



Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης

Διπλωματική Εργασία
«Επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού και λειτουργίας φωτοβολταϊκών
συστημάτων με χρήση υπολογιστικών φύλλων»

Ψημένος Ευάγγελος

Επιβλέπων καθηγητής:
Ιψάκης Δημήτριος

Χανιά, 2023

Table of Contents

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Κεφάλαιο 1: Ηλιακό Δυναμικό	6
1.1: Εισαγωγή.....	6
1.2: Βασικές έννοιες.....	7
1.2.1: Ηλιακή απόκλιση και εποχιακές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας	7
1.2.2: Ηλιακή σταθερά G_{sc} και μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας	7
1.2.3: Γεωγραφικές συντεταγμένες και ωριαία δύση του Ηλίου	8
1.2.4: Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντιο επίπεδο	8
1.2.5: Μοντέλο Lui – Jordan για υπολογισμό ηλιακή ακτινοβολίας	8
1.3: Εφαρμογή μοντέλου Lui – Jordan με χρήση Excel	9
1.4: Συμπληρωματική βιβλιογραφία	17
Κεφάλαιο 2: Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	18
2.1: Εισαγωγή.....	18
2.2: Βασικές έννοιες.....	19
2.2.1: Φωτοβολταϊκό κελί.....	19
2.2.2: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού	19
2.2.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	22
2.2.4: Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας	23
2.2.5: Επίδραση θερμοκρασίας	23
2.3: Σχεδίαση χαρακτηριστικής καμπύλης φωτοβολταϊκού κελιού στο Excel	24
2.4: Σχεδίαση χαρακτηριστικής καμπύλης φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Excel	28
2.5: Υπολογισμός επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο Excel	32
2.6: Υπολογισμός επίδρασης της θερμοκρασίας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο Excel	36
2.7: Συμπληρωματική βιβλιογραφία	41
Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκά συστήματα	42
3.1: Εισαγωγή.....	42
3.2: Εξοπλισμός φωτοβολταϊκών συστημάτων	42
3.2.1: Μπαταρία	42
3.2.2: Αντιστροφέας	44
3.3.3: Ρυθμιστής φόρτισης	45
3.3.4: Βάσεις στήριξης	45

3.3.5: Καλωδιώσεις και ηλεκτρολογικός πίνακας	45
3.3: Κανόνες σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων	46
3.4: Σχεδίαση συστήματος αυτόνομης οικίας στο Excel.....	46
3.5: Ανάλυση συστήματος αυτόνομης οικίας για θερινή και χειμερινή ημέρα	52
3.6: Οικονομική ανάλυση αυτόνομου συστήματος.....	61
3.7: Συμπληρωματική βιβλιογραφία	64
Συμπεράσματα.....	65

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διαφόρων πτυχών της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και η ανάπτυξη υπολογιστικών φύλλων Excel για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με αυτή. Τα προβλήματα που επιλύονται καθώς και η θεωρία που παρουσιάζεται βασίζονται στο βιβλίο: «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» των Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ., Δημάκης Α., Καρταλίδης Α, Τσιλιγκρίδης Γ., εκδόσεις σοφία, 2015.

Το υλικό της εργασίας καθώς και η επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων παρουσιάζονται προοδευτικά: από τη μελέτη του διαθέσιμου πόρου στο πρώτο κεφάλαιο (ηλιακή ακτινοβολία), στην ανάλυση των τεχνολογιών δέσμευσης του πόρου στο δεύτερο κεφάλαιο (φωτοβολταϊκά κελιά και πλαίσια), καταλήγοντας στη μελέτη των συστημάτων αυτής της τεχνολογίας στο τρίτο κεφάλαιο (φωτοβολταϊκά συστήματα).

Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή σε βασικές έννοιες που αφορούν την σχετική κίνηση Γης – Ηλίου και τα διάφορα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, (π.χ. η ηλιακή απόκλιση δ και η ηλιακή σταθερά G). Έπειτα γίνεται περιγραφή ενός από τα πολυάριθμα μοντέλα εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας, το μοντέλο $Lui - Jordan$. Το πρόβλημα που επιλύεται με τη βοήθεια του Excel σε αυτό το κεφάλαιο αποτελεί εφαρμογή αυτού του μοντέλου με σκοπό την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια συγκεκριμένης κλίσης δεδομένων των αντίστοιχων μετρήσεων για μια επίπεδη επιφάνεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εις βάθος μελέτη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ξεκινώντας από το δομικό της στοιχείο, δηλαδή το φωτοβολταϊκό κελί, και ύστερα επεκτείνεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μετά από την περιγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κελιών παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα των φωτοβολταϊκών κελιών και πλαισίων. Επιπλέον, αναλύεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Τα προβλήματα που επιλύονται με την βοήθεια του Excel στο δεύτερο κεφάλαιο εστιάζουν στη σχεδίαση της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης – τάσης τόσο για ένα φωτοβολταϊκό κελί όσο και για ένα πλαίσιο καθώς και στη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας βάσει της προηγούμενης ανάλυσης.

Τέλος, στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται ο περιφερειακός εξοπλισμός των φωτοβολταϊκών όπως μπαταρίες, αντιστροφείς, ρυθμιστές φόρτισης κ.α., οι διάφοροι συνδυασμοί του οποίου δημιουργούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το πρόβλημα του τρίτου κεφαλαίου που επιλύεται με τη βοήθεια του Excel αφορά το σχεδιασμό και την ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος για μια αυτόνομη οικία.

Κατά την ανάπτυξη των υπολογιστικών φύλλων στο Excel, ο στόχος ήταν η μέγιστη δυνατή αυτοματοποίηση της επίλυσης των προβλημάτων. Σε κάθε φύλλο, η θεμελιώδης λογική είναι πως ο χρήστης συμπληρώνει τα δεδομένα εισόδου του εκάστοτε προβλήματος και η επίλυση του γίνεται αυτόματα και με την ελάχιστη δυνατή συμμετοχή του χρήστη.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εύχρηστο και διαδραστικό εργαλείο εκπαίδευσης που απευθύνεται σε όσους ενδιαφέρονται για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Abstract

The purpose of this thesis is to study the various aspects of photovoltaic technology and to develop Excel worksheets which solve problems related with it.

The material of the study, along with the solution to the corresponding problems, is presented progressively: from the study of the available resource (solar radiation) in chapter 1, to the analysis of the technologies which captures that resource (photovoltaic cells and panels) in chapter 2, ending with the study of systems of these technologies (photovoltaic systems) in chapter 3.

Specifically, the first chapter introduces basic concepts concerning the relative motion of the Earth and the Sun as well as the various characteristics of solar radiation (e.g., sun deviation and solar constant). Then follows the description of one of the many models which are used to estimate solar radiation, namely the Lui – Jordan model. The problem solved with the help of Excel in this chapter is an application of this model in order to estimate the solar radiation incident on a surface of a specific slope given the corresponding measurements for a flat surface.

The second chapter includes an in – depth analysis of the photovoltaic technology beginning from its structural element i.e., the photovoltaic cell which then expands to the photovoltaic panel. Having described the photovoltaic phenomenon and the working principles of the photovoltaic cells, the mathematical models of the photovoltaic cells and panels are presented. In addition, the effect of temperature and solar radiation on the performance of photovoltaic technology is analyzed. The problems solved with the help of Excel in the second chapter focus on drawing the characteristic curve of current and voltage for both a photovoltaic cell as well as a panel and studying the effect of temperature and solar radiation based on the previous analysis.

Finally, the third chapter describes photovoltaics' peripheral equipment such as batteries, inverters, charge regulators and more, the combination of which creates various photovoltaic systems. The problem solved with the help of Excel in the third chapter concerns the design and analysis of a photovoltaic system serving an autonomous house.

During the development of the Excel worksheets, the aim was to automate the solution as much as possible. In each worksheet, the fundamental logic is that the user fills in the input data of each problem and its solution is produced automatically and with the minimum possible involvement of the user.

This thesis can be considered as an easy-to-use and interactive educational tool aimed at those interested in photovoltaic technology.

Κεφάλαιο 1: Ηλιακό Δυναμικό

1.1: Εισαγωγή

Η σημαντικότερη πηγή ενέργειας που δέχεται η επιφάνεια της Γης είναι η ακτινοβολία του ηλίου. Η ενέργεια αυτή με τους διάφορους τρόπους μεταφοράς της (π.χ. κίνηση ανέμων) και μετατροπής της (π.χ. χλωροφύλλη των φυτών) δημιουργεί το φυσικό ενεργειακό κύκλο.

Ο Ήλιος είναι ένας τεράστιος αντιδραστήρας σύντηξης όπου πραγματοποιούνται συντήσεις ελαφρών πυρήνων σε βαρύτερους με σημαντικότερη τη μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο με ρυθμό 4 εκατομμυρίων τόνων το δευτερόλεπτο. Η παραγόμενη ενέργεια ακτινοβολείται στο διάστημα ενώ η θερμοκρασία επιφάνειας του ηλιακού δίσκου εκτιμάται περί του $T_{\text{sun}} = 5774 \text{ K}$. Σε αυτή την υψηλή θερμοκρασία ο Ήλιος θεωρείται ότι ακτινοβολεί ως μέλαν σώμα.

Αν και η πραγματική πηγή των περισσότερων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας είναι ο Ήλιος, ο συμβατικός ορισμός της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει την ενέργεια που μεταφέρεται υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την Ήλιο στην Γη και αξιοποιείται είτε ενεργητικά είτε παθητικά.

Σε ετήσια βάση ένα ποσοστό περίπου 20% της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τα σύννεφα, ένα ποσοστό 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ μόλις κοντά στο 50% φτάνει στο έδαφος με την μορφή άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Η άμεση ακτινοβολία δεν έχει υποστεί κάποιου είδους ανάκλαση και βασικό της χαρακτηριστικό είναι πως μπορεί να κατευθυνθεί και να συγκεντρωθεί κάπου. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι το αποτέλεσμα της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας στα μόρια της ατμόσφαιρας, των σύννεφων και της εν γένει υγρασίας και σκόνης.

Η εκτίμηση του διαθέσιμου ηλιακού δυναμικού είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό και την ανάλυση των ηλιακών συστημάτων. Για την περιγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται τα σύμβολα G για την στιγμιαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, I για την ηλιακή ακτινοβολία σε διάρκεια μίας ώρας και H για την ημερήσια (η μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας) ηλιακή ακτινοβολία. Η στιγμιαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει μονάδες ισχύος (W/m^2) ενώ η ωριαία, η ημερήσια κτλ. ηλιακή ακτινοβολία έχει μονάδες ενέργειας (Wh/m^2). Τα παραπάνω σύμβολα δέχονται τους δείκτες:

- o για ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας
- b για άμεση ηλιακή ακτινοβολία
- T για ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια ως προς την οριζόντια και
- n για ακτινοβολία κάθετη στην επιφάνεια που προσπίπτει

Για παράδειγμα, το σύμβολο H_{TB} (kWh/m^2) αναφέρεται στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια σε μια ημέρα.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.2: Βασικές έννοιες

1.2.1: Ηλιακή απόκλιση και εποχιακές μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας

Η γη περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα γύρω από τον άξονά της σε 24 ώρες και γύρω από τον Ήλιο σε 365 μέρες. Η περιστροφή γύρω από τον Ήλιο γίνεται με τον πολικό της άξονα σε κλίση ως προς το επίπεδο περιστροφής κατά 23.45° . Στο βόρειο ημισφαίριο το χειμώνα ο βόρειος πόλος είναι απομακρυσμένος (λόγω κλίσης του άξονα περιστροφής) από τον Ήλιο και οι ακτίνες του Ηλίου προσπίπτουν με μεγαλύτερη κλίση, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Αντίθετα το καλοκαίρι, η Γη βρίσκεται με το βόρειο πόλο στραμμένο προς τον Ήλιο οπότε οι ακτίνες του Ηλίου προσπίπτουν στο βόρειο ημισφαίριο πιο κάθετα, ο Ήλιος εμφανίζεται υψηλότερα στον ουρανό και προκύπτει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.

Έτσι, η αλλαγή των εποχών οφείλεται στη γωνία που σχηματίζει ο άξονας περιστροφής της Γης με την κάθετη στην ελλειπτική τροχιά. Αν και η γωνία είναι σταθερή, η περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο δημιουργεί μεταβολή στη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα Γης – Ηλίου με το ελλειπτικό επίπεδο του ισημερινού. Η γωνία αυτή ονομάζεται ηλιακή απόκλιση, συμβολίζεται με δ και υπολογίζεται για κάθε ημέρα του έτους από τη σχέση:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left(360^\circ \times \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1.1)$$

όπου n ο αριθμός της ημέρας με $n = 1$ την 1^η Ιανουαρίου, $n = 2$ την 2^η Ιανουαρίου, $n = 32$ την 1^η Φεβρουαρίου κτλ. (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.2.2: Ηλιακή σταθερά G_{sc} και μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή σταθερά G_{sc} εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας) που δέχεται από τον Ήλιο μια μονάδα επιφάνειας εκτός της ατμόσφαιρας (W/m^2), κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση Γης – Ηλίου είναι ίση με τη μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι περίπου ίση με $1353 W/m^2$. (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

Η ένταση τη ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της Γης δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται λόγω:

- Διακύμανσης της ηλιακής δραστηριότητας ($\pm 2\%$, δε λαμβάνεται υπόψιν)
- Μεταβολή της απόστασης Γης – Ηλίου ($\pm 3.5\%$), επειδή η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι ελλειπτική.

Η ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται χρονικά, σύμφωνα με τη σχέση:

$$G_0 = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(360^\circ \times \frac{n}{365} \right) \right) [W/m^2] \quad (1.2)$$

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.2.3: Γεωγραφικές συντεταγμένες και ωριαία δύση του Ηλίου

Ένα σημείο στη γήινη σφαίρα ορίζεται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Το γεωγραφικό μήκος (ψ) είναι η γωνία της θέσης του παρατηρητή σε σχέση με τον πρώτο μεσημβρινό που διέρχεται από το Greenwich ενώ το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) είναι η γωνία θέσης του παρατηρητή σε σχέση με τον ισημερινό. [1]

Η γωνιακή μετατόπιση του Ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της με ρυθμό 15 μοίρες την ώρα συμβολίζεται με ω . Η ωριαία γωνία δύσης του Ηλίου συμβολίζεται με ω_s και είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του σημείου και της ηλιακής απόκλισης:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (1.3)$$

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.2.4: Ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντιο επίπεδο

Οι περισσότερες τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιούν επίπεδες επιφάνειες συλλογής (π.χ. φωτοβολταϊκά πλαίσια, επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες κτλ.).

Για ένα επίπεδο που έχει κλίση $\beta = 0^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η έκφραση για την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας ανά κυβικό μέτρο επιφάνειας (H_o) δίνεται από την σχέση:

$$H_o = \frac{24G_o}{\pi} [\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\phi) \sin(\delta)] \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (1.4)$$

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.2.5: Μοντέλο Lui – Jordan για υπολογισμό ηλιακή ακτινοβολίας

Για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας εντός ατμόσφαιρας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τοπικές παραμέτρους όπως κλίση επιπέδου, χαρακτήρας περιοχής κτλ. Το μοντέλο Lui – Jordan εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη γνώση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο H [kWh/m²] για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ημερησίως σε επιφάνεια υπό κλίση H_T [kWh/m²] μέσω του συντελεστή $R(\beta)$ σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$H_T = R(\beta) \times H \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (1.5)$$

Ο συντελεστής $R(\beta)$ είναι συνάρτηση της κλίσης του επιπέδου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R(\beta) = R_b \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) + \frac{H_d}{H} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + r \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (1.6)$$

Όπου H_d [kWh/m²] είναι η διάχυτη ακτινοβολία, R_b είναι ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και r ο συντελεστής ανάκλασης της περιοχής.

Ο συντελεστής ανάκλασης r δίνεται από πίνακες και εξαρτάται από το χαρακτήρα της περιοχής (οικιστικός, αγροτικός, κτλ.). Η παράμετρος R_b μπορεί να εκτιμηθεί από την σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_{st}) + \omega_{st} \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_{st}) + \omega_{st} \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (1.7)$$

$$\text{Όπου: } \omega_{st} = \min\{\omega_s, \arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan(\delta))\} \quad (1.8)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αφορούν επιφάνεια που είναι στο βόρειο ημισφαίριο και κοιτάει προς το νότο ($\gamma = 0$). Για επιφάνεια που είναι στο νότο και κοιτάει τον βορρά ($\gamma = \pi$) πρέπει στις σχέσεις αυτές, όπου $-\beta$ να γίνει $+\beta$.

Ο συντελεστής αιθριότητας K_T εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας το οποίο φτάνει στην επιφάνεια της Γης και ορίζεται ως:

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (1.9)$$

όπου

- H_0 [kWh/m²] η ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας και
- H [kWh/m²] η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια

Στην εξίσωση υπολογισμού του $R(\beta)$ εμφανίζεται ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας προς τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Η σχέση που δίνει το λόγο H_d/H εξαρτάται από το δείκτη αιθριότητας K_T και έχουν προταθεί αρκετές εξισώσεις συσχέτισης. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται τους περισσότερους υπολογισμούς είναι η ακόλουθη:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 & 0.17 \leq K_T \leq 0.75 \\ 0.54K_T + 0.632 & 0.75 \leq K_T \leq 0.8 \\ 0.2 & K_T > 0.8 \end{cases} \quad (1.10)$$

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

1.3: Εφαρμογή μοντέλου Lui – Jordan με χρήση Excel

Εκφώνηση Άσκησης 1.1: Να υπολογιστεί η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για κάθε μήνα στην περιοχή της Αθήνας, για κλίση επιφάνειας 30°, 45°, 90° με δεδομένες τις αντίστοιχες μετρήσεις για το οριζόντιο επίπεδο. Οι υπολογισμοί να γίνουν για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα που αναφέρεται στα δεδομένα της εφαρμογής. Να υπολογιστεί επίσης η συνολική ετήσια ακτινοβολία για κάθε κλίση. Δίνεται ο συντελεστής ανάκλασης $r_a = 0.2$, η ηλιακή σταθερά $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ και το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας $\varphi = 37,85$ μοίρες.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 1”. Το αρχείο αυτό αποτελείται από τρία φύλλα εργασίας:

- 1.1 Input
- 1.1 Output
- 1.1 Graph

Στο φύλλο “1.1 Input” βρίσκονται τα δεδομένα και οι σταθερές της εφαρμογής όπως φαίνονται στην εικόνα 1.1. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει αυτά τα δεδομένα πληκτρολογώντας τις επιθυμητές τιμές στα αντίστοιχα κελιά (κελιά C6 έως C11). Προτείνεται ο πειραματισμός με τα δεδομένα που αφορούν το γεωγραφικό πλάτος, τις κλίσεις των επιφανειών, τον συντελεστή ανάκλασης και τις μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο.

φ_Athens: Γεωγραφικό πλάτος περιοχής [μοίρες]

β1: Κλίση 1^{ης} επιφάνειας [μοίρες]

β2: Κλίση 2^{ης} επιφάνειας [μοίρες]

β3: Κλίση 3^{ης} επιφάνειας [μοίρες]

r_a: Συντελεστής ανάκλασης περιοχής

G_sc: Ηλιακή σταθερά [W/m²]

Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρεται η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα (κελιά C15 έως C26) καθώς και οι ημέρες του μήνα (κελιά E15 έως E26).

Αφού οριστούν τα επιθυμητά δεδομένα, η επίλυση της εφαρμογής γίνεται αυτόματα στο φύλλο «1.1 Output» ενώ το αντίστοιχο γράφημα βρίσκεται στο φύλλο «1.1 Graph» . Στην συνέχεια αναλύεται η πορεία της επίλυσης και ταυτόχρονα αντιστοιχίζεται με τα διάφορα πεδία του φύλλο «1.1 Output» στο Excel.

Εφαρμογή 1.1: Εφαρμογή μοντέλου Lui - Jordan			
Input			
φ_Athens	37,85	degrees	
β1	30	degrees	
β2	45	degrees	
β3	90	degrees	
r_a	0,2		
G_sc	1353	W/m^2	
Μήνας	Ημερήσια Ηλιακή Ακτινοβολία στο Οριζόντιο Επίπεδο (kWh/m^2)	Τυπική Ημέρα Μήνα	Ημέρες Μήνα
Ιανουάριος	2,14	17	31
Φεβρουάριος	2,88	47	28
Μάρτιος	4	75	31
Απρίλιος	5,37	105	30
Μάιος	6,43	135	31
Ιούνιος	7,46	162	30
Ιούλιος	7,36	198	31
Αύγουστος	6,62	228	31
Σεπτέμβριος	5,21	258	30
Οκτώβριος	3,44	288	31
Νοέμβριος	2,18	318	30
Δεκέμβριος	1,73	344	31

Εικόνα 1. 1: Δεδομένα εισόδου εφαρμογής 1.1

Σύμφωνα με το μοντέλο Lui – Jordan, η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια υπολογίζεται από την σχέση (1.5):

$$H_T = R(\beta) \times H \text{ [kWh/m}^2\text{]}$$

Εφόσον οι αντίστοιχες μετρήσεις της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για το οριζόντιο επίπεδο H [kWh/m²] είναι δεδομένες, το ζητούμενο είναι να βρεθεί ο συντελεστής $R(\beta)$ για κάθε κλίση.

Καθώς το Excel έχει ως μονάδα μέτρησης των γωνιών τα ακτίνια, η επίλυση στο φύλλο “1.1 Output” ξεκινάει με την μετατροπή των γωνιών από μοίρες σε ακτίνια. Ο υπολογισμός γίνεται στον πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2 (κελιά C5 έως C9).

