



Πολυτεχνείο Κρήτης Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΤΕΦΑΝΟΥ ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ

A.M: 2014050101

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2020

"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

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΥΜΕΝΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΣΤΕΦΑΝΟΥ ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ(ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ)

ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης, για τον προσδιορισμό και ανάλυση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα σε οροφή κτιρίου.

Η αντικατάσταση κατασκευαστικών υλικών ενός κτιρίου, όπως σε προσόψεις και οροφές, με σύγχρονα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελεί μια ανερχόμενη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Ταυτοχρόνως, λειτουργούν ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ως υλικά κτιρίου, προσφέροντας εξοικονόμηση ηλεκτρικού ρεύματος, μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων και αναβάθμιση της αρχιτεκτονικής δομής του κτιρίου.

Η ολοκλήρωση του μοντέλου, πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού προγράμματος TRNSYS (Transient Systems Simulation Tool), όπου και ορίστηκαν τα τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, καθώς και τα βασικά τμήματα που απαρτίζουν την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτού υμένα CIGS, θέτοντας την κλίση των πλαισίων σε διαφορετικές μοίρες, με σκοπό, την μελέτη του βαθμού επιρροής και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπλέον, εξετάστηκε η εφαρμογή διαφορετικού είδους φωτοβολταϊκού στοιχείου CdTe και μελετήθηκε η απόδοση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλάζοντας και εδώ, διαδοχικά, την γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Από τα σενάρια που εφαρμόστηκαν για τις δύο κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτού υμένα, επιλέχθηκαν τα πιο αποδοτικά και χρησιμοποιήθηκαν στην περαιτέρω σύγκριση τους, σχετικά με την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και κοστολόγηση της συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, με απώτερο στόχο την εύρεση του βέλτιστου ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού στοιχείου, με εφαρμογή σε οροφές κτιρίου.

Abstract

The present thesis, aims to create simulation models, for the determination and analysis of the generated electricity, from integrated thin film photovoltaics on the roof of a building.

Replacing the building materials of a building envelope, such as facades and roof, with modern photovoltaic elements, constitutes a rising photovoltaic technology. At the same time, building integrated photovoltaics function as sources of electricity and building materials, offering savings in electricity costs, reducing the use of fossil fuels and upgrading the architectural structure of the building.

The completion of the model was carried out through the software program of TRNSYS (Transient Systems Simulation Tool), which defined the technical and constructive characteristics of the building, as well as the basic parts that make up the installation of a photovoltaic system.

Then, a sensitivity analysis of the integrated CIGS thin-film photovoltaic panels was performed, setting the inclination of the frames at different degrees, in order to study the rate of influence and the efficiency of the photovoltaic system. In addition, the application of a different type of photovoltaic cell, CdTe was examined in order to study the efficiency of the generated electricity, modifying successively, the angle of inclination of the photovoltaic panel. From the scenarios applied for the two categories of thin film photovoltaic cells, the most efficient ones were selected and used in their further comparison, regarding the saving of electricity costs and production costs of the specific photovoltaic technology, with the ultimate goal of finding the best building integrated photovoltaic thin film solar cell technology.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κ. Διονυσία Κολοκοτσά, για την ανάθεση της εργασίας και τη συνεχή καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Γομπάκη και την κ. Μαρία Αρυμπλιά για τις πληροφορίες που μου προσέφεραν και τη συμβολή τους στην διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

