



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ  
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΣΕ  
ΚΤΙΡΙΑ ΓΡΑΦΕΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**Χαρίλαου Μαγκώνη**

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ, 2019

“Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.”



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

# **ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΓΡΑΦΕΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΟΥ**

**Χαρίλαου Μαγκώνη**

*ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:*

Διονυσία Κολοκοτσά (Επιβλέπουσα)

Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης

Θεοχάρης Τσούτσος

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια μετατροπής των κτιρίων από καταναλωτές ενέργειας σε παραγωγούς. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα στα κτίρια, ΦΒΕΚ (BiPV, Building Integrated Photovoltaic), τα οποία ενσωματώνονται στις ελεύθερες επιφάνειες του κτιρίου. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης, για τον προσδιορισμό και τη μελέτη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση καινοτόμων φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία εγκαθίστανται σε κτίρια, αντικαθιστώντας ορισμένα δομικά υλικά του κελύφους. Συνεπώς συμβάλουν τόσο στην ενεργειακή, όσο και στην αισθητική αναβάθμιση των κτιρίων.

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Αρχικά, μελετήθηκαν σενάρια σε ένα κτίριο μικρότερης κλίμακας, στο οποίο πραγματοποιήθηκε σύγκριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στη συνέχεια, τα αποδοτικότερα εξ αυτών, χρησιμοποιήθηκαν στην ενεργειακή μελέτη του κτιρίου K1 της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η γεωμετρία των μοντέλων προσομοίωσης, για όλα τα σενάρια, δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού Sketch Up, ενώ τα δεδομένα τα οποία αφορούν τα κατασκευαστικά υλικά του κτιρίου, τροποποιήθηκαν μέσω του λογισμικού Openstudio. Τέλος, η μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος Energy Plus, κάνοντας χρήση των διαθέσιμων μαθηματικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν, συγκρίνονται με δεδομένα που αφορούν τις ηλεκτρικές ανάγκες του κτιρίου, με στόχο την εύρεση του αποδοτικότερου συνδυασμού μεταξύ των σεναρίων.

## Abstract

During the past few years an effort is being made to achieve the conversion of buildings from an energy consumer to a producer. For this reason, BIPV (Building Integrated Photovoltaic) panels are being used, which are integrated on the unused surfaces of the building. The goal of this thesis is the creation of simulation models and, through them, the determining of the produced electrical energy. This is achieved through the installation of innovative photovoltaic panels on buildings, which also substitute some building materials of the building envelope. As such, they contribute to an overhaul of both energy consumption and aesthetics.

This thesis is comprised of two parts. Initially, scenarios on a building of smaller scale were examined, for which the produced electrical energy between the photovoltaic panels was compared. Consequently, the panels which were found to be the most efficient, were used to assess the energy performance of the K1 building of the School of Environmental Engineering, located at the Technical University of Crete campus. The geometry of the simulation models for all the scenarios was created via the Sketch Up software, while the data which concerns the building materials used were modified with the Openstudio software. Finally, the modelling of the photovoltaic panels was realized through the Energy Plus program, using the mathematical models available. The emerging results were then compared to the electrical energy needs of the building, so as to determine the most efficient combination possible among the scenarios.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κ. Διονυσία Κολοκοτσά, για την καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ την κ. Αγγελική Μαυριγιαννάκη για τις πληροφορίες που μου προσέφερε, την συνεχή βοήθεια και τη συμβολή της για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Θεοχάρη Τσούτσο και τον κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη, για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη μελέτη και την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Περιεχόμενα πινάκων .....	10
Περιεχόμενα εικόνων.....	12
Περιεχόμενα διαγραμμάτων.....	13
Κεφάλαιο 1    Εισαγωγή .....	15
1.1            Εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	15
1.1.1        Ενεργειακή απόδοση.....	16
1.1.2        Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου .....	16
1.2            Φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στα κτίρια (Building Integrated PV, BiPV) .....	17
1.2.1        Εφαρμογές ΦΒΕΚ στις προσόψεις των κτιρίων .....	17
1.2.2        Εφαρμογές ΦΒΕΚ (BiPV) στην οροφή των κτιρίων .....	18
1.2.3        ΦΒΕΚ (BiPV) σε εφαρμογές σκίασης .....	19
1.3            Υλικά κατασκευής ΦΒΕΚ (BiPV).....	20
1.3.1        Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού Υμενίου (Thin Film) .....	20
1.3.2        Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων Thin Film .....	21
Κεφάλαιο 2    Μεθοδολογία .....	22
2.1            Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.....	22
2.2            Στάδιο 1 <sup>ο</sup> :Περιγραφή μεθοδολογίας για το κτίριο μικρής κλίμακας.....	24
2.2.1        Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Openstudio .....	24
2.2.2        Ορισμός τοποθεσίας .....	24
2.2.3        Ορισμός χρονοδιαγραμμάτων (Schedules-Schedules Sets).....	25
2.2.4        Ορισμός κατασκευαστικών υλικών.....	28
2.2.5        Ορισμός φορτίων κτιρίου.....	31
2.2.6        Δημιουργία και προσδιορισμός χώρων κτιρίου .....	31
2.2.7        Προσδιορισμός κατασκευών και ορισμός θερμικών ζωνών .....	32
2.3            Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Sketch Up.....	32
2.3.1        Σχεδιασμός γεωμετρίας του κτιρίου .....	32
2.3.2        Δημιουργία θερμικών ζωνών (Thermal Zones) και Χώρων (Spaces) .....	33
2.3.3        Δημιουργία επιφανειών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	33
2.4            Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό EnergyPlus .....	34
2.4.1        Εισαγωγή στο λογισμικό Energy Plus.....	34
2.4.2        Περιγραφή μοντέλου PhotovoltaicPerformance:Simple (U.S. Department of Energy 2018).....	35
2.4.3        Περιγραφή μοντέλου Photovoltaic Performance: Equivalent One-Diode (U.S. Department of Energy 2018).....	35
2.4.4        Δημιουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	39

2.5	Στάδιο 2 <sup>ο</sup> :Περιγραφή μεθοδολογίας για το κτίριο K1 .....	42
2.6	Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Openstudio .....	42
2.6.1	Ορισμός τοποθεσίας .....	42
2.6.2	Ορισμός χρονοδιαγραμμάτων (Schedules).....	42
2.6.3	Ορισμός κατασκευαστικών υλικών.....	44
2.6.4	Ορισμός φορτίων κτιρίου.....	46
2.6.5	Δημιουργία και προσδιορισμός χώρων κτιρίου .....	46
2.7	Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Sketch Up.....	46
2.8	Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό EnergyPlus .....	47
2.9	Περιγραφή σεναρίων που μελετήθηκαν .....	47
2.9.1	Περιγραφή σεναρίων κτιρίου μικρότερης κλίμακας .....	47
2.9.2	Περιγραφή σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικού Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης.....	50
2.9.3	Περιγραφή συμπληρωματικών σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος .....	53
Κεφάλαιο 3	Αποτελέσματα.....	56
3.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων που μελετήθηκαν για το κτίριο μικρότερης κλίμακας.....	56
3.1.1	Αρχικό Σενάριο: Αρχικό κτίριο γραφείου .....	56
3.1.2	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση Solarblock στο νότιο τοίχο του κτιρίου.....	56
3.1.3	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου ...	58
3.1.4	Σενάριο 3α: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 20% διαπερατότητα .....	58
3.1.5	Σενάριο 3b: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 30% διαπερατότητα .....	60
3.1.6	Σενάριο 4 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση αδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου.....	62
3.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων που μελετήθηκαν για το κτίριο K1 του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης .....	64
3.2.1	Αρχικό Σενάριο: Αρχικό κτίριο γραφείου .....	64
3.2.2	Σενάριο 2 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στα παράθυρα των γραφείων στη νότια όψη του πρώτου ορόφου του κτιρίου .....	64
3.2.3	Σενάριο 3 <sup>ο</sup> : Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας της νότιας όψης με Solarblock απόδοσης 4%.....	66
3.2.4	Σενάριο 4 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση αδιαφανούς ΦΒΕΚ κρυσταλλικού πυριτίου στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου.....	67
3.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων συμπληρωματικών σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.....	69
3.3.1	Συμπληρωματικό σενάριο 1 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου .....	69
3.3.2	Συμπληρωματικό σενάριο 2 <sup>ο</sup> : Τοποθέτηση Solarblock στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου .....	71
Κεφάλαιο 4	Συζήτηση .....	73



Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα .....	78
Βιβλιογραφία .....		79

## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κτιρίου. ....	24
Πίνακας 2.2: Φορτία από διάφορες δραστηριότητες (Portal).....	26
Πίνακας 2.3: Υλικά από τα οποία αποτελείται το υπό μελέτη κτίριο, Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010, Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των κτηρίων(Υ Π Ε Κ Α 2010). ....	29
Πίνακας 2.4: Κατασκευές ανοιγμάτων κτιρίου. ....	29
Πίνακας 2.5: Υλικά από τα οποία αποτελείται το κτίριο, χωρισμένα ανά κατασκευή.....	30
Πίνακας 2.6: Κατανάλωση ενέργειας συσκευών γραφείου. ....	31
Πίνακας 2.7: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, Πηγή:(“Product Manual” 2011).....	39
Πίνακας 2.8: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20%, Πηγή: (“Product Manual” 2011). ....	40
Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 30%, Πηγή: (“Product Manual” 2011). ....	40
Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά SolarBlock, Πηγή:(SBskin Smart Building Skin). ....	41
Πίνακας 2.11: Χρονοδιαγράμματα Εργαστηρίων, γραφείων και αίθουσας συνεδριάσεων..	42
Πίνακας 2.12: Χρονοδιαγράμματα κοινόχρηστων χώρων. ....	43
Πίνακας 2.13:Χρονοδιάγραμμα ποσοστού αριθμού ατόμων.....	43
Πίνακας 2.14: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται το ισόγειο του κτιρίου K1. ...	44
Πίνακας 2.15: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο πρώτος όροφος του κτιρίου K1.....	44
Πίνακας 2.16: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο δεύτερος όροφος του κτιρίου K1.....	45
Πίνακας 2.17:Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο θόλος του κτιρίου K1. ....	45
Πίνακας 2.18: Φορτία κτιρίου K1.....	46
Πίνακας 2.19: Χώροι κτιρίου K1.....	46
Πίνακας 2.20: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.....	48
Πίνακας 2.21: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.....	48
Πίνακας 2.22: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.....	48
Πίνακας 2.23: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.....	49
Πίνακας 2.24: Συνοπτικός πίνακας σεναρίων για το κτίριο μικρής κλίμακας. ....	50
Πίνακας 2.25: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια <1.5 m <sup>2</sup> . 50	
Πίνακας 2.26: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια <2.3 m <sup>2</sup> . 50	
Πίνακας 2.27: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια <4 m <sup>2</sup> ....	51
Πίνακας 2.28: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για τοίχο με επιφάνεια 8.48 m <sup>2</sup> .....	51
Πίνακας 2.29: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για τοίχο με επιφάνεια 7.15 m <sup>2</sup> .....	52
Πίνακας 2.30: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 66.47 m <sup>2</sup> δεξιά του θόλου. ....	52
Πίνακας 2.31: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 79.5 m <sup>2</sup> αριστερά του θόλου.....	53
Πίνακας 2.32: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 9.2 m <sup>2</sup> . ....	54
Πίνακας 2.33: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 17.94 m <sup>2</sup> . ....	54
Πίνακας 2.34: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 13.86 m <sup>2</sup> . ....	54
Πίνακας 2.35: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 9.2 m <sup>2</sup> . ....	55
Πίνακας 2.36: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 17.94 m <sup>2</sup> . ....	55
Πίνακας 2.37: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 13.86 m <sup>2</sup> . ....	55
Πίνακας 2.38: Συνοπτικός πίνακας σεναρίων για το κτίριο K1.....	55
Πίνακας 3.1:Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση Solarblock..	56
Πίνακας 3.2: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%.....	58

Πίνακας 3.3: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30%.....	60
Πίνακας 3.4: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%.....	62
Πίνακας 3.5: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%.....	64
Πίνακας 4.1: Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης. ....	73
Πίνακας 4.2: Συνδυαστικά σενάρια εγκατάστασης ΦΒΕΚ στο κτίριο K1.....	76

## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου I-V [3].	16
Εικόνα 1.2: Παράδειγμα εφαρμογής ΦΒΕΚ στην πρόσοψη κτιρίου. Το κτίριο βρίσκεται στην πόλη Konstanz της Γερμανίας και αποτελεί κατασκευή του Arnold Wild (Anon., 2011).	17
Εικόνα 1.3: Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η εγκατάσταση thin film BiPV σε μη διαφανή οροφή κτιρίου στη Ζυρίχη της Ελβετίας (Anon., 2011). Στη αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η εγκατάσταση μιας σειράς Semi transparent BiPV στην πόλη Φένλο της Ολλανδίας(“Swiss BiPV Competence Centre” 2011).	18
Εικόνα 1.4: Πάνω αριστερά παρουσιάζεται μια κατοικία στο Ormalingen της Ελβετίας και δεξιά η λεπτομέρεια κατασκευής της (Anon., 2011). Στην κάτω εικόνα παρουσιάζεται μια εφαρμογή BiPV στην οροφή ενός θερμοκηπίου στην Ούντινε της Ιταλίας(“Swiss BiPV Competence Centre” 2011).	19
Εικόνα 1.5: Σκίαση στην πρόσοψη κτιρίου (Selfa photovoltaics, n.d.), 2. Χρήση BiPV σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων (Sunpal, 2017)	20
Εικόνα 1.6: Δομή Thin Film PV.	20
Εικόνα 1.7: Συνδεσμολογία Thin film BiPV (“Product Manual” 2011).	21
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα μεθοδολογίας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	22
Εικόνα 2.2: Καρτέλα εισαγωγής αρχείου καιρού, τοποθεσίας και χρονολογίας.	24
Εικόνα 2.3: Χρονοδιάγραμμα αριθμού ατόμων στο κτίριο.	25
Εικόνα 2.4: Χρονοδιάγραμμα επιπέδου δραστηριοτήτων.	26
Εικόνα 2.5: Χρονοδιάγραμμα ηλεκτρικών συσκευών.	27
Εικόνα 2.6: Χρονοδιάγραμμα φωτισμού.	27
Εικόνα 2.7: Αντιστοίχιση χρονοδιαγραμμάτων.	28
Εικόνα 2.8: Εισαγωγή χαρακτηριστικών των υλικών.	28
Εικόνα 2.9: Καρτέλα δημιουργίας Spaces κτιρίου	31
Εικόνα 2.10: Αριστερά παρουσιάζεται η γεωμετρία σε περιβάλλον Sketch Up, ενώ δεξιά σε περιβάλλον OpenStudio.	32
Εικόνα 2.11: Άξονες προσανατολισμού στο λογισμικό Sketch Up και Openstudio.	33
Εικόνα 2.12: Μεθοδολογία προσθήκης φωτοβολταϊκών πλαισίων.	33
Εικόνα 2.13: Περιβάλλον λογισμικού Energy Plus, κατά τη μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων.	34
Εικόνα 2.14: Κύκλωμα μαθηματικού μοντέλου τεσσάρων παραμέτρων(U.S. Department of Energy 2018).	36
Εικόνα 2.15: Αναπαράσταση αυτοσκίασης κτιρίου K1 και σκίασης του από το κτίριο K2. ...	47
Εικόνα 2.16: Σενάρια τοποθέτησης ΦΒΕΚ στη νότια όψη του κτιρίου.	49
Εικόνα 2.17: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στον πρώτο όροφο του κτιρίου.	51
Εικόνα 2.18: Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας στο κτίριο.	52
Εικόνα 2.19: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% στη νότια όψη του δεύτερου ορόφου.	53

## Περιεχόμενα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.....	57
Διάγραμμα 3.2: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	57
Διάγραμμα 3.3: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	59
Διάγραμμα 3.4: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.....	59
Διάγραμμα 3.5: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	60
Διάγραμμα 3.6: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	61
Διάγραμμα 3.7: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ενεργειακών αναγκών για φωτισμό από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά. ....	61
Διάγραμμα 3.8: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ενεργειακών αναγκών για χρήση ηλεκτρικών συσκευών από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά.....	62
Διάγραμμα 3.9: Απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	63
Διάγραμμα 3.10: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	63
Διάγραμμα 3.11: Απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	65
Διάγραμμα 3.12: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	65
Διάγραμμα 3.13: Ποσοστά κάλυψης ενεργειακών αναγκών. ....	66
Διάγραμμα 3.14: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ..	67
Διάγραμμα 3.15: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	68
Διάγραμμα 3.16: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	68
Διάγραμμα 3.17: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό. ....	70
Διάγραμμα 3.18: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ....	70
Διάγραμμα 3.19: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών απαιτήσεων για φωτισμό σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.....	71
Διάγραμμα 3.20: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών. ..	72
Διάγραμμα 3.21 Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών από τα ημιδιαφανή ΦΒΕΚ. ....	72
Διάγραμμα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση απόδοσης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	73

Διάγραμμα 4.2: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των ΦΒΕΚ για κάθε σενάριο. ....	74
Διάγραμμα 4.3: Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων φωτισμού για κάθε σενάριο. .	74
Διάγραμμα 4.4: Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων ηλεκτρικών συσκευών για κάθε σενάριο.....	75
Διάγραμμα 4.5: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων για φωτισμό. ....	77
Διάγραμμα 4.6: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων ηλ.συσκευών. ....	77

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Ο άνθρωπος, για να μπορέσει να ικανοποιήσει τις βιοτικές του ανάγκες, οι οποίες συνέβαλαν και στην μετέπειτα εξέλιξή του, εκμεταλλεύεται με κάθε δυνατό τρόπο τη διαθέσιμη ενέργεια από το περιβάλλον.

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος πριν ακόμα ανακαλύψει τα ορυκτά ως καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, αξιοποιούσε κάθε μορφή της, η οποία μπορούσε να αντληθεί από το περιβάλλον<sup>1</sup>. Σύμφωνα με τους Singer, Holmyard, & Hall, 1954, οι ΑΠΕ είχαν πρωτοεμφανιστεί από την αρχαιότητα όταν οι λαοί της Μεσογείου χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια για την μετακίνηση των πλοίων τους με σκοπό την ανακάλυψη νέων «κόσμων», τις εμπορικές συναλλαγές μεταξύ των διαφορετικών χωρών, αλλά και σε πολεμικές επιδρομές.

Σε μεταγενέστερο χρόνο όμως, με την ανακάλυψη των ορυκτών ως καύσιμο, επικρατούσε η πεποίθηση ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κοστίζουν περισσότερο, κατά τη χρήση τους ως μέσο παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, στις μηχανολογικές εφαρμογές τα ορυκτά καύσιμα απέδιδαν καλύτερα απ' ό,τι οι ΑΠΕ. Η άποψη αυτή ξεκίνησε να αποκτά όλο και λιγότερους οπαδούς, όταν οι άνθρωποι είχαν αρχίσει σιγά σιγά να ανακαλύπτουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που η χρήση ορυκτών καυσίμων δημιουργούσαν τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Έτσι, η αύξηση του κόστους εξόρυξης και εκμετάλλευσης του ορυκτού πλούτου της γης σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις που προκαλούσαν στο περιβάλλον, οδήγησε τον άνθρωπο στην αναζήτηση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας που αποσκοπούσαν, όχι μόνο την οικονομική ευημερία των λαών αλλά και την βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης δίνοντας έμφαση και στο περιβάλλον (Ellabban, Abu-Rub and Blaabjerg, 2014).

Συγκεκριμένα, η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεκίνησε όταν οι τιμές του πετρελαίου και του αερίου αυξήθηκαν, αποσκοπώντας όχι μόνο στη μείωση του κόστους για την παραγωγή ενέργειας αλλά και στην βελτίωση του περιβάλλοντος με κατεύθυνση την αειφόρο ανάπτυξη. Σήμερα, το δυναμικό των ΑΠΕ δύναται να καλύψει ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας απαίτησης ενέργειας. Σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν ένα ποσοστό της τάξεως του 20-30%, της παγκόσμιας ενεργειακής απαίτησης (Akella, Saini and Sharma, 2009). Τα τελευταία 30 χρόνια η πώληση τόσο των ηλιακών όσο και των αιολικών συστημάτων έχει αυξηθεί ραγδαία, μειώνοντας έτσι το κόστος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξελίσσονται διαρκώς αποσκοπώντας στη βελτίωση του τρόπου ζωής των ανθρώπων, βελτιώνοντας τις συνθήκες διαβίωσης του.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, είναι η παραμετρική ανάλυση καινοτόμων φωτοβολταϊκών πλασιών, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε κτίρια (Building Integrated PV), με σκοπό, όχι μόνο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά, και την αισθητική τους αναβάθμιση.

### 1.1 Εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, γίνεται αναφορά, στο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των ΦΒΕΚ. Αρχικά, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις κυριότερες παραμέτρους με βάση τις οποίες, γίνεται η αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εφαρμογές των ΦΒΕΚ στα κτίρια, έπειτα γνωστοποιούνται τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα ΦΒΕΚ που μελετάμε και τέλος, παρουσιάζεται και αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στο λογισμικό EnergyPlus, για την μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών.

---

<sup>1</sup>Με τον όρο αξιοποίηση κάθε μορφής ενέργειας από περιβάλλον εννοείται το σύνολο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθούν με την εκάστοτε τεχνολογική πρόοδο

### 1.1.1 Ενεργειακή απόδοση

Η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό αξιολόγησης του καθώς, συσχετίζει την ισχύ της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας, με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Δηλαδή, προσδιορίζεται το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η οποία, μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η μαθηματική έκφραση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων ορίζεται ως εξής:

$$n = \frac{P_m}{P_{inc}} \times 100\% \quad \text{Εξίσωση 1.1}$$

Όπου  $P_m$ : Η ισχύς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

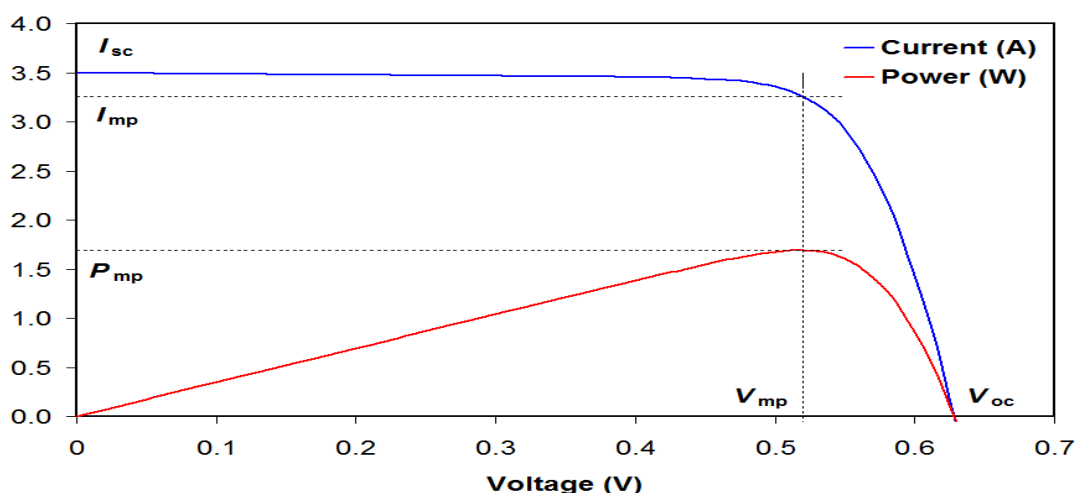
$P_{inc}$ : Η ισχύς της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας

Γενικά, η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ κυμαίνεται από 15-20%(Mani and Pillai, 2010). Αξίζει όμως να σημειωθεί, ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται, με τις καιρικές συνθήκες, τις συνθήκες του περιβάλλοντος (ψηλά δέντρα με πυκνό φύλλωμα, ψηλά κτίρια), τη συντήρηση του πλαισίου (καθαρισμός για την αποφυγή επικαθίσεων, σκόνης), αλλά ακόμα και με την πάροδο των ετών.

### 1.1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ίσως μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, είναι η χαρακτηριστική καμπύλη I-V η οποία, προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και της τάσης στα άκρα του (I-V). Η σχέση αυτή, αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 1.1).

Κατά τη λειτουργία ενός πλαισίου, όταν η τάση στα άκρα είναι  $V=0$  τότε, το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι στη μέγιστη τιμή του  $I_{sc}$ , και ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κατά την αύξηση της τάσης, η ένταση του ρεύματος μειώνεται με πολύ μικρό ρυθμό (παραμένει σχεδόν σταθερή), μέχρι και το σημείο μέγιστης ισχύος ( $V_{mp}, I_{mp}$ ), από το οποίο ξεκινά η έντονη μείωσή της έως και το σημείο  $V_{oc}$ , όπου η τάση στα άκρα μεγιστοποιείται και η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται.



Εικόνα 1.1: Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου I-V [3].

Από το γινόμενο της τάσης (V) και της έντασης του ρεύματος (I), προκύπτει η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του εκάστοτε φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$$P = I \times V \text{ (Watt)} \quad \text{Εξίσωση 1.2}$$



Με διαδοχικούς υπολογισμούς, η ηλεκτρική ισχύς παίρνει την μέγιστη τιμή της, η οποία προκύπτει από μια τιμή για την ένταση του ρεύματος και μια τιμή για την τάση στα άκρα του κυκλώματος. Η τιμή αυτή, ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος ή Maximum Power Point και παράγεται, ως γινόμενο της τάσης μέγιστης ισχύος ( $V_m$  ή  $V_{mpp}$ ) και του ρεύματος μέγιστης ισχύος ( $I_m$  ή  $I_{mpp}$ ). Η διακύμανση της ισχύος συγκριτικά με την τάση στα άκρα του κυκλώματος, παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα στον παραπάνω γράφημα (Εικόνα 1.1)(Θεοχάρης Τσούτος, 2016).

## 1.2 Φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στα κτίρια (Building Integrated PV, BiPV)

Οι εφαρμογές των ΦΒ στο κτίριο, στοχεύουν στην αντικατάσταση υλικών του κελύφους του κτιρίου, με συστήματα τα οποία μπορούν να παράγουν ενέργεια. Ορισμένες εφαρμογές ΦΒΕΚ στο κτίριο είναι, στις προσόψεις (curtain walls), στην οροφή και σε κατασκευές σκίασης του κτιρίου. Ανάλογα με την χρήση του εκάστοτε πλαισίου χρησιμοποιούνται και διαφορετικά υλικά κατασκευής.

### 1.2.1 Εφαρμογές ΦΒΕΚ στις προσόψεις των κτιρίων

Η εγκατάσταση των ΦΒΕΚ στις προσόψεις των κτιρίων, αποτελεί μια εφαρμογή αρκετά διαδεδομένη, η οποία προτιμάται κυρίως σε κτίρια τα οποία έχουν μεγάλες ελεύθερες επιφάνειες. Η τοποθέτησή τους γίνεται κυρίως στις προσόψεις με νότιο προσανατολισμό για την επίτευξη μέγιστης δυνατής απόδοσης. Με τον κατάλληλο συνδυασμό τζαμιού-πλαισίου, τα ΦΒΕΚ, τα οποία εγκαθίστανται στις προσόψεις των κτιρίων, μπορούν καλύπτουν μέρος των αναγκών του για θερμομόνωση, ηχομόνωση, σκίαση αλλά ταυτόχρονα, και ένα ποσοστό των ηλεκτρικών αναγκών του. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 1.2), παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές των ΦΒΕΚ στις προσόψεις των κτιρίων.



Εικόνα 1.2: Παράδειγμα εφαρμογής ΦΒΕΚ στην πρόσοψη κτιρίου. Το κτίριο βρίσκεται στην πόλη Konstanz της Γερμανίας και αποτελεί κατασκευή του Arnold Wild (Anon., 2011).

