26,8	-25,3	-23,8	-23,5	-12,0	-23,1

Πίνακας Γ.2: Μέση ετήσια ποσοστιαία (%) διακύμανση του Ονομαστικού Βαθμού Απόδοσης n_{ref} του Φ/Β.
Εκτίμηση βάσει της σχέσης 5 (Πίνακας 4.6.2), για $\beta_{ref}=0,0045$ και $k=0,055$

Περιοχή	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μ.Ο.
Αθήνα, Ελληνικό	-28,9	-27,6	-28,6	-30,6	-34,0	-37,2	-38,8	-39,3	-36,9	-33,9	-31,9	-19,1	-33,6
Καβάλα	-28,7	-27,1	-27,5	-29,1	-33,5	-36,6	-38,0	-38,3	-35,8	-32,5	-31,1	-19,4	-32,8
Μυτιλήνη	-27,4	-26,1	-27,8	-30,7	-34,9	-37,6	-39,0	-39,2	-37,2	-33,7	-31,3	-17,8	-33,6
Ρόδος	-29,8	-28,8	-30,3	-32,0	-34,7	-37,6	-39,0	-39,3	-38,2	-36,5	-33,6	-20,8	-34,4
Αγρίνιο	-29,6	-27,3	-29,4	-32,3	-34,0	-37,4	-39,2	-40,1	-37,0	-33,8	-32,1	-18,8	-33,9
Καλαμάτα	-29,7	-28,2	-29,6	-30,9	-34,3	-37,3	-38,7	-39,3	-37,1	-34,6	-32,5	-20,0	-33,9
Ιωάννινα	-25,2	-23,9	-25,7	-27,4	-31,5	-35,4	-37,2	-37,4	-33,7	-30,6	-27,9	-15,1	-31,1
Άραξος	-29,0	-27,6	-28,9	-30,7	-34,1	-37,0	-38,5	-39,1	-36,9	-34,1	-31,8	-18,9	-33,5
Αλεξανδρούπολη	-27,5	-25,8	-27,1	-29,5	-33,1	-36,8	-38,3	-38,7	-36,0	-32,6	-30,3	-19,3	-32,8
Κοζάνη	-25,0	-22,8	-24,3	-25,9	-28,6	-32,8	-34,8	-35,8	-32,7	-28,6	-27,1	-15,2	-29,0
Κύθηρα Α/Δ	-28,8	-27,4	-29,2	-30,9	-34,6	-37,2	-38,4	-39,0	-37,1	-34,9	-32,1	-19,8	-33,7
Κέρκυρα	-28,6	-26,9	-28,5	-30,2	-34,1	-37,3	-38,8	-39,3	-36,5	-33,3	-31,3	-17,9	-33,4
Λάρισα	-27,7	-26,1	-27,6	-30,1	-33,5	-36,9	-38,4	-38,7	-36,0	-32,3	-30,4	-17,1	-32,9
Καστοριά	-25,3	-23,6	-25,5	-27,3	-30,6	-34,9	-36,4	-36,5	-33,3	-30,0	-27,5	-14,5	-30,3
Θεσσαλονίκη (Μίκρα)	-27,8	-25,8	-26,9	-29,4	-32,9	-36,3	-38,1	-38,2	-35,3	-31,8	-30,2	-19,9	-32,5
Σκύρος	-27,3	-26,1	-27,6	-30,5	-34,1	-37,3	-38,7	-39,1	-36,7	-32,9	-30,7	-17,6	-33,3
Πύργος	-29,8	-28,2	-29,7	-30,9	-34,4	-37,3	-38,9	-39,4	-37,1	-34,8	-32,7	-19,8	-33,9
Ρέθυμνο	-28,9	-28,2	-29,1	-31,8	-35,2	-37,5	-38,8	-39,3	-37,7	-34,3	-33,1	-20,6	-34,3
Νάξος	-28,5	-27,3	-29,1	-31,3	-34,6	-37,6	-39,0	-39,4	-37,5	-34,6	-32,1	-19,4	-34,0
Νέα Φιλαδέλφεια	-28,7	-26,7	-28,9	-30,1	-33,6	-36,6	-38,3	-39,6	-37,0	-33,4	-31,1	-18,4	-33,2
Σέρρες	-27,6	-25,7	-26,9	-29,3	-32,9	-36,5	-38,1	-38,3	-35,6	-32,0	-30,1	-19,2	-32,5
Λήμνος	-27,4	-26,0	-27,7	-30,5	-34,3	-37,4	-38,9	-39,1	-36,7	-33,2	-30,6	-17,0	-33,4
Άρτα	-29,6	-27,7	-28,8	-30,1	-33,7	-37,0	-38,5	-39,0	-36,7	-34,1	-32,0	-18,8	-33,3
Αργοστόλι	-29,3	-27,8	-29,4	-30,8	-34,7	-37,6	-39,0	-39,5	-37,1	-34,3	-32,2	-19,1	-33,9
Αργος	-29,8	-28,2	-29,6	-31,1	-34,5	-37,6	-39,2	-39,7	-37,3	-34,7	-32,5	-19,8	-34,0
Λαμία	-28,5	-26,7	-28,1	-30,2	-33,6	-37,0	-38,3	-38,7	-36,2	-32,8	-31,2	-18,2	-33,0
Τανάγρα	-27,7	-26,3	-27,6	-30,0	-33,5	-37,0	-38,6	-38,9	-36,5	-32,8	-30,4	-17,8	-33,1
Ανδραβίδα	-29,8	-28,3	-29,7	-31,0	-34,3	-37,6	-39,1	-39,6	-37,2	-34,8	-32,7	-19,8	-34,0
Ιεράπετρα	-30,2	-29,1	-30,7	-32,6	-34,9	-37,4	-38,7	-39,2	-38,1	-36,5	-34,3	-22,1	-34,6
Τρίκαλα Ημαθίας	-28,6	-26,5	-27,2	-29,3	-32,8	-36,6	-37,9	-38,3	-35,5	-32,1	-30,7	-20,6	-32,6
Ηράκλειο	-29,1	-28,1	-29,5	-31,9	-34,8	-37,6	-39,0	-39,4	-37,8	-35,4	-32,7	-20,8	-34,3
Σαντορίνη (Θήρα)	-29,0	-27,8	-28,7	-31,2	-34,9	-38,7	-40,7	-41,1	-39,1	-34,4	-32,1	-20,3	-34,9
Μεθώνη	-28,7	-27,6	-29,4	-30,7	-34,8	-37,1	-38,5	-39,0	-37,2	-34,6	-32,6	-19,7	-33,8
Μήλος	-27,1	-25,6	-28,3	-32,0	-34,8	-37,4	-38,7	-39,0	-37,4	-33,5	-31,7	-18,5	-33,8
Αγχίαλος	-28,8	-26,8	-27,9	-30,1	-33,6	-37,2	-38,6	-38,9	-36,3	-32,6	-30,9	-18,0	-33,1
Ελευσίνα	-28,2	-27,0	-28,4	-30,4	-33,9	-36,8	-38,5	-39,2	-36,8	-33,7	-32,0	-18,9	-33,3
Σούδα	-28,5	-27,6	-29,7	-31,5	-34,6	-37,4	-38,9	-39,4	-37,5	-34,9	-32,0	-20,2	-34,0
Σάμος	-29,1	-27,8	-29,3	-31,4	-34,7	-37,9	-39,3	-39,7	-38,0	-35,1	-32,9	-19,5	-34,2
Ζάκυνθος	-29,2	-27,5	-28,1	-31,0	-33,8	-36,3	-38,6	-39,6	-37,0	-33,4	-31,3	-18,9	-33,5
Τρίπολη	-26,2	-24,8	-26,7	-28,4	-31,6	-35,4	-36,6	-37,0	-34,8	-31,7	-29,1	-17,2	-31,2