Output		
ϕ_{Athens}	0,66	radians
β_1	0,52	radians
β_2	0,79	radians
β_3	1,57	radians

Εικόνα 1. 2: Πίνακας μετατροπής μοιρών σε ακτίνια

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας H_o [kWh/m²] για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα σύμφωνα με την σχέση (1.4):

$$H_o = \frac{24G_o}{\pi} [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)] \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (1.4)$$

Αυτό θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για τον καθορισμό του δείκτη αιθριότητας K_T . Έτσι, απαιτείται ο υπολογισμός:

- της γωνιακής απόκλισης δ (κελιά D14 έως D25)
- της ηλιακής ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας G_o [W/m²] (κελιά F14 έως F25)
- της ωριαίας γωνίας δύσης του ηλίου ω_s (κελιά G14 έως G25)

Η ηλιακή απόκλιση δ και η ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας G_o είναι συνάρτηση μόνο της ημέρας του χρόνου n και υπολογίζονται από τις σχέσεις (1.1) και (1.2) αντίστοιχα:

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360^\circ \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1.1)$$

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos\left(360^\circ \times \frac{n}{365}\right)\right) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1.2)$$

Τα παραπάνω υπολογίζονται για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα στο φύλλο “1.1 Output” όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3.

Μήνας	Τυπική Ημέρα Μήνα	δ (degrees)	δ (radians)	G_o (W/m ²)
Ιανουάριος	17	-20,92	-0,37	1395,75
Φεβρουάριος	47	-12,95	-0,23	1383,82
Μάρτιος	75	-2,42	-0,04	1365,33
Απρίλιος	105	9,41	0,16	1342,53
Μάιος	135	18,79	0,33	1322,46
Ιούνιος	162	23,09	0,40	1311,10
Ιούλιος	198	21,18	0,37	1309,93
Αύγουστος	228	13,45	0,23	1321,36
Σεπτέμβριος	258	2,22	0,04	1341,04
Οκτώβριος	288	-9,60	-0,17	1363,84
Νοέμβριος	318	-18,91	-0,33	1383,82
Δεκέμβριος	344	-23,05	-0,40	1394,76

Εικόνα 1. 3: Πίνακας υπολογισμού τυπικής απόκλισης δ και ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας G_o

Στην στήλη δ (radians) γίνεται η μετατροπή της υπολογισμένης γωνιακής απόκλισης δ από μοίρες σε ακτίνια (κελιά E14 έως E25).

Η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου είναι συνάρτηση της ηλιακής απόκλισης δ και του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής ϕ και υπολογίζεται από την σχέση (1.3):

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (1.3)$$

Το ω_{st} είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους ϕ , της γωνιακής απόκλισης δ και της κλίσης β και υπολογίζεται από την σχέση (1.8):

$$\omega_{st} = \min\{\omega_s, \arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan(\delta))\} \quad (1.8)$$

Έτσι, το ω_{st} υπολογίζεται για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα καθώς και για τις 3 κλίσεις β (κελιά H14 έως J25). Το ω_{st} δεν απαιτείται για τον υπολογισμό του H_o αλλά υπολογίζεται σε αυτή την φάση της επίλυσης ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα.

Έχοντας βρει τα δ , G_o και ω_s , υπολογίζεται και η ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας H_o [kWh/m²] και για την τυπική ημέρα του κάθε μήνα (κελιά K14 έως K25). Βάση αυτής υπολογίζεται και ο δείκτης αιθριότητας από τη σχέση (1.9) (κελιά L14 έως L25):

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (1.9)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φύλλο “1.1 Output” όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.

ω_s	ω_{st}			Ho (W/m ²)	K_T.Athens
	β_1	β_2	β_3		
1,27	1,27	1,27	1,27	4545,1	0,471
1,39	1,39	1,39	1,39	5981,2	0,482
1,54	1,54	1,54	1,54	7809,0	0,512
1,70	1,59	1,55	1,36	9672,9	0,555
1,84	1,62	1,53	1,12	10954,5	0,587
1,91	1,63	1,52	0,99	11463,8	0,651
1,88	1,62	1,52	1,05	11190,0	0,658
1,76	1,60	1,54	1,26	10150,2	0,652
1,60	1,58	1,57	1,52	8469,1	0,615
1,44	1,44	1,44	1,44	6507,4	0,529
1,30	1,30	1,30	1,30	4876,0	0,447
1,23	1,23	1,23	1,23	4148,1	0,417

Εικόνα 1. 4: Πίνακας υπολογισμού ωριαίας γωνίας δύσης ηλίου ω_s , του μεγέθους ω_{st} , και της ημερίσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας H_o

Στην συνέχεια θα οριστούν οι δύο παράμετροι που απαιτούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή $R(\beta)$ και κατ' επέκταση της ηλιακής ακτινοβολίας στις κεκλιμένες επιφάνειες. Αυτές είναι:

- ο λόγος της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο R_b
- ο λόγος H_d/H

Η παράμετρος R_b εκτιμάται από την σχέση (1.7):

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos(\delta) \sin(\omega_{st}) + \omega_{st} \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_{st}) + \omega_{st} \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (1.7)$$

Εφόσον είναι και συνάρτηση της κλίσης β , υπολογίζεται για την τυπική ημέρα κάθε μήνα καθώς και για τις τρεις κλίσεις β (κελιά M14 έως O25).

Ο λόγος H_d/H συμβολίζεται ως $H_{Rat} = \frac{H_d}{H}$ και καθορίζεται από τον δείκτη αιθριότητας σύμφωνα με την σχέση (1.10) (κελιά P14 έως P25):

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.99 & K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.865K_T^3 + 14.648K_T^4 & 0.17 \leq K_T \leq 0.75 \\ 0.54K_T + 0.632 & 0.75 \leq K_T \leq 0.8 \\ 0.2 & K_T > 0.8 \end{cases} \quad (1.10)$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φύλλο "1.1 Output" όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5.

R_b			H_Rat
β1	β2	β3	
1,928	2,209	2,123	0,656
1,604	1,750	1,475	0,637
1,309	1,334	0,887	0,580
1,074	1,004	0,441	0,497
0,930	0,809	0,219	0,435
0,871	0,732	0,144	0,322
0,897	0,765	0,176	0,312
1,008	0,915	0,335	0,320
1,207	1,190	0,685	0,383
1,498	1,601	1,264	0,548
1,834	2,075	1,935	0,697
2,040	2,368	2,349	0,745

Εικόνα 1. 5: Πίνακας υπολογισμού παραμέτρου R_b για κάθε κλίση και του λόγου H_{Rot}

Έχοντας βρει τις παραπάνω παραμέτρους, υπολογίζεται ο δείκτης $R(\beta)$ σύμφωνα με την σχέση (1.6) (κελιά Q14 έως S25):

$$R(\beta) = R_b \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) + \frac{H_d}{H} \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + r \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \quad (1.6)$$

Βάση αυτού υπολογίζεται και η ηλιακή ακτινοβολία (κελιά T14 έως V25) σύμφωνα με την σχέση (1.5) που αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται για την τυπική ημέρα κάθε μήνα καθώς και για τις τρεις κλίσεις β . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο φύλλο “1.1 Output” όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6.

R			H_T (kWh/m ²)		
β1	β2	β3	β1	β2	β3
1,289	1,349	1,159	2,758	2,887	2,479
1,190	1,209	0,954	3,427	3,481	2,748
1,105	1,085	0,763	4,419	4,340	3,051
1,017	0,959	0,570	5,463	5,148	3,063
0,944	0,858	0,442	6,073	5,515	2,839
0,904	0,800	0,359	6,747	5,970	2,679
0,921	0,822	0,377	6,781	6,050	2,774
0,998	0,925	0,488	6,604	6,120	3,229
1,116	1,091	0,714	5,813	5,682	3,720
1,202	1,220	0,945	4,134	4,198	3,251
1,219	1,253	1,035	2,658	2,732	2,256
1,229	1,269	1,071	2,125	2,195	1,853

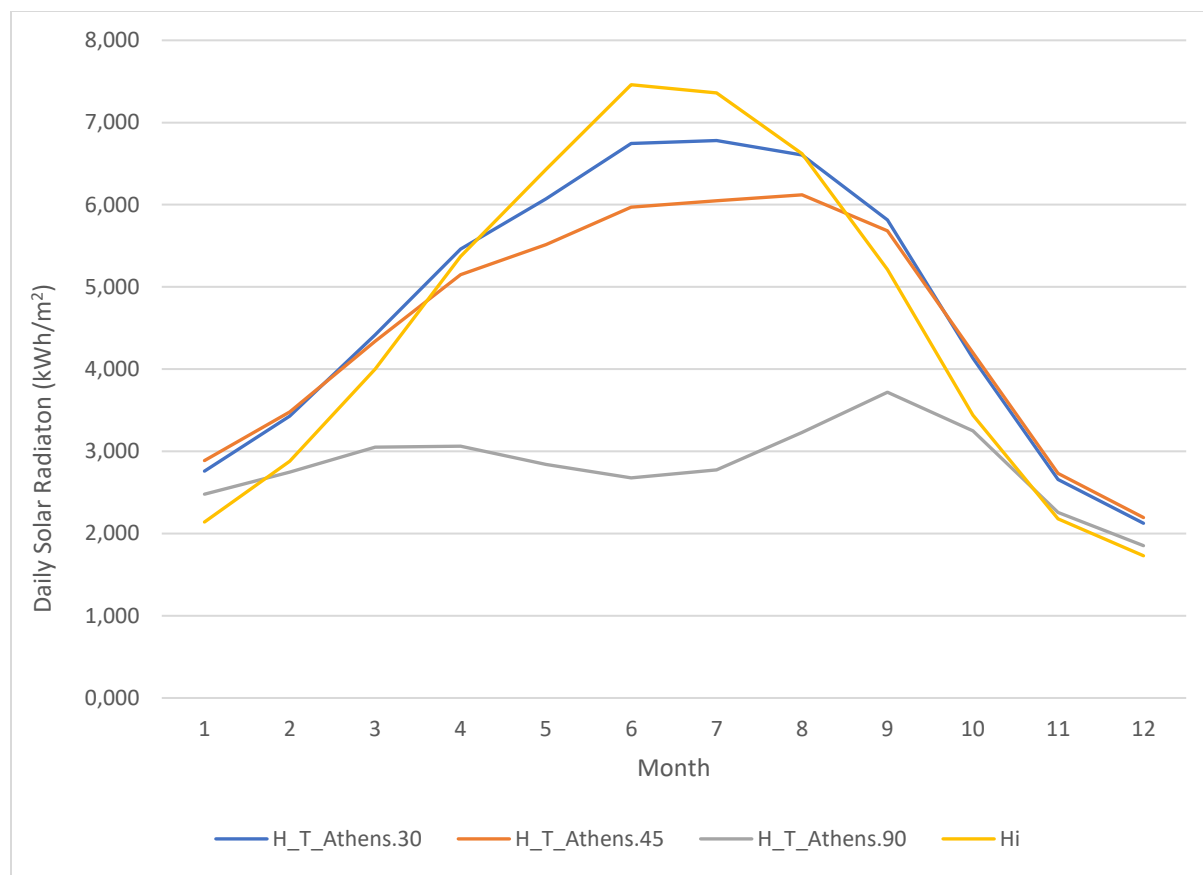
Εικόνα 1. 6: Πίνακας υπολογισμού δείκτη R και ηλιακής ακτινοβολίας H_T για κάθε κλίση επιφάνειας

Το τελευταίο βήμα της εφαρμογής είναι ο υπολογισμός της συνολικής ετήσιας ακτινοβολίας για κάθε κλίση. Αυτό γίνεται υποθέτοντας ότι η ημερήσια ακτινοβολία για κάθε μήνα ισοδυναμεί με την ημερήσια ακτινοβολία που υπολογίστηκε για την τυπική τους ημέρα. Έτσι, πολλαπλασιάζοντας την ημερήσια ακτινοβολία της τυπικής ημέρας του κάθε μήνα με τον αριθμό των ημερών του προκύπτει η μηνιαία ακτινοβολία. Τέλος, αθροίζοντας τις μηνιαίες ακτινοβολίες καταλήγουμε στην συνολική ετήσια ακτινοβολία. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για κάθε κλίση. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «1.1 Output» και παρουσιάζεται στην εικόνα 1.7 (κελιά C28 έως C31).

H_An_Athens	1,6706	10 ³ *kWh/m ²
H_An_Athens.30	1,7361	10 ³ *kWh/m ²
H_An_Athens.45	1,6539	10 ³ *kWh/m ²
H_An_Athens.90	1,0322	10 ³ *kWh/m ²

Εικόνα 1. 7: Πίνακας υπολογισμού συνολικής ετήσιας ακτινοβολίας για κάθε κλίση

Στο φύλλο “1.1 Graph” που φαίνεται στην εικόνα 1.8 παρουσιάζεται γραφικά η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στις κεκλιμένες επιφάνειες την τυπική ημέρα κάθε μήνα, όπως υπολογίστηκε στο φύλλο “1.1 Output”.



Εικόνα 1. 8: Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στις κεκλιμένες επιφάνειες σε διάστημα ενός έτους

H_T_Athens.30: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κλίσης 30 μοιρών στην Αθήνα.

H_T_Athens.45: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κλίσης 45 μοιρών στην Αθήνα.

H_T_Athens.90: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κλίσης 90 μοιρών στην Αθήνα.

H_i: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια στην Αθήνα.

Είναι φανερό πως την θερινή περίοδο (από τον Απρίλιο μέχρι τον Αύγουστο), η οριζόντια επιφάνεια συλλέγει σημαντικά περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία από τις κεκλιμένες. Αντιθέτως, οι κεκλιμένες επιφάνειες αποδίδουν καλύτερα την χειμερινή περίοδο. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μέγιστη όταν αυτή προσπίπτει κάθετα στον συλλέκτη. Έτσι, το καλοκαίρι όπου η Γη βρίσκεται με τον βόρειο πόλο στραμμένο προς τον ήλιο (λόγο κλίσης του άξονα περιστροφής), οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν στο βόρειο ημισφαίριο πιο κάθετα οπότε η οριζόντια επιφάνεια απορροφά την μέγιστη ακτινοβολία. Ομοίως, τον χειμώνα ο βόρειος πόλος είναι απομακρυσμένος από τον ήλιο και οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν με μεγαλύτερη κλίση οπότε οι κεκλιμένες επιφάνειες συλλέγουν την μέγιστη ακτινοβολία.

1.4: Συμπληρωματική βιβλιογραφία

Chen J., "Physics of solar energy", John Wiley & Sons, 2011.

Duffie J., Beckman W., "Solar Engineering of Thermal Processes", 3rd Ed., Wiley & Sons, 2006.

Eicker, U., "Solar Technologies for Buildings", John Wiley & Sons, 2003.

Gettings M., "The National Energy Audit (NEAT) Engineering Manual", Version 7, Oak Ridge National Laboratory, 2003.

Hodge B. K., "Alternative Energy Systems and Applications", Wiley & Sons, 2010.

Kalogirou S., "Solar Energy Engineering: Processes and System", Elsevier/Academic Press, 2009.

Pohl J., "Building Science: Concepts and Application", Wiley-Blackwell, 2011.

Ramlow B., Nusz B., "Solar water heating: A comprehensive guide to solar water and space heating systems", New Society Publishers, 2010.

Αντωνόπουλος Κ., "Θερμικά - Ηλιακά Συστήματα", 2001

Κεφάλαιο 2: Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

2.1: Εισαγωγή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον φυσικό Alexandre Edmond Becquerel. Ο Edmond, κάνοντας πειράματα με μια μπαταρία υγρού τύπου, διαπίστωσε πως η τάση στα άκρα της αύξανε όταν στις πλάκες (ηλεκτρόδια) προσέπιπτε ηλιακό φως.

Το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί δημιουργήθηκε το 1877. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το σελήνιο και το κελί είχε βαθμό απόδοσης μόλις 0.5%. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κελί από σιλικόνη αναπτύχθηκε το 1940 από ερευνητές της Bell Telephone, αυξάνοντας τον μέχρι τότε βαθμό απόδοσης των κελιών.

Με την εφεύρεση της πρώτης p – n διόδου σιλικόνης το 1954, επιτεύχθηκε ο τότε εκπληκτικός βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού κελιού ίσος με 6%. Το 1955, ένα φωτοβολταϊκό κελί χρησιμοποιήθηκε για την παροχή ενέργειας σε ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών, γεγονός που αποτέλεσε την πρώτη πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας στην ιστορία. Τα χρόνια που ακολούθησαν, εμφανίστηκαν και άλλες εφαρμογές με ταχύτατους ρυθμούς. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η επιτυχημένη χρήση των φωτοβολταϊκών κελιών για την παροχή ενέργειας στον δορυφόρο Vanguard I της Nasa το 1958. Έτσι, η έρευνα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας επιταχύνθηκε σημαντικά από τον αγώνα για την εξερεύνηση του διαστήματος. Ωστόσο, βασικό εμπόδιο της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών αποτέλεσε η έλλειψη βέλτιστων παραγωγικών διαδικασιών και συνεπώς υψηλού κόστους παραγωγής.

Η επόμενη σημαντική εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έγινε το 1970, όταν αναπτύχθηκε μια διαδικασία που αύξησε τον βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών κελιών σιλικόνης κατά 50%, αυξάνοντας σημαντικά και το μέγεθος της αγοράς τους. Παράλληλα, λόγω της πετρελαϊκής κρίσης της εποχής εντάθηκε το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Έτσι εμφανίστηκαν νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιούσαν διαφορετικά υλικά με κύριο γνώμονα την ελάττωση του κόστους παραγωγής. Επιπλέον, οι ανακαλύψεις άλλων φαινομένων που έγιναν σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους επέτρεψαν την περεταίρω βελτίωση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας από κάθε άποψη.

Σήμερα, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει ξεπεράσει κάθε προσδοκία με φωτοβολταϊκά πλαίσια να συναντώνται παντού ενώ μαζική παραγωγή ορισμένων τεχνολογιών έχει μειώσει σημαντικά το κόστος τους. Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA), η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά το 2021 ανήλθε στα 179 TWh, ποσό που ισούται με το 3.6% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Αυτό καθιστά τα φωτοβολταϊκά ως την τρίτη μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά από την υδροηλεκτρική και την αιολική ενέργεια.

Στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής και της αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων ως την βασική πηγή ενέργειας της ανθρωπότητας, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει σπουδαίες προοπτικές λόγω του χαμηλού κόστους καθώς και της εύκολης εγκατάστασης. Από το σύνολο των 17 Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης που τέθηκαν από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών το 2015, 3 από αυτούς σχετίζονται με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

2.2: Βασικές έννοιες

2.2.1: Φωτοβολταϊκό κελί

Το βασικό δομικό στοιχείο παραγωγής ενέργειας είναι το φωτοβολταϊκό κελί. Τα φωτοβολταϊκά κελιά διαφοροποιούνται με βάση το υλικό και τον τρόπο παραγωγής με αντίστοιχες διαφορές στο κόστος και την απόδοση. Οι τύποι φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου – (mono Si): Σήμερα επιτυγχάνουν βαθμό απόδοσης 20% - 21%, αλλά η διαδικασία παραγωγής τους είναι ακριβότερη και δυσκολότερη καθώς το πυρίτιο κρυσταλλώνεται στο ίδιο πλέγμα. Λόγω της διαδικασίας παραγωγής τους παράγουν σημαντική ποσότητα αποβλήτων. Έχουν ομοιόμορφο μπλε σκούρο / μαύρο χρώμα και σχήμα τετραγωνικής κυψέλης.
- Πολυκρυσταλλικού τύπου – (poly Si): Είναι τα συνηθέστερα φωτοβολταϊκά στη αγορά αλλά έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικού τύπου πυριτίου φθάνοντας έως 18%. Η διαδικασία παραγωγής τους είναι απλή και δεν παράγονται τόσα πολλά απόβλητα. Έχουν μπλε χρώμα το οποίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια του κελιού ενώ το σχήμα τους είναι τετραγωνικό.
- Λεπτού υμενίου: Η τεχνολογία λεπτού υμενίου έχει ως χαρακτηριστικό το χαμηλό βαθμό απόδοσης αλλά και το χαμηλό κόστος. Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι άμορφου – πυριτίου (a-Si) με βαθμό απόδοσης έως 9%, καδμίου – τελούριου (CdTe) και χαλκού – ινδίου – γαλλίου (CIS). Το χρώμα τους ανάλογα με τον τύπο είναι μαύρο, μπλε ή σκούρο μωβ και έχουν τετράγωνο σχήμα.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

2.2.2: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού

Τα φωτοβολταϊκά κελιά στηρίζονται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα στον ημιαγωγό παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Ηλεκτρονική δομή των ημιαγωγών

Για την κατανόηση των αρχών της φυσικής των ημιαγωγών θα εξεταστεί η συμπεριφορά του πυριτίου. Η δομή του πυριτίου ακολουθεί την αδαμαντοειδή κρυστάλλωση όπου κάθε άτομο έχει τους κοντινότερους «γείτονες» στις τέσσερις γωνίες ενός τετραέδρου. Αυτή η δομή είναι αποτέλεσμα των δεσμών που δημιουργούνται από τα τέσσερα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας. Κάθε δεσμός μεταξύ δύο ατόμων πυριτίου έχει δύο ηλεκτρόνια (ένα από κάθε άτομο) και όλοι οι ημιαγωγοί σχηματίζουν παρόμοιες κρυσταλλικές δομές.

Αυτή η κρυσταλλική δομή έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες του ημιαγωγού. Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου σε έναν κρύσταλλο πρέπει να βρίσκεται εντός καθορισμένου εύρους. Η ενέργεια των στοιβάδων σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς ανάμεσα στα άτομα ονομάζεται ζώνη σθένους και συμβολίζεται με E_v . Η αμέσως μεγαλύτερη

στάθμη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας, συμβολίζεται με E και διαφέρει κατά μια ποσότητα από τη στάθμη σθένους που ονομάζεται ενεργειακό χάσμα, $E_g (= E_c - E_v)$.

Ένας καθαρός ημιαγωγός περιέχει αριθμό ηλεκτρονίων έτσι ώστε η ζώνη σθένους να είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας να είναι κενή. Επομένως, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να ανέλθουν στη ζώνη αγωγιμότητας και οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται ως μονωτές. Οι ημιαγωγοί μπορούν να άγουν τον ηλεκτρισμό μόνο εάν φορείς ηλεκτρισμού εισαχθούν στη ζώνη αγωγιμότητας ή αφαιρεθούν από τη ζώνη σθένους. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η δημιουργία προσμίξεων ημιαγωγών με άλλα στοιχεία. Εάν γίνει πρόσμιξη με άτομα τα οποία έχουν πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (π.χ. φώσφορος) τότε τα τέσσερα από αυτά σχηματίζουν κανονικούς δεσμούς στο κρυσταλλικό πλέγμα με τα άτομα του ημιαγωγού και το πέμπτο μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση αυτή στη ζώνη αγωγιμότητας υπάρχει περίσσια ηλεκτρονίων, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα και αυτού του είδους οι προσμίξεις ονομάζονται αρνητικές (negative / n - type). Όμοια, εάν γίνει πρόσμιξη με ένα άτομο με τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (π.χ. βόριο) τότε δημιουργείται έλλειμμα ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους και σχηματίζονται οι οπές ως φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες είναι φορτισμένες θετικά και προσμίξεις αυτού του είδους ονομάζονται θετικές (positive/p-type).