Παρά τα αισθητικά, και κατασκευαστικά πλεονεκτήματα των facade BIPV, αξίζει να αναφερθούν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία συνδέονται με την λειτουργία των συγκεκριμένων πλαισίων. Η συγκεκριμένη κατηγορία φωτοβολταϊκών πλαισίων, παρουσιάζει μειωμένη απόδοση, καθώς η φωτεινή ακτινοβολία δεν προσπίπτει με την βέλτιστη γωνία στο πλαίσιο, το οποίο κατασκευάζεται υπό γωνία  $90^\circ$ . Έτσι ανεξαρτήτως από τον προσανατολισμό του κτιρίου, λόγω της κλίσης τους η απόδοση είναι χαμηλή συγκριτικά με το κόστος εγκατάστασης. Επιπλέον, η απόδοσή τους επηρεάζεται από την σκίαση που δημιουργείται από τα γύρω κτίρια. Η εφαρμογή των ΦΒΕΚ στις προσόψεις των κτιρίων, μπορεί να γίνει με τις εξής τεχνικές:

- Ενσωμάτωση σε μέρος της πρόσοψης, αντικαθιστώντας τα δομικά υλικά
- Ενσωμάτωση, αντικαθιστώντας πλήρως τα δομικά υλικά της πρόσοψης
- Τοποθέτηση, μετά την κατασκευή του κτιρίου, ως εξωτερικό κέλυφος

Οι δύο πρώτες κατηγορίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως BIPV (Building Integrated PV), ενώ η τρίτη κατηγορία αναφέρεται ως BAPV (Building Attached PV). Τις περισσότερες φορές η κατηγορία των BIPV περιέχει και αυτή των BAPV (Verberne, 2014). Στις εγκαταστάσεις αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά πάνελ πυριτίου ή BiPV άμορφου πυριτίου.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία ΦΒΕΚ (BIPV), ανήκουν και τα Solar Blocks, τα οποία αποτελούν καινοτόμα φωτοβολταϊκά στοιχεία γυαλιού, που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, μέσω του ενσωματωμένου συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων τρίτης γενιάς που διαθέτουν. Τα στοιχεία αυτά, είναι είτε διαφανή, είτε ημιδιαφανή και η λειτουργία τους βασίζεται, στη τεχνολογία Dye-Sensitized Solar Cells (DSCs). Πρόκειται για μία καινοτομία, η οποία μπορεί να προσφέρει πολλά οφέλη στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό των κτιρίων, μέσα από την ποικιλία χρωμάτων και εφαρμογών (SBskin Smart Building Skin, no date).

### 1.2.2 Εφαρμογές ΦΒΕΚ (BIPV) στην οροφή των κτιρίων

Η εφαρμογή φωτοβολταϊκών πλαισίων στις οροφές των κτιρίων, είναι ίσως ο πιο διαδεδομένος τρόπος εγκατάστασης πλαισίων στο κτίριο, καθώς και ο πιο αποδοτικός λόγω της κλίσης που ορίζεται στα πλαίσια. Τοποθετούνται, τόσο σε οροφές με κλίση όσο και σε επίπεδες οροφές.

- **Εφαρμογή σε επίπεδες οροφές**

Η εγκατάσταση στις επίπεδες οροφές κτιρίων πραγματοποιείται για την αξιοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας της οροφής. Δηλαδή, μπορεί να γίνει εγκατάσταση τόσο σε κεκλιμένες όσο και σε επίπεδες οροφές κτιρίων, αλλά, και σε επιφάνειες που χρησιμοποιούνται ως οροφές αιθρίων. Στις περιπτώσεις που τα φωτοβολταϊκά τοποθετούνται στις οροφές αιθρίων, η εγκατάστασή τους είναι προτιμότερο να γίνει κατά την κατασκευή του κτιρίου. Ενώ, στις περιπτώσεις αδιαφανούς επιφάνειας η εγκατάσταση γίνεται μετά την κατασκευή των κτιρίων. Παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.3



Εικόνα 1.3: Στη δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η εγκατάσταση thin film BIPV σε μη διαφανή οροφή κτιρίου στη Ζυρίχη της Ελβετίας (Αnon., 2011). Στη αριστερή εικόνα παρουσιάζεται η εγκατάσταση μιας σειράς Semi transparent BIPV στην πόλη Φένλο της Ολλανδίας (Swiss BiPV Competence Centre, 2011).

- **Εφαρμογές σε οροφές υπό κλίση**

Οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές σε οροφές με κλίση είναι κυρίως σε κατοικίες. Η εγκατάστασή τους γίνεται κυρίως μετά την κατασκευή του κτιρίου αλλά, υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις κατασκευής αιθρίων που η εγκατάσταση πραγματοποιείται κατά την κατασκευή του κτιρίου. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κεκλιμένες επιφάνειες έχει μεγάλη εφαρμογή στη γεωργία, ιδιαίτερα σε χώρες του βορά όπου οι κλιματολογικές συνθήκες δεν ευνοούν την ανάπτυξη ορισμένων καλλιεργειών. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν θερμοκήπια τα οποία στην οροφή τους διαθέτουν ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία όχι μόνο επιτρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει στο θερμοκήπιο αλλά και παράγουν



ηλεκτρική ενέργεια η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε θερμική, με σκοπό τη δημιουργία ιδανικών κλιματολογικών συνθηκών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4: Πάνω αριστερά παρουσιάζεται μια κατοικία στο Ormalingen της Ελβετίας και δεξιά η λεπτομέρεια κατασκευής της (Αποη., 2011). Στην κάτω εικόνα παρουσιάζεται μια εφαρμογή BIPV στην οροφή ενός θερμοκηπίου στην Ούντινε της Ιταλίας (Swiss BiPV Competence Centre, 2011).

### 1.2.3 ΦΒΕΚ (BiPV) σε εφαρμογές σκίασης

Ίσως μια από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές semi-transparent και opaque φωτοβολταϊκών πλαισίων, είναι οι τοποθέτηση των εν λόγω πλαισίων σε κατασκευές για σκίαση, είτε πάνω στο κτίριο, είτε και σε άλλους χώρους, όπως για παράδειγμα σε στάσεις λεωφορείων, σε χώρους στάθμευσης κλπ.. Η διαπερατότητα και το είδος του πλαισίου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφέρει, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κτιρίου ή της εγκατάστασης για σκίαση. Οι δυνατότητες εφαρμογής είναι πολλές, καθώς, όχι μόνο υπάρχει η δυνατότητα επιλογής της πυκνότητας των στοιχείων στο σύστημα σκίασης, αλλά, και η κλίση των πλαισίων δύναται να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες τις κάθε εγκατάστασης.



Εικόνα 1.5: Σκίαση στην πρόσοψη κτιρίου (Selfa photovoltaics, n.d.), 2. Χρήση BiPV σε χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων (Sunpal, 2017) .

### 1.3 Υλικά κατασκευής ΦΒΕΚ (BiPV)

Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κυρίως ανόργανοι ημιαγωγοί οι οποίοι, σχηματίζουν κατάλληλες αλληλεπιδράσεις με άλλα υλικά, προκαλώντας κατά την έκθεση στο φως το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Deb, 1996).

#### 1.3.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου (Thin Film)

Το άμορφο πυρίτιο, είναι το κύριο υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου καθώς, όχι μόνο είναι άφθονο και μη τοξικό αλλά, απαιτεί και χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας, γεγονός που καθιστά τα πλαίσια αυτά αρκετά εύκαμπτα και οικονομικά κατά την παραγωγή τους.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμενίου αποτελούνται από ημιαγωγό πάχους μερικών μικρομέτρων ο οποίος, τοποθετείται πάνω σε λεπτό γυαλί (Tempered glass). Η επίστρωση αυτή υποδιαιρείται σε επιμέρους λεπτά φωτοβολταϊκά κύτταρα. Τα κελία, συνήθως χρωματίζονται καφέ ή μαύρα και διαχωρίζονται μεταξύ τους από μεταλλικές (Opaque PV) ή διαφανείς γραμμές (Semi-transparent PV). Το μέγεθος των πλαισίων, είναι προκαθορισμένο από τους κατασκευαστές και σπάνια διαιρείται σε μικρότερα μέρη. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, συνεπώς η δημιουργία ειδικών σχημάτων δεν συνηθίζεται (Odersun, 2011). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικά η δομή ενός φωτοβολταϊκού λεπτού υμενίου.

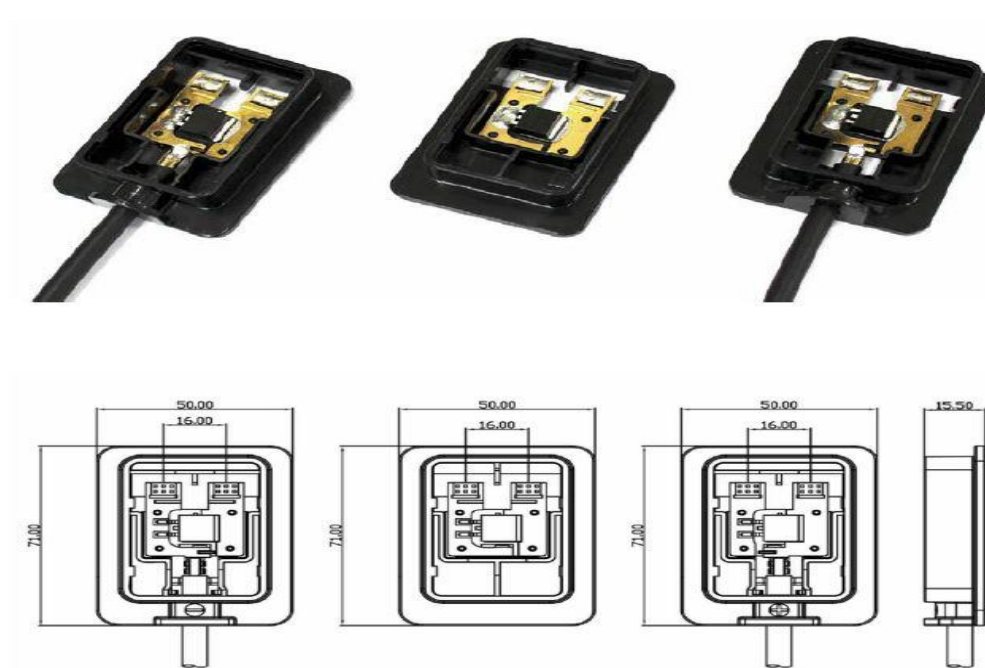


Εικόνα 1.6: Δομή Thin Film PV.

### 1.3.2 Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων Thin Film

Η συνδεσμολογία των thin film PV διαφέρει ανάλογα με το είδος, την κατασκευή και τις προτιμήσεις του αγοραστή. Τα κουτιά σύνδεσης μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε πάνω στην οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Η σύνδεση πραγματοποιείται είτε με συγκόλληση, είτε μέσω ειδικά διαμορφωμένης επαφής.

Η συνδεσμολογία η οποία χρησιμοποιείται, είναι κατάλληλη για ΦΒΕΚ καθώς, επιτρέπει την αποκέντρωση των δύο αγωγών της φωτοβολταϊκής μονάδας. Στην εικόνα 1.7 παρουσιάζονται τα κουτιά σύνδεσης των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιήθηκαν από την εταιρία OnyxSolar.



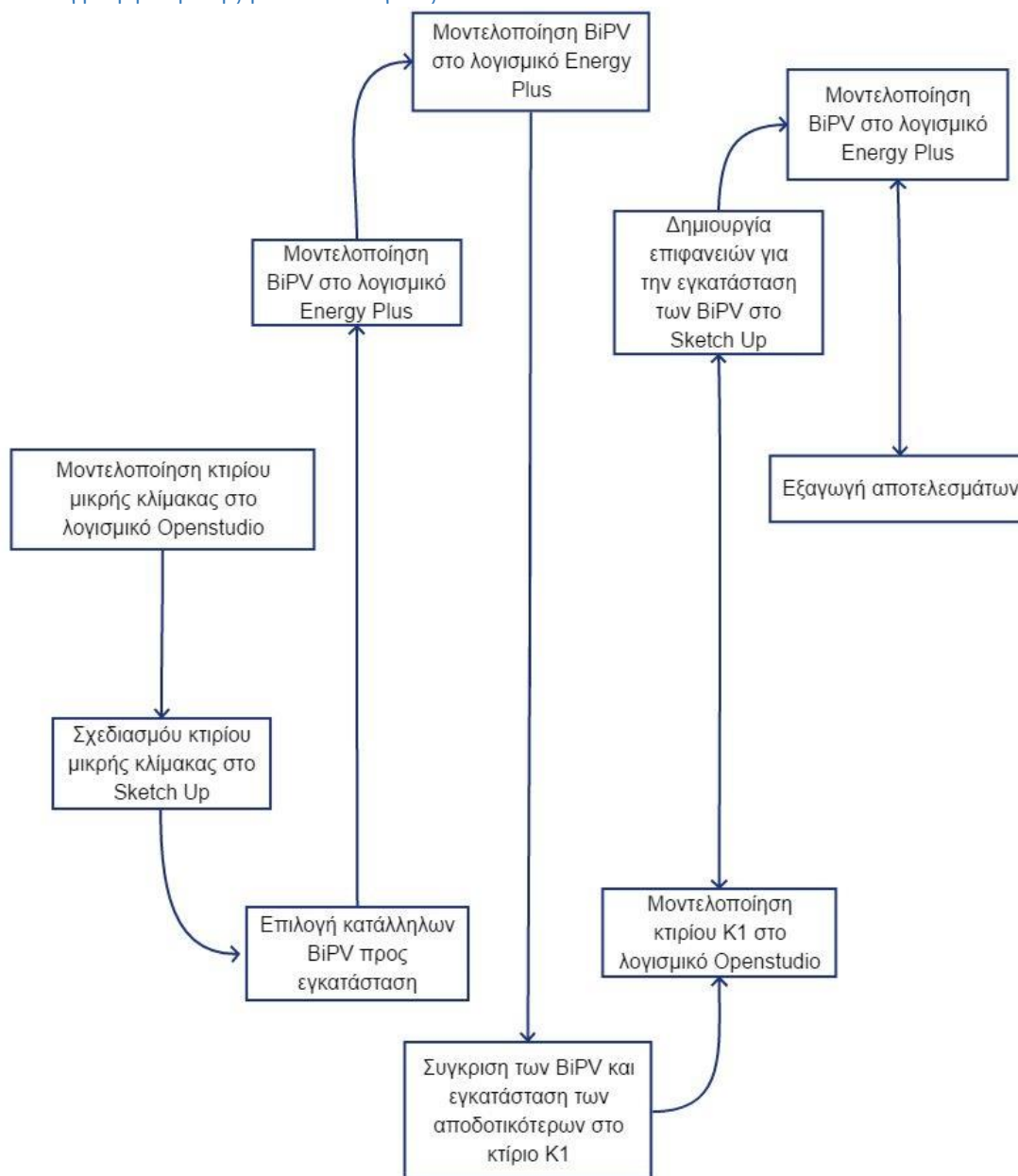
Εικόνα 1.7: Συνδεσμολογία Thin film BiPV (Product Manual, 2011).

## Κεφάλαιο 2 Μεθοδολογία

Η μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων και εν τέλει η εγκατάστασή τους στο κτίριο K1 πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια.

Κατά το πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός ενός κτιρίου μικρής κλίμακας, με χαρακτηριστικά γραφείου, στο οποίο τοποθετήθηκαν ΦΒΕΚ σε διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικό προσανατολισμό, με σκοπό τη σύγκρισή τους ανάλογα με την χρήση τους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε μια αρχική εικόνα του τρόπου λειτουργίας των πλαισίων. Μετά τη σύγκριση των ΦΒΕΚ σε ότι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επιλέχθηκαν τα πιο αποδοτικά εξ αυτών για να εγκατασταθούν στο κτίριο K1.

### 2.1 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα μεθοδολογίας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.



Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά προγράμματα προσομοίωσης, στα οποία πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές διεργασίες. Για την τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Sketch Up Make 2017, όπου έχει αναπτυχθεί από την Google και αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη απεικόνιση αντικειμένων προς μελέτη, στην περίπτωση μας κτίρια. Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό των υλικών, αλλά και των επιμέρους στοιχείων που συμβάλουν στη λειτουργία του κτιρίου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Openstudio. Το λογισμικό Openstudio μπορεί να υποστηρίξει την ενεργειακή μοντελοποίηση ενός κτιρίου χρησιμοποιώντας τη γεωμετρία που δημιουργείται μέσω του λογισμικού Sketch Up. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέγει την τοποθεσία που θα βρίσκεται το υπό μελέτη κτίριο επιλέγοντας το ανάλογο αρχείο καιρού. Επιπλέον, ο χρήστης επιλέγει τα υλικά από τα οποία επιθυμεί να είναι κατασκευασμένο το κτίριο που μοντελοποιεί και ορίζει τα φορτία κάθε χώρου ξεχωριστά, αλλά και τις θερμικές ζώνες από τις οποίες θα αποτελείται το κτίριο. Τέλος, τα στοιχεία τα οποία εισάγουμε στα παραπάνω προγράμματα, αποτυπώνονται στο πρόγραμμα Energy Plus το οποίο αποτελεί μια πιο λεπτομερή απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου, με τη μορφή συντεταγμένων καθώς και αναλυτικότερο προσδιορισμό διαφόρων μεταβλητών.

Ο κύριος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα παραπάνω προγράμματα, είναι επειδή, δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη, να προσδιορίσει και να αναλύσει, με περισσότερη λεπτομέρεια τις μεταβλητές τις οποίες θέλει να μελετήσει. Επιπλέον, και τα τρία προγράμματα, διατίθενται δωρεάν, συνεπώς τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν, μπορούν να ελεγχθούν και να συγκριθούν, χωρίς οικονομική επιβάρυνση. Τέλος, σημαντικό ρόλο αποτέλεσε και η προηγούμενη χρήση των λογισμικών αυτών, κατά τη διάρκεια του κύκλου σπουδών στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αρχικά παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας, στο οποίο κατασκευάστηκε κτίριο μικρής κλίμακας για τη σύγκριση των φωτοβολταϊκών. Αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο λογισμικό OpenStudio, στη συνέχεια ακολουθεί ο σχεδιασμός του κτιρίου μέσω του Sketch Up. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τη δημιουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων κάνοντας χρήση των διαθέσιμων μαθηματικών μοντέλων του προγράμματος Energy Plus.

## 2.2 Στάδιο 1<sup>ο</sup>:Περιγραφή μεθοδολογίας για το κτίριο μικρής κλίμακας

### 2.2.1 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Openstudio

Στο πρώτο στάδιο, το υπό μελέτη κτίριο δεν αποτελεί μια ήδη υπάρχουσα κατασκευή, αλλά δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας. Ορίστηκε ως ένα κτίριο στο οποίο στεγάζεται ένα γραφείο εννέα τετραγωνικών μέτρων, το οποίο βρίσκεται στο νομό Χανίων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των βημάτων και των υποθέσεων που θεωρήθηκαν για τη μοντελοποίηση.

Οι συνθήκες λειτουργίας γραφείου διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Το ωράριο λειτουργίας ορίστηκε 8:00-20:00.
- Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται αποτελεί εξοπλισμό γραφείου.
- Η δραστηριότητα των ανθρώπων συμπίπτει με την λειτουργία του κτιρίου.

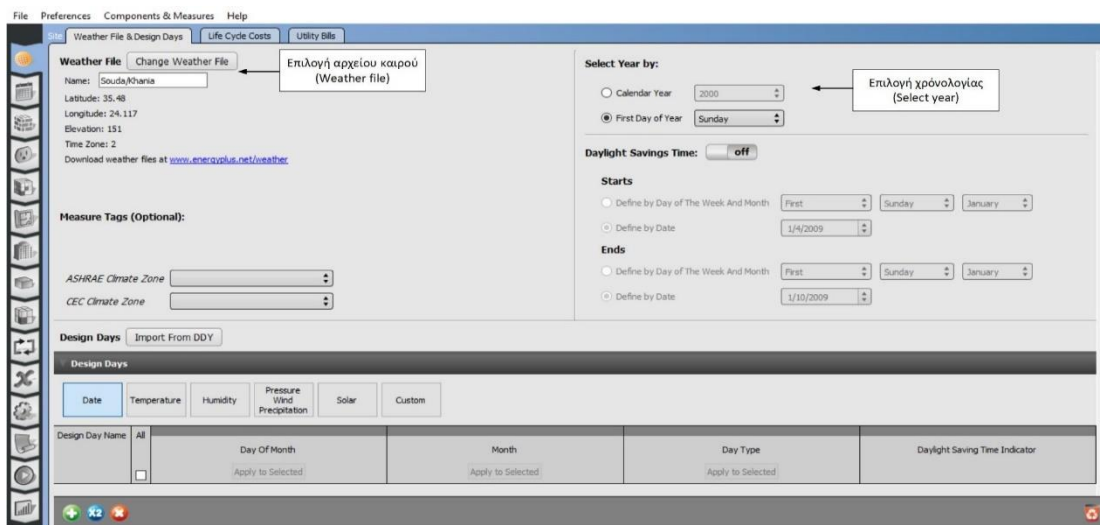
Το κτίριο της προσομοίωσης έχει μήκος, πλάτος και ύψος τριών μέτρων. Διαθέτει μια πόρτα στον βόρειο τοίχο και ένα παράθυρο στον ανατολικό τοίχο. Η μελέτη κατασκευής και εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιήθηκε στον νότιο τοίχο του κτιρίου. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου που μελετάται.

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κτιρίου.

	Υφιστάμενο Κτίριο	Παράθυρο	Πόρτα
Μήκος (m) (l)	3	2	1
Ύψος (m) (h)	3	1	2
Πλάτος (m) (b)	3	-	-

### 2.2.2 Ορισμός τοποθεσίας

Πρωταρχικός παράγοντας για να μοντελοποιηθεί σωστά ένα κτίριο, καθώς και για την εξαγωγή των σωστών αποτελεσμάτων, είναι η επιλογή του κατάλληλου αρχείου καιρού όπως και της τοποθεσίας, με σκοπό τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να συμβαδίζουν με τις εκάστοτε εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Για την προσομοίωση του υπό μελέτη κτιρίου θεωρήθηκε ως τοποθεσία τα Χανιά. Τα αρχεία καιρού που περιέχουν τα μετεωρολογικά δεδομένα βρίσκονται στην ιστοσελίδα του EnergyPlus ([energyplus.net](http://energyplus.net)). Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.2) παρουσιάζεται η ρύθμιση των λειτουργιών της καρτέλας Site για την παρούσα εργασία.



Εικόνα 2.2: Καρτέλα εισαγωγής αρχείου καιρού, τοποθεσίας και χρονολογίας.



### 2.2.3 Ορισμός χρονοδιαγραμμάτων (Schedules-Schedules Sets)

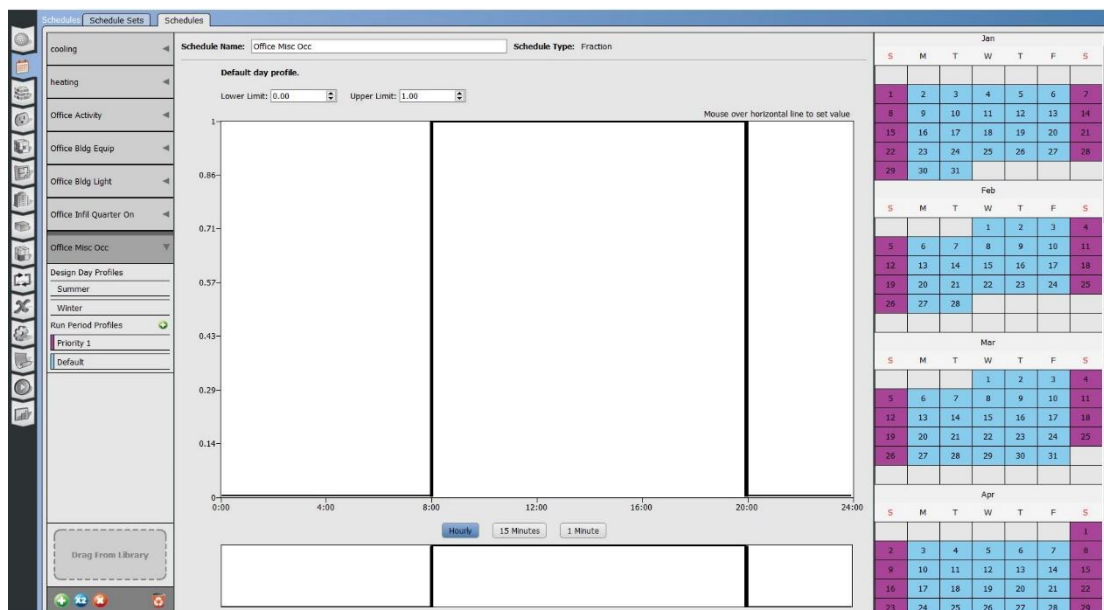
Η καρτέλα Schedules αποτελεί το εργαλείο με το οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει πληροφορίες, οι οποίες αφορούν την κατανομή της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα χρονοδιαγράμματα που δημιουργήθηκαν για το υπό μελέτη κτίριο.

Για να κατασκευαστούν τα χρονοδιαγράμματα, θεωρήθηκαν οι παρακάτω συνθήκες οι οποίες αντιστοιχούν στον τρόπο λειτουργίας ενός γραφείου, το οποίο θα μελετηθεί μεμονωμένα.

- Οι δραστηριότητες που αφορούν τον αριθμό των ατόμων, τη θερμική ενέργεια που παράγουν καθώς και την ηλεκτρική ενέργεια η οποία καταναλώνεται για το φωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου ξεκινούν από τις 8:00 έως 20:00.
- Ο αριθμός των ατόμων είναι σταθερός και αντιστοιχεί σε τέσσερα άτομα.
- Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για το φωτισμό του κτιρίου κυμαίνεται από 20% έως 70% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας.
- Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών έχει οριστεί από το 20% έως το 100% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνουν οι συσκευές.
- Ο αερισμός του κτιρίου είναι στο 100%.

#### Αριθμός Ατόμων (NuOfPeople, Fractional)

Αρχικά κατασκευάστηκε χρονοδιάγραμμα που αφορά τον αριθμό των ατόμων στο κτίριο. Θεωρήθηκε ότι ο αριθμός των ατόμων κατά τη διάρκεια 8:00-20:00 είναι σταθερός και ίσος με τέσσερα άτομα.



Εικόνα 2.3: Χρονοδιάγραμμα αριθμού ατόμων στο κτίριο.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω χρονοδιάγραμμα (Εικόνα 2.3), ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τη χρονική διάρκεια μέσα σε μια ημέρα. Ο κατακόρυφος άξονας είναι ποσοστιαία κατανομημένος και η τιμή ένα ισούται με το 100% και αντιπροσωπεύει τον αριθμό των τεσσάρων ατόμων, ο οποίος και έχει ορισθεί για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

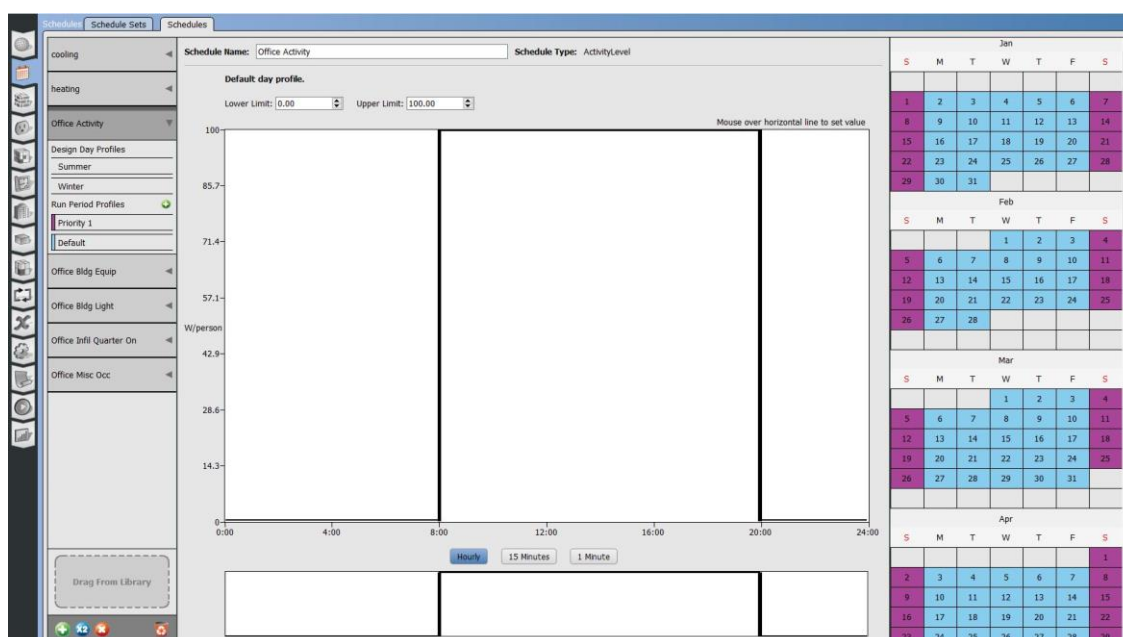
## Επίπεδο δραστηριοτήτων (Activity level, ActivityLevel)

Στο χρονοδιάγραμμα που αφορά το επίπεδο των δραστηριοτήτων των ανθρώπων στο κτίριο γίνεται αναφορά της συνολικής θερμικής ενέργειας που παράγεται κατά την εκπόνηση διαφόρων δραστηριοτήτων. Ενδεικτικά ορισμένες τιμές παραγόμενης ενέργειας με βάση ορισμένες συνήθειες δραστηριότητες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.2: Φορτία από διάφορες δραστηριότητες (Portal).