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

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	4
Abstract	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
Σκοπός της εργασίας	12
Ιστορική αναδρομή	12
1.Εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	13
1.1. Ημιαγωγοί P και N	13
1.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	14
1.3. Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και καμπύλη ισχύος ..	14
<i>Διάγραμμα 1.3.1:Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου I-V</i>	<i>14</i>
Εξίσωση 1.3.2	15
1.4. Απόδοση Φωτοβολταϊκού στοιχείου και Απώλειες	15
Εξίσωση 1.4.1	15
1.5. Εγκατάσταση και ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Κτίρια(Building Integrated PV)..	16
1.6. Εφαρμογή Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε προσόψεις κτιρίου	17
<i>Εικόνα 1.6.1:Παράδειγμα εφαρμογής BIPV σε πρόσοψη σπιτιού στο Άνκορατζ της Αλάσκας από την Artic Solar Ventures Corporation, η φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Dennis Schroeder,NREL,2018.</i>	<i>17</i>
1.7. Εφαρμογή PV σε οροφές κτιρίων.....	18
<i>Εικόνα 1.7.1:Παράδειγμα εφαρμογής ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών στην οροφή εκκλησίας, η φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Dennis Schroeder,NREL,2017.</i>	<i>18</i>
1.8. Εφαρμογή PV σε φεγγίτες κτιρίων	19
<i>Εικόνα 1.8.1:Παράδειγμα ενσωμάτωσης BIPV στην σκεπή ενός σχολείου, σχεδιασμένο από την κατασκευαστική εταιρία Romag.</i>	<i>19</i>
1.9. Εφαρμογή PV σε χώρους σκίασης	20
<i>Εικόνα 1.9.1:Παράδειγμα εφαρμογής BIPV για σκίαση σε χώρο στάθμευσης, κατασκευασμένο από την εταιρία National Renewable Energy Laboratory,2017.</i>	<i>20</i>
1.10. Κατηγοριοποίηση τρόπου ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών σε κτίριο	20
<i>Εικόνα 1.10.1: Παράδειγμα εφαρμογής BAPV σε στέγη κτιρίου, από την NREL(National Renewable Energy Laboratory),2017.....</i>	<i>21</i>
1.11. Σύγχρονη φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	21
1.12. Πολλαπλά στρώματα φωτοβολταϊκών κυττάρων(Sandwich solar cells).....	21
1.13. Φωτοβολταϊκά κύτταρα ευαισθητοποιημένα με βαφή(dye-sensitized solar cells) ..	21
1.14. Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα CIGS(χαλκού-ινδίου-γάλλιου-σεληνίου)	22

<i>Εικόνα 1.14.1:Παράδειγμα φωτοβολταϊκού λεπτού υμένα CIGS, η φωτογραφία αποτελεί έργο του Frank Peters.....</i>	<i>22</i>
1.15. Δομή των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CIGS.....	22
<i>Εικόνα 1.15.1:Δομή του φωτοβολταϊκού κυττάρου τεχνολογίας CIGS, Kazmerski L,2005.....</i>	<i>23</i>
1.16. Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα CdTe(τελλουριούχου καδμίου)	23
1.17. Δομή των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CdTe(τελλουριούχου καδμίου).....	24
<i>Εικόνα 1.17.1: Η κατασκευαστική δομή ενός CdTe/CdS φωτοβολταϊκού κυττάρου</i>	<i>24</i>
2.0 Μεθοδολογία.....	25
2.1.Λογισμικό TRNSYS(Transient System Simulation Tool).....	25
2.2. Simulation Studio	25
<i>Εικόνα 2.2.1:Αρχική επιφάνεια εργασίας του Simulation Studio.....</i>	<i>26</i>
2.3.Λογισμικό Sketch Up	26
<i>Εικόνα 2.3.1:Αριστερά, παρατηρείται το κτίριο στο λογισμικό περιβάλλον του Energy plus ενώ δεξιά, στο λογισμικό Sketch up.</i>	<i>27</i>
<i>Εικόνα 2.3.2:Το υπό μελέτη κτίριο στο λογισμικό του Sketch up, με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στην οροφή</i>	<i>27</i>
2.4. Μοντέλο προσομοίωσης (3D Multizone Building Project)	27
<i>Εικόνα 2.4.1:Παράδειγμα επιλογής τύπου πρότζεκτ στην επιφάνεια εργασίας του TRNSYS</i>	<i>28</i>
<i>Εικόνα 2.4.2: Εισαγωγή στοιχείων προσανατολισμού και τοποθεσίας του κτιρίου</i>	<i>29</i>
<i>Εικόνα 2.4.3:Το μοντέλο προσομοίωσης(3D Building Project) στο λογισμικό TRNSYS</i>	<i>29</i>
2.5. TrnBuild	30
<i>Εικόνα 2.5.1: Επιφάνεια εργασίας στο TrnBuild</i>	<i>31</i>
<i>Πίνακας 2.5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευής του κτιρίου.....</i>	<i>31</i>
<i>Εικόνα 2.5.3: Ενδεικτική τιμή αερισμού στο κτίριο</i>	<i>33</i>
<i>Εικόνα 2.5.4: Σύστημα εξαερισμού για ψύξη.....</i>	<i>34</i>
<i>Εικόνα 2.5.5:Σύστημα εξαερισμού για θέρμανση.....</i>	<i>34</i>
<i>Πίνακας 2.5.6: Χαρακτηριστικά της κατηγορίας "Gains" του κτιρίου</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 2.5.7:Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων για εσωτερικά κέρδη (Gains) σε μία από τις τρεις θερμικές ζώνες</i>	<i>35</i>
<i>Πίνακας 2.5.8:Χαρακτηριστικά θερμικής άνεσης</i>	<i>35</i>
<i>Εικόνα 2.5.9: Προσομοίωση του μοντέλου με εγκατάσταση HVAC συστήματος</i>	<i>36</i>
Εξίσωση 2.5.10	36