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών κελιών βασίζεται στο σχηματισμό επαφών ανάμεσα στους ημιαγωγούς. Ο συνηθέστερος τύπος επαφής είναι η επαφή p-n, όπου ημιαγωγός τύπου p έρχεται σε επαφή με ημιαγωγό τύπου n. Το βασικότερο χαρακτηριστικό των επαφών είναι πως δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο καθώς ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό η διαχέονται προς τον ημιαγωγό p δημιουργώντας μια μικρή περιοχή αρνητικά φορτισμένη και αφήνουν πίσω τους μια μικρή περιοχή φορτισμένη θετικά, καθώς δημιουργούνται οπές. Το αποτέλεσμα της επαφής είναι πως η μικρή αυτή περιοχή κοντά στην διεπιφάνεια δεν περιέχει καθόλου φορείς μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή οπές ή ηλεκτρόνια, και λειτουργεί ως φράγμα δυναμικού αποτρέποντας τη ροή ηλεκτρικού φορτίου.

Η σύνδεση p-n αποτελεί μια απλή δίοδο. Σε μια επαφή p-n τα φωτόνια κατάλληλης ενέργειας διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Όσο διαρκεί η ακτινοβοληση, δημιουργείται περίσσεια από ζεύγη φορέων (ηλεκτρόνια - οπές). Στην περιοχή της επαφής, οι φορείς δέχονται την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου και ως αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς την περιοχή η και στη συνέχεια κινούνται προς ένα συλλέκτη φορτίων στην εμπρόσθια επιφάνεια του κελιού και δημιουργείται ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα, το οποίο με τη σειρά του «υπερνικά» το φράγμα εσωτερικού δυναμικού, όσο οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας το επιτρέπουν.

Μαθηματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού κελιού

Το στοιχειώδες κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κελιού μοντελοποιείται από μία δίοδο, μία πηγή ρεύματος, μία αντίσταση παράλληλα σε αυτή και τέλος μία αντίσταση σε σειρά. Η ένταση της πηγής ρεύματος ονομάζεται φωτόρευμα και σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία. Η χαρακτηριστική εξίσωση έντασης – τάσης ($I - V$) της διόδου δίνεται από την σχέση του Shockley:

$$I_d = I_o \left(\exp \left(q_e \frac{V_d}{kT} \right) - 1 \right) [A] \quad (2.1)$$

όπου I_o [Ampere] το ρεύμα κόρου, q_e [Coulomb] το φορτίο του ηλεκτρονίου, k η σταθερά του Boltzman, V_d [Volt] η τάση στα άκρα της διόδου και T [Kelvin] η θερμοκρασία της διόδου. Το ρεύμα στα άκρα του κυκλώματος θα είναι:

$$I = I_l - I_d - I_{sh} [A] \quad (2.2)$$

όπου I_l είναι το φωτόρευμα [Ampere] και I_{sh} [Ampere] είναι το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη αντίσταση. Με αντικατάσταση για το ρεύμα της διόδου από την εξίσωση (2.1), η (2.2) γίνεται:

$$I = I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{V_d}{kT} \right) - 1 \right) - I_{sh} [A] \quad (2.3)$$

Με αντικατάσταση από τον νόμο του Ohm για την παράλληλη αντίσταση R_{sh} [Ohm] προκύπτει:

$$I = I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{V_d}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{V_d}{R_{sh}} [A] \quad (2.4)$$

Η τάση V_d σχετίζεται με την τάση στους ακροδέκτες, με βάση την εξίσωση $V_d = V + IR_s$. Έτσι η εξίσωση (2.4) γίνεται:

$$I = I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{U + IR_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} [A] \quad (2.5)$$

Η εξίσωση (2.5) αποτελεί τη *χαρακτηριστική εξίσωση έντασης ρεύματος – τάσης ($I - U$)* ενός φωτοβολταϊκού κελιού.

Το φωτόρευμα I_l στα πλαίσια της συγκεκριμένης ανάλυσης μπορεί να θεωρηθεί πως δίνεται από την σχέση:

$$I_l = J_{ph} q_e A_{cell} [A] \quad (2.6)$$

Όπου J_{ph} είναι η ροή των φωτονίων (J_{ph} – φωτόνια ανά επιφάνεια και χρόνο) με μήκος κύματος που μπορούν να ενεργοποιήσουν ένα φωτοβολταϊκό κελί και A_{cell} η επιφάνεια του κελιού.

Ισχύς φωτοβολταϊκού κελιού

Η ισχύς που μπορεί να παράξει ένα φωτοβολταϊκό κελί δίνεται από το γινόμενο της τάσης με την ένταση του ρεύματος, δηλαδή:

$$P = VI [Watts] \quad (2.7)$$

και με αντικατάσταση από την εξίσωση (2.5) για την ένταση του ρεύματος:

$$P = U \left[I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{U + IR_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \right] [Watts] \quad (2.8)$$

Η ισχύς που τελικά θα αποδώσει το φωτοβολταϊκό κελί, εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις συνθήκες του περιβάλλοντος, εξαρτάται και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φορτίου που θα τοποθετηθεί στους ακροδέκτες του, τα οποία καθορίζουν το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού κελιού. Η μέγιστη ισχύς ενός κελιού δίνεται στο σημείο όπου ισχύει:

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad (2.9)$$

Ταυτόχρονα πρέπει να επαληθεύεται και η εξίσωση (2.5). Η λύση του συστήματος δίνει το σημείο λειτουργίας για το οποίο λαμβάνεται η μέγιστη ισχύς.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

2.2.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από N_s φωτοβολταϊκά κελία συνδεδεμένα εν σειρά και N_p σειρές συνδεδεμένες παράλληλα τότε η τάση και η ένταση του ρεύματος στα άκρα του πλαισίου θα είναι αντίστοιχα:

$$V_{panel} = N_s V [V] \quad (2.10)$$

$$I_{panel} = N_p I [A] \quad (2.11)$$

Για να βρεθεί η χαρακτηριστική εξίσωση του πλαισίου, θα γίνει αντικατάσταση στην εξίσωση (2.10) από την χαρακτηριστική εξίσωση του κελιού (2.5):

$$I_{panel} = N_p I = N_p \left[I_L - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{V + IR_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right] [A] \quad (2.12)$$

Και σε συνδυασμό με την εξίσωση (2.9) προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση πλαισίου:

$$I_{panel} = N_p \left[I_L - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{R_{sh}} \right] [A] \quad (2.13)$$

Ο σχεδιασμός της πεπλεγμένης εξίσωσης (2.12) δίνει την χαρακτηριστική καμπύλη $I_{panel} - V_{panel}$ του πλαισίου η οποία αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό χαρακτηριστικό του καθώς από εκεί εξάγονται όλες οι παράμετροι που χρειάζονται για το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ενέργειας:

- I_{sc} [A] ρεύμα βραχυκύκλωσης (μέγιστο ρεύμα)
- V_{oc} [V] τάση ανοικτού κυκλώματος (μέγιστη τάση)
- I_{mp} [A] ένταση στη μέγιστη ισχύ
- V_{mp} [V] τάση στη μέγιστη ισχύ
- P_{mp} ή P_{max} [W] μέγιστη ισχύς

Τα σημεία μέγιστης ισχύος του πλαισίου I_{mp} και V_{mp} μπορούν να βρεθούν με όμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση του κελιού, δηλαδή από την λύση του συστήματος των εξισώσεων (2.13) και (2.14)

$$\frac{dP_{panel}}{dV_{panel}} = 0 \rightarrow \frac{d(I_{panel} V_{panel})}{dV_{panel}} = 0 \quad (2.14)$$

Η χαρακτηριστική καμπύλη σχεδιάζεται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Οι «Τυπικές Συνθήκες Δοκιμής (Standard Testing Conditions – STC) είναι:

- Ένταση ακτινοβολίας $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία $T_{STC} = 298 \text{ K}$
- Φάσμα ακτινοβολίας σε 1.5 μάζα αέρα (AM1.5)

Η μέγιστη ισχύς P_{mp} στις συνθήκες STC είναι η ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης προκύπτει από την σχέση:

$$\eta_{STC} = \frac{P_{mp,STC}/A_{panel}}{G_{STC}} \quad (2.15)$$

όπου $A_{panel} [\text{m}^2]$ το εμβαδόν του πλαισίου.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

2.2.4: Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας

Σε πρακτικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθεί πως το φωτόρρευμα και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγέθη ανάλογα, δηλαδή:

$$I_l = I_{l,STC} \frac{G}{G_{STC}} [A] \quad (2.16)$$

Όπου $I_{l,STC}$ η ένταση του φωτορεύματος στις συνθήκες STC. Η παραπάνω αναλογία οδηγεί τελικά στην παραγόμενη ισχύ να είναι και αυτή ανάλογη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

2.2.5: Επίδραση θερμοκρασίας

Ο βαθμός απόδοσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός κελιού, ενός πλαισίου ή μιας συστοιχίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία της επιφάνειας του πλαισίου, όπως φαίνεται και στις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου. Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι δύσκολο να μελετηθεί θεωρητικά διότι μεταβάλλονται και άλλες παράμετροι (όπως το ρεύμα κόρου) που έχουν σύνθετη συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές δίνουν, μετά από μετρήσεις, συντελεστές θερμοκρασιακής μεταβολής των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής έντασης a_I
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής τάσης a_V
- Συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής ισχύος a_P

Οι συντελεστές αυτοί επιδρούν στα τρία βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη ενός Φ/Β με βάση τις εξής σχέσεις:

$$I'_{SC} = I_{SC}(1 + a_I(T' - T)) [A] \quad (2.17)$$

$$V'_{OC} = U_{OC}(1 + a_V(T' - T)) [V] \quad (2.18)$$

$$P'_{mp} = P_{mp}(1 + a_P(T' - T)) [W] \quad (2.19)$$

όπου T η θερμοκρασία του πλαισίου και T' η θερμοκρασίας αναφοράς ($=25^\circ\text{C}$). Με τις ίδιες σχέσεις επιδρά η θερμοκρασία σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της καμπύλης για το αντίστοιχο μέγεθος ενώ οι συντελεστές a_I , a_V και a_P μεταβάλλονται ελάχιστα. Οι συντελεστές δείχνουν την ποσοστιαία μεταβολή του μεγέθους για αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό. Έτσι, πρακτικά με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό κελσίου, εάν όλες οι υπόλοιπες συνθήκες μένουν σταθερές, η παραγόμενη τάση στα άκρα ενός Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται περίπου 0.3%, η ένταση του ρεύματος αυξάνεται περίπου 0.04% ενώ η ισχύς μειώνεται κατά 0.45%.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

2.3: Σχεδίαση χαρακτηριστικής καμπύλης φωτοβολταϊκού κελιού στο Excel

Εκφώνηση άσκησης 2.1: Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης ($I - U$) και Ισχύος – Τάσης ($P - U$) ενός Φ/Β κελιού όταν ακτινοβολείται σε συνθήκες STC. Να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς του και ο βαθμός απόδοσης.

Δίνεται η παράλληλη αντίσταση και αντίσταση σε σειρά του Φ/Β κελιού $R_{sh} = 6.6 \, \Omega$ και $R_s = 0.005 \, \Omega$ αντίστοιχα, η επιφάνεια του κελιού $A_{cell} = 150 \, \text{cm}^2$, το ρεύμα κόρου $I_o = 10^{-10} \, \text{A}$, η ροή των φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί $J_{phSTC} = 1.369 \times 10^{17} [1/s] \times [1/\text{cm}^2]$, το φορτίο ηλεκτρονίου $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \, \text{C}$, η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23} \, \text{J/K}$, η θερμοκρασία κελιού σε συνθήκες STC $T_{STC} = 298 \, \text{K}$ και η ακτινοβολία σε συνθήκες STC $G_{STC} = 1000 \, \text{W/m}^2$.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 2”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «2.1»
- «2.1 Graph»

Στο φύλλο «2.1» ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα δεδομένα της εφαρμογής που βρίσκονται στα μπλε πεδία του πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1 (κελιά D7 έως D15), όπου:

R_s: Αντίσταση κελιού σε σειρά [Ω]

R_{sh}: Παράλληλη αντίσταση κελιού [Ω]

A_{cell}: Επιφάνεια κελιού [cm^2]

I_o: Ρεύμα κόρου [A]

J_{ph_stc}: Ροή φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί

q_e: Φορτίο Ηλεκτρονίου [C]

k: Σταθερά Boltzmann

R _s	0,005	Ω
R _{sh}	6,6	Ω
A _{cell}	150	cm^2
I _o	1E-10	A
J _{ph_stc}	1,369E+17	$(1/s) \cdot (1/\text{cm}^2)$
q _e	1,6E-19	C
k	1,38E-23	J/K
T _{stc}	298	K
G _{stc}	1000	W/m^2
I(J _{ph})	3,286	A

Εικόνα 2. 1: Πίνακας δεδομένων εισόδου εφαρμογής 2.1

T_{stc}: Θερμοκρασία κελιού STC [K]

G_{stc}: Ακτινοβολία STC [W/m²]

I(J_{ph}): Φωτόρρευμα [A]

Το φωτόρρευμα **I(J_{ph})** υπολογίζεται αυτόματα σύμφωνα με την σχέση (2.6) κελί D16:

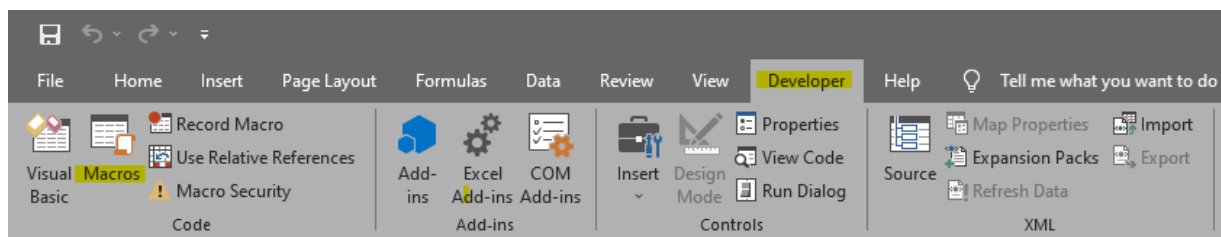
$$I_l = J_{ph} q_e A_{cell} [A] \quad (2.6)$$

Έχοντας προσδιορίσει τα παραπάνω ξεκινάει η επίλυση της εφαρμογής όπως αναλύεται στην συνέχεια.

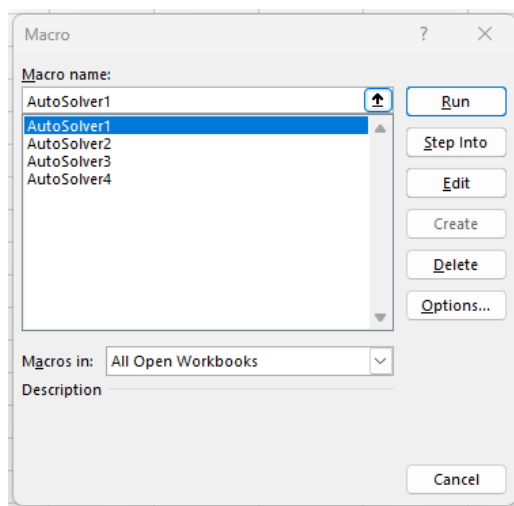
Η ζητούμενη χαρακτηριστική καμπύλη αποτελεί την γραφική αναπαράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης έντασης ρεύματος – τάσης του φωτοβολταϊκού **κελιού** που δίνεται από την σχέση (2.5):

$$I = I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{V + IR_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} [A] \quad (2.5)$$

Τα ζεύγη τιμών (I – V) που ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση αποτελούν σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης του κελιού. Για τον υπολογισμό αυτών των σημείων, ο χρήστης αρκεί να «τρέξει» την μακροεντολή με όνομα «AutoSolver1» (Developer → Macros → AutoSolver1 → Run). Τα βήματα απεικονίζονται στις εικόνες 2.2 και 2.3.



Εικόνα 2. 2: Πρώτο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 1



Εικόνα 2. 3: Δεύτερο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 1

Η μακροεντολή AutoSolver 1 ουσιαστικά υπολογίζει την τιμή της έντασης ρεύματος που αντιστοιχεί σε προκαθορισμένη τιμή τάσης έτσι ώστε να ικανοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για εύρος τάσης $U = 0V, 0.01V, \dots, 1V$ οπότε προκύπτουν 101 σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης. Μερικά δευτερόλεπτα ύστερα από το τρέξιμο της AutoSolver 1, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα του φύλλου «2.1» (κελιά C22 έως E122), απόκομμα του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4.

Στην στήλη P(W) αυτού του πίνακα (κελιά E22 έως E122) υπολογίζεται αυτόματα και η ισχύς που παράγει το Φ/Β κελί για κάθε ζεύγος τιμών $I - V$ της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, σύμφωνα με την σχέση (2.7):

$$P = V \times I [W] \quad (2.7)$$

V (Volts)	I (A)	P (W)
0	3,28311379	0
0,01	3,28159979	0,032815998
0,02	3,28008578	0,065601716
0,03	3,27857178	0,098357153
0,04	3,27705777	0,131082311
0,05	3,27554377	0,163777188
0,06	3,27402976	0,196441786
0,07	3,27251576	0,229076103
0,08	3,27100175	0,26168014
0,09	3,26948775	0,294253897
0,1	3,26797374	0,326797374
0,11	3,26645973	0,35931057
0,12	3,26494572	0,391793486
0,13	3,2634317	0,424246122
0,14	3,26191769	0,456668476
0,15	3,26040366	0,489060549

Εικόνα 2. 4: Ζεύγη τιμών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $I - V$ του Φ/Β κελιού

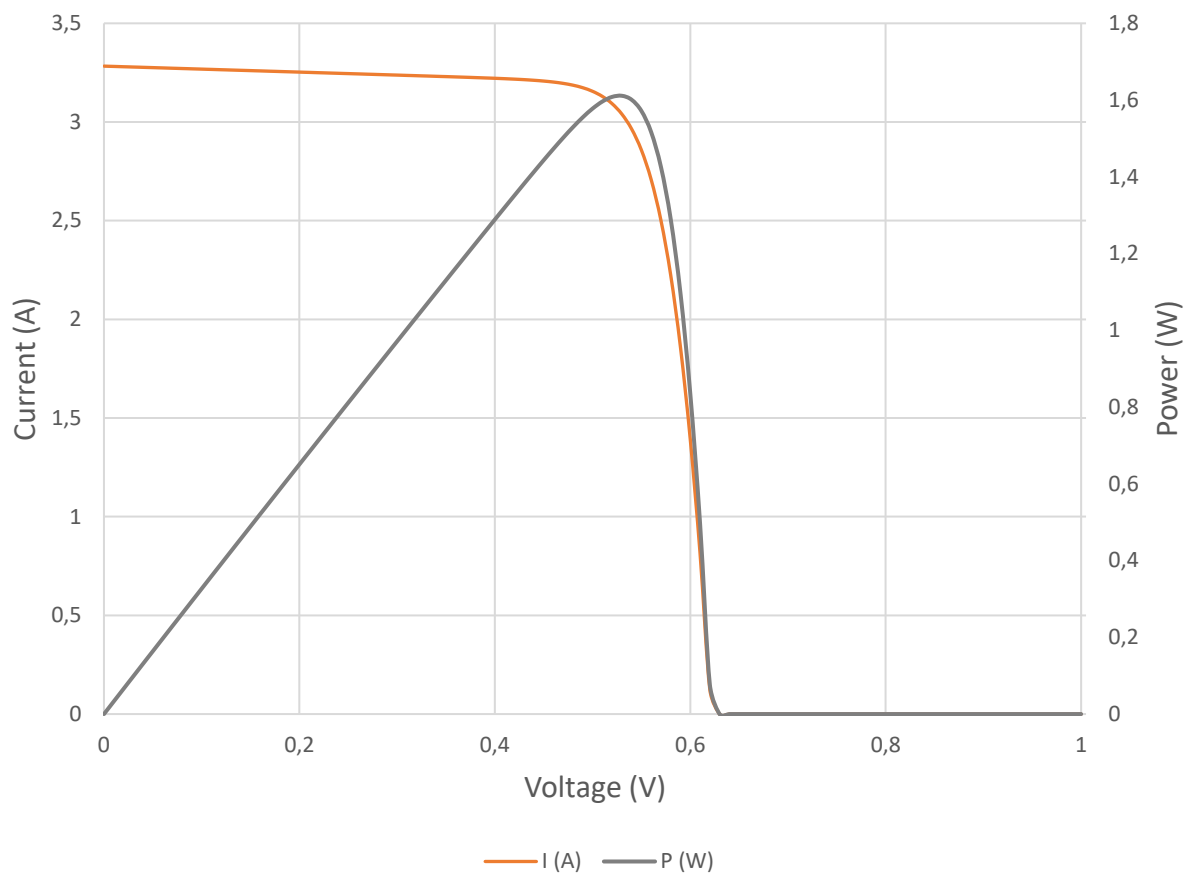
Με τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών, ο χρήστης μπορεί να δει την χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ καθώς και την καμπύλη ισχύος του Φ/Β κελιού επιλέγοντας το φύλλο «2.1 Graph» το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6.

Τέλος, στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «2.1» και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.5 (κελιά H21 έως H24) καταγράφονται τα υπόλοιπα ζητούμενα της εφαρμογής:

- **V_max:** Τάση μέγιστης ισχύος [V]
- **I_max:** Ρεύμα μέγιστης ισχύος [A]
- **P_max:** Μέγιστη ισχύς [W]
- **η:** Βαθμός απόδοσης κελιού

V_max	0,53	V
I_max	3,04	A
P_max	1,611	W
η	10,74%	

Εικόνα 2. 5: Πίνακας υπολογισμού τάσης, έντασης ρεύματος ισχύος και βαθμού απόδοσης στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.