Είδος δραστηριότητας	Ύψος	Εργασία σε υπολογιστή	Περπάτημα	Αθλητική δραστηριότητα
W/person	70	100	200	300-800

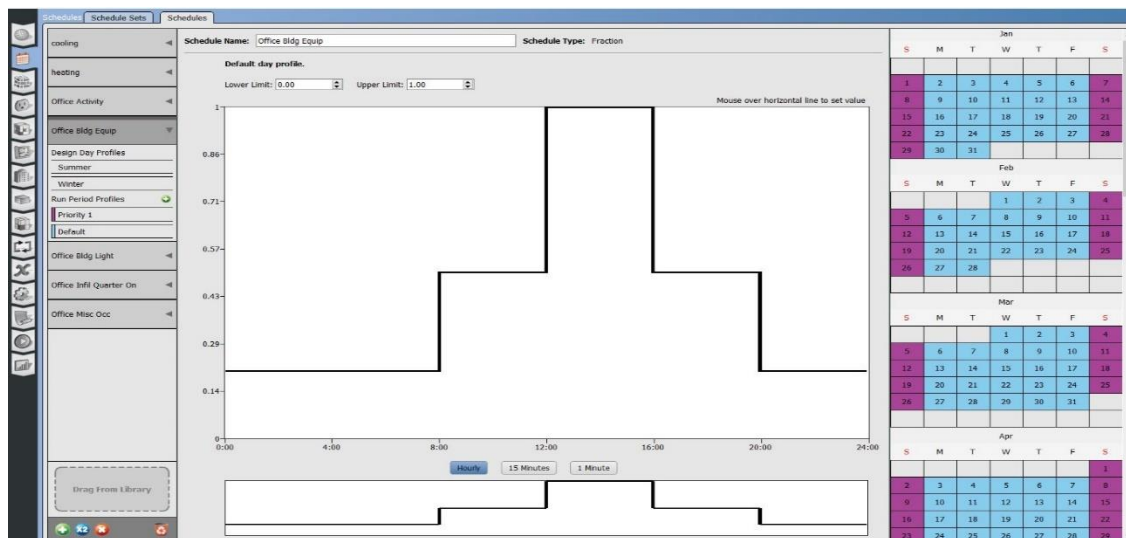
Το επίπεδο δραστηριοτήτων θεωρήθηκε στα  $100 \frac{W}{person}$  καθ' όλη τη χρονική διάρκεια και παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 2.4), στο οποίο ο οριζόντιος άξονας αποτελείται από χρονικές τιμές, ενώ ο κατακόρυφος λαμβάνει τιμές που αφορούν την παραγόμενη ενέργεια σε  $W/person$ .



Εικόνα 2.4: Χρονοδιάγραμμα επιπέδου δραστηριοτήτων.

## Ηλεκτρικές Συσκευές (ElectricalEq, Fractional)

Στη συνέχεια απαραίτητη για τη σωστή καταγραφή των αποτελεσμάτων είναι η καταχώρηση του ποσοστού κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τις ηλεκτρικές συσκευές. Θα θεωρηθεί λοιπόν ότι η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος 8:00-12:00 είναι στο 50% της συνολικής κατανάλωσης των ηλεκτρικών συσκευών. Από τις 12:00-16:00 η κατανάλωση ανέρχεται στο 100% του ποσοστού κατανάλωσης, ενώ στο χρονικό διάστημα 16:00-20:00 η κατανάλωση μειώνεται στο 50%. Τέλος, στην υπόλοιπη διάρκεια του εικοσιτετράωρου η κατανάλωση μειώνεται στο 20%. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το συγκεκριμένο ποσοστό της συνολικής λειτουργίας των ηλεκτρικών συσκευών είναι πως θεωρούμε ότι οι ηλεκτρικές συσκευές δεν έχουν την ίδια χρήση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς, το γράφημα διαμορφώνεται όπως στην Εικόνα 2.5. Επιπλέον, για την περίοδο του σαββατοκύριακου έχει ορισθεί κατανάλωση στο 20% καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.



Εικόνα 2.5: Χρονοδιάγραμμα ηλεκτρικών συσκευών.

### Φωτισμός (Lights, Fractional)

Η κατασκευή του χρονοδιαγράμματος που αφορά τον φωτισμό του κτιρίου θα κατασκευαστεί με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάστηκε και το χρονοδιάγραμμα για τις ηλεκτρικές συσκευές. Για το χρονικό διάστημα 8:00-12:00 το ποσοστό του φωτισμού είναι στο 40% της συνολικής ηλεκτρικής απαίτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Κατά τη διάρκεια 12:00-16:00 η κατανάλωση ανέρχεται στο 50%, ενώ για το χρονικό διάστημα 16:00-20:00 το ποσοστό ανέρχεται στο 80%. Τέλος, τόσο για την υπόλοιπη διάρκεια της ημέρας όσο και για το σαββατοκύριακο το ποσοστό κατανάλωσης αντιστοιχεί στο 20% της συνολικής κατανάλωσης όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω διάγραμμα Εικόνα 2.6.

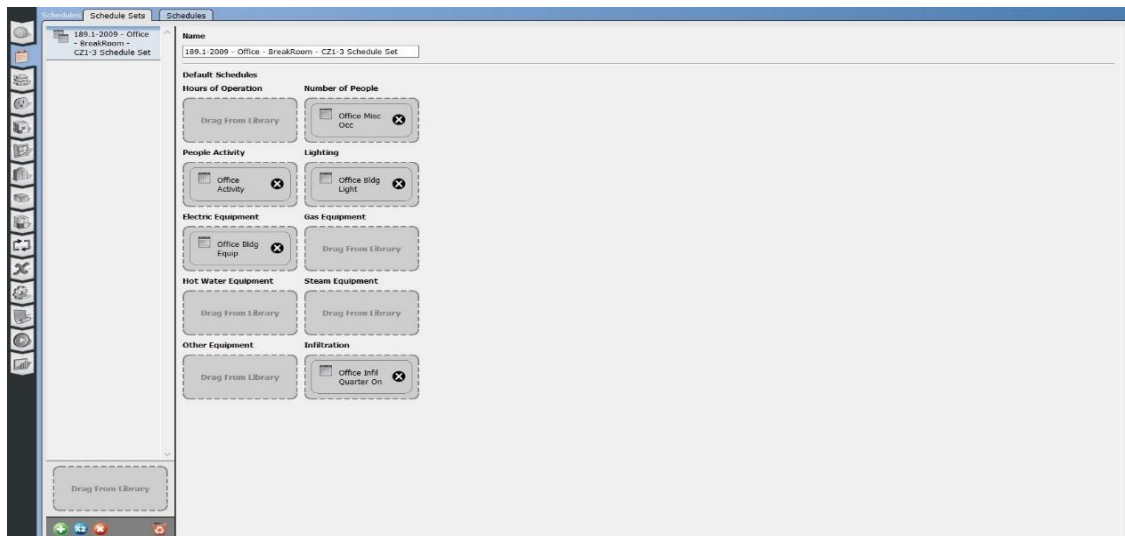


Εικόνα 2.6: Χρονοδιάγραμμα φωτισμού.

### Αερισμός (InfiltrationalwON, Fractional)

Τέλος, κατασκευάστηκε το χρονοδιάγραμμα που αφορά τον αερισμό. Για τον αερισμό επιλέχθηκε αερισμός στο 100% της τιμής του και είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια του εικοσιτετράωρου.

Για να εφαρμοστούν τα χρονοδιαγράμματα στο εκάστοτε κτίριο, θα γίνει αντικατάσταση του αντίστοιχου χρονοδιαγράμματος που δημιουργήθηκε στην καρτέλα Schedule Sets στην αντίστοιχη θέση τους, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7 .



Εικόνα 2.7: Αντιστοίχιση χρονοδιαγραμμάτων.

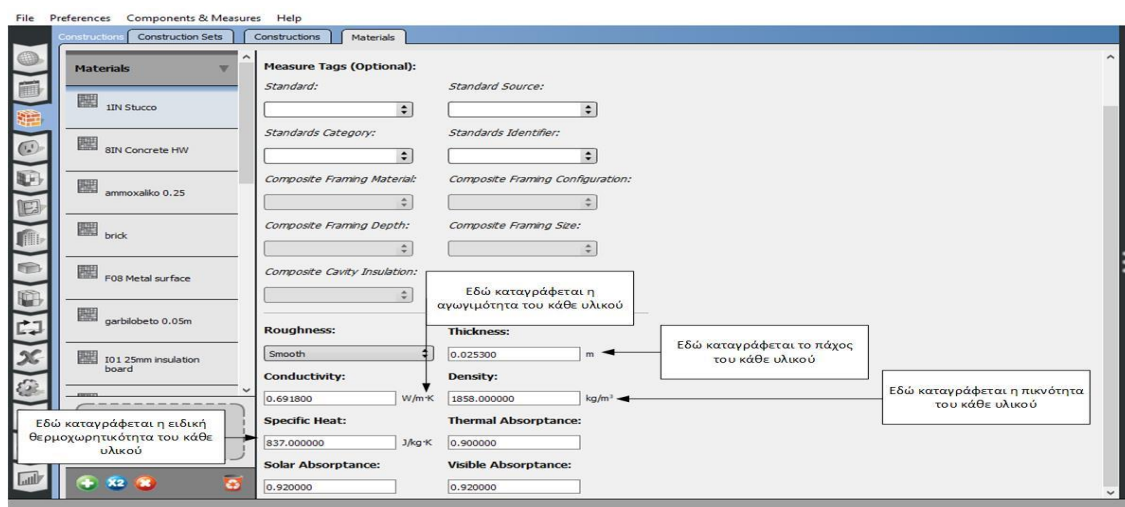
#### 2.2.4 Ορισμός κατασκευαστικών υλικών

Το επόμενο στάδιο μετά την κατασκευή των χρονοδιαγραμμάτων του κτιρίου είναι ο καθορισμός των υλικών από τα οποία αποτελείται το κτίριο. Οι ενέργειες για τον ορισμό των κατασκευαστικών υλικών πραγματοποιείται στην καρτέλα **Constructions** του λογισμικού Openstudio. Αποτελείται από τρεις υποκαρτέλες, οι οποίες συμπληρώνονται από την τελευταία στην πρώτη. Στην τρίτη κατά σειρά καρτέλα γίνεται η καταγραφή των υλικών στα οποία συμπληρώνεται η πυκνότητα, το πάχος, η θερμική αγωγιμότητα καθώς και η ειδική θερμοχωρητικότητα. Στην δεύτερη κατά σειρά καρτέλα τοποθετούνται τα υλικά από τα οποία αποτελείται η κάθε κατασκευή του κτιρίου, δηλαδή τα υλικά από τα οποία αποτελείται το δάπεδο, η οροφή, οι τοίχοι, τα παράθυρα και οι πόρτες.

Η συμπλήρωση των καρτελών όπως αναφέρθηκε θα γίνει από την τελευταία στην πρώτη. Οπότε η ανάλυση των καρτελών θα γίνει με τον ίδιο τρόπο που συμπληρώθηκαν.

#### Υλικά (Materials)

Αρχικά, συμπληρώθηκε η υποκαρτέλα που αφορά τα υλικά από τα οποία αποτελείται το κτίριο. Στην συγκεκριμένη καρτέλα, θα γίνει αναφορά και καταγραφή των χαρακτηριστικών των υλικών, από τα οποία αποτελείται το κτίριο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8.



Εικόνα 2.8: Εισαγωγή χαρακτηριστικών των υλικών.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Πίνακας 2.3: Υλικά από τα οποία αποτελείται το υπό μελέτη κτίριο, Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-2/2010, Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομονωτικής Επάρκειας των κτηρίων(Υ Π Ε Κ Α, 2010).

Υλικό	Πάχος (Thickness) m	Πυκνότητα (Density) $kg/m^3$	Αγωγιμότητα (Conductivity) $W/m \cdot K$	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (Specific Heat) $J/kg \cdot K$
Αμμοχάλικο	0.25	2200	2.00	1000.0
Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858	0.6918	837.0
Γαρμπιλομπετόν	0.05	1050	0.64	1000.0
Μεταλλική Επιφάνεια	0.0008	7824	45.28	500.0
Μονωτική πλάκα	0.0254	43	0.03	1210.0
Πλακάκι	0.015	2000	1.84	1000.0
Τούβλο	0.09	1500	0.6	1000.0
Τσιμέντο	0.2033	2243	1.7296	837.0
Τζάμι	0.003	-	0.9	-

Αφού καταγραφούν τα υλικά κατασκευής του κτιρίου, θα δημιουργηθούν οι αντίστοιχες κατασκευές. Η δημιουργία των κατασκευών θα γίνει στην αντίστοιχη υποκαρτέλα (constructions).

#### Κατασκευές (Constructions)

Στη συνέχεια, θα γίνει αντικατάσταση των υλικών για την κατασκευή των τοίχων, του δαπέδου και των ανοιγμάτων. Το υπό μελέτη κτίριο αποτελείται από τέσσερις τοίχους, μία οροφή, δάπεδο, ένα παράθυρο και μία πόρτα. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι παρακάτω κατασκευές, αντικαθιστώντας τα υλικά από το εξωτερικό του κτιρίου προς το εσωτερικό. Αρχικά, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις κατασκευές των ανοιγμάτων του κτιρίου, ενώ στη συνέχεια με τις υπόλοιπες επιφάνειές του.

Πίνακας 2.4: Κατασκευές ανοιγμάτων κτιρίου.

Κατασκευές	Υλικό	Πάχος (Thickness) (m)	Πυκνότητα (Density) ( $kg/m^3$ )	Αγωγιμότητα (Conductivity) ( $W/m \times K$ )	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (Specific Heat) ( $J/kg \times K$ )
Εξωτερική Πόρτα	Μεταλλική Επιφάνεια	0.0008	7824.0	45.28	500.0
	Μονωτική πλάκα	0.0254	43.0	0.03	1210.0
Παράθυρο	Τζάμι	0.003	-	0.9	-
	Αέρας	0.003	-	-	-
	Τζάμι	0.003	-	0.9	-

Στο συγκεκριμένο κτίριο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία θα συμβαδίζουν με τα υλικά από τα οποία αποτελείται ένα κτίριο γραφείων, με σκοπό να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη

προσέγγιση στο υπό μελέτη κτίριο K1 του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πίνακας 2.5: Υλικά από τα οποία αποτελείται το κτίριο, χωρισμένα ανά κατασκευή.

Κατασκευές	Υλικό	Πάχος (Thickness) (m)	Πυκνότητα (Density) ( $kg/m^3$ )	Αγωγιμότητα (Conductivity) ( $W/m \times K$ )	Ειδική Θερμοχωρητικότητα (Specific Heat) ( $J/kg \times K$ )
Εξωτερικός Τοίχος	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858.0	0.6918	837.0
	Τούβλο	0.09	1500.0	0.6	1000.0
	Μόνωση Αέρα	Θερμική Αντίσταση: $0.15 m^2 \times K/W$			
	Τούβλο	0.09	1500.0	0.6	1000.0
	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858.0	0.6918	837.0
Οροφή	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858.0	0.6918	837.0
	Γαρμπιλομπετόν	0.05	1050.0	0.64	1000.0
	Τσιμέντο	0.2033	2243.0	1.7296	837.0
	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858.0	0.6918	837.0
Δάπεδο	Αμμοχάλικο	0.25	2200.0	2.00	1000.0
	Τσιμέντο	0.2033	2243.0	1.7296	837.0
	Ασβεστοτσιμεντοκονίαμα	0.0253	1858.0	0.6918	837.0
	Πλακάκι	0.015	2000.0	1.84	1000.0

Μετά τη δημιουργία των κατασκευών, θα γίνει αντιστοίχιση της κάθε κατασκευής στην υποκαρτέλα Construction Sets.

#### Ορισμός κατασκευών (Constructions Sets)

Στη συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί αντιστοίχιση των κατασκευών, για τον σωστό προσδιορισμό, των εξωτερικών ή εσωτερικών κατασκευών καθώς και των ανοιγμάτων. Έτσι οι επιφάνειες οι οποίες έχουν επαφή με τον εξωτερικό περιβάλλον του κτιρίου θα διαφέρουν από αυτές στο εσωτερικό. Με τον τρόπο αυτό, θα πραγματοποιηθεί σωστή μοντελοποίηση του κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά των υλικών κατασκευής σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες.



### 2.2.5 Ορισμός φορτίων κτιρίου

Στη καρτέλα Loads θα καταγραφούν τα φορτία που παράγουν θερμότητα και επηρεάζουν τις εσωτερικές συνθήκες του κτιρίου. Τα φορτία που θεωρήθηκαν είναι:

- Ο αριθμός των ατόμων, τέσσερα άτομα (People Definitions)
- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό, 18 *Watt* (Lights Definitions)
- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών, 1680 *Watt* (Electric Equipment Definitions)

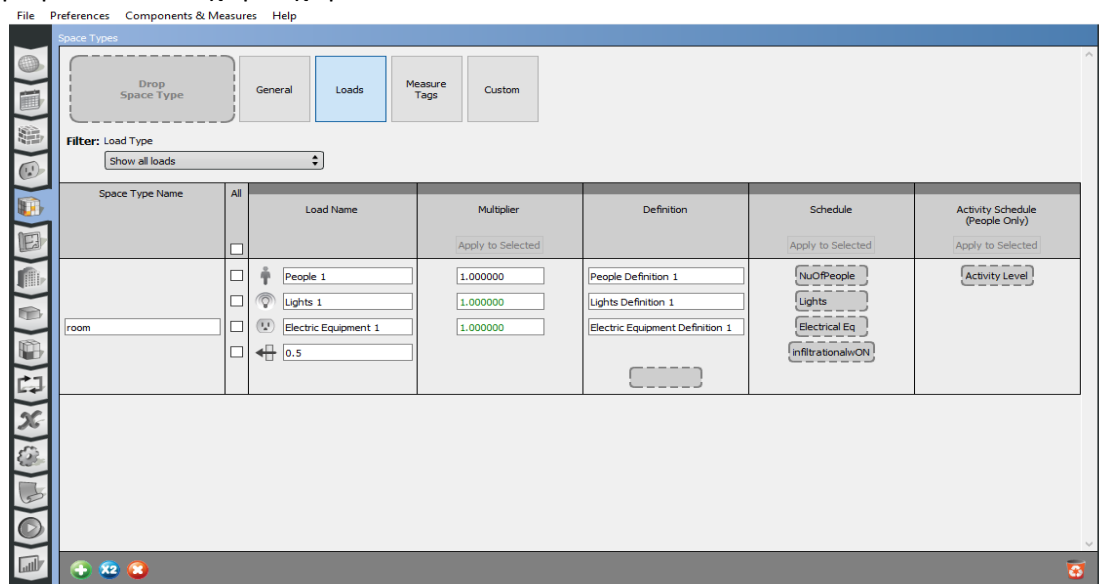
Πιο συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι στο υπό μελέτη κτίριο οι συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι:

Πίνακας 2.6: Κατανάλωση ενέργειας συσκευών γραφείου.

Εξοπλισμός	Ονομαστική ισχύς (Watts)
4 × Desktop Computer	240
4 × 17" LCD Display	150
1 × Desktop Laser Printer	120
<b>Συνολική κατανάλωση</b>	<b>1680</b>

### 2.2.6 Δημιουργία και προσδιορισμός χώρων κτιρίου

Στην επόμενη καρτέλα του λογισμικού OpenStudio, πραγματοποιείται μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες για τη σωστή και ολοκληρωμένη μοντελοποίηση του κτιρίου. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργούνται οι χώροι του εκάστοτε κτιρίου, αντικαθιστώντας, τις αντίστοιχες κατασκευές, τα χρονοδιαγράμματα και τα φορτία που έχουν προηγουμένως παραχθεί. Επιπλέον, γίνεται ορισμός του αερισμού του κάθε χώρου χωριστά.



Εικόνα 2.9: Καρτέλα δημιουργίας Spaces κτιρίου

Στην Εικόνα 2.9 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο χώρος του υπό μελέτη κτιρίου. Για τη σωστή μοντελοποίηση του κτιρίου έχει γίνει αντικατάσταση των χρονοδιαγραμμάτων που κατασκευάστηκαν, καθώς και της ανθρώπινης δραστηριότητας στο εσωτερικό του κτιρίου, που αφορά τον αριθμό των ατόμων τη χρήση των ηλεκτρικών συσκευών αλλά και το φωτισμό. Επιπλέον, στην στήλη με την ονομασία Load Name (Ονομασία Φορτίων), έχει ορισθεί ο αερισμός του κτιρίου ως 0.5 *ach*.

## 2.2.7 Προσδιορισμός κατασκευών και ορισμός θερμικών ζωνών

### **Facility (Εγκατάσταση)**

Στην καρτέλα Εγκατάσταση πραγματοποιείται ένας εκ νέου προσδιορισμός των κατασκευών που έχουν δημιουργηθεί για το κτίριο, καθώς και των χρονοδιαγραμμάτων. Στην καρτέλα αυτή είναι δυνατό να δηλωθούν τυχόν διαφοροποιήσεις για τους ορόφους του εκάστοτε κτιρίου, καθώς και τυχόν εξοπλισμός σκίασης ή άλλου είδους εξωτερικός εξοπλισμός.

### **Spaces (Χώροι)**

Μέσω της καρτέλας Spaces πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των χώρων του κτιρίου μέσω του λογισμικού Sketch Up.

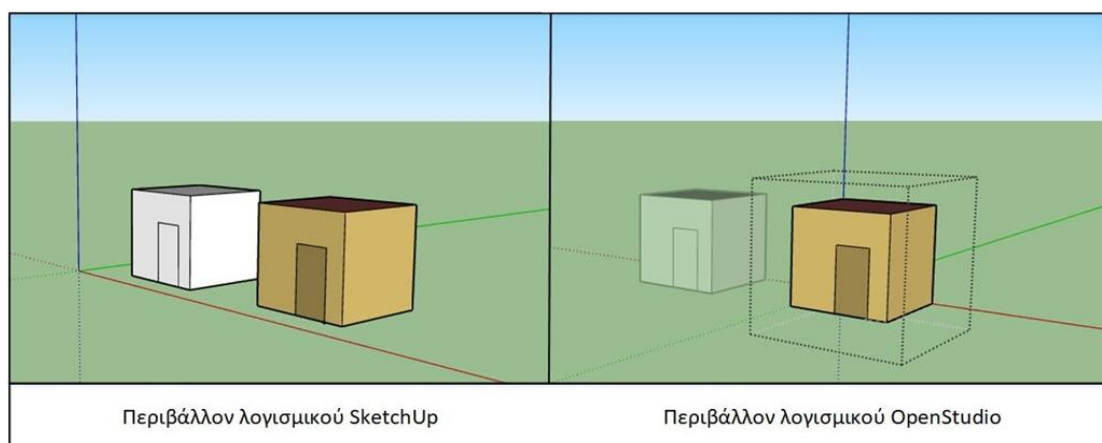
### **Thermal Zones (Θερμικές Ζώνες)**

Όπως η καρτέλα Spaces, έτσι και η καρτέλα Thermal Zones, ρυθμίζονται μέσω του περιβάλλοντος του λογισμικού Sketch Up. Η λειτουργία της καρτέλας Thermal Zones είναι ο ορισμός των θερμικών ζωνών στο εκάστοτε μοντέλο. Οι θερμικές ζώνες συνήθως διαφοροποιούνται ανάλογα με τον όροφο των κτιρίων, αλλά και με τη λειτουργία τους. Δηλαδή, η διαφορετική χρήση του κάθε χώρου μπορεί να διαφοροποιηθεί με τη χρήση διαφορετικών θερμικών ζωνών, με σκοπό την πιο λεπτομερή μοντελοποίηση του εκάστοτε κτιρίου.

## 2.3 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Sketch Up

### 2.3.1 Σχεδιασμός γεωμετρίας του κτιρίου

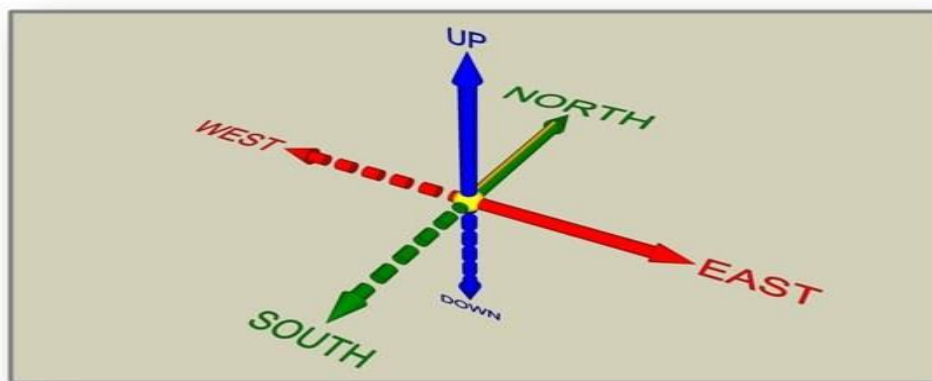
Ο σχεδιασμός του αρχικού κτιρίου πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Sketch Up αλλά σε περιβάλλον OpenStudio. Δηλαδή ο σχεδιασμός του κτιρίου πραγματοποιήθηκε σε μια άλλη διάσταση του περιβάλλοντος του λογισμικού Sketch Up αυτή του OpenStudio. Στην Εικόνα 2.10, παρουσιάζεται η διαφοροποίηση των δυο διαστάσεων στο περιβάλλον του λογισμικού Sketch Up.



Εικόνα 2.10: Αριστερά παρουσιάζεται η γεωμετρία σε περιβάλλον Sketch Up, ενώ δεξιά σε περιβάλλον OpenStudio.

Η διαφοροποίηση των δύο περιβαλλόντων, είναι διακριτή και από τους χρωματισμούς του κτιρίου σε κάθε περίπτωση. Κατά τη σχεδίαση με το λογισμικό Sketch Up, το κτίριο δεν αποκτά διαφορετικές αποχρώσεις ανάλογα με την επιφάνεια που έχει σχεδιαστεί. Σε αντίθετη περίπτωση, το λογισμικό OpenStudio αναγνωρίζει τις διαφορετικές επιφάνειες όταν αυτές σχεδιάζονται και τις αναπαριστά με διαφορετικό χρώμα. Επομένως, η μοντελοποίηση του κτιρίου θα γίνει μόνο σε περιβάλλον OpenStudio. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι οι άξονες που παρουσιάζονται ακολουθούν την παρακάτω δομή (Εικόνα 2.11).





Εικόνα 2.11: Άξονες προσανατολισμού στο λογισμικό Sketch Up και Openstudio.

Με την πράσινη διακεκομμένη γραμμή ορίζεται ο Νότος, με τη συνεχόμενη πράσινη γραμμή ο Βορράς, ενώ η συνεχόμενη κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στην ανατολή και τέλος, η διακεκομμένη κόκκινη στη δύση. Η γραμμές μπλε χρώματος ορίζουν την τρίτη διάσταση.

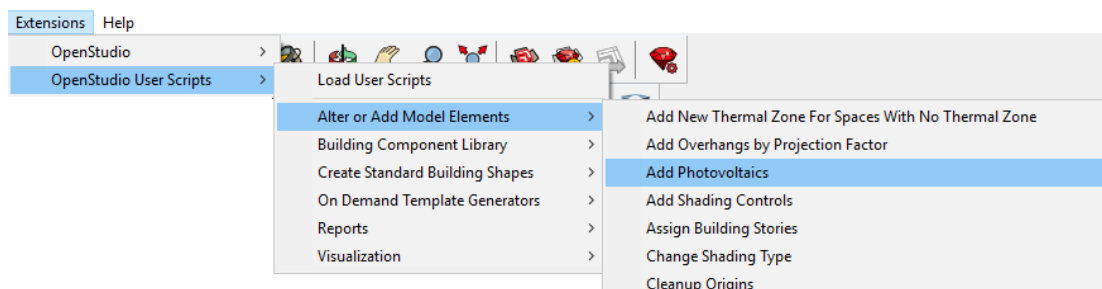
### 2.3.2 Δημιουργία θερμικών ζωνών (Thermal Zones) και Χώρων (Spaces)

Όπως προαναφέρθηκε στην περιγραφή του λογισμικού OpenStudio παραπάνω, ο ορισμός των θερμικών ζωνών και των διαφορετικών χώρων πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ευκολία μέσω του περιβάλλοντος του OpenStudio-Sketch Up.

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο OpenStudio Inspector, προσδιορίζονται οι διαφορετικοί χώροι σε ένα κτίριο, αντιστοιχίζοντας τις κατασκευές του, τα χρονοδιαγράμματά του καθώς και την ονομασία του. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δημιουργία νέου χώρου (Space) κάθε φορά και βάση αυτού πραγματοποιείται και ο καθορισμός των θερμικών ζωνών.

### 2.3.3 Δημιουργία επιφανειών για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Sketch Up σε συνδυασμό με το OpenStudio και το Energy Plus.



Εικόνα 2.12: Μεθοδολογία προσθήκης φωτοβολταϊκών πλαισίων.