Εξίσωση 2.5.11	37
<i>Εικόνα 2.5.12: Προσομοίωση του μοντέλου με εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ...</i>	38
Εξίσωση 2.5.13	38
Εξίσωση 2.5.14	39
<i>Εικόνα 2.5.15: Κύκλωμα μαθηματικού μοντέλου, σύμφωνα με το λογισμικό TRNSYS</i>	39
Εξίσωση 2.5.16	40
Εξίσωση 2.5.17	40
Εξίσωση 2.5.18	40
Εξίσωση 2.5.19	40
Εξίσωση 2.5.20	41
Εξίσωση 2.5.21	41
Εξίσωση 2.5.22	41
Εξίσωση 2.5.23	41
Εξίσωση 2.5.24	41
Εξίσωση 2.5.25	41
Εξίσωση 2.5.26	42
2.6. Ανάλυση ευαισθησίας.....	42
<i>Εικόνα 2.6.2:Τεχνικά χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών CIGS.....</i>	43
<i>Εικόνα 2.6.4: Διαμόρφωση νέας κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου</i>	43
<i>Εικόνα 2.6.6:Τροποποίηση κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων</i>	44
<i>Εικόνα 2.6.8:Τεχνικά χαρακτηριστικά CdTe φωτοβολταϊκής τεχνολογίας</i>	45
<i>Εικόνα 2.6.10: Αλλαγή στην κλίση των CdTe φωτοβολταϊκών πλαισίων</i>	45
<i>Εικόνα 2.6.12: Αλλαγή τις κλίσης από 30° στις 40°</i>	46
3. Αποτελέσματα.....	46
<i>Πίνακας 3.1.1:Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου</i>	47
<i>Πίνακας 3.2.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο</i>	49
<i>Διάγραμμα 3.2.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των CIGS, σε καινούργια κλίση 30 μοιρών.....</i>	50
<i>Πίνακας 3.3.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με αλλαγή κλίσης, σε νέα διεύθυνση των 40 μοιρών.....</i>	51
<i>Διάγραμμα 3.3.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας από τα CIGS, σε καινούργια κλίση 40 μοιρών.</i>	52