Εικόνα 2. 6: Χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ φωτοβολταϊκού κελιού

I(A): Ένταση ρεύματος

P(W): Παραγόμενη ισχύς

Σημείωση: Η μακροεντολή AutoSolver 1 κάνει χρήση του εργαλείου Solver. Αυτό είναι ένα *add-in* πρόγραμμα του Excel το οποίο για να χρησιμοποιηθεί πρέπει πρώτα να φορτωθεί σύμφωνα με οδηγίες που είναι διαθέσιμες στην ιστοσελίδα της Microsoft.

2.4: Σχεδίαση χαρακτηριστικής καμπύλης φωτοβολταϊκού πλαισίου στο Excel

Εκφώνηση άσκησης 2.2: Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης ($I - V$) και Ισχύος – Τάσης ($P - V$) ενός Φ/Β πλαισίου που αποτελείται από $N_s = 20$ κελιά και $N_p = 2$ σειρές κελιών και ακτινοβολείται σε συνθήκες STC. Να βρεθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου.

Δίνεται η παράλληλη αντίσταση και αντίσταση σε σειρά του Φ/Β κελιού $R_{sh} = 6.6 \Omega$ και $R_s = 0.005 \Omega$ αντίστοιχα, η επιφάνεια του κελιού $A_{cell} = 150 \text{ cm}^2$, το ρεύμα κόρου $I_o = 10^{-10} \text{ A}$, η ροή των φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί $J_{phSTC} = 1.369 \times 10^{17} [1/s] \times [1/\text{cm}^2]$, το φορτίο ηλεκτρονίου $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, η θερμοκρασία κελιού σε συνθήκες STC $T_{STC} = 298 \text{ K}$ και η ακτινοβολία σε συνθήκες STC $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 2”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «2.2»
- «2.2 Graph»

Στο φύλλο «2.2» ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα δεδομένα της εφαρμογής που βρίσκονται στα μπλε πεδία του πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.7 (κελιά E7 έως E18), όπου:

R_s: Αντίσταση κελιού σε σειρά [Ω]

R_sh: Παράλληλη αντίσταση κελιού [Ω]

A_cell: Επιφάνεια κελιού [cm^2]

I_o: Ρεύμα κόρου [A]

J_ph_stc: Ροή φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί

q_e: Φορτίο Ηλεκτρονίου [C]

k: Σταθερά Boltzmann

T_stc: Θερμοκρασία κελιού STC [K]

G_stc: Ακτινοβολία STC [W/m^2]

N_s: Αριθμός Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένα εν σειρά

N_p: Αριθμός σειρών Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένες παράλληλα

I(J_ph): Φωτόρευμα [A]

R_s	0,005	Ω
R_sh	6,6	Ω
A_cell	150	cm^2
I_o	1E-10	A
J_ph_stc	1,369E+17	$(1/s) \cdot (1/\text{cm}^2)$
qe	1,6E-19	C
k	1,38E-23	J/K
T_stc	298	K
G_stc	1000	W/m^2
N_s	20	
N_p	2	
I(J_ph)	3,286	A

Εικόνα 2. 7: Πίνακας δεδομένων εφαρμογής 2.2

Το φωτόρευμα **I(J_ph)** υπολογίζεται αυτόματα σύμφωνα με την σχέση (2.6) κελί E18:

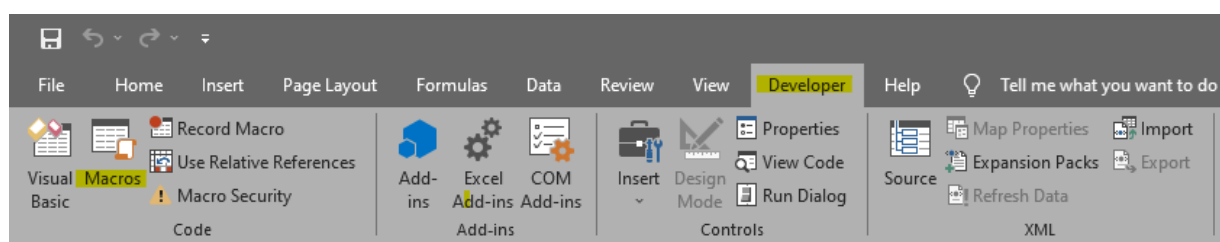
$$I_l = J_{ph} q_e A_{cell} [A] \quad (2.6)$$

Έχοντας προσδιορίσει τα παραπάνω ξεκινάει η επίλυση της εφαρμογής όπως αναλύεται στην συνέχεια.

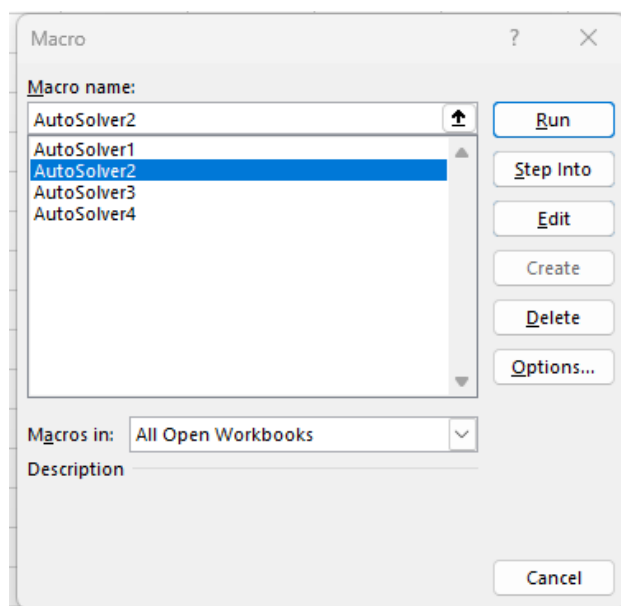
Η ζητούμενη χαρακτηριστική καμπύλη αποτελεί την γραφική αναπαράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης έντασης ρεύματος – τάσης του φωτοβολταϊκού **πλαisiού** που δίνεται από την σχέση (2.13):

$$I_{panel} = N_p \left[I_L - I_0 \left(\exp \left(q_e \frac{V_{panel} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{panel} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{R_{sh}} \right] \quad [A] \quad (2.13)$$

Τα ζεύγη τιμών ($I_{panel} - V_{panel}$) που ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση αποτελούν σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης του πλαisiού. Για τον υπολογισμό αυτών των σημείων, ο χρήστης αρκεί να «τρέξει» την μακροεντολή με όνομα «AutoSolver2» (Developer → Macros → AutoSolver2 → Run). Τα βήματα απεικονίζονται στις εικόνες 2.8 και 2.9.



Εικόνα 2. 8: Πρώτο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 2



Εικόνα 2. 9: : Δεύτερο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 2

Η μακροεντολή AutoSolver2 ουσιαστικά υπολογίζει την τιμή της έντασης ρεύματος που αντιστοιχεί σε προκαθορισμένη τιμή τάσης έτσι ώστε να ικανοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για εύρος τάσης $V = 0V, 0,2V, \dots, 20V$ οπότε προκύπτουν 101 σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης. Μερικά δευτερόλεπτα ύστερα από το τρέξιμο της AutoSolver 2, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα του φύλλου «2.2» (κελιά D24 έως F124), απόκομμα του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.10.

Στην στήλη $P(W)$ του πίνακα της εικόνας 2.10 (κελιά F24 έως F124) υπολογίζεται αυτόματα και η ισχύς που παράγει το Φ/Β πλαίσιο για κάθε ζεύγος τιμών $I_{\text{panel}} - V_{\text{panel}}$ της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, σύμφωνα με την σχέση (2.7):

$$P = V \times I \text{ [W]} \quad (2.7)$$

Έχοντας υπολογίσει τα παραπάνω, ο χρήστης μπορεί να δει την χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$ καθώς και την καμπύλη ισχύος του πλαισίου επιλέγοντας το φύλλο «2.2 Graph» (εικόνα 2.12).

V_panel (Volts)	I_panel(A)	P_panel (W)
0	6,5662256	0
0,2	6,5631976	1,31263952
0,4	6,5601696	2,62406783
0,6	6,5571416	3,93428494
0,8	6,5541135	5,24329084
1	6,5510855	6,55108554
1,2	6,5480575	7,85766903
1,4	6,5450295	9,16304132
1,6	6,5420015	10,4672024
1,8	6,5389735	11,7701523
2	6,5359455	13,071891
2,2	6,5329175	14,3724184
2,4	6,5298894	15,6717347
2,6	6,5268614	16,9698397
2,8	6,5238334	18,2667334
3	6,5208053	19,562416

Εικόνα 2. 10: : Ζεύγη τιμών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $I - V$ του Φ/Β πλαισίου

Τέλος, στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «2.2» και παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11 (κελιά J23 έως J28) καταγράφονται τα υπόλοιπα ζητούμενα της εφαρμογής:

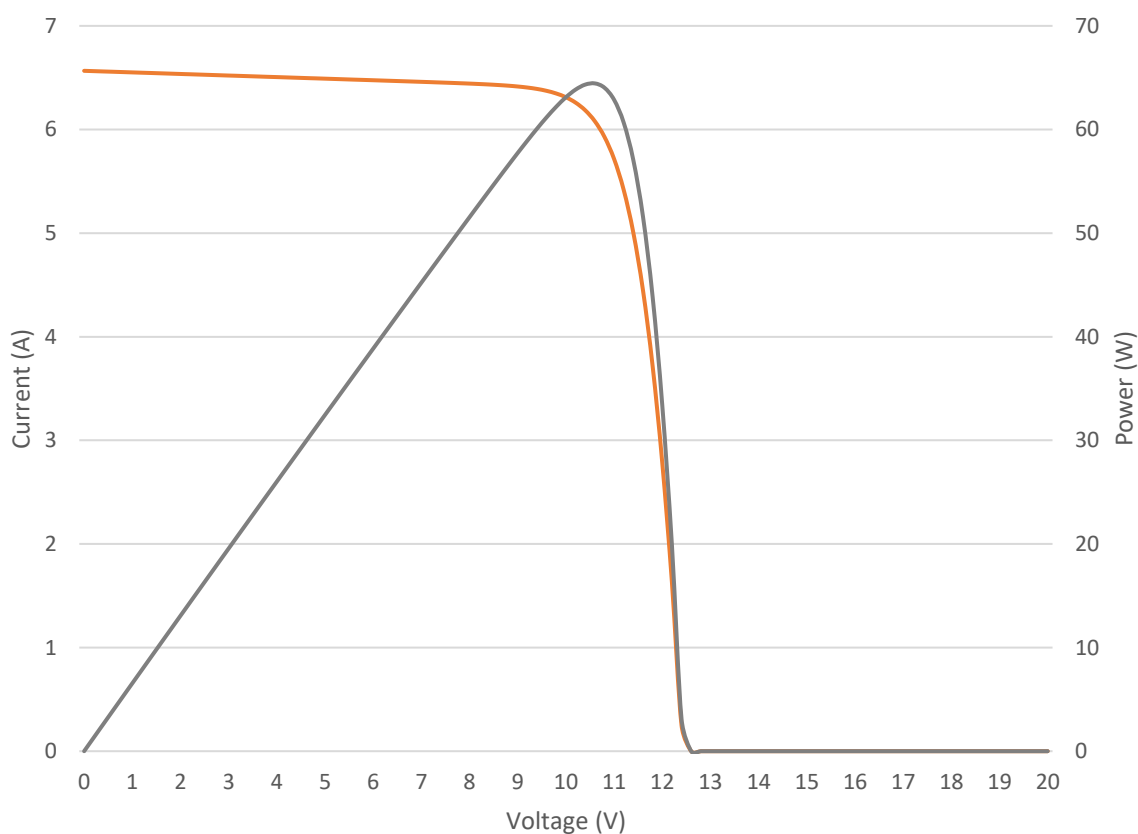
- **V_max**: Τάση μέγιστης ισχύος
- **I_max**: Ρεύμα μέγιστης ισχύος
- **P_max**: Μέγιστη ισχύς
- **I_sc**: Ρεύμα βραχυκύκλωσης
- **V_oc**: Τάση ανοιχτοκύκλωσης
- **A_panel**: επιφάνεια πλαισίου

V_max	10,6	V
I_max	6,07996	A
P_max	64,4475	W
I_sc	6,56623	A
U_oc	12,4	V
A_panel	0,6	m^2

Εικόνα 2. 11: Πίνακας υπολογισμού
ζητούμενων μεγεθών εφαρμογής
2.2

Η επιφάνεια του πλαισίου υπολογίζεται στο κελί K28 ως εξής:

$$A_{panel} = N_s \times N_p \times A_{cell} [m^2]$$



Εικόνα 2. 12: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος – τάσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.5: Υπολογισμός επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο Excel

Εκφώνηση άσκησης 2.3: Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης ($I - V$) του φωτοβολταϊκού πλαισίου της εφαρμογής 2.4 για ηλιακή ακτινοβολία: $G1= 250 \frac{W}{m^2}$, $G2= 500 \frac{W}{m^2}$, $G3= 750 \frac{W}{m^2}$, $G4= 1000 \frac{W}{m^2}$.

Δίνεται η παράλληλη αντίσταση και αντίσταση σε σειρά του Φ/Β κελιού $R_{sh} = 6.6 \Omega$ και $R_s = 0.005 \Omega$ αντίστοιχα, η επιφάνεια του κελιού $A_{cell} = 150 \text{ cm}^2$, το ρεύμα κόρου $I_o = 10^{-10} \text{ A}$, η ροή των φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί $J_{phSTC} = 1.369 \times 10^{17} [1/s] \times [1/\text{cm}^2]$, το φορτίο ηλεκτρονίου $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, η θερμοκρασία κελιού σε συνθήκες STC $T_{STC} = 298 \text{ K}$ και η ακτινοβολία σε συνθήκες STC $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$. Το πλαίσιο αποτελείται από $N_s = 20$ κελιά σε σειρά και $N_p = 2$ σειρές κελιών.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 2”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «2.3»
- «2.3 STC values»
- «2.3 Graph»

Το φύλλο «2.3 STC values» χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την δημιουργία του γραφήματος του φύλλου «2.3 Graph»

Στο φύλλο «2.2» ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα δεδομένα της εφαρμογής που βρίσκονται στα μπλε πεδία του πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.13 (κελιά D7 έως D20), όπου:

R_s: Αντίσταση κελιού σε σειρά [Ω]

R_{sh}: Παράλληλη αντίσταση κελιού [Ω]

A_{cell}: Επιφάνεια κελιού [cm^2]

I_o: Ρεύμα κόρου [A]

J_{ph_stc}: Ροή φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί

q_e: Φορτίο Ηλεκτρονίου [C]

k: Σταθερά Boltzmann

T_{stc}: Θερμοκρασία κελιού STC [K]

G_{stc}: Ακτινοβολία STC [W/m^2]

N_s: Αριθμός Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένα εν σειρά

N_p: Αριθμός σειρών Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένες παράλληλα

G: Ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

R_s	0,005	Ω
R_sh	6,6	Ω
A_cell	150	cm^2
I_o	1E-10	A
J_ph_stc	1,369E+17	$(1/s) \cdot (1/\text{cm}^2)$
qe	1,6E-19	C
k	1,38E-23	J/K
T_stc	298	K
G_stc	1000	W/m^2
N_s	20	
N_p	2	
G	800	W/m^2
I_i (J_ph)	3,2856	A
I_i (G)	2,62848	A

Εικόνα 2. 14: Δεδομένα εφαρμογής 2.4

Εικόνα 2. 13: Πίνακας δεδομένων εισόδου εφαρμογής 2.3

I_i(J_{ph}): Φωτόρευμα σε συνθήκες STC [A]

I_i(G): Φωτόρευμα για ακτινοβολία G [A]

Το φωτόρευμα **I_i(J_{ph})** (συνθήκες STC) υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (2.6) στο κελί D19:

$$I_l = J_{ph} q_e A_{cell} [A] \quad (2.6)$$

Το φωτόρευμα **I_i(G)** για την ηλιακή ακτινοβολία **G** υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (2.16) στο κελί D20:

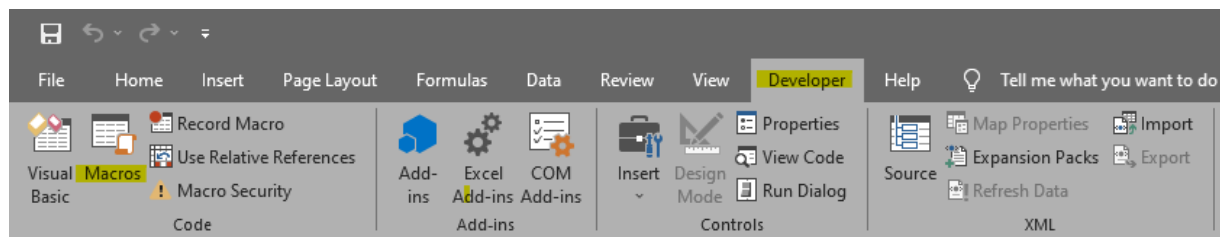
$$I_l = I_{l,STC} \frac{G}{G_{STC}} [A] \quad (2.16)$$

Όπως ισχύει για την εφαρμογή 2.4, η ζητούμενη χαρακτηριστική καμπύλη αποτελεί την γραφική αναπαράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης έντασης ρεύματος – τάσης του φωτοβολταϊκού **πλασιού** που δίνεται από την σχέση (2.13):

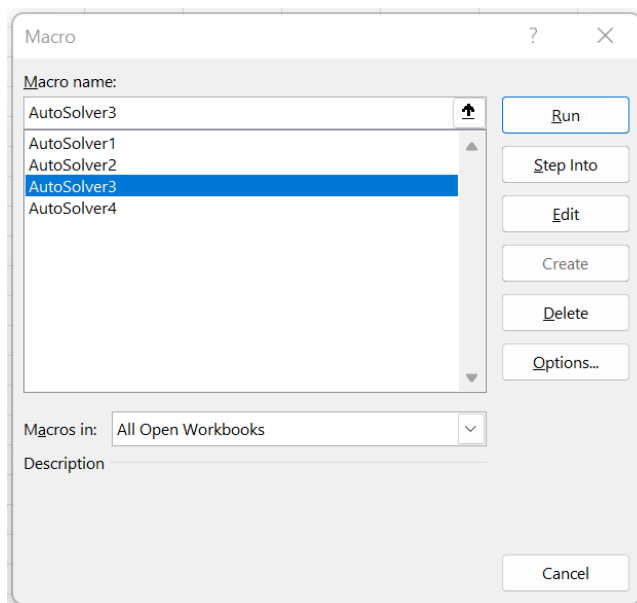
$$I_{panel} = N_p \left[I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{R_{sh}} \right] \quad (2.13)$$

Στην παραπάνω σχέση αντικαθίσταται το φωτόρευμα **I_i(G)** που προκύπτει από ακτινοβολία G όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

Τα ζεύγη τιμών ($I_{panel} - V_{panel}$) που ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση αποτελούν σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης του πλασιού. Για τον υπολογισμό αυτών των σημείων, ο χρήστης αρκεί να «τρέξει» την μακροεντολή με όνομα «AutoSolver3» (Developer → Macros → AutoSolver3 → Run). Τα βήματα απεικονίζονται στις εικόνες 2.15 και 2.16.



Εικόνα 2. 15: Πρώτο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 3



Εικόνα 2. 16: Δεύτερο βήμα «τρέξιματος» μακροεντολής AutoSolver 3

Η μακροεντολή AutoSolver3 ουσιαστικά υπολογίζει την τιμή της έντασης ρεύματος που αντιστοιχεί σε προκαθορισμένη τιμή τάσης έτσι ώστε να ικανοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση.

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για εύρος τάσης $U = 0V, 0,2V, \dots, 20V$ οπότε προκύπτουν 101 σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης. Μερικά δευτερόλεπτα ύστερα από το τρέξιμο της AutoSolver3, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα του φύλλου «2.3» (κελιά C25 έως F125), απόκομμα του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.17.

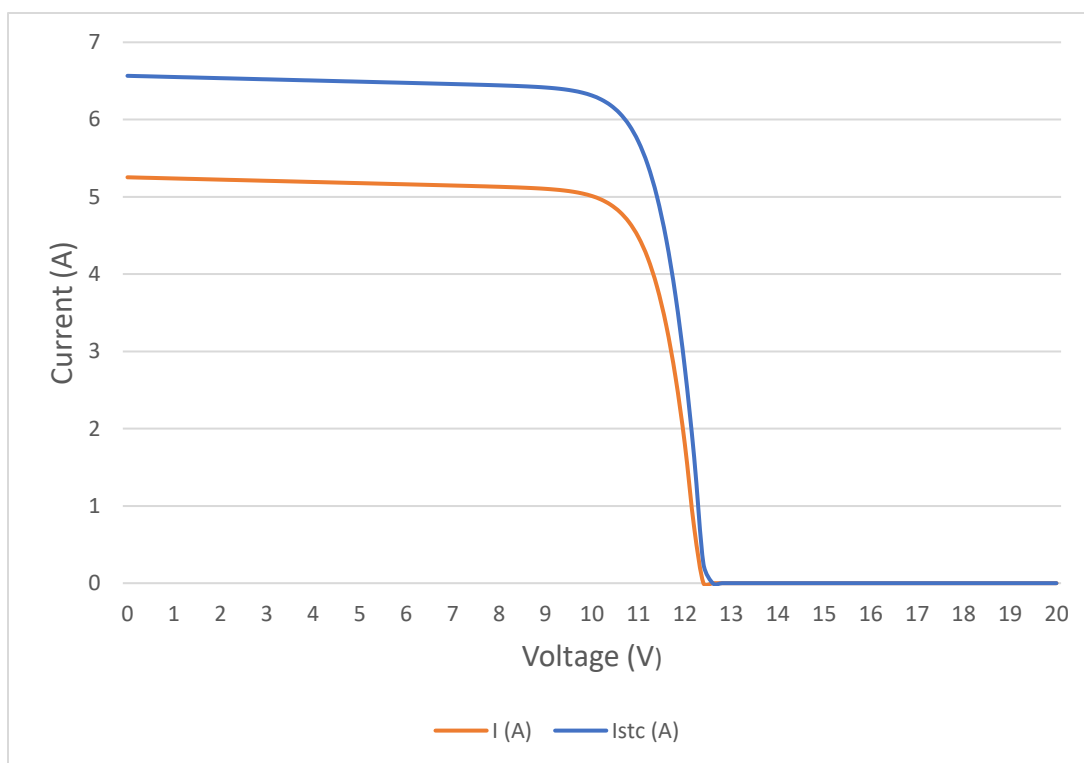
Στην στήλη $P(W)$ αυτού του πίνακα υπολογίζεται αυτόματα και η ισχύς που παράγει το Φ/Β πλαίσιο για κάθε ζεύγος τιμών $I_{panel} - V_{panel}$ της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, σύμφωνα με την σχέση (2.7):

$$P = V \times I \text{ [W]} \quad (2.7)$$

Στο φύλλο «2.3 Graph» (εικόνα 2.18), ο χρήστης μπορεί να δει την χαρακτηριστική καμπύλη έντασης – τάσης ($I - V$) για την ηλιακή ακτινοβολία G που ορίστηκε σε σχέση με την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη για ακτινοβολία σε συνθήκες STC.