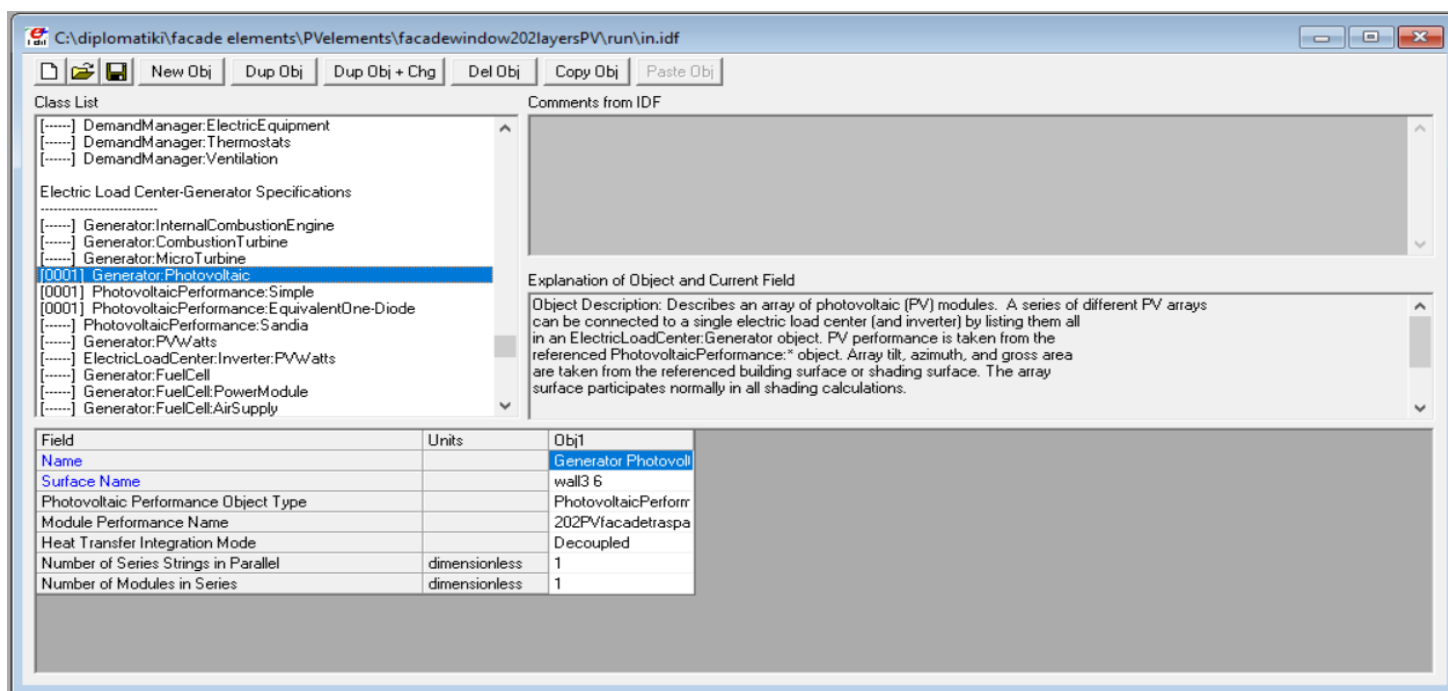
Μέσω της επιλογής Add Photovoltaics ο χρήστης έχει τη δυνατότητα προσθήκης φωτοβολταϊκού πάνελ επιλέγοντας, το κλάσμα της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς και την απόδοση τους. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία τοποθετήθηκαν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία στη συνέχεια τροποποιήθηκαν μέσω του Energy Plus.

## 2.4 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό EnergyPlus

### 2.4.1 Εισαγωγή στο λογισμικό Energy Plus

Η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν στα κτήρια (BIPV) αποτελεί μια διαδικασία, η οποία απαιτεί λεπτομερείς και αρκετά πολύπλοκους υπολογισμούς. Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση των ΦΒΕΚ είναι το Energy Plus, το οποίο προέρχεται από τα προγράμματα BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2, τα οποία αναπτύχθηκαν κατά τη δεκαετία του 1970 μέχρι και τις αρχές του 1980 (Duffie, 1991). Το Energy Plus δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει λεπτομερείς πληροφορίες για το εκάστοτε φωτοβολταϊκό με τη χρήση των επιλογών του μενού Generator: Photovoltaic. Η πρώτη επιλογή PhotovoltaicPerformance: Simple, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει φωτοβολταϊκά πλαίσια, ορίζοντας την απόδοση του πλαισίου αλλά και τη συνολική επιφάνεια που καλύπτεται από φωτοβολταϊκά κύτταρα. Με τη δεύτερη επιλογή PhotovoltaicPerformance: EquivalentOne-Diode, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο θέτοντας το είδος του υλικού από το οποίο έχει κατασκευαστεί, την επιφάνειά του, παραμέτρους που αφορούν ιδιότητες του ρεύματος που το διαρρέει αλλά και παράγει, καθώς και μεταβλητές που αφορούν τη θερμοκρασία του. Ο τρόπος μοντελοποίησης που προαναφέρθηκε ονομάζεται μοντέλο 4 ή 5 μεταβλητών, καθώς το λογισμικό έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τις υπολειπόμενες μεταβλητές προσεγγιστικά με σκοπό τον προσδιορισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η επιλογή PhotovoltaicPerformance: Sandia, αποτελεί τον πιο λεπτομερή και ίσως ακριβή τρόπο μοντελοποίησης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, λόγω του μεγάλου όγκου μεταβλητών που αξιοποιεί.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.12) παρουσιάζεται το περιβάλλον του λογισμικού Energy Plus, στο οποίο γίνεται ο ορισμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αρχικά, ορίζουμε το όνομα της εκάστοτε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, στη συνέχεια, προσδιορίζεται η επιφάνεια στην οποία εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Έπειτα, είναι πολύ σημαντικό να γίνει η σωστή επιλογή του μαθηματικού μοντέλου, στο οποίο έχει δημιουργηθεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τέλος, ορίζεται ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά, αλλά, και εκείνα τα οποία είναι παράλληλα.



Εικόνα 2.13: Περιβάλλον λογισμικού Energy Plus, κατά τη μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### 2.4.2 Περιγραφή μοντέλου Photovoltaic Performance: Simple (U.S. Department of Energy, 2018)

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιείται για την απλοποιημένη προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ως μεταβλητές εισόδου δέχεται, την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το ποσοστό των επιφανειών με ενεργά φωτοβολταϊκά κύτταρα καθώς και άλλες παραμέτρους οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη.

#### 2.4.3 Περιγραφή μοντέλου Photovoltaic Performance: Equivalent One-Diode (U.S. Department of Energy, 2018)

Για την μοντελοποίηση των ΦΒΕΚ, έγινε χρήση του μοντέλου προσομοίωσης Photovoltaic Performance: Equivalent One-Diode. Με τη χρήση του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου, γίνεται προσδιορισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί ένα φωτοβολταϊκό να παράγει. Το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιείται και στο λογισμικό TRYNSYS για την μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών πλαισίων. Από μαθηματικής άποψης, το μοντέλο χρησιμοποιεί εμπειρικές εξισώσεις, για τον προσδιορισμό των I-V χαρακτηριστικών ενός πλαισίου. Το κύκλωμα το οποίο περιγράφεται αποτελείται, από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, μια δίοδο και έναν ή δύο αντιστάτες. Η ισχύς της πηγής ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ τα χαρακτηριστικά στοιχεία I-V του φωτοβολταϊκού αποτελούν μεταβλητές οι οποίες εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από την προσομοίωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της απόδοσης πολλαπλών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Για την μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων (μονοκρυσταλλικών, πολυκρυσταλλικών), χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα ένα ισοδύναμο κύκλωμα 'τεσσάρων παραμέτρων'. Οι μεταβλητές οι οποίες χρησιμοποιούνται δεν μπορούν να ληφθούν απευθείας από τους καταλόγους των κατασκευαστών και για το λόγο αυτό υπολογίζονται από το πρόγραμμα. Επιπλέον, το μοντέλο διαθέτει έναν συντελεστή διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης, ο οποίος συσχετίζει το βαθμό απόκλισης της ανακλαστικής επιφάνειας του φωτοβολταϊκού με τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται προσδιορισμός του φωτοβολταϊκού ρεύματος, συναρτήσει της τάσης του φορτίου. Άλλα αποτελέσματα περιλαμβάνουν, την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο καθώς και την τάση στα άκρα του, τιμές που αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V, επιπλέον προσδιορίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος.

#### 1. Μαθηματική περιγραφή μοντέλου

##### Μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων

Το μαθηματικό μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων, θεωρεί ότι η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V μηδενίζεται κατά την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Δηλαδή:

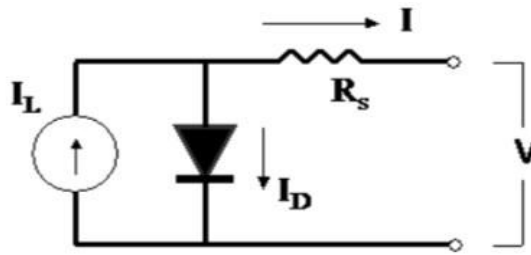
$$\lambda = \left( \frac{dI}{dV} \right)_{V=0} = 0 \text{ Εξίσωση 2.1}$$

Όπου λ: η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V

$dI$ : η μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης

$dV$ : η μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος

Οι τέσσερις παράμετροι στο μαθηματικό μοντέλο παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 2.14), και αποτελούν εμπειρικές τιμές οι οποίες δεν μπορούν να ληφθούν από πειραματικές μετρήσεις. Το λογισμικό Energy Plus υπολογίζει τις μεταβλητές αυτές, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τους καταλόγους των κατασκευαστών. Ο υπολογισμός τους θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Εικόνα 2.14: Κύκλωμα μαθηματικού μοντέλου τεσσάρων παραμέτρων (U.S. Department of Energy, 2018).

Όπου οι μεταβλητές που αναγράφονται στο παραπάνω κύκλωμα αντιστοιχούν:

- $V$ : στην τάση του φορτίου ( $V$ )
- $I$ : στο ρεύμα που διαρρέει το φωτοβολταϊκό ( $A$ )
- $I_L$ : το φωτοηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το φωτιζόμενο Φ/Β στοιχείο ( $A$ )
- $R_s$ : η ωμική αντίσταση της διόδου όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ( $\Omega$ )
- $I_D$ : το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο ( $A$ )

Για τον προσδιορισμό της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τις συνθήκες λειτουργίας, το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές που αφορούν τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον όπως για παράδειγμα τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τη θερμοκρασία του πλαισίου κλπ., αλλά και τις τιμές των τεσσάρων παραμέτρων  $I_{L,ref}$ ,  $I_{0,ref}$ ,  $\gamma$ ,  $R_s$ , σχεδιάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη  $I$ - $V$ .

Για τον υπολογισμό της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος θα χρησιμοποιηθεί η παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$I = I_L - I_0 \times \left[ \exp\left(\frac{q}{\gamma \times k \times T_c} (V + I \times R_s)\right) - 1 \right] \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

Όπου  $R_s$  και  $\gamma$  αποτελούν σταθερές. Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα  $I_L$  εξαρτάται γραμμικά από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_L = I_{L,ref} \times \frac{G_T}{G_{T,ref}} \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Στην παραπάνω εξίσωση η μεταβλητή  $G_T$  αντιστοιχεί στη συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην φωτοβολταϊκή επιφάνεια, ενώ η τιμή  $G_{T,ref}$  αντιστοιχεί στην τιμή αναφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας και αντιστοιχεί σε  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Η τιμή της μεταβλητής  $I_0$  εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία και προκύπτει από την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left( \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad \text{Εξίσωση 2.4}$$

Όπου  $T_c$ : η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε  $^{\circ}K$

$T_{c,ref}$ : η θερμοκρασία αναφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε  $^{\circ}K$

Με την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτει η τιμή του ρεύματος και της τάσης.

### Υπολογισμός μεταβλητών $I_{0,ref}$ , $I_{L,ref}$ , $\gamma$ και $R_s$

Το αρχείο idf του λογισμικού για την προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου περιλαμβάνει επιπλέον μεταβλητές οι οποίες μπορούν να αντληθούν από τους καταλόγους των κατασκευαστών. Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεταβλητών του ισοδύναμου κυκλώματος  $I_{0,ref}$ ,  $I_{L,ref}$ ,  $\gamma$  και  $R_s$ . Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Σε αυτή την υποενότητα θα αναλυθούν οι αλγεβρικές εξισώσεις, καθώς και ο υπολογιστικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των τεσσάρων αυτών παραμέτρων. Τρεις από τις παραπάνω μεταβλητές μπορούν να απομονωθούν αλγεβρικά, αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.2 τις τιμές του ρεύματος  $I$  και της τάσης  $V$  με:

- Τις τιμές της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$

$$0 = I_{L,ref} - I_{0,ref} \times \left[ \exp\left(\frac{q}{\gamma \times k \times T_{c,ref}} V_{oc,ref}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad \text{Εξίσωση 2.5}$$

- Τις τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$

$$V_{oc,ref} = I_{sc,ref} \times R_s \quad \text{Εξίσωση 2.6}$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 2.6 στη 2.5 προκύπτει:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \times \left[ \exp\left(\frac{q \times I_{sc,ref} \times R_s}{\gamma \times k \times T_{c,ref}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad \text{Εξίσωση 2.7}$$

- Τις τιμές της τάσης και του ρεύματος για συνθήκες μέγιστης ισχύος  $I_{mp}$  και  $V_{mp}$  αντίστοιχα

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \times \left[ \exp\left(\frac{q}{\gamma \times k \times T_{c,ref}} \times (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \times R_s)\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \times R_s}{R_{sh}} \quad \text{Εξίσωση 2.8}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος (-1) μπορεί να απλοποιηθεί. Η προσέγγιση αυτή έχει μικρή επιρροή στο δεξί μέλος της εξίσωσης. Με ορισμένες απλοποιήσεις και αλλαγές προκύπτουν οι παρακάτω τρεις σχέσεις οι οποίες δίνουν τις τιμές των  $I_{0,ref}$ ,  $I_{L,ref}$ ,  $\gamma$ .

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad \text{Εξίσωση 2.9}$$

$$\gamma = \frac{q \times (V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} \times R_s)}{k \times T_{c,ref} \times \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad \text{Εξίσωση 2.10}$$

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q \times V_{oc,ref}}{\gamma \times k \times T_{c,ref}}\right)} \quad \text{Εξίσωση 2.11}$$

Η τιμή της αντίστασης του κυκλώματος μπορεί να υπολογιστεί από εξισώσεις του λογισμικού είτε να δοθεί από το χρήστη με βάσει τα στοιχεία που προκύπτουν από τους καταλόγους των κατασκευαστών.

## Υπολογισμός θερμοκρασίας φωτοβολταϊκού πλαισίου

Κατά τη μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε πέντε τρόπους υπολογισμού της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο πλαίσιο κατά τη λειτουργία του. Η θερμοκρασία του πλαισίου αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο καθώς όσο η θερμοκρασία του πάνελ αυξάνεται τόσο μειώνεται η απόδοσή του.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα στις παρακάτω επιλογές:

- **Decouple, Decouple Ulleberg Dynamic**

Αν ο χρήστης επιλέξει για παράμετρο Decouple τότε η θερμοκρασία των κυττάρων του φωτοβολταϊκού μοντελοποιείται με βάση την μέθοδο των Duffie και Beckman (1991). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις τιμές των ονομαστικών θερμοκρασιών λειτουργίας NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του κυττάρου  $T_c$  για κάθε χρονική περίοδο. Η NOCT θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού για ταχύτητα ανέμου  $1 \text{ m/s}$ , χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρικού φορτίου και με συγκεκριμένη ηλιοφάνεια καθώς και καθορισμένη θερμοκρασία περιβάλλοντος (2). Η τιμή της ηλιοφάνειας ( $G_{T,NOCT}$ ) είναι συνήθως  $800 \text{ W/m}^2$  ενώ, η τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ( $T_{a,NOCT}$ ) αντιστοιχεί σε  $20^\circ\text{C}$ . Επομένως η τιμή της θερμοκρασίας του κυττάρου προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$T_c = T_a + \frac{(1-\frac{\eta_c}{\tau\alpha})}{(\frac{G_T \times \tau\alpha}{U_L})} \text{ Εξίσωση 2.12}$$

Όπου  $\eta_c$ : Η απόδοση του μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος

$\tau\alpha$ : Η τιμή της διαπερατότητας-απορρόφησης, σταθερά που ορίζεται από το χρήστη

Κατά την επιλογή της παραμέτρου Decouple Ulleberg Dynamic για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται η παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$T_{cell}|_t = T_{ambient} + (T_{cell}|_{t-1} - T_{ambient}) \times \exp\left(\frac{-U_L}{cap} \times \Delta t\right) \text{ Εξίσωση 2.13}$$

Πιο απλά η θερμοκρασία είναι μια συνάρτηση της προηγούμενης θερμοκρασίας και της θερμοχωρητικότητας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το φωτοβολταϊκό.

- **Integrated Surface Outside Face**

Κατά την επιλογή αυτής της παραμέτρου, η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου θα ταυτίζεται με τη θερμοκρασία που προκύπτει από υπολογισμούς του λογισμικού. Επιπλέον, η ακτινοβολία που εκπέμπει το πλαίσιο προστίθεται στα θερμικά φορτία του κτιρίου.

- **Integrated Transpired Collector**

Αν ο χρήστης επιλέξει τη συγκεκριμένη παράμετρο τότε η θερμοκρασία του πλαισίου θα ταυτίζεται με τη θερμοκρασία των ημιδιαφανών επιφανειών του κτιρίου.

- **Integrated Exterior Vented Cavity**

Με την επιλογή Integrated Exterior Vented Cavity η θερμοκρασία του πλαισίου ταυτίζεται με τη θερμοκρασία των υλικών του κελύφους του κτιρίου

#### 2.4.4 Δημιουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν διαφορετικά σενάρια εγκατάστασης ΦΒΕΚ, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ανάλογα με την χρήση η οποία πρόκειται να γίνει. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι τα Solarblock της εταιρίας SBskin. Επίσης μελετήθηκαν φωτοβολταϊκά άμορφου και κρυσταλλικού πυριτίου που κατασκευάζονται από την εταιρία Onyx Solar, η οποία δραστηριοποιείται στο χώρο της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών παγκοσμίως.

Ανάλογα με την επιθυμητή χρήση, επιλέχθηκαν και διαφορετικά φωτοβολταϊκά, των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στον πρώτο πίνακα (Πίνακας 2.7) που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πολυκρυσταλλικού πυριτίου τα οποία μελετήθηκαν, ανάλογα με τη επιφάνειά τους.

Πίνακας 2.7: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, Πηγή:(Product Manual, 2011).

Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου			
Χαρακτηριστικά	0.70 (m <sup>2</sup> )	1.40 (m <sup>2</sup> )	1.70 (m <sup>2</sup> )
Αριθμός κυττάρων σε σειρά	16	36	60
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	7.93	8.45	8.45
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V)	10	22	37
Ισχύ αιχμής (Wp)	64	145	241
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο αιχμής (A)	7.93	7.93	7.93
Ηλεκτρική τάση στο σημείο αιχμής (V)	8	18	30
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (%/°C)	+0.045	+0.08	+0.08
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (%/°C)	-0.35	-0.361	-0.361
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (°C)	40	40	40

Στη συνέχεια ακολουθούν συγκεντρωτικοί πίνακες (Πίνακας 2.8, Πίνακας 2.9), στους οποίους αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου, με διαπερατότητα 20% και 30% αντίστοιχα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως τα παραπάνω φωτοβολταϊκά αποτελούνται από ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, καθώς πρόκειται για φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου (thin film).



Πίνακας 2.8: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20%, Πηγή: (Product Manual, 2011).

<b>Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20%</b>		
<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>0.37 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1.55 (m<sup>2</sup>)</b>
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	0.97	0.97
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V)	23	97
Ισχύ αιχμής (Wp)	13	53
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο αιχμής (A)	0.79	0.79
Ηλεκτρική τάση στο σημείο αιχμής (V)	16	67
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (%/°C)	+0.09	+0.09
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (%/°C)	-0.28	-0.28
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (°C)	40	40

Πίνακας 2.9: Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 30%, Πηγή: (Product Manual, 2011).

<b>Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 30%</b>		
<b>Χαρακτηριστικά</b>	<b>0.37 (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1.55 (m<sup>2</sup>)</b>
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	0.77	0.77
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V)	23	97
Ισχύ αιχμής (Wp)	10	44
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο αιχμής (A)	0.65	0.65
Ηλεκτρική τάση στο σημείο αιχμής (V)	16	65
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης (%/°C)	+0.09	+0.09
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος (%/°C)	-0.28	-0.28
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (°C)	40	40

Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των Solar Blocks, τα οποία προέρχονται από δεδομένα της κατασκευαστικής εταιρίας SBkin.



Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά SolarBlock, Πηγή:{SBskin Smart Building Skin}.

Χαρακτηριστικά SolarBlock	
Όνομα φωτοβολταϊκού	SolarBlock
Απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου (%)	4
Διαστάσεις Solarblock (m)(LxHxb)	0.192x0.192x0.078
Ισχύ αιχμής ( $W_p$ )	0.75

Όπως γνωρίζουμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC), ενώ στο δίκτυο διανέμεται εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC). Για το λόγο αυτό απαιτείται η χρήση inverter ο οποίος αποτελεί ένα σύστημα ισχύος, που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η απόδοση ενός inverter είναι αρκετά υψηλή (93%-98%). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα σενάρια, στα οποία μοντελοποιήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιήθηκε inverter απόδοσης 93%. Ο inverter μέσω του Energy plus χρησιμοποιώντας το μοντέλο ElectricLoadCenter:Inverter:Simple, όπου δέχεται ως δεδομένα το όνομα που ορίζουμε καθώς και την απόδοσή του.

## 2.5 Στάδιο 2<sup>ο</sup>:Περιγραφή μεθοδολογίας για το κτίριο K1

Για τη μοντελοποίηση του κτιρίου K1 ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία που περιεγράφηκε παραπάνω. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν πίνακες με τα χρονοδιαγράμματα του κτιρίου, τα υλικά κατασκευής, αλλά και τα θερμικά φορτία του κτιρίου τα οποία προκύπτουν από την ανθρώπινη δραστηριότητα στο χώρο.

## 2.6 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Openstudio

### 2.6.1 Ορισμός τοποθεσίας

Το κτίριο K1 βρίσκεται εντός της Πολυτεχνειούπολης του νομού Χανίων, στο δήμο Ακρωτηρίου. Το αρχείο καιρού το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση είναι το ίδιο με εκείνο του κτιρίου στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας.

### 2.6.2 Ορισμός χρονοδιαγραμμάτων (Schedules)

Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα χρονοδιαγράμματα (Πίνακας 2.11), με βάση τα οποία λειτουργεί το κτίριο. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των χρονοδιαγραμμάτων έχει γίνει με βάση το χειρότερο σενάριο σε ότι αφορά την κατανάλωση ενέργειας στο κτίριο. Τα χρονοδιαγράμματα που περιγράφονται παρακάτω, είναι χωρισμένα, ανάλογα με το τον κάθε χώρο που έχει οριστεί.

Πίνακας 2.11: Χρονοδιαγράμματα Εργαστηρίων, γραφείων και αίθουσας συνεδριάσεων.

Είδος Χώρου	Χρονοδιάγραμμα		Τιμή
	Ημέρες	Ώρες	
<b>Εργαστήρια δύο ατόμων</b>  <b>Εργαστήρια πέντε ατόμων</b>  <b>Γραφεία τεσσάρων ατόμων</b>  <b>Γραφεία ενός ατόμου</b>  <b>Αίθουσα Συνεδριάσεων</b>	Αερισμός Χώρου		
	Δευ-Κυρ	24 ώρες	100%
	Φωτισμός Κτιρίου		
	Δευ-Παρ	8:00-12:00	50%
		12:00-16:30	30%
		16:30-20:00	80%
		20:00-8:00	10%
	Χρήση Ηλεκτρικών Συσκευών		
	Δευ-Παρ	8:00-12:00	70%
		12:00-16:30	100%
		16:30-8:00	10%
	Ανθρώπινη Δραστηριότητα		
	Δευ-Παρ	8:00-16:30	120 W/person

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με τα χρονοδιαγράμματα των κοινόχρηστων χώρων του κτιρίου (Πίνακας 2.12).

Πίνακας 2.12: Χρονοδιαγράμματα κοινόχρηστων χώρων.

Είδος Χώρου	Χρονοδιάγραμμα		Τιμή
	Ημέρες	Ώρες	
Κοινόχρηστοι χώροι	Αερισμός Χώρου		
	Δευ-Κυρ	24 ώρες	100%
	Φωτισμός Κτιρίου		
	Δευ-Παρ	8:00-12:00	50%
		12:00-16:30	30%
		16:30-20:00	80%
		20:00-8:00	10%
	Χρήση Ηλεκτρικών Συσκευών		
	Δευ-Κυρ	24 ώρες	0%
	Ανθρώπινη Δραστηριότητα		
	Δευ-Παρ	8:00-16:30	120 W/person

Τέλος, παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας για όλους τους χώρους, που αφορά τον αριθμό των ατόμων (Πίνακας 2.13).

Πίνακας 2.13: Χρονοδιάγραμμα ποσοστού αριθμού ατόμων.

Είδος Χώρου	Χρονοδιάγραμμα		Τιμή
	Ημέρες	Ώρες	
Εργαστήρια δύο ατόμων	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%
Εργαστήρια πέντε ατόμων	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%
Γραφεία τεσσάρων ατόμων	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%
Γραφεία ενός ατόμου	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%
Αίθουσα Συνεδριάσεων	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%
Κοινόχρηστοι χώροι	Δευ-Παρ	8:00-16:30	100%

Στον πίνακα 2.13 οι τιμές που παρουσιάζονται ως ποσοστά, αφορούν το ποσοστό του αριθμού των ατόμων που έχει οριστεί<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Για παράδειγμα, σε ένα γραφείο που εργάζονται δυο άτομα, το ποσοστό 100% αντιπροσωπεύει την ύπαρξη και των δυο ατόμων στο χώρο. Αν το ποσοστό ήταν 50% τότε στο ίδιο παράδειγμα θα είχαμε ένα άτομο.

### 2.6.3 Ορισμός κατασκευαστικών υλικών

Μετά τον καθορισμό των χρονοδιαγραμμάτων θα γίνει καθορισμός των υλικών κατασκευής του κτιρίου τα οποία παρουσιάζονται ανάλογα με το είδος της κατασκευής στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.14).

Πίνακας 2.14: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται το ισόγειο του κτιρίου Κ1.

Ισόγειο κτιρίου		
Εξωτερική τοιχοποιία	Υλικό	Διάσταση
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Σκυρόδεμα	200 mm
Εσωτερική τοιχοποιία	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
Πάτωμα ισογείου	Μάρμαρο	25 mm
	Σκυρόδεμα	150 mm
Παράθυρα	Τζάμι	3 mm
	Αέρας	13 mm
	Τζάμι	3 mm

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο πρώτος όροφος του κτιρίου στον οποίο στεγάζονται κυρίως γραφεία (Πίνακας 2.15).

Πίνακας 2.15: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο πρώτος όροφος του κτιρίου Κ1.

Πρώτος όροφος κτιρίου		
Εξωτερική τοιχοποιία	Υλικό	Διάσταση
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Αέρας	50 mm
	Τσιμεντοσανίδα	12 mm
Εσωτερική τοιχοποιία	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
Πάτωμα ορόφου	Μάρμαρο	25 mm
	Σκυρόδεμα	150 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Πλάκες οροφής	19 mm
Παράθυρα	Τζάμι	3 mm
	Αέρας	13 mm
	Τζάμι	3 mm

Έπειτα, καταγράφονται τα υλικά κατασκευής του δευτέρου ορόφου του κτιρίου (Πίνακας 2.16) και στον πίνακα 2.17 τα υλικά κατασκευής του θόλου του κτιρίου.

Πίνακας 2.16: Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο δεύτερος όροφος του κτιρίου K1.

Δεύτερος όροφος κτιρίου		
	Υλικό	Διάσταση
Εξωτερική τοιχοποιία	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Αέρας	50 mm
	Τσιμεντοσανίδα	12 mm
Εσωτερική τοιχοποιία	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
Πάτωμα ορόφου	Μάρμαρο	25 mm
	Σκυρόδεμα	150 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Πλάκες οροφής	19 mm
Οροφή κτιρίου	Πλάκες οροφής	19 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
	Τσιμεντοσανίδα	12 mm
	Σκυρόδεμα	200 mm
Παράθυρα	Τζάμι	3 mm
	Αέρας	13 mm
	Τζάμι	3 mm

Πίνακας 2.17:Υλικά κατασκευών από τις οποίες αποτελείται ο θόλος του κτιρίου K1.