Πίνακας 3.4.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία.	53
Διάγραμμα 3.4.2: Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων τελλουριούχου καδμίου.	54
Πίνακας 3.5.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία, κλίσης 30 μοιρών.	55
Διάγραμμα 3.5.2: Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων τελλουριούχου καδμίου, νέας κλίσης 30 μοιρών.	56
Πίνακας 3.6.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία, κλίσης 40 μοιρών.	56
3.7. Σύγκριση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών CIGS και CdTe.	58
Διάγραμμα 3.7.1: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 35 μοιρών.	58
Διάγραμμα 3.7.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 30 μοιρών.	59
Διάγραμμα 3.7.3: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 40 μοιρών.	60
4. Συζήτηση.	61
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης.	61
Διάγραμμα 4.1.1: Διαγραμματική, συγκριτική απεικόνιση της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών χωριστά.	61
Πίνακας 4.1.2: Παρουσίαση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, όπου το φωτοβολταϊκό πλαίσιο CIGS, αποτελεί προϊόν της κατασκευαστικής εταιρείας xSUNx, με έδρα το Οχάιο των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ενώ οι ηλεκτρικές προδιαγραφές του CdTe, πάρθηκαν από το επιστημονικό άρθρο των Agata Zdyb, Slawomir Gulkowski, 2020.	62
4.2. Κοστολόγηση.	63
Διάγραμμα 4.2.1: Διαγραμματική απεικόνιση του ποσοστού αύξησης του κόστους παραγωγής συγκριτικά με τιμή του τελλουρίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).	63
Διάγραμμα 4.2.2: Διαγραμματική απεικόνιση του ποσοστού αύξησης του κόστους παραγωγής συγκριτικά με τιμή του ινδίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).	64
Διάγραμμα 4.2.3: Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους παραγωγής συγκριτικά με την απόδοση του τελλουριούχου καδμίου και της τιμής του τελλουρίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).	64

Διάγραμμα 4.2.4: Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους παραγωγής συγκριτικά με την απόδοση του CIGS και της τιμής του ινδίου(Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).	65
4.3. Net metering(αυτοπαραγωγή)	65
Πίνακας 4.3.1: Κόστος και απόδοση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe	65
Εικόνα 4.3.2: Σύστημα net metering	66
4.4. Ανακύκλωση	67
Διάγραμμα 4.4.1: Διαγραμματική απεικόνιση των ετήσιων εκπομπών καδμίου από διάφορες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η εικόνα πάρθηκε από το άρθρο "CdTe photovoltaics: Life cycle environmental profile and comparisons", Vasilis M. Fthenakis, 2007	67
4.5. Πλεονεκτήματα Ενσωματωμένων Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κτίρια	68
4.6.Αντλία Θερμότητας	68
4.7.Αποθήκευση ενέργειας	68
5. Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	71

Σκοπός της εργασίας

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση ευαισθησίας ενός συστήματος ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, στην οροφή κτιρίου, χρησιμοποιώντας το λογισμικό TRNSYS, με απώτερο σκοπό την αξιολόγηση της συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ως λύση σε θέματα εξοικονόμησης ενέργειας, αισθητικής αναβάθμισης και απόσβεσης του συνολικού έργου.