V_panel (Volts)	I_panel (A)	P_panel (W)
0	5,25298147	0
0,2	5,24995346	1,049990692
0,4	5,24692545	2,09877018
0,6	5,24389744	3,146338464
0,8	5,24086943	4,192695545
1	5,23784142	5,237841421
1,2	5,23481341	6,281776093
1,4	5,2317854	7,32449956
1,6	5,22875739	8,366011822
1,8	5,22572938	9,406312877
2	5,22270136	10,44540272
2,2	5,21967334	11,48328136
2,4	5,21664532	12,51994878
2,6	5,2136173	13,55540498
2,8	5,21058926	14,58964994
3	5,20756122	15,62268366

Εικόνα 2. 17: Ζεύγη τιμών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $I - V$ του Φ/Β πλαισίου



Εικόνα 2. 18: Χαρακτηριστική εξίσωση πλαισίου $I - V$ για ηλιακή ακτινοβολία G σε σχέση με G_{STC}

I (A): Χαρακτηριστική καμπύλη για ηλιακή ακτινοβολία G

I_{STC} (A): Χαρακτηριστική καμπύλη για ηλιακή συνθήκες STC

2.6: Υπολογισμός επίδρασης της θερμοκρασίας σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο Excel

Εκφώνηση άσκησης 2.4: Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης – Τάσης ($I - V$) και Ισχύος – Τάσης ($P - V$) του Φ/Β πλαισίου των εφαρμογών 2.4 και 2.5 για τις θερμοκρασίες επιφάνειας: $T_1 = 0^\circ\text{C}$, $T_2 = 25^\circ\text{C}$, $T_3 = 50^\circ\text{C}$, $T_4 = 75^\circ\text{C}$ και για ηλιακή ακτινοβολία G_{STC} . Ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση είναι $a_v = -0.38\%/K$ και για την ένταση $a_I = 0.04\%/K$.

Δίνεται η παράλληλη αντίσταση και αντίσταση σε σειρά του Φ/Β κελιού $R_{sh} = 6.6 \Omega$ και $R_s = 0.005 \Omega$ αντίστοιχα, η επιφάνεια του κελιού $A_{cell} = 150 \text{ cm}^2$, το ρεύμα κόρου $I_o = 10^{-10} \text{ A}$, η ροή των φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί $J_{phSTC} = 1.369 \times 10^{17} [1/s] \times [1/\text{cm}^2]$, το φορτίο ηλεκτρονίου $q_e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, η σταθερά Boltzmann $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, η θερμοκρασία κελιού σε συνθήκες STC $T_{STC} = 298 \text{ K}$ και η ακτινοβολία σε συνθήκες STC $G_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$. Το πλαίσιο αποτελείται από $N_s = 20$ κελιά σε σειρά και $N_p = 2$ σειρές κελιών.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 2”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «2.4»
- «2.4 Graph»

Στο φύλλο «2.4» ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα δεδομένα της εφαρμογής που βρίσκονται στα μπλε πεδία του πίνακα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.19 (κελιά E7 έως E21), όπου:

R_s: Αντίσταση κελιού σε σειρά [Ω]

R_sh: Παράλληλη αντίσταση κελιού [Ω]

A_cell: Επιφάνεια κελιού [cm^2]

I_o: Ρεύμα κόρου [A]

J_ph_stc: Ροή φωτονίων που ενεργοποιούν το κελί

q_e: Φορτίο Ηλεκτρονίου [C]

k: Σταθερά Boltzmann

T_stc: Θερμοκρασία κελιού STC [K]

G_stc: Ακτινοβολία STC [W/m^2]

N_s: Αριθμός Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένα εν σειρά

N_p: Αριθμός σειρών Φ/Β κελιών του πλαισίου συνδεδεμένες παράλληλα

G: Ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

I_i(J_ph): Φωτόρευμα σε συνθήκες STC [A]

a_v: Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης [$1/\text{K}$]

a_I: Θερμοκρασιακός συντελεστής έντασης [$1/\text{K}$]

R_s	0,005	Ω
R_sh	6,6	Ω
A_cell	150	cm^2
I_o	1E-10	A
J_ph_stc	1,369E+17	$(1/s) \cdot (1/\text{cm}^2)$
q_e	1,6E-19	C
k	1,38E-23	J/K
T_stc	298	K
G_stc	1000	W/m^2
N_s	20	
N_p	2	
T	25	Celcius
a_v	-0,38%	$1/\text{K}$
a_I	0,04%	$1/\text{K}$
I_i(J_ph)	3,286	A

Εικόνα 2. 19: Πίνακας δεδομένων εισόδου εφαρμογής 2.4

Το φωτόρρευμα $I_l(J_{ph})$ (συνθήκες STC) υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (2.6) στο κελί E21:

$$I_l = J_{ph} q_e A_{cell} [A] \quad (2.6)$$

Έχοντας προσδιορίσει τα παραπάνω ξεκινάει η επίλυση της εφαρμογής όπως αναλύεται στην συνέχεια.

Μια θερμοκρασία T διαφορετική από την θερμοκρασία T_{STC} επιδρά στην ένταση ρεύματος και στην τάση σύμφωνα με τις σχέσεις (2.17) και (2.18) αντίστοιχα:

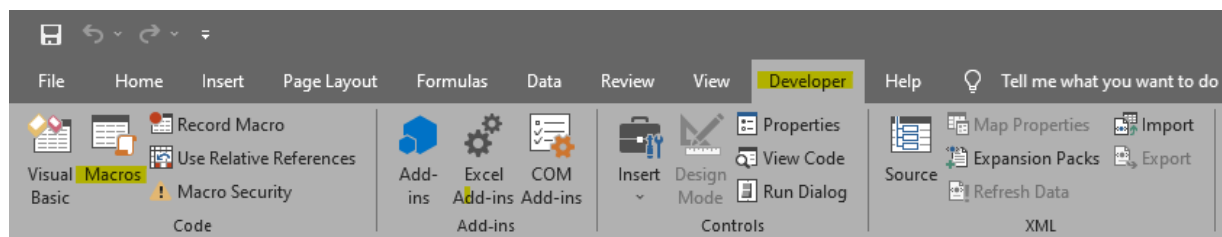
$$I' = I_{STC} (1 + a_I(T' - T)) [A] \quad (2.17)$$

$$V' = V_{STC} (1 + a_V(T' - T)) [V] \quad (2.18)$$

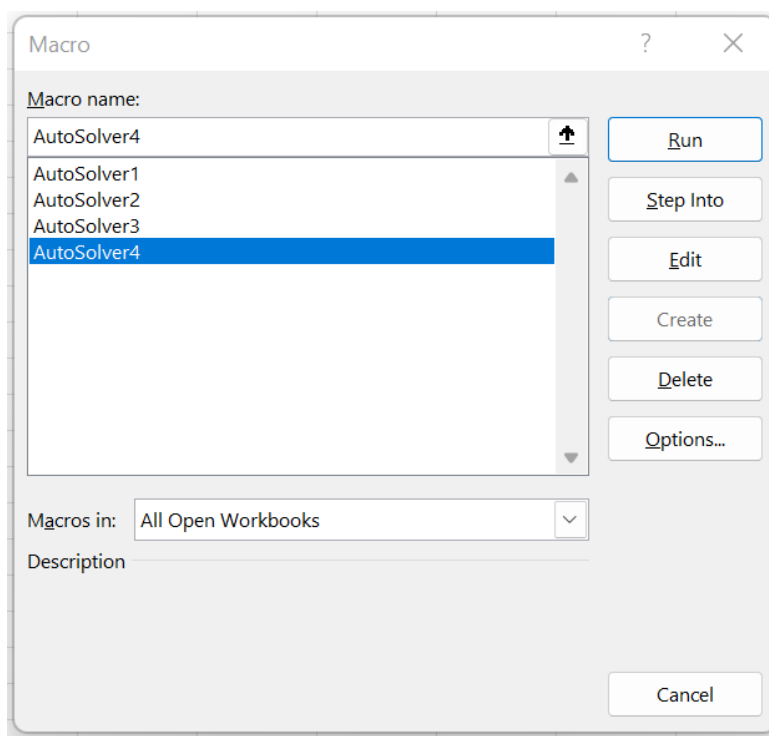
Το πρώτο βήμα της επίλυσης είναι να βρεθούν τα ζεύγη τιμών ($I_{STC} - V_{STC}$) τα οποία ικανοποιούν την χαρακτηριστική εξίσωση του Φ/Β πλαισίου όταν αυτό ακτινοβολείται σε συνθήκες STC. Η χαρακτηριστική εξίσωση του πλαισίου δίνεται από την σχέση (2.13):

$$I_{panel} = N_p \left[I_l - I_o \left(\exp \left(q_e \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{kT} \right) - 1 \right) - \frac{\frac{V_{panel}}{N_s} + \frac{I_{panel}}{N_p} R_s}{R_{sh}} \right] [A] \quad (2.13)$$

Για τον υπολογισμό αυτών των τιμών, ο χρήστης αρκεί να «τρέξει» την μακροεντολή με όνομα «AutoSolver4» (Developer → Macros → AutoSolver4 → Run). Τα βήματα απεικονίζονται στις εικόνες 2.20 και 2.21.



Εικόνα 2. 20: Πρώτο βήμα «τρεξίματος» μακροεντολής AutoSolver 4



Εικόνα 2. 21: Δεύτερο θήμα «τρεξίματος» μακροεντολής AutoSolver 4

Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για εύρος τάσης $V = 0V, 0,2V, \dots, 20V$ οπότε προκύπτουν 101 ζεύγη τιμών. Μερικά δευτερόλεπτα ύστερα από το τρέξιμο της AutoSolver4, τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα του φύλλου «2.4» (κελιά D27 έως F127), απόκομμα του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.22.

Στην στήλη $P_{STC} (W)$ αυτού του πίνακα υπολογίζεται αυτόματα και η ισχύς που παράγει το Φ/Β πλαίσιο για κάθε ζεύγος τιμών $I_{STC} - V_{STC}$ της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, σύμφωνα με την σχέση (2.7):

$$P = V \times I [W] \quad (2.7)$$

V_STC (Volts)	I_STC (A)	P_STC (W)
0	6,57	0,00
0,2	6,56	1,31
0,4	6,56	2,62
0,6	6,56	3,93
0,8	6,55	5,24
1	6,55	6,55
1,2	6,55	7,86
1,4	6,55	9,16
1,6	6,54	10,47
1,8	6,54	11,77
2	6,54	13,07
2,2	6,53	14,37
2,4	6,53	15,67
2,6	6,53	16,97
2,8	6,52	18,27
3	6,52	19,56

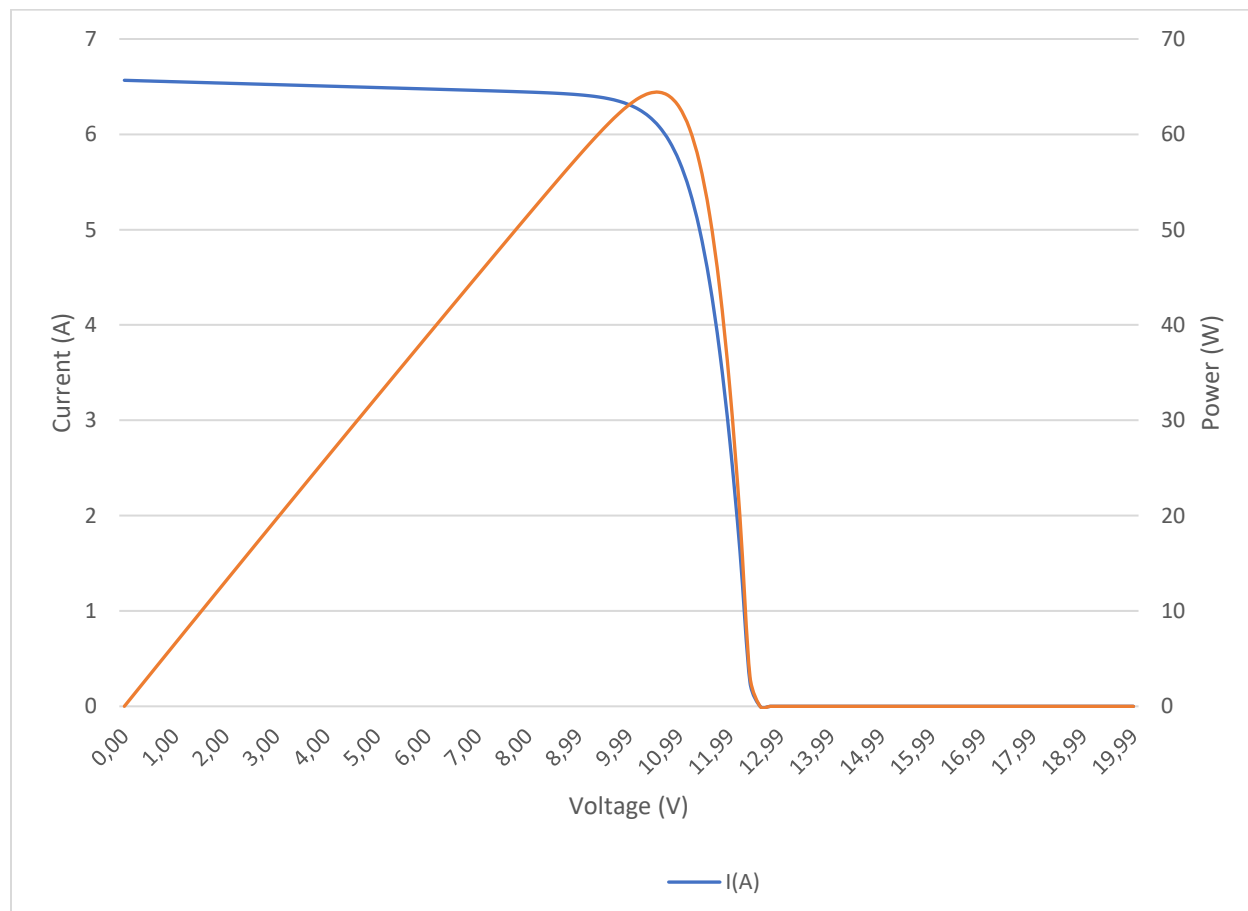
Εικόνα 2. 22: Ζεύγη τιμών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $I - V$ του Φ/Β πλαισίου σε συνθήκες STC

Έχοντας υπολογίσει τα ζεύγη τιμών (I_{STC} , V_{STC}), χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (2.17) και (2.18) για τον υπολογισμό των νέων τιμών έντασης I' και τάσης V' που προκύπτουν λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας T . Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στον πίνακα του φύλλου «2.4» (κελιά H27 έως J127), μέρος του οποίου φαίνεται στην εικόνα 2.23.

Ο χρήστης μπορεί να δει την νέα χαρακτηριστική καμπύλη Έντασης ρεύματος – Τάσης ($I - V$) καθώς και την νέα καμπύλη ισχύος για την θερμοκρασία T επιλέγοντας το φύλλο «2.4 Graph» (εικόνα 2.24).

V_panel (Volts)	I_panel (A)	P_panel (W)
0,00	6,57	0,00
0,20	6,56	1,31
0,40	6,56	2,62
0,60	6,56	3,93
0,80	6,55	5,24
1,00	6,55	6,55
1,20	6,55	7,85
1,40	6,55	9,16
1,60	6,54	10,46
1,80	6,54	11,76
2,00	6,54	13,07
2,20	6,53	14,37
2,40	6,53	15,66
2,60	6,53	16,96
2,80	6,52	18,26
3,00	6,52	19,55

Εικόνα 2. 23: Ζεύγη τιμών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $I - V$ του Φ/Β πλαισίου για θερμοκρασία επιφάνειας T



Εικόνα 2. 24: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος – τάσης Φ/Β πλαισίου για θερμοκρασία T

2.7: Συμπληρωματική βιβλιογραφία

Boyle G., "Renewable Energy Power for a Sustainable Future", Third Edition, Oxford University Press, 2012.

Green, M., "Solar Cells", New York, Prentice-Hall, 1982.

Malvino A. P., "Ηλεκτρονική Τζιόλα, 2001. Markvart T., "Solar Electricity", Wiley & Sons, 2010.

Quasching V., "Understanding Renewable Energy Systems", 2005.

Sabonnadiere J-C, " Renewable Energy Technologies, ISTE, Wiley & Sons, 2009.

Wenham, S., Green, M., Watt, M., Corkish, R., "Applied Photovoltaics", Second Edition, London, Earthscan, 2007.

Ζερβός Α., "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", 2008

Κεφάλαιο 3: Φωτοβολταϊκά συστήματα

3.1: Εισαγωγή

Το δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τα *φωτοβολταϊκά κελιά*. Καθώς η ισχύς που μπορεί να παράξει ένα Φ/Β κελί από μόνο του δεν ξεπερνάει τα 5W, απαιτείται η κατάλληλη συνδεσμολογία πολλών Φ/Β κελιών για την παραγωγή εκμεταλλεύσιμων ποσών ενέργειας. Η σύνδεση N_s φωτοβολταϊκών κελιών εν σειρά και N_p σειρών παράλληλα δημιουργεί ένα *φωτοβολταϊκό πλαίσιο*. Όμοια, η σύνδεση πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων δημιουργεί μια *φωτοβολταϊκή συστοιχία*.

Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες συνδυασμένες με εξοπλισμό όπως μπαταρίες, inverters και βοηθητικών πηγών ενέργειας χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα συστήματα, όπως:

- Συστήματα διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο
- Αυτόματα συστήματα με μπαταρία
- Συστήματα συνεχούς ρεύματος
- Υβριδικά συστήματα με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που συμμετέχουν σε κάθε σύστημα εξαρτάται από τις ενεργειακές ανάγκες, το σκοπό της χρήσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου. Έτσι τα συστήματα μπορούν να αποτελούνται από ένα και μόνο πλαίσιο για ειδικές χρήσεις, μέχρι πολλές χιλιάδες. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν σε κτήρια, είτε στην οροφή είτε στο κέλυφος (BIPV-Building Integrated Photovoltaics), σε εκτάσεις γης (φωτοβολταϊκά πάρκα), είτε μαζί με άλλες συσκευές ειδικού σκοπού (π.χ. φορτιστές εξοπλισμού τηλεμετάδοσης, σεισμολογικού δικτύου, κτλ.)

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.2: Εξοπλισμός φωτοβολταϊκών συστημάτων

3.2.1: Μπαταρία

Οι μπαταρίες (ηλεκτρικοί συσσωρευτές) χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές που χρειάζεται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμη πηγή. Σκοπός τους είναι να αποθηκεύσουν την περίσσεια ενέργειας ενός συστήματος και να την αποδώσουν όταν αυτό απαιτηθεί. Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, η χωρητικότητα της μπαταρίας αποτελεί μια παράμετρο σχεδιασμού που σχετίζεται με τον σκοπό του συστήματος, το ημερήσιο φορτίο, τις ημέρες αυτονομίας και την εγκατεστημένη ισχύ των συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό αλλά και στην ανάλυση συστημάτων με χρήση μπαταρίας παίζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της, τα οποία στην πραγματικότητα μεταβάλλονται συνεχώς ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, την κατάσταση φόρτισής της και τη θερμοκρασία. Το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους σε συνδυασμό με την καθοριστική τους σημασία τους στη λειτουργία αυτόνομων συστημάτων επιβάλλουν μεγάλη προσοχή κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία.

Η ηλεκτρική συμπεριφορά τους είναι πολυσύνθετη καθώς:

- Ο υπολογισμός της κατάστασης φόρτισης είναι σύνθετη διαδικασία.
- Εκφορτίζονται ακόμα και εάν δεν χρησιμοποιούνται.
- Η χωρητικότητα τους εξαρτάται από το πόσο γρήγορα ή αργά εκφορτίζονται.
- Ο βαθμός απόδοσης τους δεν είναι σταθερός και αλλάζει με βάση την κατάσταση φόρτισης και την ένταση του ρεύματος.
- Η θερμοκρασία τους επηρεάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.
- Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μεταβάλλονται στη διάρκεια ζωής τους.

Αντίστοιχα, η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από:

- τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά
- τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης
- τις συνθήκες λειτουργίας
- τη θερμοκρασία

Οι μπαταρίες έχουν σχετικά μεγάλο κόστος και περιορισμένη διάρκεια ζωής η οποία ανάλογα με τη χρήση μπορεί να μεταβάλλεται. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετριέται με κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Για την αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών επιλέγεται να μη γίνεται πλήρης αποφόρτιση αλλά έως ένα σημείο που ονομάζεται βάθος εκφόρτισης (DOD-Depth of Discharge). Για συνήθεις εφαρμογές επιλέγεται βάθος εκφόρτισης από 30 έως 70% της ονομαστικής χωρητικότητας, αν και υπάρχουν μπαταρίες με βάθος εκφόρτισης έως και 100%. Το βάθος εκφόρτισης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού έτσι ώστε να διαστασιολογηθεί κατάλληλα η μπαταρία. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως η χωρητικότητα των μπαταριών μειώνεται καθώς αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης.

Οι μπαταρίες επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, όπως όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Η αλλαγή της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη έχει επίπτωση στην απόδοση της αντίδρασης. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την απόδοση, ενώ η μείωση της θερμοκρασίας μειώνει την απόδοση. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν κάποια συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς (20 ή 25 °C) και δίνουν διορθωτικούς συντελεστές για την αναγωγή σε διαφορετική θερμοκρασία. Αν και η θερμοκρασία φαίνεται πως ευνοεί την χωρητικότητα, μειώνει τη διάρκεια ζωής της και αυξάνει τον βαθμό αυτό - αποφόρτισης, δηλαδή την αποφόρτιση χωρίς χρήση.