Θόλος κτιρίου		
	Υλικό	Διάσταση
Εξωτερική τοιχοποιία	Ανεπίχριστο σκυρόδεμα	18 mm
Εσωτερική τοιχοποιία	Γυψοσανίδα	18 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Γυψοσανίδα	18 mm
Πάτωμα θόλου	Μάρμαρο	25 mm
	Σκυρόδεμα	150 mm
	Μόνωση με αέρα	50 mm
	Πλάκες οροφής	19 mm
Παράθυρα	Τζάμι	3 mm
	Αέρας	13 mm
	Τζάμι	3 mm
Οροφή θόλου	Αλουμίνιο	1000 mm

#### 2.6.4 Ορισμός φορτίων κτιρίου

Τα φορτία του κτιρίου ορίσθηκαν με τον ίδιο τρόπο που δημιουργήθηκαν και για το κτίριο μικρότερης κλίμακας. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε η αντικατάσταση των παρακάτω φορτίων σε κάθε διαφορετικό χώρο (space).

Πίνακας 2.18: Φορτία κτιρίου K1.

Χώροι (Spaces)	Αριθμός ατόμων	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για φωτισμό (W)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών (W)
Εργαστήρια	2 ή 5	18	500
Γραφεία	4 ή 1	18	500
Κοινόχρηστοι Χώροι	-	18	-

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πραγματικές τιμές των συνολικών φορτίων υπολογίζονται ανάλογα με τα χρονοδιαγράμματα που έχουμε κατασκευάσει.

#### 2.6.5 Δημιουργία και προσδιορισμός χώρων κτιρίου

Το κτίριο K1 χωρίζεται σε διαφορετικά διαμερίσματα ανάλογα με τη χρήση τους. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω χώροι.

Πίνακας 2.19: Χώροι κτιρίου K1.

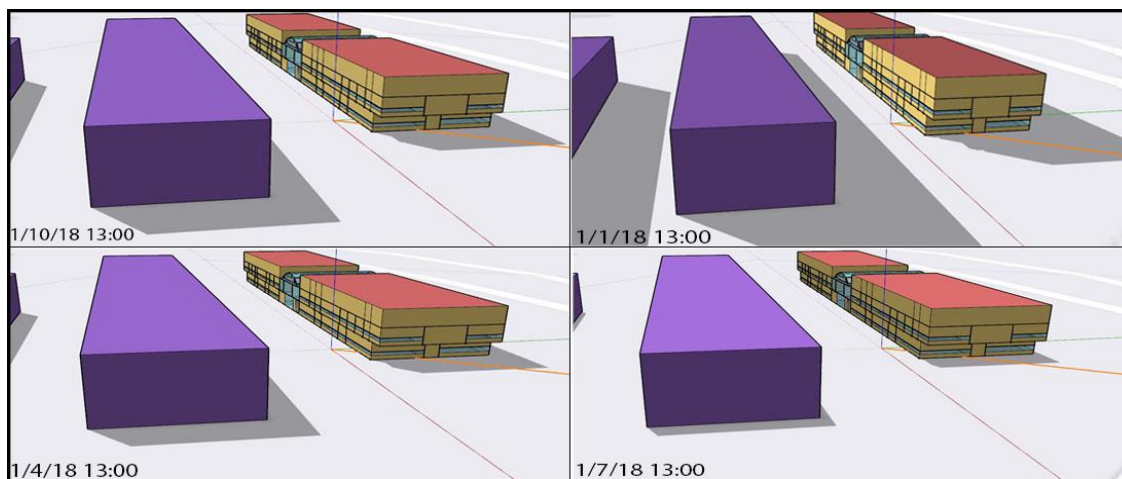
Χώροι	Αριθμός Χώρων
Εργαστήρια	16
Γραφεία	14
Κοινόχρηστοι Χώροι	32

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι καρτέλες των κατασκευών και των θερμικών φορτίων ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με το κτίριο μικρής κλίμακας.

#### 2.7 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό Sketch Up

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι για τη γεωμετρία του κτιρίου χρησιμοποιήθηκε έτοιμο μοντέλο, το οποίο είχε δημιουργηθεί στα πλαίσια μαθήματος του κύκλου σπουδών. Συνεπώς, τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν ήταν αρχικά η μελέτη σκίασης για τον έλεγχο της σκίασης και της αυτοσκίασης του κτιρίου, καθώς και η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαϊσίων.

Κατά τη δεύτερη φάση όπου μελετήθηκε το κτίριο K1, για την σωστή και αποδοτική εγκατάσταση των πλαϊσίων, πραγματοποιήθηκε μελέτη προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες επιφάνειες εγκατάστασης τους. Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τις επιφάνειες αυτές, πραγματοποιήθηκε παρακολούθηση της σκίασης από το διπλανό κτίριο (κτίριο K2), αλλά και της αυτοσκίασής του κατά τη διάρκεια του έτους. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.15) παρουσιάζεται ενδεικτικά η σκίαση του κτιρίου για τις 4 διαφορετικές εποχές του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της ώρας έγινε μετά από μελέτη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο. Συνεπώς επιλέχθηκε μια χρονική στιγμή ανάμεσα στο χρονικό διάστημα 11:00-15:00 κατά το οποίο επικρατούσε υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 2.15: Αναπαράσταση αυτοσκίασης κτιρίου K1 και σκίασης του από το κτίριο K2.

## 2.8 Περιγραφή μεθοδολογίας στο λογισμικό EnergyPlus

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο EnergyPlus, αποσκοπούσε στη δημιουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για τη δημιουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2.4.

## 2.9 Περιγραφή σεναρίων που μελετήθηκαν

Σε αυτό το υποκεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν όλα τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν, κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, για την μελέτη του τρόπου λειτουργίας των ΦΒΕΚ. Τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν διαφοροποιούνται ανάλογα με τη χρήση του εκάστοτε φωτοβολταϊκού πλαισίου αλλά και το είδος τους.

Όπως προαναφέρθηκε η μελέτη για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο κτίριο K1 πραγματοποιήθηκε σε δύο βήματα. Για το λόγο αυτό, αρχικά θα παρουσιαστούν τα σενάρια και οι παραδοχές του κτιρίου μικρότερης κλίμακας που σχεδιάσαμε και στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τελικά σενάρια που αφορούν το κτίριο K1.

### 2.9.1 Περιγραφή σεναρίων κτιρίου μικρότερης κλίμακας

Για την καλύτερη αφομοίωση, και κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και μοντελοποίησης των υπό μελέτη φωτοβολταϊκών πλαισίων, δημιουργήσαμε ένα κτίριο μικρής κλίμακας, με τις ιδιότητες ενός γραφείου<sup>3</sup>. Με τον τρόπο αυτό, η δημιουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων ήταν πιο εύκολη και γρήγορη, δίνοντας τη δυνατότητα εξαγωγής συγκρίσιμων στοιχείων μεταξύ των φωτοβολταϊκών. Μελετήθηκαν σενάρια, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά είδη φωτοβολταϊκών. Σκοπός, ήταν η σύγκρισή των αποτελεσμάτων όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια επιλογή των πιο αποδοτικών και συνάμα εύχρηστων φωτοβολταϊκών πλαισίων για να εγκατασταθούν στο κτίριο K1. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετήθηκαν σε επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό, καθώς σε αυτό τον προσανατολισμό τα φωτοβολταϊκά αποδίδουν καλύτερα (ΥΠΕΚΑ, 2009). Τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

<sup>3</sup> Δημιουργήθηκαν δηλαδή συνθήκες λειτουργίας γραφείου, κάνοντας χρήση συγκεκριμένων χρονοδιαγραμμάτων, φορτίων και εξοπλισμού.

### I. Αρχικό Σενάριο: Αρχικό κτίριο γραφείου

Στο αρχικό σενάριο, δημιουργήθηκε κτίριο γραφείου με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 2.2 της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Με βάση το αρχικό σενάριο αντλήθηκαν δεδομένα τα οποία αφορούν τις ενεργειακές ανάγκες για ηλεκτρισμό του κτιρίου, οι οποίες αποτέλεσαν και παράμετρο σύγκρισης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

### II. Σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση Solarblock στο νότιο τοίχο του κτιρίου

Κατά το δεύτερο σενάριο τοποθετήθηκαν Solarblock στο νότιο τοίχο του κτιρίου. Η συστοιχία των SolarBlock αποτελείται από δέκα σειρές και πέντε στήλες και καλύπτει μια επιφάνεια 1.84 m<sup>2</sup>. Στον πίνακα 2.17 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των Solarblock στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2.20: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South Wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
5	Number of Series Strings in Parallel
10	Number of Modules in Series

### III. Σενάριο 3<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου

Για το τρίτο σενάριο επιλέχθηκε η εγκατάσταση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων στο κτίριο ακολουθώντας τον ίδιο προσανατολισμό με το δεύτερο σενάριο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία επιλέχθηκαν έχουν δύο βαθμούς διαπερατότητας, 20% και 30%. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στους πίνακες 2.8, 2.9.

#### a. Σενάριο 3a: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 20% διαπερατότητα

Σε αυτό το σενάριο τοποθετήθηκαν τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα συνεπώς το μοντέλο του Generator:Photovoltaic διαμορφώνεται ως εξής,

Πίνακας 2.21: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South Wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparent	Module Performance Name
4	Number of Series Strings in Parallel
1	Number of Modules in Series

#### b. Σενάριο 3b: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 30% διαπερατότητα

Κατά τον ίδιο τρόπο προκύπτουν και τα δεδομένα για το ΦΒΕΚ με 30% διαπερατότητα.

Πίνακας 2.22: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 2	Name
South Wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
30transparent	Module Performance Name
4	Number of Series Strings in Parallel
1	Number of Modules in Series



#### IV. Σενάριο 4<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση αδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου

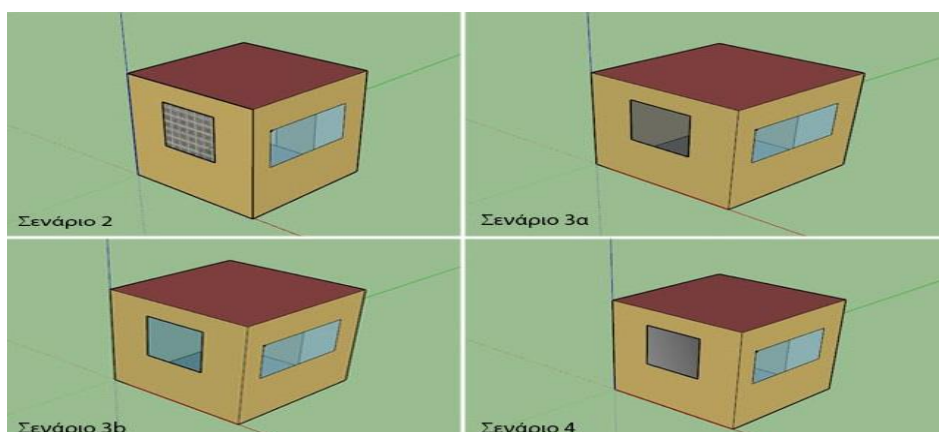
Μετά την τοποθέτηση των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου επιφάνειας 1.7 m<sup>2</sup>. Τα χαρακτηριστικά των πλαισίων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.23: Δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό EnergyPlus.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South Wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
Opaque BiPV	Module Performance Name
4	Number of Series Strings in Parallel
1	Number of Modules in Series

Όπως στα παραπάνω σενάρια έτσι και στα σενάρια που μελετήθηκαν για το κτίριο K1, τοποθετήθηκε συγκεκριμένος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων ανάλογα με τις διαστάσεις των επιφανειών εγκατάστασης. Έτσι προκύπτει για κάθε σενάριο ο αριθμός των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών σε σειρά και παράλληλα.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.16) παρουσιάζονται τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια στα οποία τοποθετήθηκαν ΦΒΕΚ στη νότια όψη του κτιρίου, η πράσινη διακεκομμένη γραμμή ορίζει το Νότο, και συνεπώς τον προσανατολισμό του παραθύρου.



Εικόνα 2.16: Σενάρια τοποθέτησης ΦΒΕΚ στη νότια όψη του κτιρίου.

Με την ολοκλήρωση της παραμετρικής ανάλυσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο κτίριο μικρότερης κλίμακας μελετήθηκε η εγκατάσταση ορισμένων φωτοβολταϊκών στο κτίριο K1 του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το κτίριο αυτό ήταν η αρχιτεκτονική του η οποία επιτρέπει τις επεμβάσεις αυτού του είδους. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του κτιρίου μικρότερης κλίμακας έγινε επιλογή των φωτοβολταϊκών που μελετήθηκαν για εγκατάσταση στο K1.

Στο κτίριο K1 μελετήθηκε η εγκατάσταση των παρακάτω πλαισίων:

- Solarblock απόδοσης 4%
- Ημιδιαφανή ΦΒΕΚ άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20%
- Αδιαφανή ΦΒΕΚ πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Συνοψίζοντας, για το κτίριο μικρότερης κλίμακας μελετήθηκαν τα παρακάτω σενάρια, στα οποία τοποθετήθηκαν και τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Πίνακας 2.24: Συνοπτικός πίνακας σεναρίων για το κτίριο μικρής κλίμακας.

Σενάρια	Solarblock	ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%	ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30%	ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%
Αρχικό κτίριο	-	-	-	-
Σενάριο 2 <sup>ο</sup>	✓	-	-	-
Σενάριο 3 <sup>ο</sup>	α	✓	-	-
	β	-	✓	-
Σενάριο 4 <sup>ο</sup>	-	-	-	✓

## 2.9.2 Περιγραφή σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικού Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης

### I. Αρχικό σενάριο: Αρχική κατάσταση κτιρίου K1 Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

Στο αρχικό σενάριο περιγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κτιρίου στην υπάρχουσα κατάσταση χωρίς την ένταξη φωτοβολταϊκά. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του κτιρίου τα οποία έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 2.6.4.

### II. Σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ στα παράθυρα των γραφείων στη νότια όψη του πρώτου ορόφου του κτιρίου

Κατά το πρώτο σενάριο, τοποθετήθηκαν ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πλαίσια, διαπερατότητας 20%, στα παράθυρα των γραφείων της νότιας όψης του κτιρίου K1. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται όχι μόνο σκίαση του εσωτερικού χώρου του κτιρίου αλλά και ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 106 ΦΒΕΚ, επιφάνειας 0,37 m<sup>2</sup> το καθένα. Το κάθε παράθυρο χωρίστηκε σε μικρότερες επιφάνειες, στις οποίες έγινε εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η υποδιαίρεση των παραθύρων πραγματοποιήθηκε για να γίνει πιο αποδοτικά η μοντελοποίηση των ΦΒΕΚ.

Δημιουργήθηκαν ξεχωριστά Generator:Photovoltaic, ανάλογα με την επιφάνεια του κάθε παραθύρου. Συνεπώς προκύπτουν τρεις κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 2.25: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια <1.5 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
Office window	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparent	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
2	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.26: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια <2.3 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 2	Name
Office window	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparent	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
3	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.27: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για παράθυρα με επιφάνεια  $<4 \text{ m}^2$ .

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 3	Name
Office window	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparent	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
5	Number of Modules in Series

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.17), αναπαρίσταται με γκρι χρώμα στο περιβάλλον Sketch Up τα ΦΒΕΚ τα οποία τοποθετήθηκαν.



Εικόνα 2.17: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στον πρώτο όροφο του κτιρίου.

### III. Σενάριο 3<sup>ο</sup>: Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας της νότιας όψης με Solarblock απόδοσης 4%

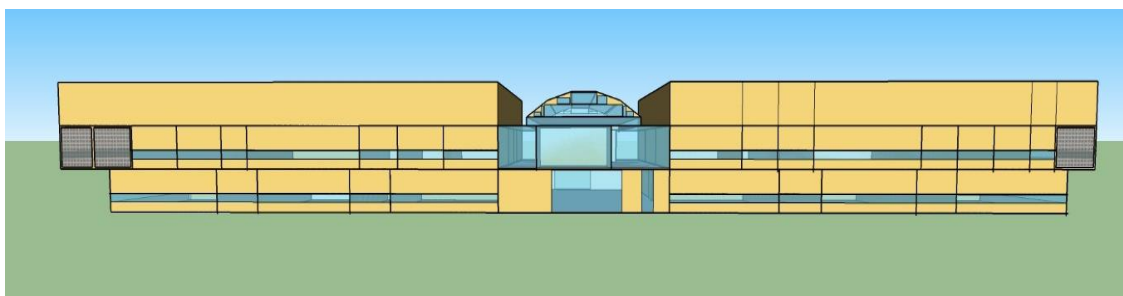
Στο δεύτερο σενάριο πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας της νότιας όψης του κτιρίου με Solarblock. Η συνολική επιφάνεια, η οποία καλύπτεται με Solarblock είναι  $24.11 \text{ m}^2$ . Τα χαρακτηριστικά, των Solarblock παρουσιάζονται στον πίνακα 2.10. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 630 Solarblock διαστάσεων  $L=0.192 \text{ m}$  και  $b=0.192 \text{ m}$ . Τα φωτοβολταϊκά τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές επιφάνειες αντικαθιστώντας μέρος της τοιχοποιίας. Οι επιφάνειες στις οποίες τοποθετήθηκαν τα Solarblock, έχουν εμβαδό  $8.48 \text{ m}^2$ ,  $8.48 \text{ m}^2$  και  $7.15 \text{ m}^2$ . Επομένως, δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά Generator:Photovoltaic, τα οποία παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2.28: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για τοίχο με επιφάνεια  $8.48 \text{ m}^2$ .

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1,2	Name
Solar wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
14	Number of Series Strings in Parallel
16	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.29: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για τοίχο με επιφάνεια  $7.15 \text{ m}^2$ .

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 2	Name
Solar wall	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
14	Number of Series Strings in Parallel
13	Number of Modules in Series



Εικόνα 2.18: Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας στο κτίριο.

#### IV. Σενάριο 4<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση αδιαφανούς ΦΒΕΚ κρυσταλλικού πυριτίου στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου

Όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, τα ΦΒΕΚ τοποθετούνται στις ελεύθερες επιφάνειες των κτιρίων με σκοπό την εκμετάλλευσή τους για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλασιών στην ελεύθερη επιφάνεια της νότιας όψης του δευτέρου ορόφου του κτιρίου Κ1. Τα χαρακτηριστικά των ΦΒΕΚ που τοποθετήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 70 φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, συνολικής επιφάνειας  $146 \text{ m}^2$ , τα οποία εγκαταστάθηκαν αριστερά και δεξιά του θόλου. Στη δεξιά πλευρά τοποθετήθηκαν 34 φωτοβολταϊκά πλαίσια, ενώ αριστερά του θόλου εγκαταστάθηκαν 36 ΦΒΕΚ. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά Generator:Photovoltaic για κάθε μια επιφάνεια.

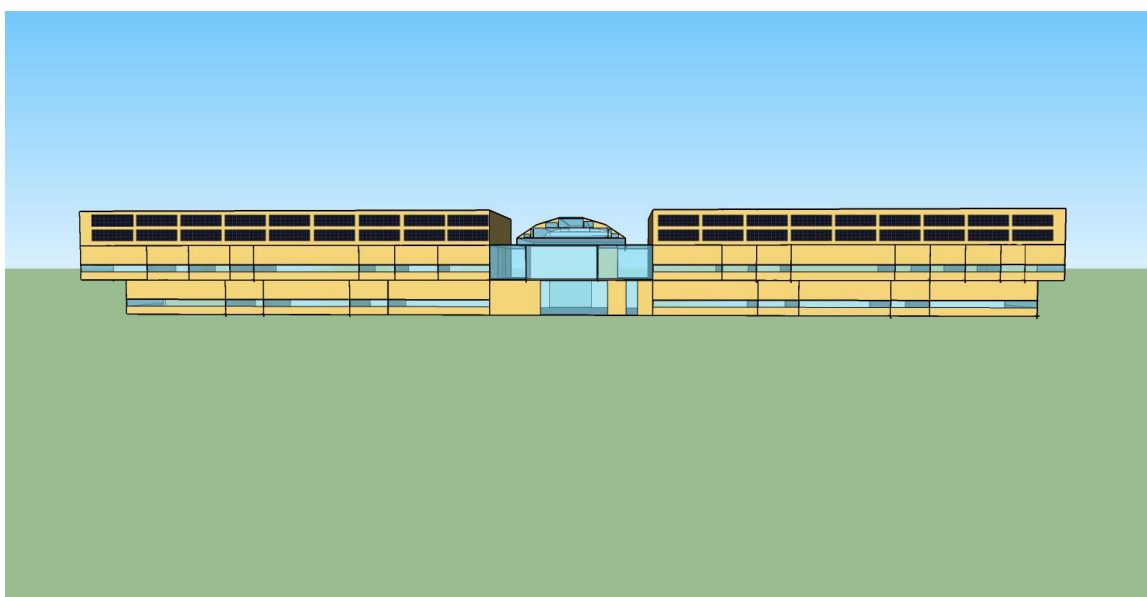
Πίνακας 2.30: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια  $66.47 \text{ m}^2$  δεξιά του θόλου.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South wall second floor	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
OpaqueBiPV R	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
17	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.31: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 79.5 m<sup>2</sup> αριστερά του θόλου.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 2	Name
South wall second floor	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
OpaqueBiPV L	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
18	Number of Modules in Series

Στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζεται η εγκατάσταση των αδιαφανών ΦΒΕΚ στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου του κτιρίου.



Εικόνα 2.19: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου.

### 2.9.3 Περιγραφή συμπληρωματικών σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

Μετά τη ολοκλήρωση της μοντελοποίησης των παραπάνω σεναρίων, κατασκευάστηκαν δυο επιπλέον σενάρια με σκοπό την μελέτη του τρόπου λειτουργίας των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου σε επιφάνειες του κτιρίου. Το 2008, ο φοιτητής Σωτήρης Παπαντωνίου του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του κ. Θεοχάρη Τσούτσου, μελέτησε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία τοποθετήθηκαν στη νότια και βόρεια όψη του θόλου του κτιρίου, στη γυάλινη οροφή του αλλά και σε σκίαστρα τα οποία τοποθετήθηκαν στα παράθυρα της νότιας όψης του πρώτου ορόφου, όπου στεγάζονται γραφεία. Συνεπώς, επιλέχθηκε η μελέτη των παρακάτω σεναρίων.

#### 1. Συμπληρωματικό σενάριο 1<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου

Κατά το πρώτο συμπληρωματικό σενάριο τοποθετήθηκαν ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στην νότια όψη του κτιρίου. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.8. Για την κάλυψη της επιφάνειας του θόλου στη νότια όψη του κτιρίου χρησιμοποιήθηκαν 24 ΦΒΕΚ, ενώ

δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά Generator:Photovoltaic, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 2.32: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 9.2 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparency	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
3	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.33: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 17.94 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 2	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparency	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
5	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.34: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 13.86 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 3	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode	Photovoltaic Performance Object Type
20transparency	Module Performance Name
2	Number of Series Strings in Parallel
4	Number of Modules in Series

## II. Συμπληρωματικό σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση Solarblock στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου

Κατά το δεύτερο συμπληρωματικό σενάριο, εγκαταστάθηκαν Solarblock στη θέση που προηγουμένως είχαν εγκατασταθεί και τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%. Τα Solarblock που χρησιμοποιήθηκαν είναι απόδοσης 4% και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.10. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα Generator:Photovoltaic τα οποία κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 2.35: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 9.2 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
13	Number of Series Strings in Parallel
14	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.36: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 17.94 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
13	Number of Series Strings in Parallel
30	Number of Modules in Series

Πίνακας 2.37: Διαμόρφωση Generator:Photovoltaic για επιφάνεια 13.86 m<sup>2</sup>.

Generator:Photovoltaic	
Generator Photovoltaic 1	Name
South face	Surface Name
PhotovoltaicPerformance:Simple	Photovoltaic Performance Object Type
Solarblock	Module Performance Name
13	Number of Series Strings in Parallel
23	Number of Modules in Series

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.38) παρουσιάζονται συνοπτικά τα σενάρια που μελετήθηκαν για το κτίριο K1.

Πίνακας 2.38: Συνοπτικός πίνακας σεναρίων για το κτίριο K1.

Σενάρια	Solarblock	ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%	ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%
Αρχικό κτίριο K1	-	-	-
Σενάριο 2 <sup>ο</sup>	-	✓	-
Σενάριο 3 <sup>ο</sup>	✓	-	-
Σενάριο 4 <sup>ο</sup>	-	-	✓
Συμπληρωματικό Σενάριο 1	-	✓	-
Συμπληρωματικό Σενάριο 2	✓	-	-



## Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση του κτιρίου μικρότερης κλίμακας, καθώς βάση αυτών πραγματοποιήθηκε η τελική επιλογή των φωτοβολταϊκών που μελετήθηκαν για εγκατάσταση στο κτίριο K1.

### 3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων που μελετήθηκαν για το κτίριο μικρότερης κλίμακας

#### 3.1.1 Αρχικό Σενάριο: Αρχικό κτίριο γραφείου

Η μηνιαία κατανάλωση ρεύματος εξαρτάται από παραμέτρους όπως ο φωτισμός και οι ηλεκτρικές συσκευές. Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται βάση των χρονοδιαγραμμάτων αλλά και της ισχύος των μέσων που χρησιμοποιούνται. Οι ετήσιες απαιτήσεις ηλεκτρισμού για φωτισμό είναι 51.41 kWh, ενώ οι ετήσιες ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη λειτουργία των συσκευών είναι 7382.67 kWh.

Οι συνολικές απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται κλιματισμός για τη θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, είναι το άθροισμα των επιμέρους συνόλων, δηλαδή καταναλώνονται ετησίως 7434.08 kWh.

#### 3.1.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση Solarblock στο νότιο τοίχο του κτιρίου

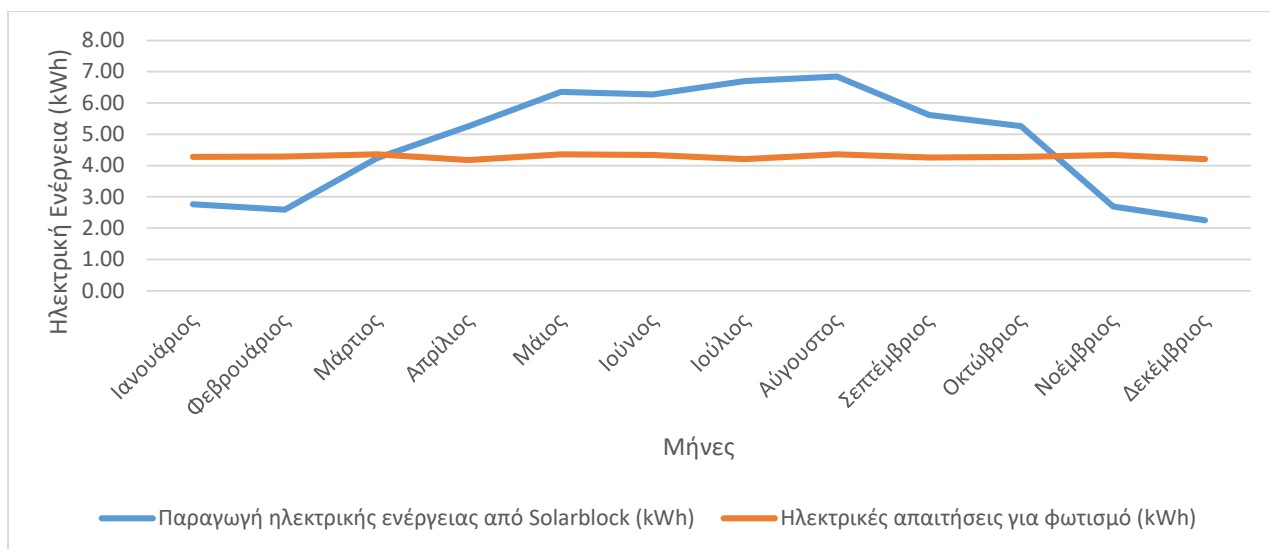
Η ετήσια κατανάλωση ρεύματος παραμένει ίδια για όλα τα σενάρια και δεν μεταβάλλεται. Τα δεδομένα τα οποία αλλάζουν είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.1) παρουσιάζονται τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση, αλλά και το ποσοστό στο οποίο ικανοποιούν τις απαιτήσεις για ηλεκτρισμό.

Πίνακας 3.1: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση Solarblock.

Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	2.76	4.28	614.19	64.62	0.63
Φεβρουάριος	2.59	4.29	616.00	60.48	0.58
Μάρτιος	4.23	4.35	626.84	97.23	0.94
Απρίλιος	5.26	4.18	597.33	125.89	1.22
Μάιος	6.36	4.35	626.84	146.02	1.41
Ιούνιος	6.27	4.33	623.47	144.62	1.40
Ιούλιος	6.71	4.20	601.55	159.59	1.55
Αύγουστος	6.85	4.35	626.84	157.22	1.52
Σεπτέμβριος	5.61	4.26	610.40	131.93	1.28
Οκτώβριος	5.26	4.28	614.19	122.99	1.19
Νοέμβριος	2.69	4.33	623.47	62.00	0.60
Δεκέμβριος	2.26	4.20	601.55	53.70	0.52
Σύνολο	56.85	51.41	7382.67	110.57	12.83

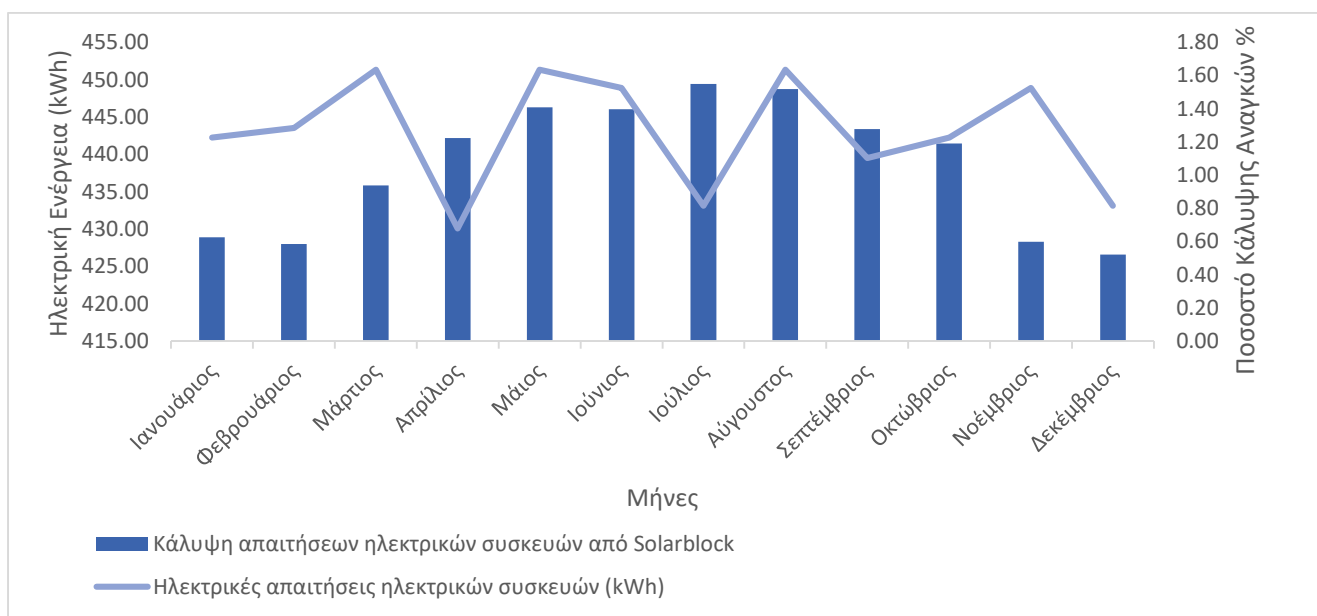
Αρχικά, απεικονίζεται γραφικά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, που παράγουν τα Solarblock.

Στο παρακάτω γράφημα (Διάγραμμα 3.1) παρουσιάζεται η πορεία της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας συγκριτικά με τις απαιτήσεις ηλεκτρικού ρεύματος για φωτισμό.



Διάγραμμα 3.1: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.

Τέλος, στο Διάγραμμα 3.2, φαίνεται γραφικά η κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών από την εγκατάσταση των Solarblock.



Διάγραμμα 3.2: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

### 3.1.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο έτσι και σε αυτό τοποθετήθηκαν ημιδιαφανή ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η δυνατότητα κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών από τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου.

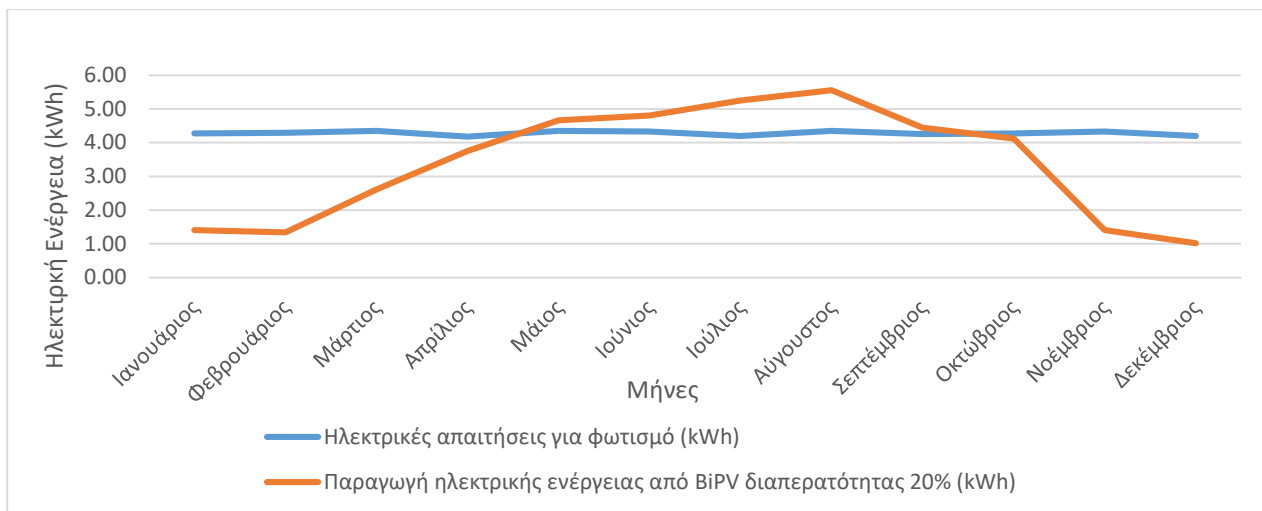
### 3.1.4 Σενάριο 3α: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 20% διαπερατότητα

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%.

Πίνακας 3.2: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%.

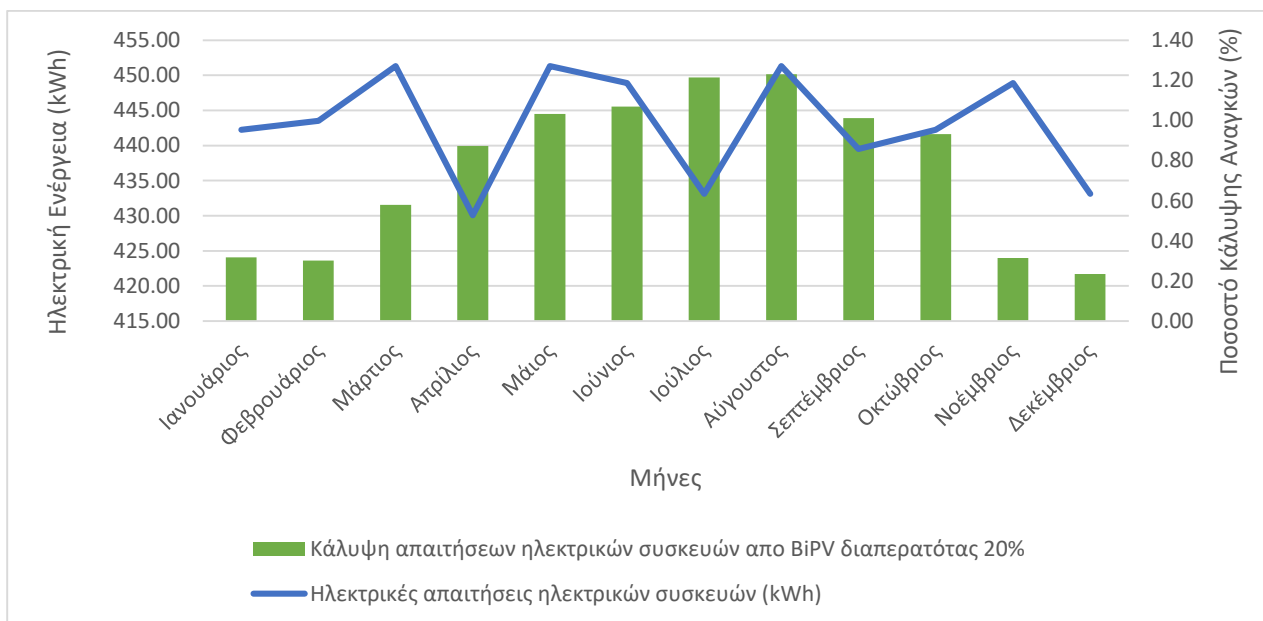
Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	1.40	4.28	614.19	32.80	0.32
Φεβρουάριος	1.34	4.29	616.00	31.23	0.30
Μάρτιος	2.61	4.35	626.84	60.02	0.58
Απρίλιος	3.76	4.18	597.33	89.95	0.87
Μάιος	4.66	4.35	626.84	107.03	1.03
Ιούνιος	4.80	4.33	623.47	110.81	1.07
Ιούλιος	5.26	4.20	601.55	125.11	1.21
Αύγουστος	5.55	4.35	626.84	127.55	1.23
Σεπτέμβριος	4.45	4.26	610.40	104.46	1.01
Οκτώβριος	4.12	4.28	614.19	96.33	0.93
Νοέμβριος	1.41	4.33	623.47	32.49	0.31
Δεκέμβριος	1.02	4.20	601.55	24.18	0.23
Σύνολο	40.38	51.41	7382.67	78.54	0.76

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν διαγράμματα για την αναπαράσταση της μηνιαίας κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου, αλλά και της πορείας τη απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου με διαπερατότητα 20%.



Διάγραμμα 3.3: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.

Έπειτα, παρουσιάζεται γραφικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ημιδιαφανή ΦΒΕΚ σε σχέση με τις ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών συσκευών.



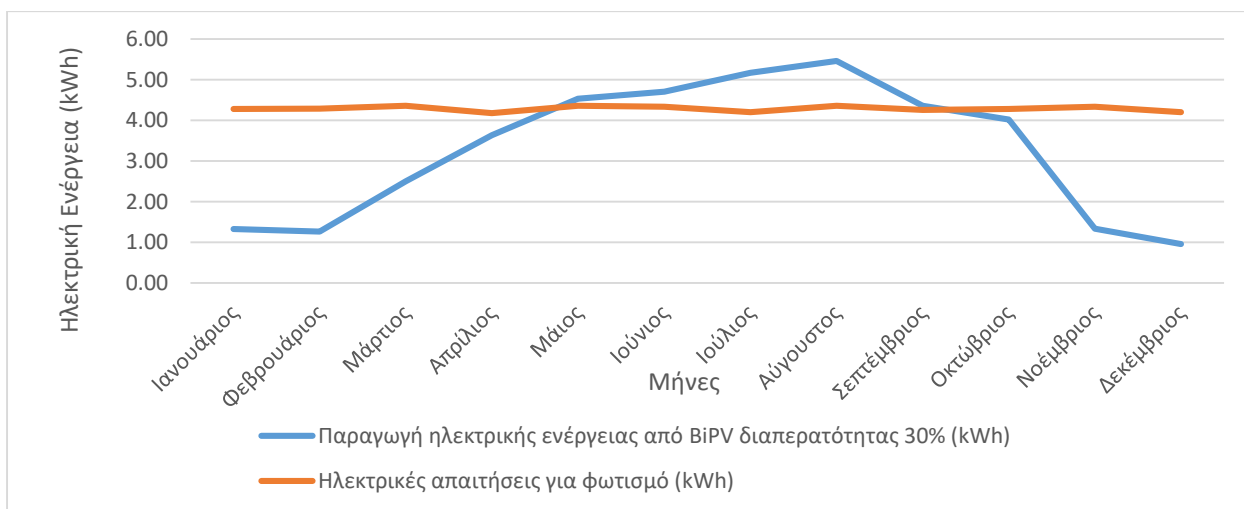
Διάγραμμα 3.4: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

3.1.5 Σενάριο 3b: Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών με 30% διαπερατότητα  
Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30%.

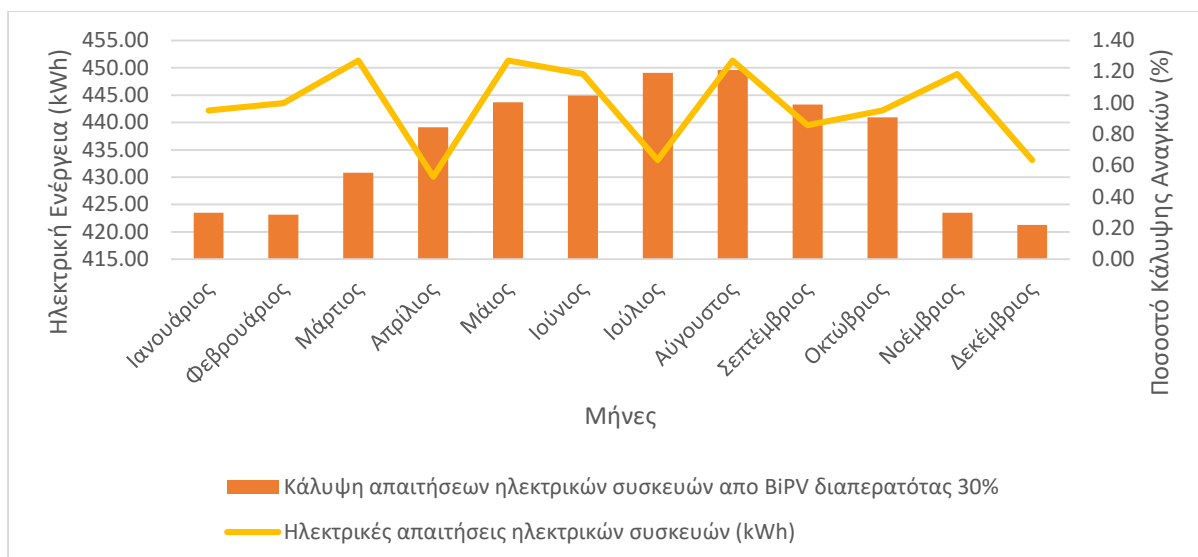
Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30% (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	1.32	4.28	614.19	30.88	0.30
Φεβρουάριος	1.26	4.29	616.00	29.49	0.29
Μάρτιος	2.50	4.35	626.84	57.40	0.55
Απρίλιος	3.63	4.18	597.33	86.97	0.84
Μάιος	4.53	4.35	626.84	104.04	1.00
Ιούνιος	4.70	4.33	623.47	108.52	1.05
Ιούλιος	5.17	4.20	601.55	122.99	1.19
Αύγουστος	5.46	4.35	626.84	125.43	1.21
Σεπτέμβριος	4.35	4.26	610.40	102.33	0.99
Οκτώβριος	4.02	4.28	614.19	93.90	0.91
Νοέμβριος	1.34	4.33	623.47	30.81	0.30
Δεκέμβριος	0.95	4.20	601.55	22.67	0.22
Σύνολο	39.24	51.41	7382.67	76.33	0.74

Στα διαγράμματα 3.5, 3.6 παρουσιάζονται τα δεδομένα που αφορούν τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσοστό κάλυψης των αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών, καθώς και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με διαπερατότητα 30%.



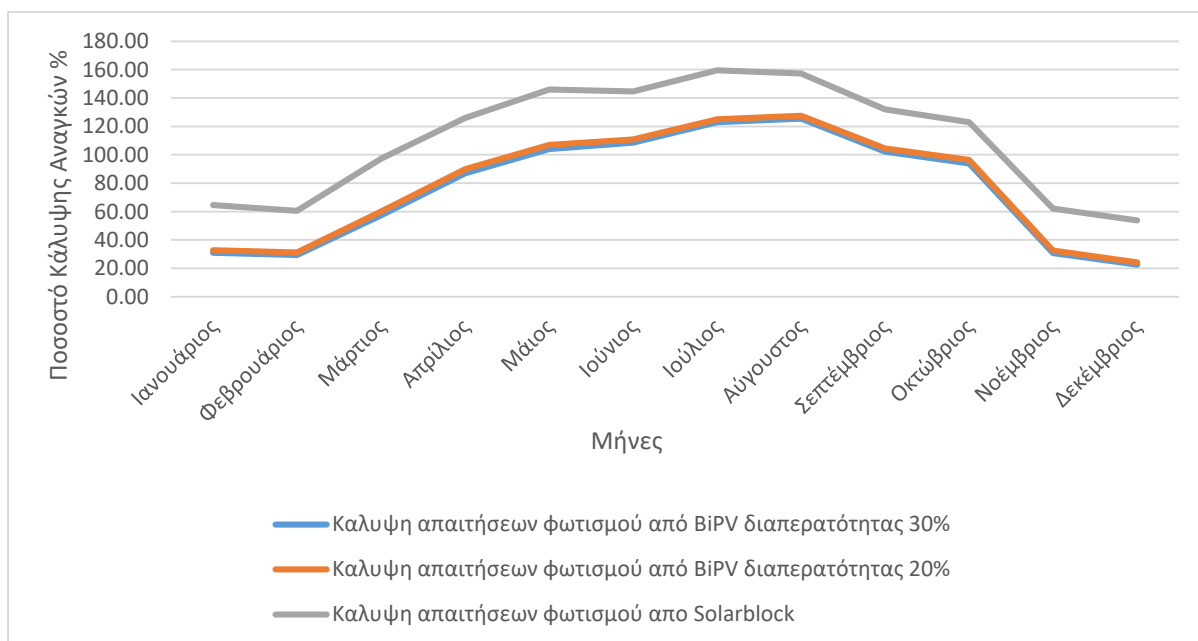
Διάγραμμα 3.5: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 30% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.

Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνεται η διακύμανση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των ενεργειακών απαιτήσεων για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών.

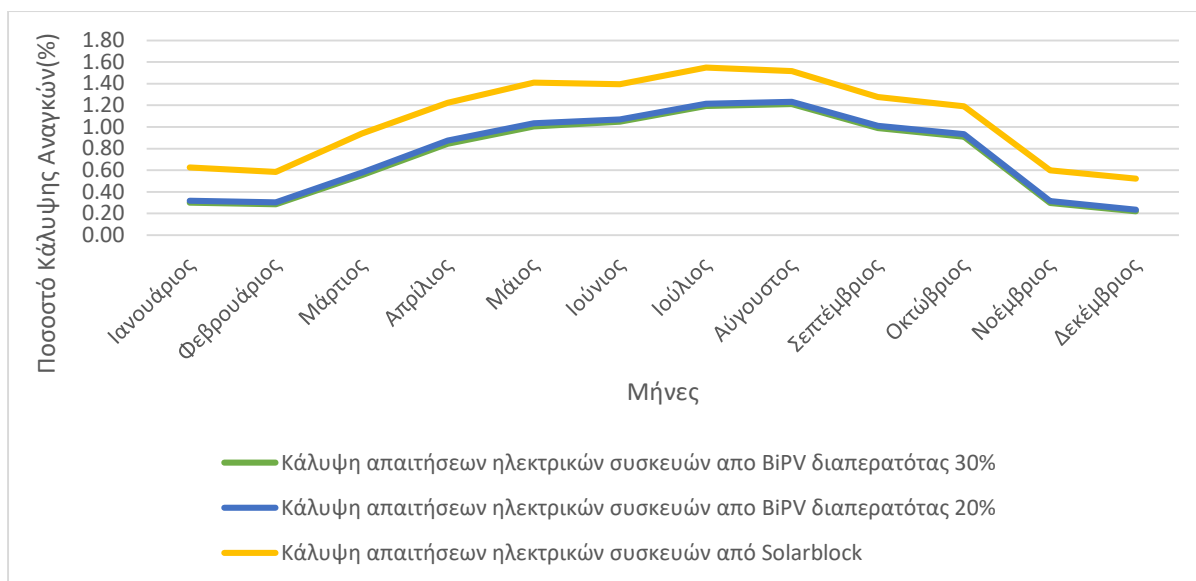


Διάγραμμα 3.6: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

Τέλος, παρουσιάζεται συγκριτικά η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων για φωτισμό και για χρήση ηλεκτρικών συσκευών από τα ημιδιαφανή ΦΒΕΚ.



Διάγραμμα 3.7: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ενεργειακών αναγκών για φωτισμό από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά.



Διάγραμμα 3.8: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ενεργειακών αναγκών για χρήση ηλεκτρικών συσκευών από ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά.

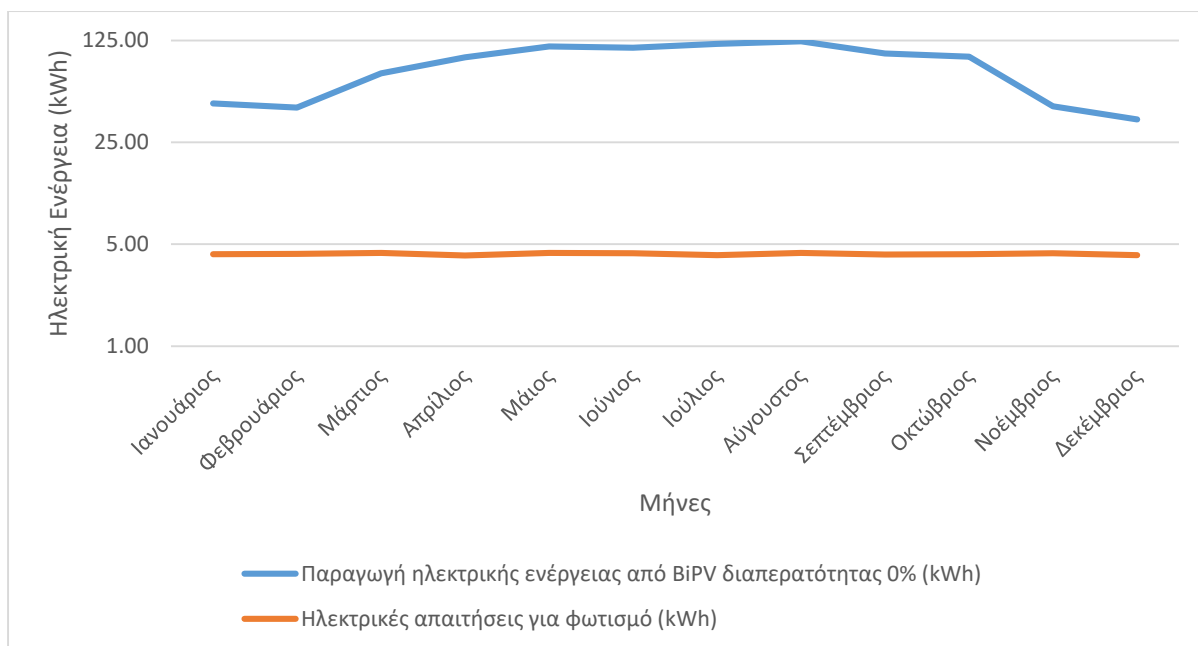
### 3.1.6 Σενάριο 4<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση αδιαφανών ΦΒΕΚ στο νότιο τοίχο του κτιρίου

Πίνακας 3.4: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%

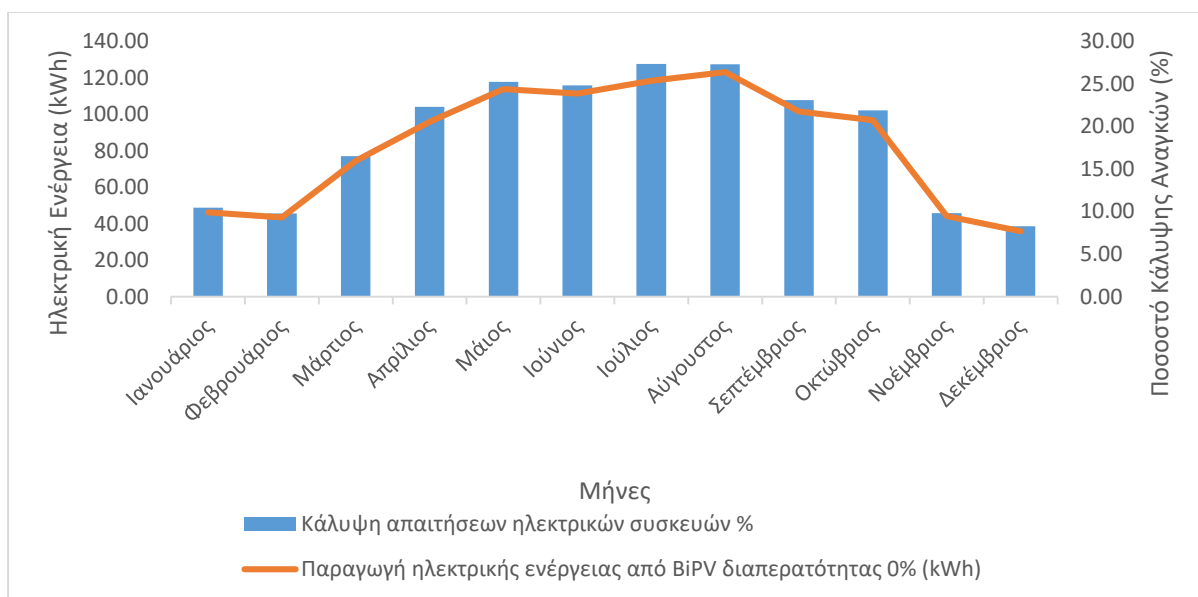
Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	46.26	4.28	614.19	1081.38	10.46
Φεβρουάριος	43.37	4.29	616.00	1011.24	9.78
Μάρτιος	74.48	4.35	626.84	1710.21	16.50
Απρίλιος	95.90	4.18	597.33	2296.36	22.30
Μάιος	113.87	4.35	626.84	2614.89	25.23
Ιούνιος	111.35	4.33	623.47	2569.05	24.81
Ιούλιος	118.36	4.20	601.55	2817.11	27.33
Αύγουστος	123.19	4.35	626.84	2828.75	27.29
Σεπτέμβριος	101.55	4.26	610.40	2386.40	23.11
Οκτώβριος	96.78	4.28	614.19	2262.13	21.88
Νοέμβριος	44.05	4.33	623.47	1016.35	9.81
Δεκέμβριος	35.80	4.20	601.55	852.13	8.27
<b>Σύνολο</b>	<b>1004.97</b>	<b>51.41</b>	<b>7382.67</b>	<b>1954.69</b>	<b>18.91</b>

Με βάση την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατασκευάστηκαν και τα παρακάτω συγκεντρωτικά διαγράμματα των ηλεκτρικών απαιτήσεων, για την ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων.





Διάγραμμα 3.9: Απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.



Διάγραμμα 3.10: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

### 3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων σεναρίων που μελετήθηκαν για το κτίριο K1 του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης

#### 3.2.1 Αρχικό Σενάριο: Αρχικό κτίριο γραφείου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τις απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια για το κτίριο K1.

#### 3.2.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στα παράθυρα των γραφείων στη νότια όψη του πρώτου ορόφου του κτιρίου

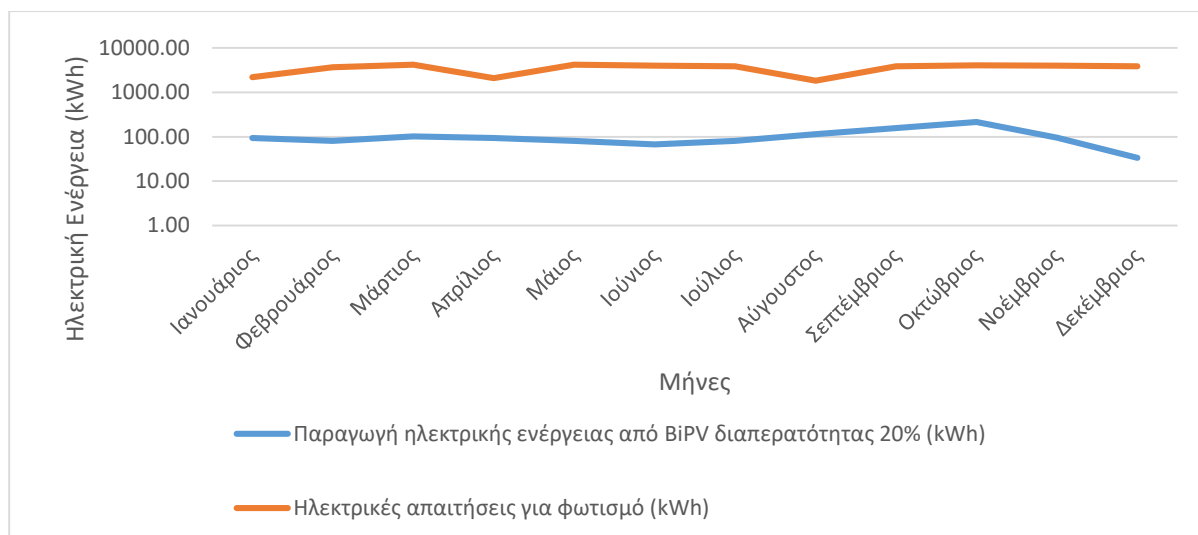
Τοποθετώντας ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά πλαίσια στα παράθυρα των γραφείων του πρώτου ορόφου, στοχεύουμε σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αλλά, και το ποσοστό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών.

Πίνακας 3.5: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%.