Χίος	-27,8	-26,5	-28,5	-31,2	-34,9	-37,6	-39,0	-39,3	-37,5	-34,6	-31,9	-18,5	-33,9
Χανιά	-28,2	-27,3	-29,2	-31,2	-34,6	-37,6	-38,9	-39,3	-37,4	-34,3	-32,0	-20,2	-34,0
Τυμπάκι	-30,3	-29,4	-30,9	-32,2	-34,9	-37,7	-39,1	-39,7	-38,3	-36,8	-33,9	-22,0	-34,8
Σύρος	-28,2	-27,1	-28,9	-31,6	-34,6	-37,5	-38,8	-39,3	-37,4	-34,1	-32,0	-19,5	-33,8
Σητεία	-28,8	-27,9	-29,5	-31,5	-34,5	-37,5	-38,8	-39,2	-37,6	-35,4	-32,5	-20,6	-34,1
Πάτρα	-28,0	-26,8	-29,3	-30,1	-34,4	-37,4	-38,6	-39,1	-36,9	-33,7	-31,3	-18,7	-33,5
Πάρος	-28,6	-27,5	-29,2	-31,7	-34,7	-37,6	-38,9	-39,3	-37,6	-34,7	-32,2	-19,7	-34,0
Κόρινθος	-29,3	-28,0	-29,1	-30,9	-34,4	-37,5	-38,8	-39,3	-37,0	-34,2	-32,1	-19,0	-33,8
Κόνιτσα	-25,1	-23,4	-26,1	-27,5	-32,1	-35,1	-37,3	-37,5	-34,0	-30,7	-28,5	-15,4	-31,1
Κομοτηνή	-27,3	-25,2	-26,8	-29,7	-33,4	-36,9	-38,5	-38,7	-36,0	-32,4	-30,2	-19,3	-32,9
Τρίκαλα	-28,1	-26,1	-27,8	-29,5	-32,7	-35,8	-37,2	-37,8	-35,7	-31,8	-30,6	-17,5	-32,1
Κάλυμνος	-28,6	-27,6	-29,8	-32,1	-34,8	-37,5	-38,8	-39,1	-37,8	-35,1	-32,8	-20,0	-34,1
Δράμα	-27,1	-25,0	-26,6	-28,9	-32,6	-36,0	-38,1	-37,9	-35,5	-31,5	-30,0	-19,1	-32,2
Αλιάρτος	-27,5	-26,1	-27,7	-30,3	-33,8	-37,1	-38,5	-39,1	-36,6	-32,6	-30,6	-17,9	-33,2