Η ονομαστική χωρητικότητα C είναι το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποδοθεί από την μπαταρία λόγω των χημικών αντιδράσεων. Η χωρητικότητα των μπαταριών μετριέται σε (Ah). Έτσι, η χωρητικότητα των μπαταριών μπορεί να μεταφραστεί στη δυνατότητα που έχει η μπαταρία να δίνει ρεύμα έντασης I για χρονικό διάστημα Δt μέχρι να εκφορτιστεί, δηλαδή:

$$C = I \times \delta t \text{ [Ah]} \quad (3.1)$$

Για πρακτικές εφαρμογές σχεδιασμού, η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας (E_b) υπολογίζεται από το γινόμενο της ονομαστικής χωρητικότητας [Ah] με την ονομαστική τάση λειτουργίας της μπαταρίας [V], δηλαδή:

$$E_b = C \times V_{bat} \text{ [kWh]} \quad (3.2)$$

Γενικά με την κατάλληλη ηλεκτρική σύνδεση όμοιων μπαταριών μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη τάση λειτουργίας ενός συστήματος. Η τάση λειτουργίας ενός συστήματος V_{sys} αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο και γενικά η μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος απαιτεί και μεγαλύτερη τάση λειτουργίας.

Έστω ότι πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύστημα που να αποθηκεύει περίπου $E_b = 48 \text{ kWh}$ και για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν μπαταρίας τάσης $V_{bat} = 2 \text{ V}$ και χωρητικότητας $C = 1000 \text{ Ah}$. Κάθε μπαταρία μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια ίση με $E_b = V_{bat} \times C = 2 \text{ kWh}$. Άρα απαιτούνται $N_{sys} = \frac{E_{sys}}{E_b} = 24$ μπαταρίες.

Εάν δημιουργηθεί ένα σύστημα με τάση $V_{sys} = 24 \text{ V}$ θα δημιουργηθούν δύο σειρές συνδεδεμένες παράλληλα με 12 μπαταρίες εν σειρά. Σε σύστημα με τάση $E_{sys} = 48 \text{ V}$ θα συνδεθούν και οι 24 μπαταρίες εν σειρά. Στην πρώτη περίπτωση είναι ένα σύστημα τάσεως 24 V και χωρητικότητας 2000 Ah ενώ στη δεύτερη περίπτωση τάσεως 48 V και χωρητικότητας 1000 Ah. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αποφεύγεται η σύνδεση μη όμοιων μπαταριών.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.2.2: Αντιστροφέας

Ο αντιστροφέας (inverter) αποτελεί κεντρικό κομμάτι μιας φωτοβολταϊκής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς αναλαμβάνει τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο ή στην περίπτωση των αυτόνομων συστημάτων την διαμόρφωση των χαρακτηριστικών του ρεύματος για τη βέλτιστη κάλυψη των φορτίων. Οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν το ηλεκτρικό ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο, ανυψώνουν την εισερχόμενη τάση στην απαιτούμενη τάση και φροντίζουν για τη λειτουργία στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (στο γόνατο της καμπύλης). Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ενός αντιστροφέα είναι:

- ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης $\eta_{inv,ETA}$
- η μέγιστη ισχύς που δέχεται από τα φωτοβολταϊκά P_{DCmax}
- η μέγιστη τάση U_{DCmax}
- το εύρος τάσης MPPT ($V_{MPPTHI} - V_{MPPTLO}$)
- η μέγιστη ένταση ρεύματος (I_{maxDC})
- ο μέγιστος αριθμός παράλληλων γραμμών από φωτοβολταϊκά (S_{max}) που μπορεί να δέχεται ο αντιστροφέας.

Ανάλογα με τον τύπο του συστήματος (αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα) χρησιμοποιείται και ο κατάλληλος τύπος αντιστροφέα. Η βασική τους διαφορά είναι πως οι αντιστροφείς των αυτόνομων συστημάτων δημιουργούν το αυτόνομο δίκτυο, δηλαδή τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος ενώ οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων «κουμπώνουν» στην συχνότητα του δικτύου που συνδέονται. Επιπλέον οι αντιστροφείς των αυτόνομων συστημάτων έχουν ενσωματωμένους ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών ή και έξυπνα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.3.3: Ρυθμιστής φόρτισης

Η βασική λειτουργία του ρυθμιστή φόρτισης είναι να ρυθμίζει την ενέργεια που δέχεται η μπαταρία από τα φωτοβολταϊκά έτσι ώστε να μην υπερφορτιστεί. Οι ρυθμιστές φόρτισης διαφέρουν βάση μέγιστης της έντασης ρεύματος που μπορούν να διαχειριστούν. Ορισμένα ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν επιπλέον λειτουργίες όπως την σύνδεση των φωτοβολταϊκών με DC φορτία καθώς και την ρύθμιση της ενέργειας που δέχονται τα φορτία δεδομένης της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.

Όταν υπάρχει περίσσεια ενέργεια παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά, τότε ο ρυθμιστής επιτρέπει την φόρτιση της μπαταρίας εφόσον υπάρχει περιθώριο. Αντίστοιχα, όταν η ζήτηση ενέργειας ξεπερνάει την ενέργεια που μπορούν να παράξουν τα φωτοβολταϊκά (π.χ. τις νυχτερινές ώρες), τότε ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει να καλυφθεί η ζήτηση από τα αποθέματα της μπαταρίας.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.3.4: Βάσεις στήριξης

Οι βάσεις στήριξης αποτελούν κατασκευές που τοποθετούνται στην επιφάνεια του χώρου εγκατάστασης (οικόπεδο, δώμα, στέγη, στέγαστρο) και παρέχουν έδραση στα φωτοβολταϊκά. Ανάλογα τον τύπο και τη χρήση, μπορούν να είναι κατασκευασμένες από ανοδιωμένο αλουμίνιο ή χάλυβα ενώ μπορούν να έχουν σταθερή ή ρυθμιζόμενη κλίση. Είναι κατασκευασμένες με βάση στατικούς κανόνες και οδηγίες για να ανταποκρίνονται στις καταπονήσεις από το βάρος των Φ/Β, την πίεση από τον άνεμο, χιονοπτώσεις και σεισμικότητα. Το κόστος τους αποτελεί μια σημαντική οικονομοτεχνική παράμετρο. Το συνολικό κόστος των βάσεων σχετίζεται με τον αριθμό των Φ/Β πλαϊσίων ενός συστήματος.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.3.5: Καλωδιώσεις και ηλεκτρολογικός πίνακας

Οι καλωδιώσεις ενός Φ/Β συστήματος χωρίζονται στις καλωδιώσεις του συνεχούς ρεύματος και του εναλλασσόμενου ρεύματος. Γενικά χρησιμοποιούνται τυποποιημένα καλώδια για φωτοβολταϊκές εφαρμογές (solar cables) με βασικά χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής (περίπου 30 χρόνια) για μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία, βροχή, χιόνι, υπεριώδη ακτινοβολία, κτλ). Τα καλώδια του συνεχούς ρεύματος είναι μονοπολικά με διπλή μόνωση για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας βραχυκυκλώματος. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται κοινά συστήματα γείωσης για όλους τους σκοπούς, καθώς επίσης και αντικεραυνική προστασία.

Οι καλωδιώσεις από τις εξόδους των αντιστροφών καταλήγουν σε στεγανούς πίνακες που περιλαμβάνουν ασφάλειες για την κάθε φάση, γενικούς διακόπτες φορτίου, απαγωγούς κεραυνικών και κρουστικών ρευμάτων κτλ. Μετά τον πίνακα, όπου απαιτείται, υπάρχει μετρητής της παρεχόμενης ενέργειας στο δίκτυο.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.3: Κανόνες σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων

Για την αύξηση της απόδοσης όλων των φωτοβολταϊκών συστημάτων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω γενικοί κανόνες σχεδιασμού:

- Ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία των πλαισίων. Έτσι η επιλογή θέσης εγκατάστασης όπου πνέει άνεμος σε όλη τη διάρκεια του έτους μπορεί να οδηγήσει σε συνολικά καλύτερη απόδοση.
- Ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας του δηλαδή από την ισχύ που του παρέχεται να μετατρέψει. Εάν δεν έχει γίνει καλός σχεδιασμός είναι πιθανό ο αντιστροφέας να μη μπορεί να ανταποκριθεί ή να λειτουργεί σε σημείο λειτουργίας που ο βαθμός απόδοσης δεν είναι ο καλύτερος δυνατός για τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους.
- Η επιλογή της κατάλληλης διατομής των καλωδίων διασύνδεσης ανάμεσα στα Φ/Β και από τα Φ/Β στον αντιστροφέα αποτελεί σημαντικό παράγοντα γιατί καθορίζει τις ωμικές απώλειες.
- Η σωστή κλίση των πλαισίων είναι σημαντική για τη μεγιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την περίοδο λειτουργίας.

(Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκδόσεις Σοφία, 2015)

3.4: Σχεδίαση συστήματος αυτόνομης οικίας στο Excel

Εκφώνηση εφαρμογής 3.1: Σε μια οικία, κατά την διάρκεια ενός 24ώρου, κατεγράφησαν οι καταναλώσεις που παρουσιάζονται σε παρακάτω πίνακα. Να κατασκευαστεί σε γράφημα το προφίλ της καταναλισκόμενης ενέργειας και με βάση την μέση ηλιακή ακτινοβολία του πίνακα να υπολογιστεί η απαιτούμενη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών καθώς και το μέγεθος της μπαταρίας για την πλήρη κάλυψη της κατανάλωσης μιας ημέρας από τα φωτοβολταϊκά.

Δίνεται ο βαθμός απόδοσης του Φ/Β πλαισίου $\eta_{STC} = 14\%$, ο λόγος απόδοσης του Φ/Β πλαισίου $PR = 80\%$, η εγκαταστημένη ισχύς του Φ/Β πλαισίου $P_{panel} = 160\text{ W}$, η τάση του συστήματος μπαταρίας $V_{syst} = 24\text{ V}$, η τάση κελιού μπαταρίας $V_{cell} = 2\text{ V}$, η χωρητικότητα κελιού μπαταρίας $Cap_{cell} = 1000\text{ Ah}$, το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας $DoD = 50\%$ και η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου $A_{panel} = \frac{P_{panel}}{G_{STC} \times \eta_{STC}} = 1.143\text{ m}^2$

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 3”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «3.1Input»
- «3.1 Output»
- «3.1 Graph»

Στο φύλλο «3.1 Input» βρίσκονται τα δεδομένα και οι σταθερές της εφαρμογής όπως φαίνονται στις εικόνες 3.1 (κελιά C6 έως C14) και 3.2 (κελιά B18 έως E41). Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει αυτά τα δεδομένα πληκτρολογώντας τις επιθυμητές τιμές στα αντίστοιχα κελιά. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον πίνακα της εικόνας 3.1 είναι τα εξής:

n_{stc}: Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού

PR: Λόγος απόδοσης Φ/Β πλαισίου

P_{panel}: Εγκατεστημένη ισχύς πλαισίου [W]

V_{syst}: Τάση συστήματος μπαταρίας [V]

V_{cel}: Τάση κελιού μπαταρίας [V]

Cap_{cel}: Χωρητικότητα κελιού μπαταρίας [Ah]

DoD: Βάθος εκφόρτισης

A_{panel}: Επιφάνεια πλαισίου [m²]

n _{stc}	14%	
PR	80%	
P _{panel}	160	W
V _{syst}	24	V
V _{cel}	2	V
Cap _{cel}	1000	A*hr
DoD	50%	
G _{stc}	1000	W/m ²
A _{panel}	1,143	m ²

Εικόνα 3. 1: Πίνακας δεδομένων εισόδου εφαρμογής 3.1

Στο πίνακα της εικόνας 3.2 καταγράφονται οι καταναλώσεις της οικίας και η μέση ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου.

Αφού οριστούν τα επιθυμητά δεδομένα στο φύλλο «3.1 Input», η επίλυση της εφαρμογής γίνεται αυτόματα στο φύλλο «3.1 Output» ενώ το αντίστοιχο γράφημα βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Graph». Στην συνέχεια αναλύεται η πορεία της επίλυσης και ταυτόχρονα αντιστοιχίζεται με τα διάφορα πεδία του φύλλου «3.1 Output» στο Excel.

Περίοδος	Ώρα	Σύνολο ενεργειακών αναγκών (Wh)	Μέση ηλιακή ακτινοβολία (W *hr/m ²)
1	0-1	550	0
2	1-2	550	0
3	2-3	300	0
4	3-4	300	0
5	4-5	300	0
6	5-6	300	0
7	6-7	420	0
8	7-8	420	10,3
9	8-9	775	138,5
10	9-10	500	352,9
11	10-11	500	545,5
12	11-12	500	690,5
13	12-13	2500	782,4
14	13-14	500	801,8
15	14-15	500	766,3
16	15-16	960	660,5
17	16-17	1385	439,9
18	17-18	2760	248,9
19	18-19	1710	138,4
20	19-20	3400	12,4
21	20-21	2650	0
22	21-22	1900	0
23	22-23	1900	0
24	23-24	1360	0

Εικόνα 3. 2: Πίνακας ενεργειακών αναγκών και διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας εφαρμογής 3.1

Αρχικά υπολογίζεται ο απαιτούμενος αριθμός των πλασίων. Εφόσον η πρώτη απαίτηση του σχεδιασμού είναι η κάλυψη της ημερήσιας ζήτησης από τα φωτοβολταϊκά, τότε θα πρέπει να ισχύει:

$$E_{pv} = E_{total} [kWh] \quad (3.1)$$

όπου E_{pv} είναι η ημερήσια ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και E_{total} είναι η ημερήσια ζήτηση ενέργειας της οικίας. Η ενέργεια E_{total} ισούται με το άθροισμα της στήλης «Σύνολο Ενεργειακών Αναγκών (Wh)» που βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Input».

$$E_{total} = \sum_{i=0}^{23} Demand_i = 26.94 kWh \text{ (κελί C6)}$$

Η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία H_{total} ισούται με το άθροισμα της στήλης «Μέση ηλιακή ακτινοβολία» που βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Input» (Wh/m²).

$$H_{total} = \sum_{i=0}^{23} SolarRad_i = 5.588 \frac{kWh}{m^2} \text{ (κελί C8)}$$

Η ημερήσια ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά δίνεται από την εξής σχέση:

$$E_{pv} = n_{stc} \times PR \times H_{total} \times A_{array} [kWh] \quad (3.2)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (3.2) στην σχέση (3.1) και λύνοντας προς την απαιτούμενη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών A_{array} προκύπτει:

$$A_{array} = \frac{E_{total}}{n_{stc} \times PR \times H_{total}} = 43.043 m^2 \text{ (κελί C9)}$$

Η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς είναι:

$$P'_{arraySTC} = A_{array} \times G_{stc} \times \eta_{stc} = 6.026 kW \text{ (κελί C10)}$$

Για να εξασφαλιστεί αυτή η παραγωγή ισχύος απαιτούνται:

$$N_{array} = \frac{P'_{arraySTC}}{P_{panel}} = 37.6625 \text{ πλαίσια (κελί C11)}$$

Στρογγυλοποιώντας προς τα πάνω τον αριθμό των πλασίων έχουμε $N_{array} = 38$ τα οποία προσφέρουν εγκατεστημένη ισχύς ίση με $P'_{inst} = N_{array} \times P_{panel} = 6,08 kW$ (κελί C12)

Οι παραπάνω υπολογισμοί συνοψίζονται στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Output» (εικόνα 3.3).

Για την ευκολότερη κατανόηση των ποσοτήτων που πρέπει να υπολογιστούν με σκοπό να προσδιοριστεί το μέγεθος της μπαταρίας, κατασκευάζεται το διάγραμμα παραγωγής και ζήτησης ενέργειας για κάθε ώρα (εικόνα 3.5).

E_total	26,94	kWh
E_pv	26,94	kWh
H_total	5,5883	kWh/m ²
A_Array	43,043	m ²
P'_array_stc	6,026	kW
N_array	38	
P'_inst	6,08	kW

Εικόνα 3. 3: Πίνακας υπολογισμού αριθμού Φ/Β πλασίων

Η ωριαία παραγωγή ενέργειας των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$E_{prod} = N_{array} \times A_{panel} \times SolarRad_i \times PR \times \eta_{STC} \text{ [kWh]}$$

(κελιά D21 έως D44)

Η ζήτηση ενέργειας των δεδομένων μετατρέπεται από Wh σε kWh. (κελιά C21 έως C44)

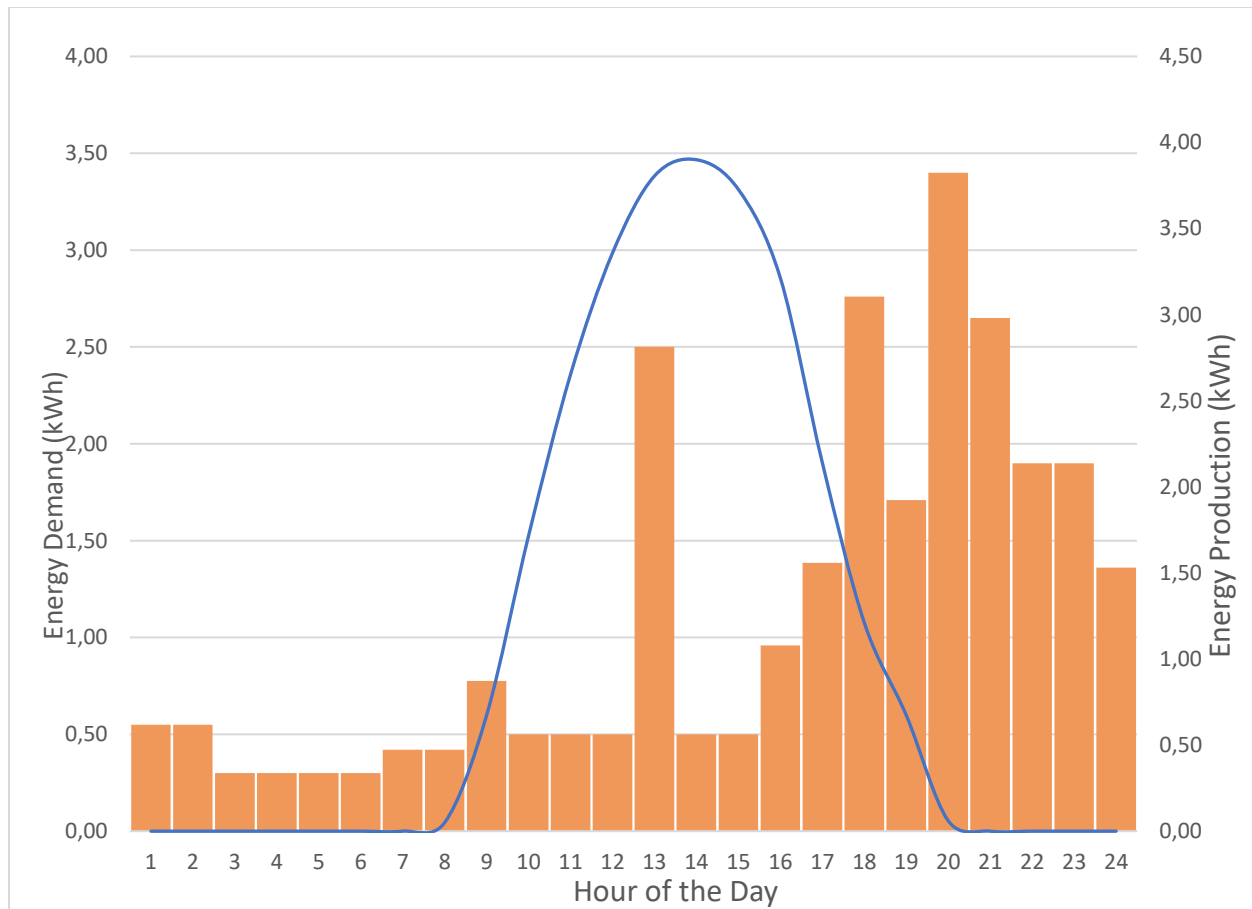
Έτσι προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας στο φύλλο «3.1 Output» βάση του οποίου κατασκευάζεται το γράφημα παραγωγής και ζήτησης ενέργειας για κάθε ώρα. (εικόνα 3.4) Το γράφημα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5.

Σύμφωνα με το γράφημα, μπορούν αν οριστούν τρεις επιφάνειες – ενεργειακά ποσά.

1. Η πρώτη επιφάνεια περιέχει απαιτούμενα ποσά ενέργειας τα οποία καλύπτονται άμεσα από ΑΠΕ (Επιφάνεια κάτω από την μπλε καμπύλη με πορτοκαλί χρώμα) (E_{div}) [kWh]
2. Η δεύτερη επιφάνεια περιέχει ποσά ενέργειας τα οποία πλεονάζουν και θα πρέπει να αποθηκευτούν στην μπαταριά (Επιφάνεια κάτω από την μπλε γραμμή με λευκό χρώμα) (E_{xs}) [kWh]
3. Η τρίτη επιφάνεια περιλαμβάνει ποσά ενέργειας (E_i) τα οποία δεν καλύπτονται άμεσα από ΑΠΕ και πρέπει να καλυφθούν από την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας (E_{FBT}) ή από κάποια άλλη βοηθητική πηγή (Επιφάνεια με πορτοκαλί χρώμα πάνω από την μπλε καμπύλη) (E_{aux}) [kWh]

Ώρα	Demand (kWh)	E_prod (kWh)
0-1	0,55	0,00
1 - 2	0,55	0,00
2 - 3	0,30	0,00
3 - 4	0,30	0,00
4 - 5	0,30	0,00
5 - 6	0,30	0,00
6 - 7	0,42	0,00
7 - 8	0,42	0,05
8 - 9	0,78	0,67
9 - 10	0,50	1,72
10 - 11	0,50	2,65
11 - 12	0,50	3,36
12 - 13	2,50	3,81
13 - 14	0,50	3,90
14 - 15	0,50	3,73
15 - 16	0,96	3,21
16 - 17	1,39	2,14
17 - 18	2,76	1,21
18 - 19	1,71	0,67
19 - 20	3,40	0,06
20 - 21	2,65	0,00
21 - 22	1,90	0,00
22 - 23	1,90	0,00
23 - 24	1,36	0,00

Εικόνα 3. 4: Πίνακας υπολογισμού ποσών ενεργειακής ζήτησης και παραγωγής



Εικόνα 3. 5: Διάγραμμα ωριαίας παραγωγής και ζήτησης ενέργειας

Τα απαιτούμενα ποσά ενέργειας άμεσης κάλυψης από ΑΠΕ ορίζονται από την ακόλουθη λογική:

$$E_{dlv} = \begin{cases} Demand_i & \text{if } Demand_i < E_{prod_i} \\ E_{prod_i} & \text{if } Demand_i > E_{prod_i} \end{cases} \quad [kWh] \text{ (κελιά E21 έως E44)}$$

Με άλλα λόγια, εφόσον η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση κάποιας δεδομένης στιγμής, τότε το ποσό ενέργειας άμεσης κάλυψης από ΑΠΕ ισούται με την ζήτηση. Αντίθετα, αν η παραγωγή ενέργειας είναι μικρότερη από την ζήτηση κάποιας δεδομένης στιγμής, τότε το ποσό ενέργειας άμεσης κάλυψης από ΑΠΕ ισούται με την παραγωγή. Η υπόλοιπη ζήτηση θα πρέπει να καλυφθεί από τα αποθέματα της μπαταρίας.