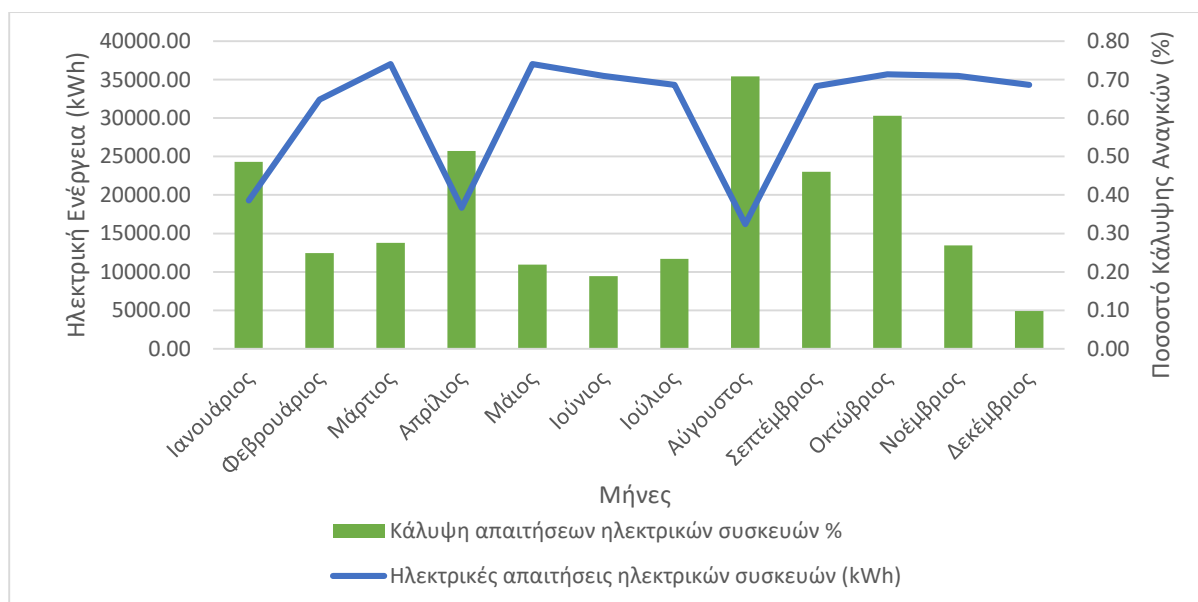
Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	93	2178	19288	4.30	0.49
Φεβρουάριος	80	3660	32406	2.20	0.25
Μάρτιος	102	4183	37035	2.44	0.28
Απρίλιος	94	2070	18328	4.56	0.51
Μάιος	81	4184	37035	1.94	0.22
Ιούνιος	67	4009	35492	1.67	0.19
Ιούλιος	80	3878	34337	2.07	0.23
Αύγουστος	114	1830	16203	6.28	0.71
Σεπτέμβριος	157	3856	34143	4.07	0.46
Οκτώβριος	216	4031	35686	5.36	0.61
Νοέμβριος	95	4009	35492	2.38	0.27
Δεκέμβριος	33	3878	34337	0.87	0.10
Σύνολο	1216	41770	369787	2.91	0.33

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η πορεία της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα εγκατεστημένα ΦΒΕΚ.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο αναφέρονται τα ποσοστά κάλυψης των αναγκών για φωτισμό και για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών.



Διάγραμμα 3.11: Απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.



Διάγραμμα 3.12: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

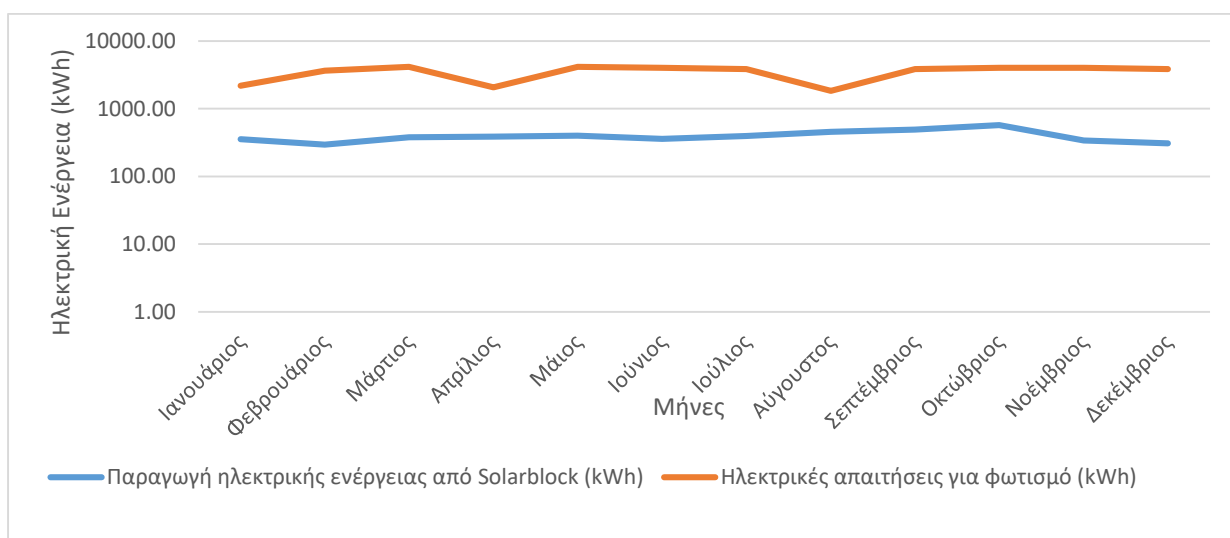
### 3.2.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup>: Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας της νότιας όψης με Solarblock απόδοσής 4%

Η αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας με Solarblock αποτέλεσε το δεύτερο σενάριο το οποίο μελετήθηκε στο κτίριο K1.

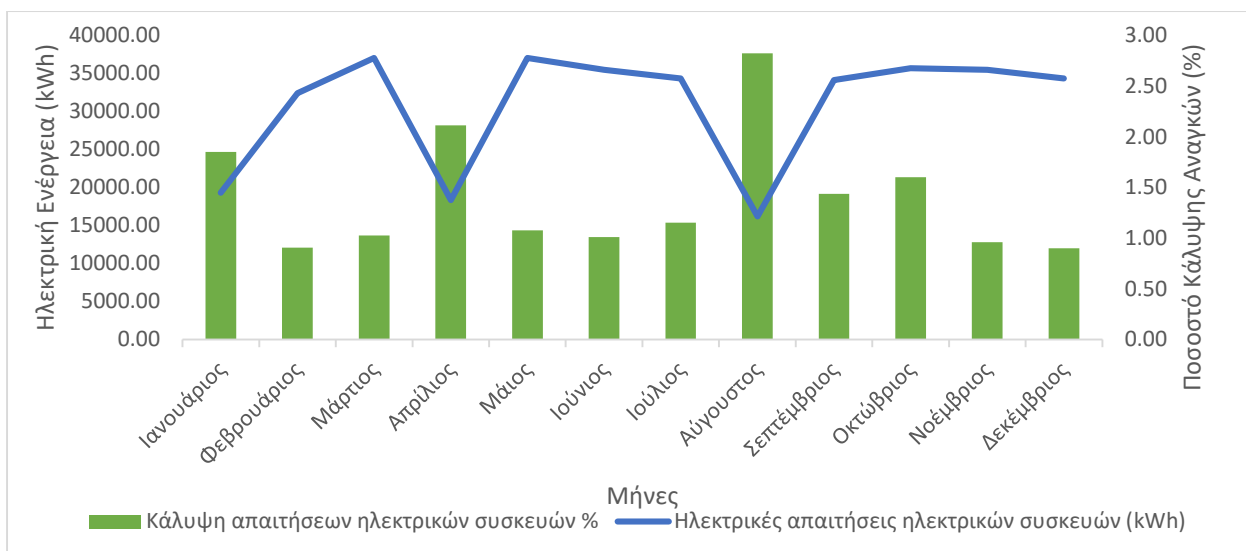
Πίνακας 3.7: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση Solarblock.

Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Solarblock (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	357	2178	19288	16.39	1.85
Φεβρουάριος	294	3660	32406	8.04	0.91
Μάρτιος	380	4183	37035	9.10	1.03
Απρίλιος	387	2070	18328	18.70	2.11
Μάιος	399	4183	37035	9.54	1.08
Ιούνιος	358	4009	35492	8.95	1.01
Ιούλιος	395	3878	34337	10.21	1.15
Αύγουστος	457	1830	16203	24.98	2.82
Σεπτέμβριος	490	36	34143	12.72	1.44
Οκτώβριος	571	4031	35686	14.19	1.60
Νοέμβριος	340	4009	35492	8.49	0.96
Δεκέμβριος	309	3878	34337	7.98	0.90
Σύνολο	4742	41770	369787	11.35	1.28

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν την ενέργεια η οποία παράγεται από τα Solarblock, αλλά τα ποσοστά κάλυψης των ενεργειακών αναγκών.



Διάγραμμα 3.13: Ποσοστά κάλυψης ενεργειακών αναγκών.



Διάγραμμα 3.14: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

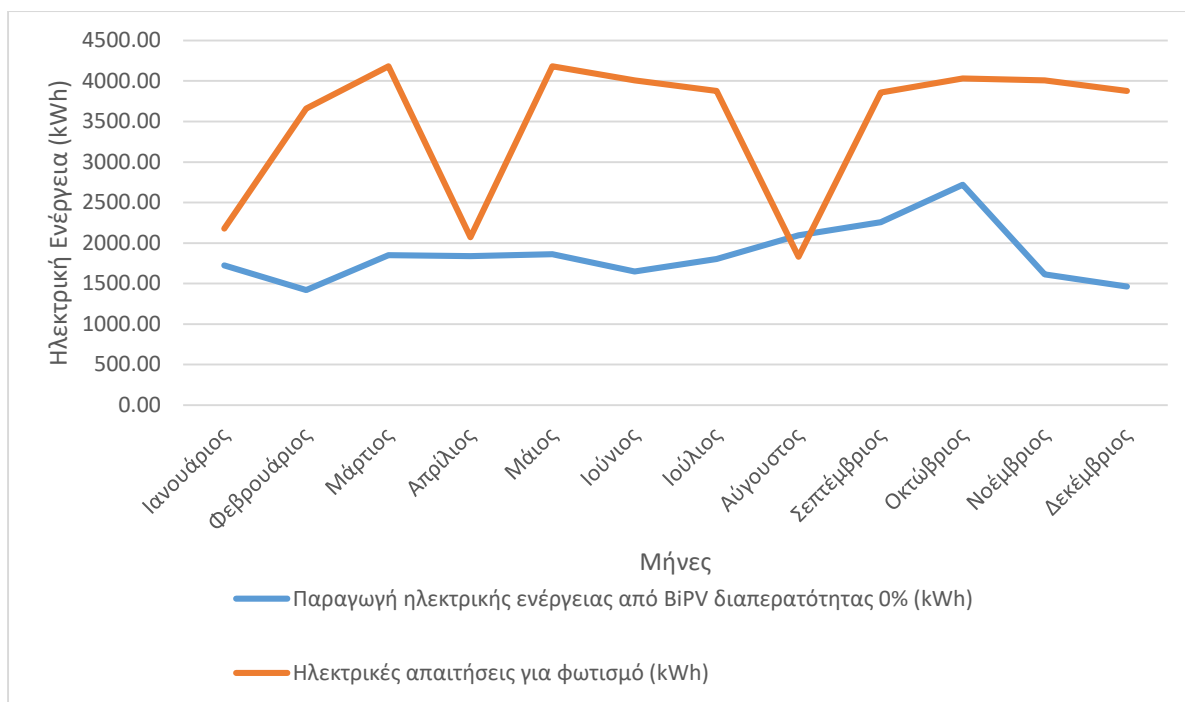
### 3.2.4 Σενάριο 4<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση αδιαφανούς ΦΒΕΚ κρυσταλλικού πυριτίου στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου

Μετά την ανάλυση των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τοποθετήθηκαν αδιαφανή ΦΒΕΚ στη νότια όψη του κτιρίου, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

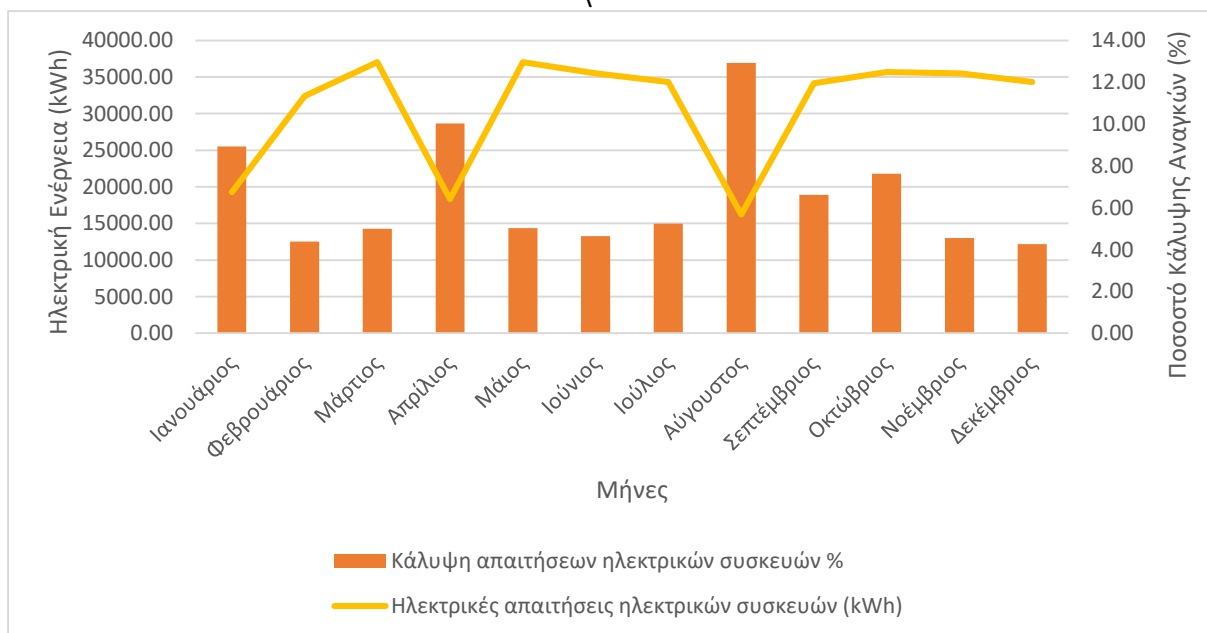
Πίνακας 3.8: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0%.

Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	1723	2178	19288	79.08	8.93
Φεβρουάριος	1418	3660	32406	38.76	4.38
Μάρτιος	1851	4183	37035	44.26	5.00
Απρίλιος	1838	2070	18328	88.80	10.03
Μάιος	1860	4183	37035	44.47	5.02
Ιούνιος	1649	4009	35492	41.14	4.65
Ιούλιος	1801	3878	34337	46.46	5.25
Αύγουστος	2094	1830	16203	114.45	12.93
Σεπτέμβριος	2258	3856	34143	58.56	6.62
Οκτώβριος	2720	4031	35686	67.48	7.62
Νοέμβριος	1614	4009	35492	40.26	4.55
Δεκέμβριος	1462	3878	34337	37.70	4.26
Σύνολο	22294	41770	369787	53.37	6.03

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν διαγράμματα με τις μηνιαίες τιμές τους όπως αναγράφονται στον παραπάνω πίνακα.



Διάγραμμα 3.15: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.



Διάγραμμα 3.16: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

### 3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων συμπληρωματικών σεναρίων κτιρίου K1 τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος

Αφού πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των αρχικών σεναρίων, μελετήθηκαν συμπληρωματικά σενάρια για τον προσδιορισμό της λειτουργίας των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20%.

#### 3.3.1 Συμπληρωματικό σενάριο 1<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου

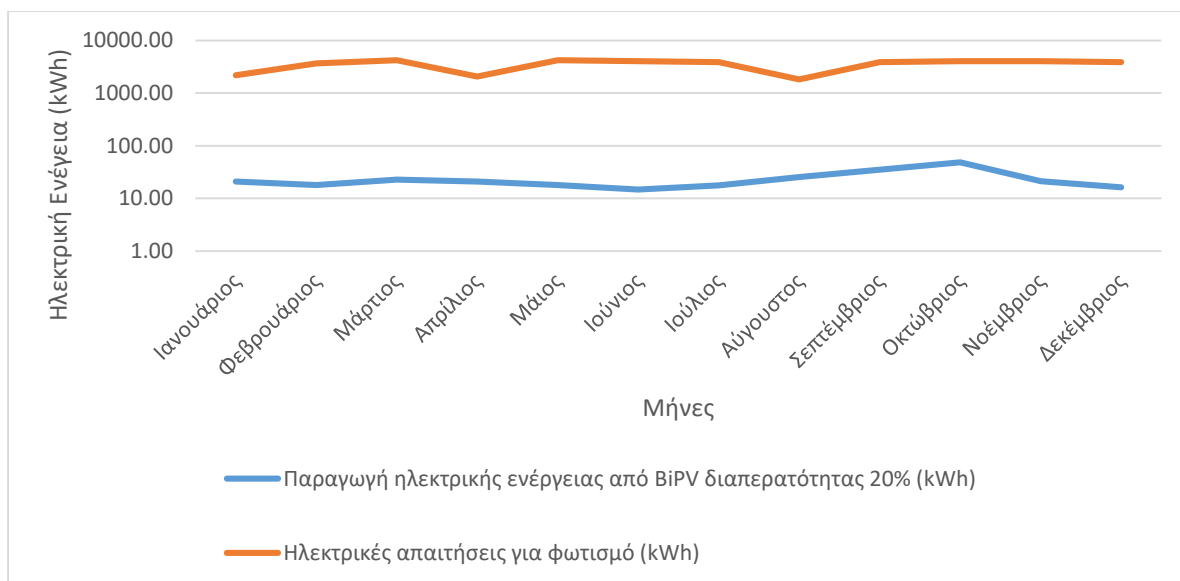
Πίνακας 3.9: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%.

Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	21	2179	19289	0.95	0.11
Φεβρουάριος	18	3661	32407	0.49	0.06
Μάρτιος	23	4183	37035	0.54	0.06
Απρίλιος	21	2070	18328	1.01	0.11
Μάιος	18	4183	37035	0.43	0.05
Ιούνιος	15	4009	35492	0.37	0.04
Ιούλιος	18	3879	34338	0.46	0.05
Αύγουστος	26	1830	16203	1.39	0.16
Σεπτέμβριος	35	3857	34144	0.91	0.10
Οκτώβριος	49	4031	35686	1.21	0.14
Νοέμβριος	21	4009	35492	0.53	0.06
Δεκέμβριος	16	3879	34338	0.42	0.05
Σύνολο	279	41771	369788	0.67	0.08

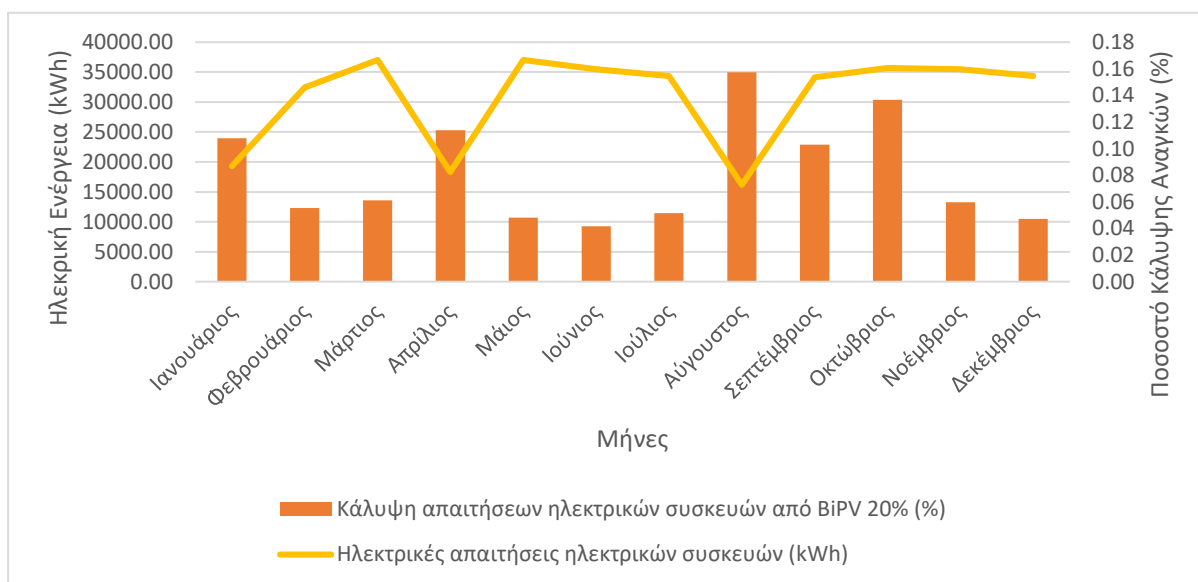
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, για τα φωτοβολταϊκά τα οποία εγκαταστάθηκαν στο θόλο του κτιρίου.

Με βάση τα δεδομένα για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιήθηκε και η σύγκριση για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών.





Διάγραμμα 3.17: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για φωτισμό.



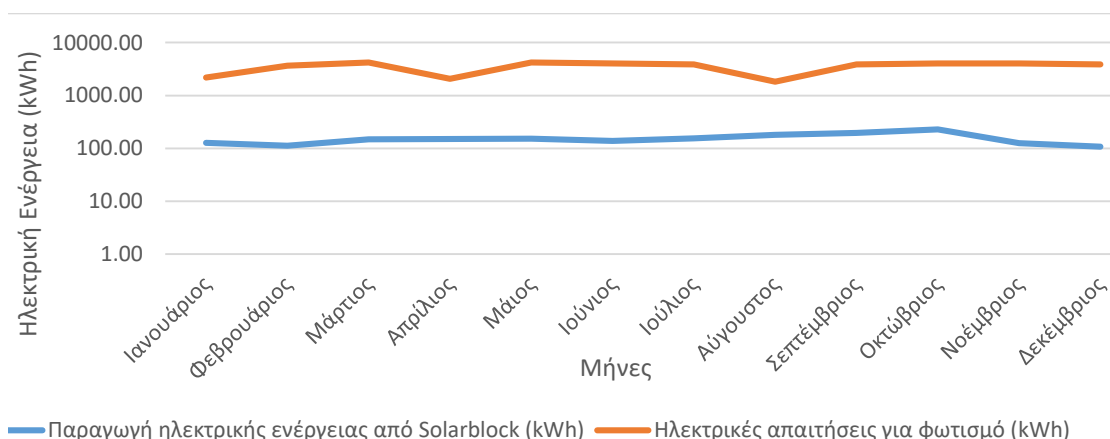
Διάγραμμα 3.18: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 0% συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

### 3.3.2 Συμπληρωματικό σενάριο 2<sup>ο</sup>: Τοποθέτηση Solarblock στη νότια όψη του θόλου του κτιρίου

Στο δεύτερο συμπληρωματικό σενάριο τοποθετήθηκαν στη θέση των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου και διαπερατότητας 20%, Solarblock σκοπός η σύγκριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ των δύο ημιδιάφανων φωτοβολταϊκών.

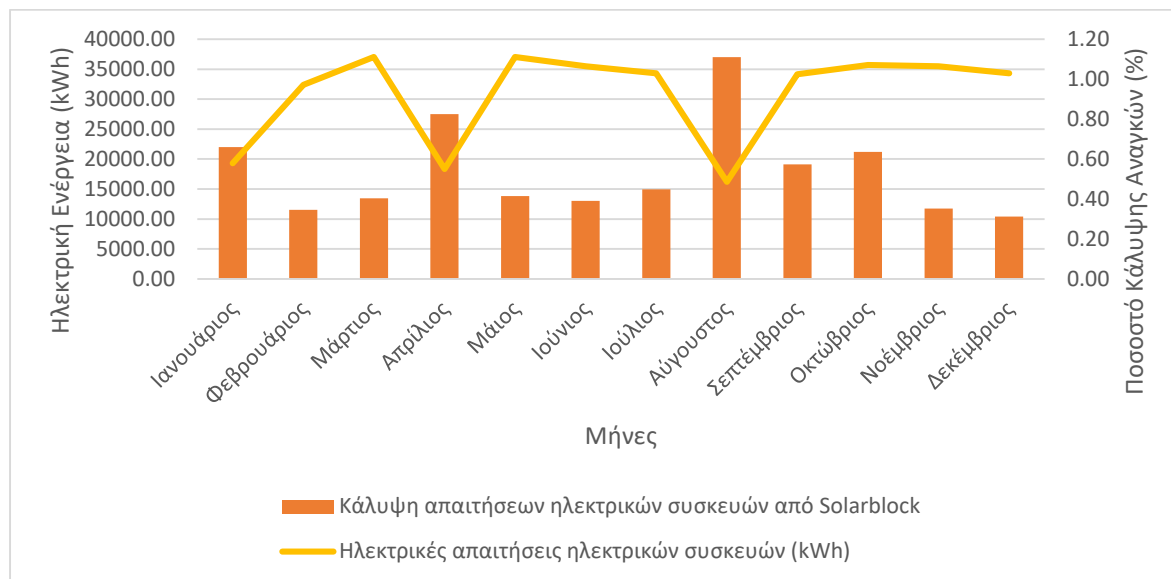
Πίνακας 3.10: Παραγωγή και ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών με χρήση Solarblock.

Μήνες	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Solarblock (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από λαμπτήρες (kWh)	Κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από ηλεκτρικές συσκευές (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών συσκευών (%)
Ιανουάριος	128	2179	19289	5.84	0.66
Φεβρουάριος	112	3661	32407	3.07	0.35
Μάρτιος	149	4183	37035	3.57	0.40
Απρίλιος	151	2070	18328	7.30	0.82
Μάιος	154	4183	37035	3.67	0.41
Ιούνιος	139	4009	35492	3.46	0.39
Ιούλιος	154	3879	34338	3.97	0.45
Αύγουστος	180	1830	16203	9.83	1.11
Σεπτέμβριος	196	3857	34144	5.08	0.57
Οκτώβριος	227	4031	35686	5.63	0.64
Νοέμβριος	125	4009	35492	3.12	0.35
Δεκέμβριος	107	3879	34338	2.77	0.31
<b>Σύνολο</b>	<b>1821</b>	<b>41771</b>	<b>369788</b>	<b>4.36</b>	<b>0.49</b>



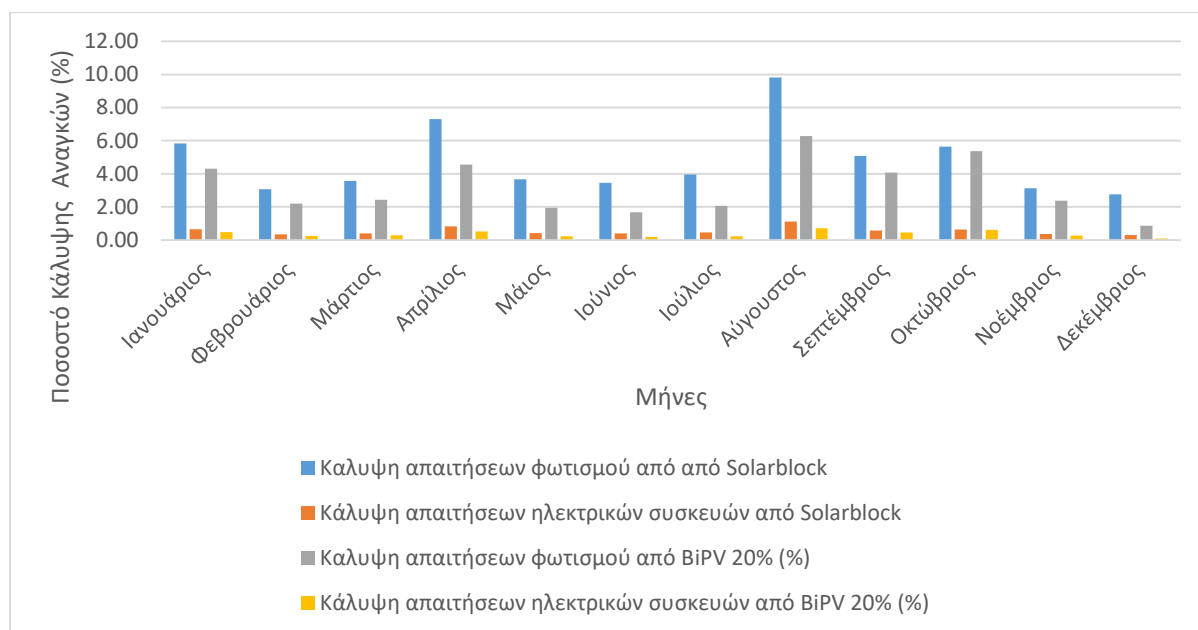
Διάγραμμα 3.19: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών απαιτήσεων για φωτισμό σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα Solablock σε σχέση με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις του κτιρίου για φωτισμό. Ενώ στο διάγραμμα 3.20 παρουσιάζεται η κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων των συσκευών σε σχέση με απαιτήσεις λειτουργίας τους.



Διάγραμμα 3.20: Διαγραμματική απεικόνιση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Solarblock συγκριτικά με τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών.

Τέλος, παρουσιάζεται σύγκριση των δεδομένων που αφορούν τα ποσοστά κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών από τα δύο φωτοβολταϊκά.



Διάγραμμα 3.21 Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών από τα ημιδιαφανή ΦΒΕΚ.