Ιστορική αναδρομή

Ο άνθρωπος, από την αρχή της ιστορίας για να καλύψει τις καθημερινές του ανάγκες, προσπαθούσε να χρησιμοποιήσει κάθε μορφή ενέργειας που διέθετε το περιβάλλον αλλά και να επέμβει στη δομή του ώστε να βελτιώσει την ποιότητα ζωής του. Από την αρχαιότητα, η χρήση του νερού για καλλιέργειες (ποταμός του Νείλου) και η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας για την λειτουργία των ανεμόμυλων και για την μετακίνηση εμπορικών/πολεμικών πλοίων κυρίως στη Μεσόγειο, αποτέλεσαν την πρώτη επαφή του ανθρώπου με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Με την πάροδο των χρόνων, η σχέση του ανθρώπου με τα ορυκτά καύσιμα(κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), οδήγησε στην εγκατάλειψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην πλήρη αξιοποίηση των πρώτων. Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα απαρτίζουν σχεδόν το 80% της παγκόσμιας ενεργειακής απαίτησης. Αποτελούν φθηνή πηγή και αξιόπιστη μορφή ενέργειας, με μεγάλες αποδόσεις, μιας και η απόδοση των ΑΠΕ εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες. Όμως, κάθε χρόνο, η υπερκατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, οδηγεί στην εξάντληση των αποθεμάτων, οι τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου να αυξάνονται και τα περιβαλλοντικά προβλήματα(π.χ υπερθέρμανση του πλανήτη, απορρίμματα, ρύπανση των νερών, τρύπα του όζοντος) να εντείνουν τις ανησυχίες τις κοινωνίας για το μέλλον της ίδιας αλλά και του περιβάλλοντος(E.Delyannis,2003).

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, η ανάγκη για ένα αειφόρο περιβάλλον, έστρεψε το ενδιαφέρον του ανθρώπου προς την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέχρι σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν σχεδόν το 20% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, κυρίως μέσω της χρήσης βιομάζας(π. χ ξύλο) για θέρμανση και μαγειρική. Από το 2015 και μετά, περίπου το 16% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ ένα 6% προέρχεται από άλλους τύπους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ ηλιακή, αιολική, γεωθερμική). Σύμφωνα με την Noelle Eckley Selin, από το 1990 και ύστερα η ετήσια ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ξεπέρασαν το 20% και 30% αντίστοιχα.. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί τον πιο βασικό ρόλο στην εξελικτική πορεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς από τον 7^ο αιώνα, ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε την ηλιακή ενέργεια μέσω διαφόρων υλικών μεγεθυντικού γυαλιού, για την δημιουργία φωτιάς. Σε μεταγενέστερο χρόνο, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε στο

διάστημα, με σκοπό την τροφοδοσία δορυφόρων, για την μετακίνηση τους, μέσω ηλιακών συλλεκτών. Έπειτα, το 1973, το πανεπιστήμιο του Delaware, έφτιαξε το πρώτο ενεργειακό κτίριο, που περιείχε υβριδικό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Αποτέλεσε επίσης, το πρώτο κτίριο που είχε ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στην σκεπή. Στα χρόνια που ακολούθησαν η εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας βοήθησε στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών και στην αναζήτηση νέων, πιο βελτιωμένων υλικών για πιο ανθεκτικές και αξιόπιστες φωτοβολταϊκές μονάδες, με τελικό σκοπό την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την μείωση των εκπομπών άνθρακα παγκοσμίως. Η μείωση στο κόστος εγκατάστασής τους, από το 1956 μέχρι σήμερα, (από 300\$/Watt στα 0.5\$/Watt) φανερώνει την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας και την παρουσίαση των φωτοβολταϊκών ως μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας.

1.Εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει ανάλυση του θεωρητικού υποβάθρου της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας γενικότερα.

Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, πραγματοποιείται με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούνται από ημιαγώγιμα υλικά, τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν φωτόνια και να μεταδίδουν την ενέργεια τους αυτή σε χωριστά ηλεκτρόνια(ημιαγωγοί). Το πυρίτιο(Si) αποτελεί το πιο συχνό, που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ημιαγωγών για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους.

Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο δημιουργείται με την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος πυριτίου ενισχυμένου με φώσφορο(P), σε επαφή με ένα στρώμα από πυρίτιο ενισχυμένο με βόριο(B).

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο(Θεοχάρης Τσούτσος,2016).