Τα πλεονάζοντα ποσά ενέργειας που πρέπει να αποθηκευτούν στην μπαταρία υπολογίζονται ως εξής:

$$E_{xs} = E_{prod_i} - E_{dlv_i} [kWh] \text{ (κελιά F21 έως F44)}$$

Η ενέργεια που παρέχεται από την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας υπολογίζονται ως εξής:

$$E_f = Demand_i - E_{dlv_i} [kWh] \text{ (κελιά G21 έως G44)}$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται αυτόματα στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Output» (εικόνα 3.6).

Η χωρητικότητα της μπαταρίας πρέπει να είναι τόση ώστε να χωράει την περίσσεια ενέργεια. Έτσι, αν αθροιστούν τα ποσά E_{xs} για όλο το 24ώρο προκύπτει πως η μπαταρία θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια ίση με:

$$E_{BTCapD} = \sum_{i=0}^{23} E_{xs_i} = 17.169 [kWh] \text{ (κελί C13)}$$

Η χωρητικότητα της μπαταρίας τελικά είναι μεγαλύτερη από αυτή που το σύστημα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύσει επειδή οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εφαρμογές (Οξέος – Μόλυβδου) δεν εκφορτίζονται πλήρως καθώς έτσι μειώνεται πάρα πολύ η διάρκεια ζωής τους. Συνήθως επιλέγεται ένα βάθος εκφόρτισης DoD = 50%. Πρακτικά, αυτό θα πει πως πρέπει αν αυξηθεί η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας κατά 50%.

$$E_{BTCap} = \frac{E_{BTCapD}}{Dod} = 34.337 [kWh] \text{ (κελί C14)}$$

E_dlv (kWh)	E_xs (kWh)	E_f (kWh)
0,00	0,00	0,55
0,00	0,00	0,55
0,00	0,00	0,30
0,00	0,00	0,30
0,00	0,00	0,30
0,00	0,00	0,30
0,00	0,00	0,30
0,00	0,00	0,42
0,05	0,00	0,37
0,67	0,00	0,10
0,50	1,22	0,00
0,50	2,15	0,00
0,50	2,86	0,00
2,50	1,31	0,00
0,50	3,40	0,00
0,50	3,23	0,00
0,96	2,25	0,00
1,39	0,75	0,00
1,21	0,00	1,55
0,67	0,00	1,04
0,06	0,00	3,34
0,00	0,00	2,65
0,00	0,00	1,90
0,00	0,00	1,90
0,00	0,00	1,36

Εικόνα 3. 6: Πίνακας υπολογισμού ποσών ενέργειας

Το σύστημα της μπαταρίας σε αυτή την περίπτωση είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί στα $V_{syst} = 24V$. Για να επιτευχθεί η τάση V_{syst} θα πρέπει στο σύστημα να είναι συνδεδεμένες 12 μπαταρίες των $V_{cel} = 2V$ εν σειρά. Η δωδεκάδα των μπαταριών εν σειρά αποτελεί και το ελάχιστο μέγεθος του συστήματος μπαταρίας που μπορεί να εγκατασταθεί ενώ οποιαδήποτε αύξηση αυτού θα είναι ακέραιος αριθμός αυτής της χωρητικότητας και προκύπτει με παράλληλη σύνδεση σειρών. Η ελάχιστη χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (3.2):

$$E_{BT.min} = V_{syst} \times Cap_{cel} = 24 kWh \text{ (κελί C15)} \quad (3.2)$$

Με προς τα πάνω στρογγυλοποίηση, ο αριθμός συστοιχιών μπαταριών που απαιτούνται είναι :

$$N_{BT} = \frac{E_{BTCap}}{E_{BT.min}} = 2 \text{ (κελί C16)}$$

Τελικά η χωρητικότητα των μπαταριών που θα εγκατασταθούν είναι

$$E_{BT.inst} = N_{BT} \times E_{BT.min} = 48 kWh \text{ (κελί C17)}$$

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται αυτόματα στον πίνακα που βρίσκεται στο φύλλο «3.1 Output» (εικόνα 3.7).

E_BTcapD	17,17	kWh
E_BTcap	34,337174	kWh
E_Bt.min	24	kWh
N_BT	2	
E_BT.inst	48	kWh

Εικόνα 3. 7: Πίνακας υπολογισμού παραμέτρων μπαταρίας

3.5: Ανάλυση συστήματος αυτόνομης οικίας για θερινή και χειμερινή ημέρα

Εκφώνηση εφαρμογής 3.2: Να εξεταστεί η συμπεριφορά ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για μια καλοκαιρινή ημέρα και για μια χειμερινή. Ο λόγος απόδοσης για το καλοκαίρι είναι $PR_{sum} = 0.78$ ενώ για το χειμώνα είναι $PR_{win} = 0.82$. Να γίνει η υπόθεση πως η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι $SOC_0 = 55\%$ στην αρχή της ημέρας και στις δύο περιπτώσεις. Δίνεται η ηλιακή ακτινοβολία και οι καταναλώσεις. Για λόγους απλότητας, θεωρούμε πως δεν υπάρχουν ενεργειακές απώλειες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας.

Δίνεται ο βαθμός απόδοσης του Φ/Β πλαισίου $\eta_{STC} = 14\%$, η χωρητικότητα της μπαταρίας $E_{Btinst} = 48 \text{ kWh}$, το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας $DoD = 50\%$, η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου $A_{panel} = 1.143 \text{ m}^2$ και ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων $N_{array} = 38$.

Για την επίλυση της εφαρμογής στο Excel, χρησιμοποιείται το αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 3”. Τα υπολογιστικά φύλλα του αρχείου που αφορούν την παρούσα εφαρμογή είναι τα εξής:

- «3.2 Input»
- «3.2 Output»
- «Summer Analysis»
- «Winter Analysis»

Στο φύλλο «3.2 Input» βρίσκονται τα δεδομένα της εφαρμογής όπως φαίνονται στις εικόνες 3.8 (κελιά C6 έως C13) και 3.9 (B17 έως G40). Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει αυτά τα δεδομένα πληκτρολογώντας τις επιθυμητές τιμές στα αντίστοιχα κελιά. Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον πίνακα της εικόνας 3.8 είναι τα εξής:

R_Sum: Καλοκαιρινός λόγος απόδοσης

PR_Win: Χειμερινός λόγος απόδοσης

SOC_0: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας την στιγμή 0

n_stc: Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού

E_Btinst: Χωρητικότητα μπαταρίας [kWh]

DoD: Βάθος εκφόρτισης μπαταρίας

A_panel: Επιφάνεια πλαισίου [m^2]

N_array: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

PR_Sum	0,78	
PR_Win	0,82	
SOC_0	55%	
n_stc	14%	
E_Btinst	48	kWh
DoD	50%	
A_panel	1,143	m^2
N_array	38	

Εικόνα 3. 8: Πίνακας δεδομένων εφαρμογής 3.2

Για τις δύο περιπτώσεις δίνεται η ενεργειακή κατανάλωση της οικίας καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου όπως φαίνεται στον πίνακα της εικόνας 3.9.

Αφού οριστούν τα επιθυμητά δεδομένα στο φύλλο «3.2 Input», η επίλυση της εφαρμογής γίνεται αυτόματα στο φύλλο «3.2 Output» ενώ τα αντίστοιχα γράφημα βρίσκονται στα φύλλα «Summer Analysis» και «Winter Analysis». Στην συνέχεια αναλύεται η πορεία της επίλυσης και ταυτόχρονα αντιστοιχίζεται με τα διάφορα πεδία του φύλλου «3.2 Output» στο Excel.

Περίοδος	Ώρα	Κατανάλωση Καλοκαιρινής Ημέρας (Wh)	Κατανάλωση Χειμερινής Ημέρας (Wh)	Ηλιακή Ακτινοβολία Καλοκαιρινής Ημέρας (Wh/m ²)	Ηλιακή Ακτινοβολία Χειμερινής Ημέρας (Wh/m ²)
1	0 - 1	600	500	0	0
2	1 - 2	600	500	0	0
3	2 - 3	600	250	0	0
4	3 - 4	350	250	0	0
5	4 - 5	350	250	0	0
6	5 - 6	350	250	1,5	0
7	6 - 7	350	370	93,5	0
8	7 - 8	470	370	299	17,9
9	8 - 9	575	725	515,5	155,9
10	9 - 10	550	450	700,1	319,6
11	10 - 11	550	450	843,8	453
12	11 - 12	1675	450	932	536,1
13	12 - 13	3675	2450	936,4	566,7
14	13 - 14	2800	450	889,4	523,7
15	14 - 15	2800	450	781,6	462,9
16	15 - 16	3010	910	616,3	306,8
17	16 - 17	3685	1335	419,6	129,9
18	17 - 18	5060	2710	214,4	13,5
19	18 - 19	4010	2600	39,5	0
20	19 - 20	4760	3350	0	0
21	20 - 21	3285	2600	0	0
22	21 - 22	1950	1850	0	0
23	22 - 23	1950	1850	0	0
24	23 - 24	2535	1310	0	0

Εικόνα 3. 9: Πίνακας ενεργειακής κατανάλωσης και διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για την καλοκαιρινή και την χειμερινή ημέρα

Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χρησιμοποιείται η παραγωγή των φωτοβολταϊκών άμεσα, ενώ η περίσσεια της παραγωγής αποθηκεύεται στην μπαταριά εφόσον αυτή δεν είναι πλήρως φορτισμένη. Όταν η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν είναι αρκετή ώστε να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της οικίας, τότε χρησιμοποιείται η ενέργεια από την μπαταριά εφόσον υπάρχουν αποθέματα. Διαφορετικά χρησιμοποιείται κάποια βοηθητική πηγή ενέργειας όπως ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη (H/Z).

Για να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος το χειμώνα και το καλοκαίρι αλλά και η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται από βοηθητικές πηγές, θα γίνει ωριαία προσομοίωση. Η ζήτηση σε μορφή συνάρτησης ως προς την ώρα της ημέρας t και την εποχή TD είναι:

$$E_{dem}(t, TD) = (Demand^{[TD]})_t [Wh]$$

Ομοίως, η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά υπολογίζεται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$E_{prod}(t, TD) = N_{array} \times A_{panel} \times (SolarRad^{[TD]})_t \times PR_{TD} \times \eta_{STC} [kWh]$$

Η παραγωγή ενέργειας την καλοκαιρινή ημέρα υπολογίζεται στα κελιά D13 έως D36 του φύλλου «3.2 Output» ενώ για την χειμερινή ημέρα στα κελιά E13 έως E36 του ίδιου φύλλου.

Στην συνέχεια, και για τις δύο περιπτώσεις υπολογίζονται οι εξής ποσότητες ενέργειας:

- Η ενέργεια που αποδίδεται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά την κάθε ώρα της ημέρας:

$$E_{dlv}(t,TD) = \begin{cases} E_{dem}(t,TD) & \text{if } E_{dem}(t,TD) < E_{prod}(t,TD) \\ E_{prod}(t,TD) & \text{if } E_{dem}(t,TD) > E_{prod}(t,TD) \end{cases} \quad [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά F13 έως F36 για το καλοκαίρι και G13 έως G36 για τον χειμώνα)

- Η ενέργεια που δεν αποδίδεται άμεσα ή περισσεύει την κάθε ώρα της ημέρας:

$$E_{XS}(t,TD) = E_{prod}(t,TD) - E_{dlv}(t,TD) \quad [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά H13 έως H36 για το καλοκαίρι και I13 έως I36 για τον χειμώνα)

- Η ενέργεια που πρέπει να δοθεί από την μπαταρία ή από κάποια άλλη πηγή την κάθε ώρα της ημέρας:

$$E_f(t,TD) = E_{dem}(t,TD) - E_{dlv}(t,TD) \quad [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά J13 έως J36 για το καλοκαίρι και K13 έως K36 για τον χειμώνα)

Οι προηγούμενοι υπολογισμοί συνοψίζονται στον πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10.

Οι παραπάνω σχέσεις είναι γενικές και εφαρμόζονται ανεξάρτητα από την κατάσταση της μπαταρίας. Το βασικό πρόβλημα είναι ο υπολογισμός των παρακάτω ποσών ενέργειας κάθε περίοδο:

- **E_{TBT}**: Ενέργεια προς την μπαταρία [kWh]
- **E_{FBT}**: Ενέργεια από την μπαταρία [kWh]
- **SOC**: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (state of charge)
- **E_{BTav}**: Διαθέσιμη ενέργεια μπαταρίας [kWh]
- **E_{und}**: Ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί και καταστρέφεται [kWh]
- **E_{aux}**: Ενέργεια από βοηθητική πηγή [kWh]

Περίοδος	Ωρα	E_prod.summer (kWh)	E_prod.winter (kWh)	E_dlv.summer (kWh)	E_dlv.winter (kWh)	E_xs.summer (kWh)	E_xs.winter (kWh)	E_f.summer (kWh)	E_f.winter (kWh)
1	0-1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,50
2	1-2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,50
3	2-3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,25
4	3-4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,25
5	4-5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	0,25
6	5-6	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,34	0,25
7	6-7	0,44	0,00	0,35	0,00	0,09	0,00	0,00	0,37
8	7-8	1,42	0,09	0,47	0,09	0,95	0,00	0,00	0,28
9	8-9	2,45	0,78	0,58	0,73	1,87	0,05	0,00	0,00
10	9-10	3,32	1,59	0,55	0,45	2,77	1,14	0,00	0,00
11	10-11	4,00	2,26	0,55	0,45	3,45	1,81	0,00	0,00
12	11-12	4,42	2,67	1,68	0,45	2,75	2,22	0,00	0,00
13	12-13	4,44	2,83	3,68	2,45	0,77	0,38	0,00	0,00
14	13-14	4,22	2,61	2,80	0,45	1,42	2,16	0,00	0,00
15	14-15	3,71	2,31	2,80	0,45	0,91	1,86	0,00	0,00
16	15-16	2,92	1,53	2,92	0,91	0,00	0,62	0,09	0,00
17	16-17	1,99	0,65	1,99	0,65	0,00	0,00	1,69	0,69
18	17-18	1,02	0,07	1,02	0,07	0,00	0,00	4,04	2,64
19	18-19	0,19	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	3,82	2,60
20	19-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,76	3,35
21	20-21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,29	2,60
22	21-22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,95	1,85
23	22-23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,95	1,85
24	23-24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,54	1,31

Εικόνα 3. 10: Πίνακας υπολογισμού ποσών ενέργειας για καλοκαιρινή και χειμερινή ημέρα

Η σχέση που δίνει την διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας E_{BTav} σαν συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης SOC είναι η εξής:

$$E_{BTav}(SOC) = (SOC - DoD) \times E_{BTinst} \quad [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά E40 έως E63 για το καλοκαίρι και E67 έως E90 για τον χειμώνα)

$$\text{Επειδή } SOC_{max} = 100\% \text{ τότε } E_{BTmax} = E_{BTav}(SOC_{max}) = (100\% - 50\%) \times 48 kWh = 24 kWh$$

$$\text{Ομοίως για } SOC_{min} = 50\% \text{ τότε } E_{BTmin} = E_{BTav}(SOC_{min}) = (50\% - 50\%) \times 48 kWh = 0 kWh$$

Ενέργεια προς την μπαταρία (E_{BT}) ρέει όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και η μπαταρία μπορεί να την δεχτεί όλη η μερικώς. Για να τη δεχτεί όλη, το περιθώριο φόρτισης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την περίσσεια ενώ για να τη δεχτεί εν μέρει, η περίσσεια είναι μεγαλύτερη από το περιθώριο φόρτισης και η ποσότητα που θα μεταφερθεί θα είναι ίση με το περιθώριο φόρτισης. Η παραπάνω λογική διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$E_{TBT}(t, TD, SOC) = \begin{cases} E_{xs}(t, TD) & \text{if } E_{xs}(t, TD) < E_{BTmax} - E_{BTav}(SOC) \\ E_{BTmax} - E_{BTav}(SOC) & \text{if } E_{xs}(t, TD) \geq E_{BTmax} - E_{BTav}(SOC) \end{cases} \quad [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά F40 έως F63 για το καλοκαίρι και F67 έως F90 για τον χειμώνα)

Ενέργεια από την μπαταρία (E_{FBT}) ρέει όταν η άμεση ενέργεια δεν επαρκεί για να καλύψει την ζήτηση. Η μπαταρία θα καλύψει την ζήτηση (όλη η μερικά) ανάλογα με τη διαθέσιμη ενέργεια της. Για να καλυφθεί όλη η ζήτηση από την μπαταρία θα πρέπει να είναι φορτισμένη με περισσότερη ενέργεια από την ζήτηση ενώ εάν η διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας είναι λιγότερη, τότε θα αποδοθεί ολόκληρη και η μπαταρία θα αδειάσει. Η παραπάνω λογική διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$E_{FBT}(t, TD, SOC) = \begin{cases} E_f(t, TD) & \text{if } E_f(t, TD) < E_{BTav}(SOC) \\ E_{BTav}(SOC) & \text{if } E_f(t, TD) \geq E_{BTav}(SOC) \end{cases} [kWh]$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά G40 έως G63 για το καλοκαίρι και G67 έως G90 για τον χειμώνα)

Για να βρεθεί η ενέργεια της μπαταρίας που θα είναι διαθέσιμη στο τέλος της κάθε (και στην αρχή της επόμενης) περιόδου, γίνεται ισοζύγιο ενέργειας. Έτσι, η συνολική ποσότητα ενέργειας θα είναι η ενέργεια που είχε στην αρχή της προσθέτοντας η αφαιρώντας τις ροές ενέργειας:

$$E_{BTav}(t) = E_{BTav}(t-1) + E_{TBT}(t, TD, SOC) - E_{FBT}(t, TD, SOC) [kWh]$$

Η παραπάνω σχέση δεν έχει φυσική σημασία αφού δεν είναι δυνατόν να ρέει ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια προς και από την μπαταρία.

Για να βρεθεί η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή εφαρμόζεται ο εξής αλγόριθμος:

$$\begin{array}{l} \text{SOC}(TD) = \begin{array}{|l} \text{soc} \leftarrow \text{SOC}_0 \\ \text{for } i \in 1 \dots 24 \\ \quad \text{TBT}_i \leftarrow E_{TBT}(i, TD, \text{soc}) \\ \quad \text{FBT}_i \leftarrow E_{FBT}(i, TD, \text{soc}) \\ \quad \text{BT}_{av} \leftarrow E_{BTav}(\text{soc}) + \text{TBT}_i - \text{FBT}_i \\ \quad \text{soc} \leftarrow \frac{\text{BT}_{av}}{E_{BTinst}} + \text{DoD} \\ \quad \text{SOC}_i = \text{soc} \end{array} \\ \text{SOC} \end{array}$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά D40 έως D63 για το καλοκαίρι και D67 έως D90 για τον χειμώνα)

Σε λόγια, την αρχική χρονική στιγμή υποθέτουμε ότι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι $SOC_0 = 55\%$, σύμφωνα με τα δεδομένα της εφαρμογής. Βάση αυτού, για την αρχική περίοδο υπολογίζεται η ενέργεια προς την μπαταρία $E_{TBT}(t, TD, SOC)$ και η ενέργεια από την μπαταρία $E_{FBT}(t, TD, SOC)$ όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Τότε, εφαρμόζεται το ισοζύγιο ενέργειας ώστε να βρεθεί η ενέργεια της μπαταρίας $E_{BTav}(t)$ που είναι διαθέσιμη στο τέλος της αρχικής περιόδου. Βάση αυτού υπολογίζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας SOC με την οποία ξεκινάει η επόμενη περίοδος και η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή.

Η ενέργεια που δεν μπορεί να αποθηκευτεί (E_{und}) υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{und}(t, TD, SOC) = E_{xs}(t, TD) - E_{TBD}(t, TD, SOC) \text{ [kWh]}$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά H40 έως H63 για το καλοκαίρι και H67 έως H90 για τον χειμώνα)

ενώ ενέργεια που πρέπει να δοθεί από την βοηθητική πηγή (E_{aux}) υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{aux}(t, TD, SOC) = E_f(t, TD) - E_{FBT}(t, TD, SOC) \text{ [kWh]}$$

(Υπολογίζεται στο φύλλο «3.2 Output» στα κελιά I40 έως I63 για το καλοκαίρι και I67 έως I90 για τον χειμώνα)

Οι προηγούμενοι υπολογισμοί συνοψίζονται στους πίνακες που παρουσιάζονται στις εικόνες 3.11 (καλοκαίρι) και 3.12 (χειμώνας).