## Κεφάλαιο 4 Συζήτηση

### Κτίριο μικρής κλίμακας

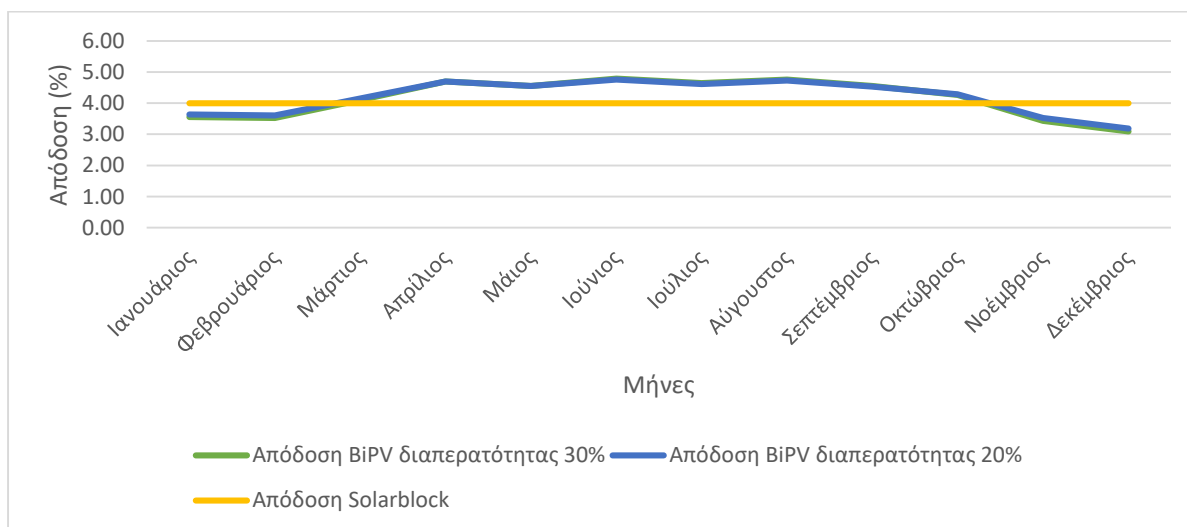
Όπως προαναφέρθηκε και στη μεθοδολογία, αρχικά μελετήθηκαν σενάρια στα οποία τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια σε κτίριο μικρότερης κλίμακας με σκοπό τη σύγκριση των δεδομένων που προέκυψαν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1), παρουσιάζονται όλα τα συγκρίσιμα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.1: Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης.

Τύπος Φωτοβολταϊκού	Παραγόμενη Ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών για το φωτισμό (%)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών συσκευών (%)
Ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά διαπερατότητας 30%	39	76.33	0.74
Ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά διαπερατότητας 20%	40	78.54	0.76
Solarblock	57	110.57	12.83

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, πραγματοποιήθηκε η επιλογή των φωτοβολταϊκών τα οποία τοποθετήθηκαν στο κτίριο K1. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 20% μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, σε σχέση με εκείνα διαπερατότητας 30%. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο ότι η μεγαλύτερη διαπερατότητα του πλαισίου αυξάνει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία διαπερνά το πλαίσιο. Συνεπώς, μικρότερα ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν στα φωτοβολταϊκά κύτταρα.

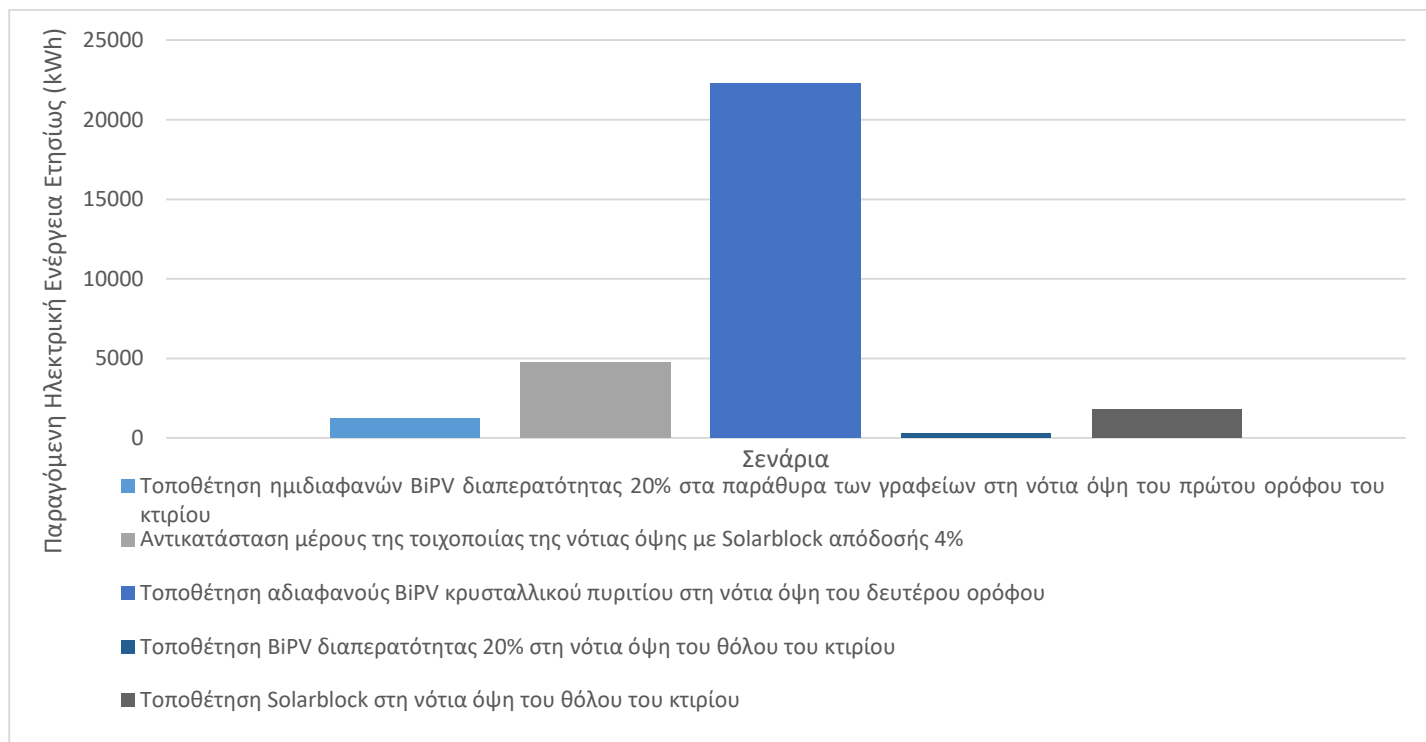
Σε ότι αφορά την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών παρατηρούμε ότι η εγκατάσταση των Solarblock αποτελεί την πιο αποδοτική επιλογή. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στο ότι κατά τη μοντελοποίηση του πλαισίου, η απόδοση παραμένει σταθερή και ίση με 4%. Στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζονται οι διαφορετικές αποδόσεις των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων.



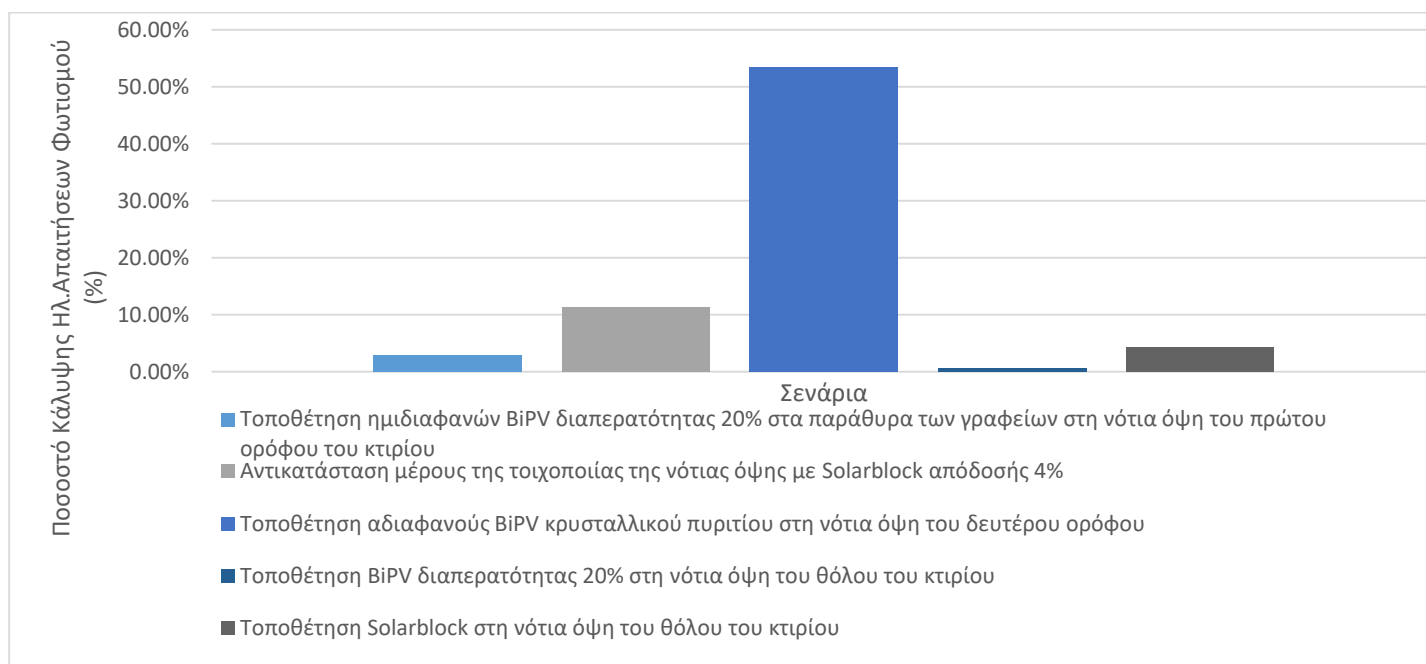
Διάγραμμα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση απόδοσης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων.

## Κτίριο K1

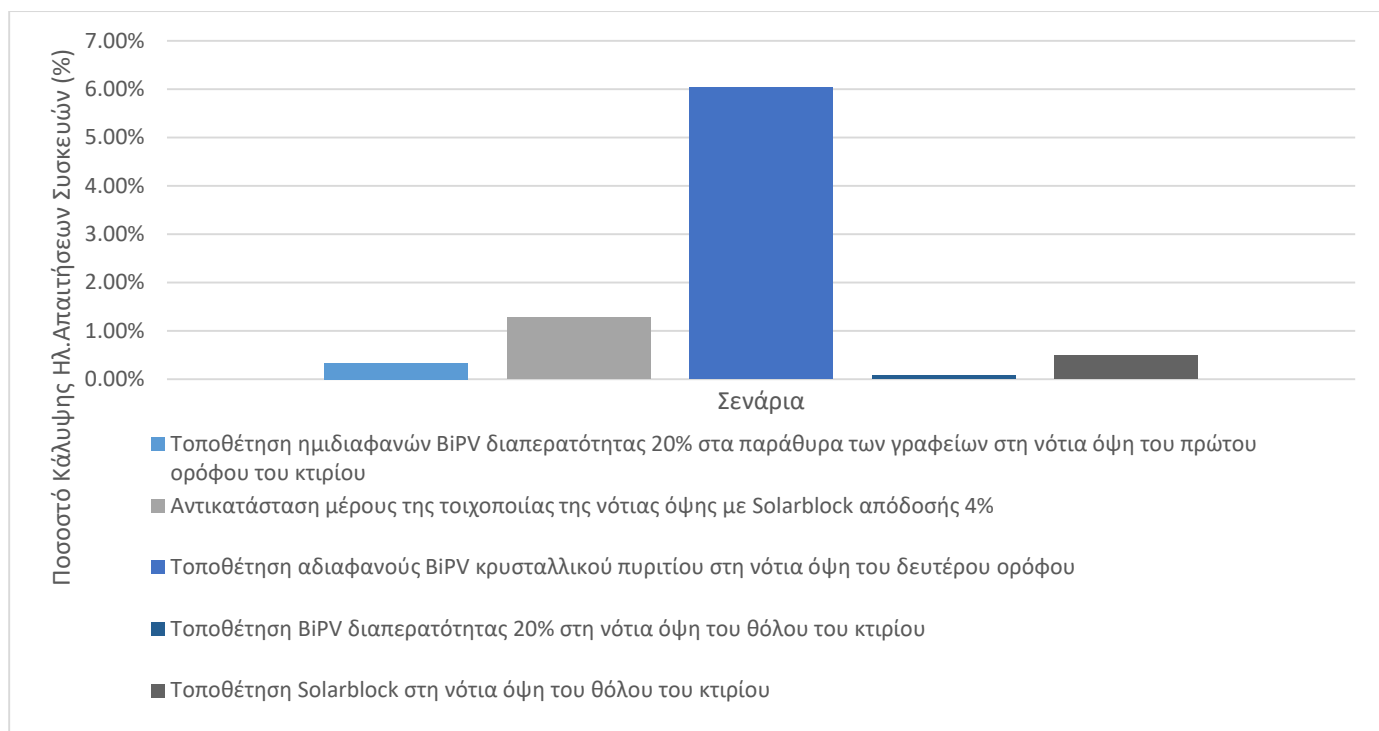
Κατά το δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας προέκυψαν τα αποτελέσματα των σεναρίων που μελετήθηκαν για το κτίριο K1. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ, καθώς και τα ποσοστά κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών για κάθε σενάριο.



Διάγραμμα 4.2: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των ΦΒΕΚ για κάθε σενάριο.



Διάγραμμα 4.3: Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων φωτισμού για κάθε σενάριο.



Διάγραμμα 4.4: Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων ηλεκτρικών συσκευών για κάθε σενάριο.

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, μπορούμε να διακρίνουμε την πιο αποδοτική λύση, για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου. Παρατηρούμε ότι, η εγκατάσταση ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων στα παράθυρα της νότιας όψης του δευτέρου ορόφου, αποτελεί μία λύση η οποία μπορεί να καλύψει μέρος των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου αλλά σε μικρότερο ποσοστό, σε σχέση με τα υπόλοιπα κύρια σενάρια που μελετήθηκαν. Έχοντας σαν γνώμονα την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τη συνολική επιφάνεια, την οποία καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ( $23 \text{ m}^2$  για τα Solarblock και  $39.22 \text{ m}^2$  για τα ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20%) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η εγκατάσταση Solarblock, αποτελεί το πιο αποδοτικό σενάριο εγκατάστασης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών στο κτίριο. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται στα συμπληρωματικά σενάρια, όπου πραγματοποιήθηκε εγκατάσταση των ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών πλαισίων σε επιφάνεια  $42 \text{ m}^2$ . Η διαφορά αυτή στην απόδοση των φωτοβολταϊκών ίσως οφείλεται στο γεγονός της διαφορετικής μοντελοποίησης, καθώς κατά τη μοντελοποίηση των Solarblock χρησιμοποιήθηκε σταθερή απόδοση, ίση με 4%, λόγω έλλειψης δεδομένων για μοντελοποίηση τους, ενώ η απόδοση των ΦΒΕΚ αυξομειωνόταν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Παρόλα αυτά, η χρήση οπουδήποτε από τα σενάρια εγκατάστασης ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών μπορεί να συνδυαστεί με την εγκατάσταση αδιαφανών ΦΒΕΚ στη νότια όψη του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνδυαστικά τα σενάρια, μαζί με τα ποσοστά κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών.

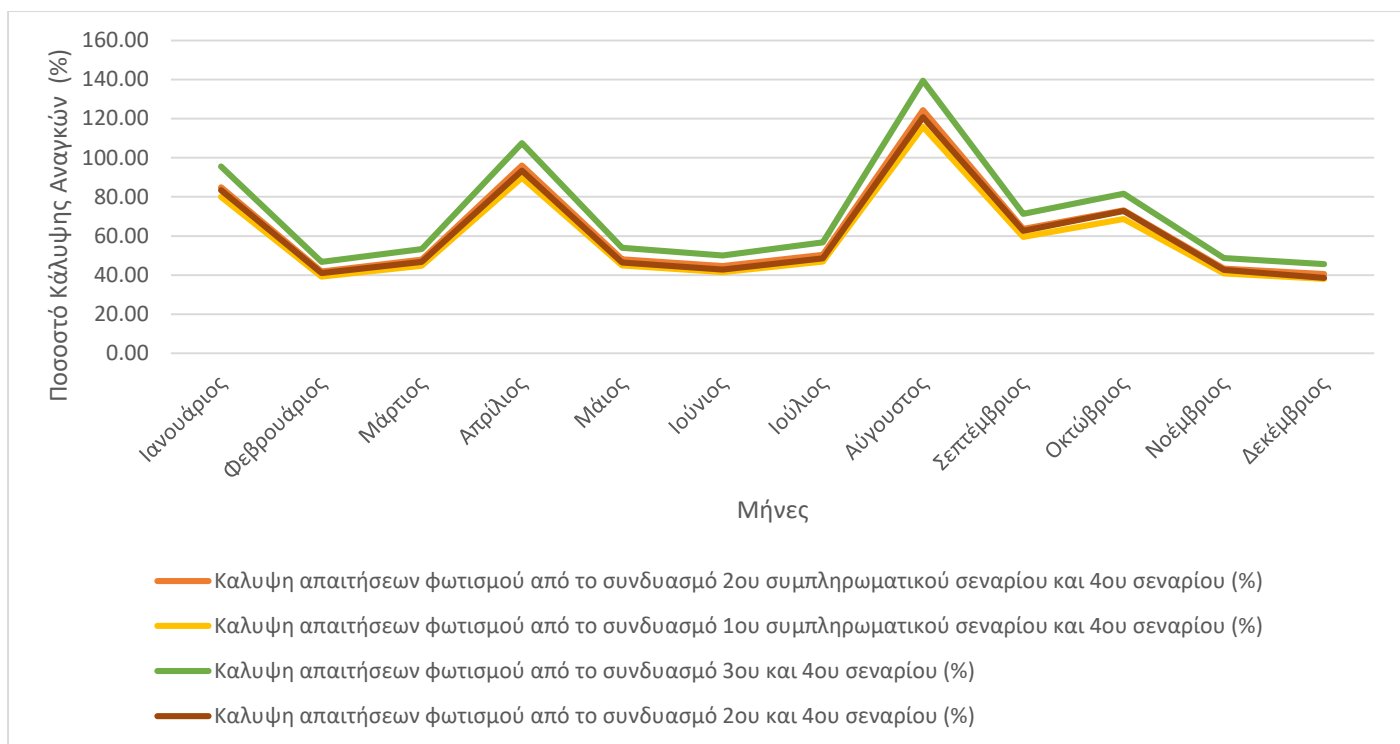
Πίνακας 4.2: Συνδυαστικά σενάρια εγκατάστασης ΦΒΕΚ στο κτίριο K1.

Συνδυασμός Σεναρίων κτιρίου K1			
Σενάρια	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ετησίως (kWh)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων φωτισμού	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων συσκευών
Τοποθέτηση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ διαπερατότητας 20% στα παράθυρα των γραφείων στη νότια όψη του πρώτου ορόφου του κτιρίου και εγκατάσταση αδιαφανών ΦΒΕΚ στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου	23511	22.33 %	6.36 %
Αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας της νότιας όψης με Solarblock απόδοσης 4% και εγκατάσταση αδιαφανών ΦΒΕΚ στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου	27037	45.5 %	7.31 %

Ο συνδυασμός των παραπάνω σεναρίων πραγματοποιήθηκε αποσκοπώντας στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒΕΚ, προκειμένου να μπορέσει να καλυφθεί το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό των ηλεκτρικών αναγκών. Όπως μπορούμε να συμπεράνουμε, μπορεί να γίνει συνδυασμός των πιο αποδοτικών σεναρίων, αρκεί να μην επηρεάζεται ο τρόπος λειτουργίας των συνδυαζόμενων σεναρίων.

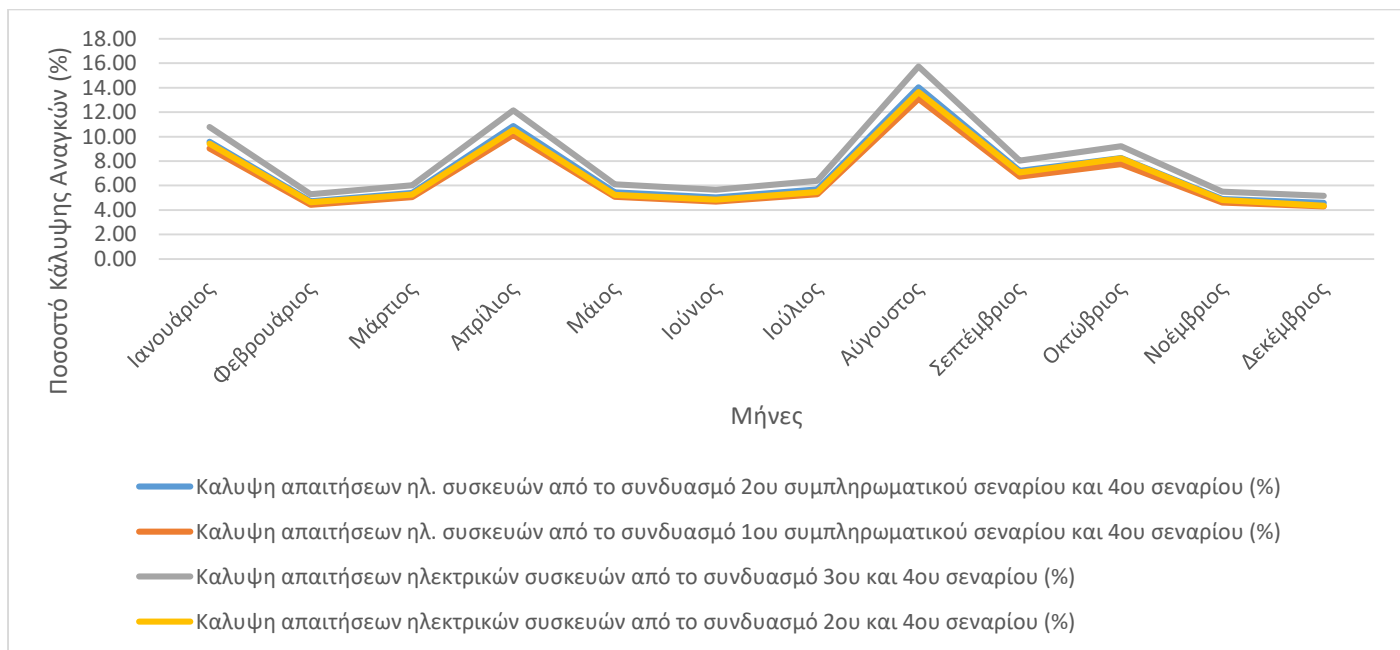
Στο διάγραμμα 4.5, απεικονίζεται το ποσοστό κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών με το συνδυασμό των σεναρίων. Από το διάγραμμα αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ο πιο αποδοτικός συνδυασμός σεναρίων είναι η εγκατάσταση Solarblock, με αντικατάσταση μέρους της τοιχοποιίας, σε συνδυασμό με εγκατάσταση αδιαφανών ΦΒΕΚ στη νότια όψη του δευτέρου ορόφου του κτιρίου.





Διάγραμμα 4.5: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων για φωτισμό.

Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να διακρίνουμε ότι τα ποσοστά κάλυψης των αναγκών των ηλεκτρικών συσκευών είναι πολύ μικρότερα από εκείνα της κάλυψης των απαιτήσεων για φωτισμό.



Διάγραμμα 4.6: Διαγραμματική απεικόνιση κάλυψης ηλεκτρικών απαιτήσεων ηλ.συσκευών.

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την προσομοίωση, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Σε ότι αφορά τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι τα ημιδιαφανή ΦΒΕΚ μπορούν να εγκατασταθούν στα κτίρια αλλά όχι ως κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας, λόγω της χαμηλής απόδοσής τους. Επομένως, συνιστάται η εγκατάστασή τους σε μεγάλες ελεύθερες επιφάνειες ή κεκλιμένες επιφάνειες, με νότιο προσανατολισμό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση και συνεπώς οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται σε μεγαλύτερο ποσοστό. Στην περίπτωση, που κατασκευαζόταν ένα κτίριο εξ αρχής, θα μπορούσαμε να δημιουργήσουμε μεγαλύτερες ελεύθερες επιφάνειες στις οποίες θα γινόταν η εγκατάσταση των ΦΒΕΚ και συνεπώς θα μπορούσαμε να καλύψουμε μεγαλύτερο ποσοστό αυτόν με ΦΒΕΚ.
- Για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου, δεν απαιτείται μόνο η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών υπό συνθήκες<sup>4</sup>, αλλά και η ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου. Αυτό επιτυγχάνεται, με αλλαγή των χρονοδιαγραμμάτων λειτουργίας των λαμπτήρων και την αντικατάσταση ορισμένων ηλεκτρικών συσκευών με άλλες χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης.
- Αν θέλουμε να συνδυάσουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την βελτίωση της εξωτερικής εικόνας του κτιρίου, τα ΦΒΕΚ αποτελούν μια πολύ καλή λύση. Πιο συγκεκριμένα η εγκατάσταση ημιδιαφανών ΦΒΕΚ σε γυάλινες επιφάνειες, παρέχει σκίαση του χώρου με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Από το συνδυασμό των σεναρίων ακόμη προέκυψε για το πρώτο συνδυαστικό σενάριο, μείωση 2.6 tn CO<sub>2</sub>, ενώ με το δεύτερο συνδυαστικό σενάριο προέκυψε μείωση 1.7 tn CO<sub>2</sub>.

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν, αποτελούν συγκρίσιμα δεδομένα στα οποία μπορεί όποιος επιθυμεί να έχει πρόσβαση, καθώς τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν διατίθενται δωρεάν. Συνεπώς, η μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιήθηκε μπορεί να ελεγχθεί, να αξιολογηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί από όποιον επιθυμεί τη μελέτη παρόμοιων σεναρίων. Η χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας στοχεύει στην εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν δεν υποστηρίζουν τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων ως δομικά υλικά, αλλά ως παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε με τη χρήση λογισμικών που υποστηρίζουν την μοντελοποίηση των ΦΒΕΚ, ως δομικά υλικά του κελύφους, να μελετηθούν τα ΦΒΕΚ όχι μόνο ως παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ως υλικά επιρροής θερμικών φορτίων. Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσει ο χρήστης να έχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα σε ότι αφορά την εγκατάσταση των ΦΒΕΚ σε ένα κτίριο.

Ένα πεδίο το οποίο αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον κομμάτι στη μελέτη των ΦΒΕΚ είναι η εγκατάστασή τους σε κατασκευές που δεν αποτελούν κτίρια στέγασης ή εργασίας. Δηλαδή, η εγκατάστασή τους σε κτίρια γεωργικής χρήσης όπως είναι τα θερμοκήπια, σε οροφές μέσω μεταφοράς όπως είναι τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία.

Τα ΦΒΕΚ όπως και οι περισσότερες ΑΠΕ αντιμετωπίζουν ένα κοινό πρόβλημα, την αποθήκευση της ανεκμετάλλευτης παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς ένα ακόμη πεδίο μελέτης μπορεί να αποτελέσει η δυνατότητα αποθήκευσης της ανεκμετάλλευτης παραγόμενης ενέργειας στα κτίρια.

---

<sup>4</sup> Δηλαδή, η εγκατάσταση σε επιφάνειες υπό κλίση με νότιο προσανατολισμό, κάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας.

## Βιβλιογραφία

- Akella, A. K., Saini, R. P. and Sharma, M. P. (2009) 'Social , economical and environmental impacts of renewable energy systems', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 34(2), pp. 390–396.
- Deb, S. K. (1996) 'Thin-film solar cells: an overview', *Renewable energy*, pp. 69–92.
- Duffie, J. A. and W. A. B. (1991) *Solar engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ellabban, O., Abu-Rub, H. and Blaabjerg, F. (2014) 'Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, pp. 748–764.
- Mani, M. and Pillai, R. (2010) 'Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, pp. 3124–3131.
- Παπαντωνίου Σωτήρης (2008) 'Ενεργειακή μελέτη του κτιρίου μηχανικών περιβάλλοντος με αξιοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων', Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Portal, C. B. E. & E. 'Internal Heat Gain Loads'.
- Product Manual* (2011) *OnyxSolar*.
- SBskin Smart Building Skin*. Available at: <https://sbskin.it/en/research-and-development/>.
- Swiss BiPV Competence Centre* (2011).
- U.S. Department of Energy (2018) 'Energy Plus Documentation-Engineering Reference'.
- Verberne, G. (2014) 'BiPV as a pitched roofing solution A feasibility study for the Dutch market', (July).
- Θεοχάρης Τσούτος, Ι. Κ. (2016) 'Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία', in *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Τεχνολογίες και Περιβάλλον*. Αθήνα: Παπασωτηρίου, pp. 119–176.
- Υ Π Ε Κ Α (2010), 'Τεχνική οδηγία'.
- ΥΠΕΚΑ (2009), 'Οδηγίες για την εγκατάσταση φ / β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις'.