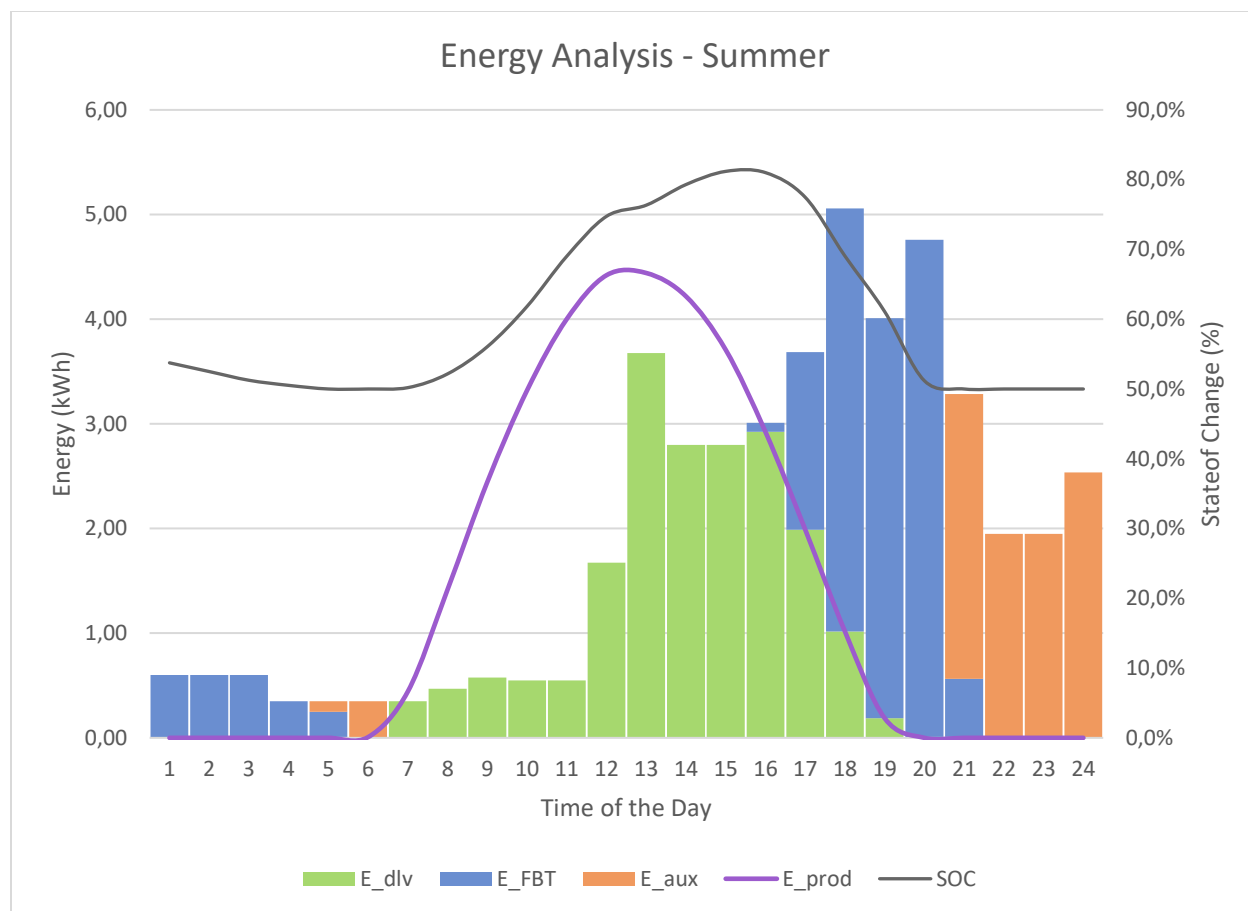
Περίοδος	Ώρα	SOC.summer	E_BT_av.summer (kWh)	E_TBT.summer (kWh)	E_FBT.summer (kWh)	E_und.summer (kWh)	E_aux.summer (kWh)
1	0-1	53,8%	1,80	0,00	0,60	0,00	0,0
2	1 - 2	52,5%	1,20	0,00	0,60	0,00	0,0
3	2 - 3	51,3%	0,60	0,00	0,60	0,00	0,0
4	3 - 4	50,5%	0,25	0,00	0,35	0,00	0,0
5	4 - 5	50,0%	0,00	0,00	0,25	0,00	0,1
6	5 - 6	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,3
7	6 - 7	50,2%	0,09	0,09	0,00	0,00	0,0
8	7 - 8	52,2%	1,04	0,95	0,00	0,00	0,0
9	8 - 9	56,1%	2,91	1,87	0,00	0,00	0,0
10	9 - 10	61,8%	5,68	2,77	0,00	0,00	0,0
11	10 - 11	69,0%	9,13	3,45	0,00	0,00	0,0
12	11 - 12	74,7%	11,88	2,75	0,00	0,00	0,0
13	12 - 13	76,3%	12,65	0,77	0,00	0,00	0,0
14	13 - 14	79,3%	14,06	1,42	0,00	0,00	0,0
15	14 - 15	81,2%	14,97	0,91	0,00	0,00	0,0
16	15 - 16	81,0%	14,88	0,00	0,09	0,00	0,0
17	16 - 17	77,5%	13,19	0,00	1,69	0,00	0,0
18	17 - 18	69,1%	9,15	0,00	4,04	0,00	0,0
19	18 - 19	61,1%	5,32	0,00	3,82	0,00	0,0
20	19 - 20	51,2%	0,56	0,00	4,76	0,00	0,0
21	20 - 21	50,0%	0,00	0,00	0,56	0,00	2,7
22	21 - 22	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	2,0
23	22 - 23	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	2,0
24	23 - 24	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	2,5

Εικόνα 3. 11: Πίνακας υπολογισμού ενεργειακών ποσών σχετικά με την μπαταρία και επιπέδου φόρτισης της για την καλοκαιρινή ημέρα

Περίοδος	Ώρα	SOC.winter	E_BT_av.winter (kWh)	E_TBT.winter (kWh)	E_FBT.winter (kWh)	E_und.winter (kWh)	E_aux.winter (kWh)
1	0-1	54,0%	1,90	0,00	0,50	0,00	0,00
2	1 - 2	52,9%	1,40	0,00	0,50	0,00	0,00
3	2 - 3	52,4%	1,15	0,00	0,25	0,00	0,00
4	3 - 4	51,9%	0,90	0,00	0,25	0,00	0,00
5	4 - 5	51,4%	0,65	0,00	0,25	0,00	0,00
6	5 - 6	50,8%	0,40	0,00	0,25	0,00	0,00
7	6 - 7	50,1%	0,03	0,00	0,37	0,00	0,00
8	7 - 8	50,0%	0,00	0,00	0,03	0,00	0,25
9	8 - 9	50,1%	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00
10	9 - 10	52,5%	1,20	1,14	0,00	0,00	0,00
11	10 - 11	56,3%	3,00	1,81	0,00	0,00	0,00
12	11 - 12	60,9%	5,23	2,22	0,00	0,00	0,00
13	12 - 13	61,7%	5,60	0,38	0,00	0,00	0,00
14	13 - 14	66,2%	7,76	2,16	0,00	0,00	0,00
15	14 - 15	70,0%	9,62	1,86	0,00	0,00	0,00
16	15 - 16	71,3%	10,24	0,62	0,00	0,00	0,00
17	16 - 17	69,9%	9,56	0,00	0,69	0,00	0,00
18	17 - 18	64,4%	6,91	0,00	2,64	0,00	0,00
19	18 - 19	59,0%	4,31	0,00	2,60	0,00	0,00
20	19 - 20	52,0%	0,96	0,00	3,35	0,00	0,00
21	20 - 21	50,0%	0,00	0,00	0,96	0,00	1,64
22	21 - 22	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85
23	22 - 23	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85
24	23 - 24	50,0%	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31

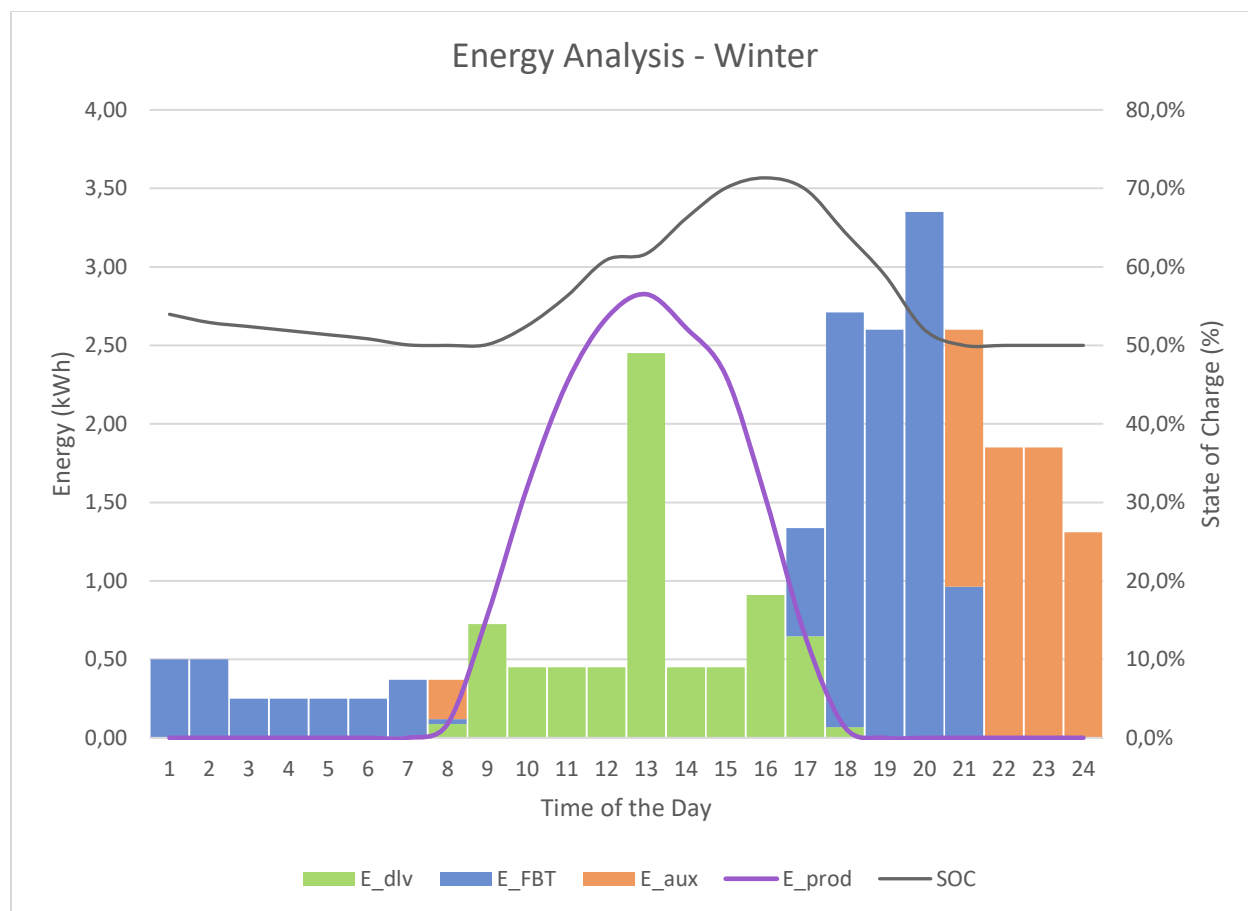
Εικόνα 3. 12: Πίνακας υπολογισμού ενεργειακών ποσών σχετικά με την μπαταρία και επιπέδου φόρτισης της για την χειμερινή ημέρα

Στα φύλλα «Summer Analysis» και «Winter Analysis» γίνεται η γραφική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος για την καλοκαιρινή και την χειμερινή ημέρα αντίστοιχα, βάση των προηγούμενων υπολογισμών (εικόνες 3.13 και 3.14).



Εικόνα 3. 13: Γραφική αναπράσταση συμπεριφοράς του συστήματος την καλοκαιρινή ημέρα

- **E_{dlv}** : Ενέργεια που αποδίδεται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά [kWh]
- **E_{FBT}** : Ενέργεια από την μπαταρία [kWh]
- **E_{aux}** : Ενέργεια από βοηθητική πηγή [kWh]
- **E_{prod}** : Ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά [kWh]
- **SOC**: Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας



Εικόνα 3. 14: Γραφική αναπαράσταση συμπεριφοράς του συστήματος την χειμερινή ημέρα

- **E_{dlv} :** Ενέργεια που αποδίδεται άμεσα από τα φωτοβολταϊκά [kWh]
- **E_{FBT} :** Ενέργεια από την μπαταρία [kWh]
- **E_{aux} :** Ενέργεια από βοηθητική πηγή [kWh]
- **E_{prod} :** Ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά [kWh]
- **SOC:** Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας

3.6: Οικονομική ανάλυση αυτόνομου συστήματος

Εκφώνηση: Να βρεθεί το συνολικό κόστος στη διάρκεια ζωής του συστήματος των εφαρμογών 3.4 και 3.5 και να γίνει σύγκριση με σύστημα που καλύπτει τις ίδιες ανάγκες μόνο με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Diesel. Η ετήσια ζήτηση ενέργειας είναι $E_{tot} = 11585 \text{ kWh/m}^2$ και το ποσοστό κάλυψης από τα φωτοβολταϊκά είναι $f_{pv} = 85\%$ ενώ το υπόλοιπο καλύπτεται από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος Diesel με βαθμό απόδοσης $\eta_{DSL} = 35\%$. Τον ίδιο βαθμό απόδοσης έχει και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος της σύγκρισης. Να μην ληφθεί υπόψη η χρονική αξία χρήματος και η μεταβολή του κόστους καυσίμου.

Δίνεται το κόστος του Φ/Β πλαισίου επιφάνειας 1.143 m^2 ίσο με $IC_{panel} = 360$ ευρώ, το κόστος της βάσης του Φ/Β πλαισίου $IC_{st} = 860$ ευρώ, το κόστος του αντιστροφέα $IC_{inv} = 2750$ ευρώ, το κόστος του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας $IC_{CR} = 210$ ευρώ, το κόστος κελιού της μπαταρίας $IC_{BTcell} = 430$ ευρώ, το κόστος του καυσίμου $C_{DSL} = 1.2$ ευρώ/L, η διάρκεια ζωής του συστήματος $Life = 25$ χρόνια, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας $L_{BT} = 8$ χρόνια, ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων $N_{PVcell} = 38$, ο αριθμός κελιών μπαταρίας $N_{BTcell} = 24$, η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου $Hu = 43.7 \text{ MJ/kg}$ και η πυκνότητα του καυσίμου $\rho_{DSL} = 0.832 \text{ kg/L}$.

Για την επίλυση της εφαρμογής 3.6 στο Excel, χρησιμοποιείται το υπολογιστικό φύλλο «3.3» που βρίσκεται στο αρχείο με όνομα “Κεφάλαιο 3”.

Στο φύλλο «3.3» βρίσκονται τα δεδομένα και οι σταθερές της εφαρμογής 3.15 όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 3.9. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει αυτά τα δεδομένα πληκτρολογώντας τις επιθυμητές τιμές στα αντίστοιχα κελιά.

E_tot: Ετήσια ζήτηση ενέργειας

f_pv: Ποσοστό κάλυψης από τα φωτοβολταϊκά

n_DSL: Βαθμός απόδοσης ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους Diesel

IC_panel: Κόστος του Φ/Β πλαισίου

IC_st: Κόστος της βάσης του Φ/Β πλαισίου

IC_inv: Κόστος του αντιστροφέα

IC_CR: Κόστος του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας

IC_BT.cell: Κόστος κελιού της μπαταρίας

C_DSL: Κόστος του καυσίμου

Life: Διάρκεια ζωής του συστήματος

L_BT: Διάρκεια ζωής της μπαταρίας

N_PV.cell: Αριθμός των Φ/Β πλαισίων

N_BT.cell: Αριθμός κελιών μπαταρίας

Hu: Θερμογόνος δύναμη του καυσίμου

ρ_DSL: Πυκνότητα του καυσίμου

E_tot	11585	kWh/year
f_pv	85%	
n_DSL	35%	
IC_panel	360	euro
IC_st	80	euro
IC_inv	2750	euro
IC_CR	210	euro
IC_BT.cell	430	euro
C_DSL	1,2	euro/L
Life	25	year
L_BT	8	year
N_PV.cell	38	
N_BT.cell	24	
Hu	43,7	MJ/kg
ρ_DSL	0,832	kg/L

Εικόνα 3. 15: Δεδομένα εισόδου εφαρμογής 3.3

Έχοντας ορίσει τα παραπάνω ξεκινάει η επίλυση της εφαρμογής.

Το κόστος εγκατάστασης του αυτόνομου συστήματος προκύπτει από την σχέση:

$$IC_{inst} = (IC_{panel} + IC_{ist}) \times N_{PVcel} + IC_{BTcel} \times N_{BTcel} + IC_{CR} + IC_{inv}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C25.

Η συμβατική ενέργεια που απαιτείται σε ένα έτος είναι:

$$E_{aux} = (1 - f_{pv}) \times E_{tot}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C26.

Η ετήσια κατανάλωση καυσίμου είναι:

$$V_{DSL} = \frac{E_{aux}}{Hu \times \eta_{DSL} \times \rho_{DSL}}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C27.

Το ετήσιο κόστος καυσίμου είναι:

$$OC_f = C_{DSL} \times V_{DSL}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C28.

Το κόστος συντήρησης αφορά το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών και πραγματοποιείται 2 φορές κατά τα έτη 8 και 16:

$$MC = 2 \times IC_{BTcel} \times N_{BTcel}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C29.

Στα 25 έτη το συνολικό κόστος είναι:

$$TC_{sys1} = OC_f \times Life + IC_{inst} + MC$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C30.

Εάν δεν γινόταν χρήση των φωτοβολταϊκών, η κατανάλωση του καυσίμου θα ήταν:

$$V_{DSL} = \frac{E_{tot}}{Hu \times \eta_{DSL} \times \rho_{DSL}}$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C31.

Σε αυτή την περίπτωση, το συνολικό κόστος θα ήταν:

$$TC_{sys2} = C_{DSL} \times V_{DSL2} \times Life$$

Ο υπολογισμός γίνεται στο φύλλο «3.3» και στο κελί C32.

Οι παραπάνω υπολογισμοί συνοψίζονται στον πίνακα που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.16.

IC_inst	30000	euro
E_aux	1737,75	kWh/year
V_DSL	491,60	L/year
OC_f	589,92	euro
MC	20640	euro
TC_sys	65388,06	euro
V_DSL.2	3277,35	L/year
TC_sys.2	98320,37	euro

Εικόνα 3. 16: Δεδομένα εξόδου εφαρμογής 3.3

Από την παραπάνω εφαρμογή προκύπτει ότι παρά το υψηλό αρχικό κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (46% του συνολικού κόστους) και το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών (31% του συνολικού κόστους), τα χρήματα που εξοικονομούνται σε βάθος χρόνου 25 ετών χάρη στην παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και στην αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων καθιστούν το φωτοβολταϊκό σύστημα ως την πιο συμφέρουσα επιλογή. Συγκεκριμένα, η αποκλειστική χρήση ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους για την κάλυψη των αναγκών της οικίας έχει 50% επιπλέον κόστος σε σχέση με την χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

3.7: Συμπληρωματική βιβλιογραφία

Boyle G., "Renewable Energy Power for a Sustainable Future", Third Edition, Oxford University Press, 2012.

Green, M., "Solar Cells", New York, Prentice-Hall, 1982. Malvino A. P., "Ηλεκτρονική Τζιόλα, 2001.

Markvart T., "Solar Electricity", Wiley & Sons, 2010.

Quasching V., "Understanding Renewable Energy Systems", 2005.

Sabonnadiere J-C," Renewable Energy Technologies, ISTE, Wiley & Sons, 2009.

Wenham, S., Green, M., Watt, M., Corkish, R., "Applied Photovoltaics", Second Edition, London, Earthscan, 2007.

Ζερβός Α., "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", 2008.

Συμπεράσματα

Από την ανάλυση και την επίλυση των προβλημάτων που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπορούν να εξαχθούν, μεταξύ άλλων, τα εξής συμπεράσματα.

Αρχικά η εφαρμογή του πρώτου κεφαλαίου απέδειξε πως η βέλτιστη κλίση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή η κλίση που θα επιτρέψει τη μέγιστη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας, διαφέρει από μήνα σε μήνα. Αυτό εξηγείται από τη μετατόπιση της τροχιάς του ηλίου στον ουράνιο θόλο κατά τη διάρκεια του έτους και το γεγονός ότι η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται στο μέγιστο όταν αυτή προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του συλλέκτη.

Η εφαρμογές του δεύτερου κεφαλαίου επιβεβαίωσαν πως τόσο για το φωτοβολταϊκό κελί όσο και για το πλαίσιο, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας τους, δηλαδή το σημείο αυτό στο οποίο παράγεται η μέγιστη ισχύς, βρίσκεται στο «γόνατο» της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης ρεύματος – τάσης ($I - V$). Επιπλέον, απεικονίστηκε η αναλογία της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με την τιμή του φωτορεύματος που μπορεί θεωρητικά να προκαλέσει και κατ' επέκταση την ισχύ που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τέλος υπογραμμίστηκε η σημασία της θερμοκρασίας της επιφάνειας του πλαισίου στην απόδοση του, με χαμηλότερες θερμοκρασίες να επιτρέπουν την παραγωγή περισσότερης ισχύος.

Οι εφαρμογές του τρίτου κεφαλαίου φανέρωσαν τις βασικότερες σχεδιαστικές παραμέτρους ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και τόνισαν την ανάγκη της λεπτομερούς μελέτης για την κατασκευή του. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις σχεδιαστικές παραμέτρους της μπαταρίας, καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στην ομαλή και συνεχή λειτουργία του συστήματος. Ταυτόχρονα, αποτελεί ένα από τα ακριβότερα στοιχεία του συστήματος με περιορισμένη διάρκεια ζωής. Συνεπώς, η σωστή διαστασιολόγηση και χρήση της μπαταρίας είναι απαραίτητα για την επίτευξη της μέγιστης διάρκειας ζωής της. Παρά το υψηλό κόστος εγκατάστασης που επιβάλλει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα για μια αυτόνομη οικία, φάνηκε πως σε βάθος χρόνου είναι πιο συμφέρον οικονομικά από την αποκλειστική χρήση ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα εύχρηστο και διαδραστικό εργαλείο εκπαίδευσης που απευθύνεται σε όσους ενδιαφέρονται για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Βασίστηκε στο βιβλίο «Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ., Δημάκης Α., Καρταλίδης Α, Τσιλιγκρίδης Γ., «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», εκδόσεις σοφία, 2015»