1.1. Ημιαγωγοί P και N

Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. φωσφόρου, τα οποία, συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας του φωσφόρου, ελευθερώνονται και γίνονται φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος. Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί ημιαγωγό

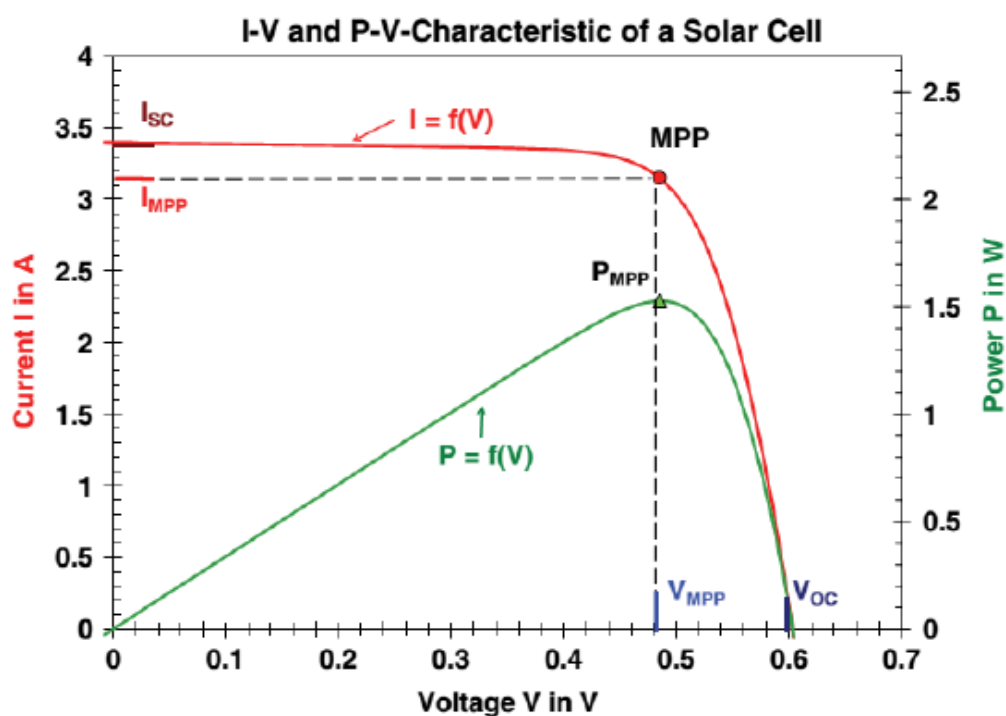
τύπου N. Παρομοίως, όταν προστίθεται στο κρυσταλλικό πυρίτιο βόριο, προκύπτουν ημιαγωγοί τύπου P(Θεοχάρης Τσούτσος, 2016).

1.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η ένωση δύο ημιαγωγών τύπου p και n, σχηματίζει μια επαφή p-n(junction), η οποία όταν φωτιστεί από μια φωτεινή πηγή, ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας θα απορροφηθεί από τα άτομα του υλικού των ημιαγωγών με αποτέλεσμα, η κίνηση των ηλεκτρονίων που θα δημιουργηθεί μαζί με την αντίθετη κίνηση των οπών, να σχηματίσουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η διαδικασία αυτή, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο(Θεοχάρης Τσούτσος, 2016).

1.3. Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και καμπύλη ισχύος

Η γραφική παράσταση του ρεύματος I_R που διαρρέει το Φ/Β στοιχείο σε συνάρτηση χαρακτηριστική καμπύλη I-V του Φ/Β στοιχείου (όταν αυτό φωτίζεται από ακτινοβολία σταθερής ισχύος). Όπως φαίνεται από την γραφική παράσταση (διάγραμμα) καθώς αυξάνεται η τάση, το ρεύμα που κυκλοφορεί στο Φ/Β στοιχείο είναι περίπου σταθερό για μια μεγάλη περιοχή το κύκλωμα «ανοίγει» και η τάση στα άκρα του είναι $V = V_{oc}$ (open circuit). Η μέγιστη τιμή του ρεύματος όταν βραχυκυκλώσουμε το Φ/Β στοιχείο (δηλαδή όταν συνδέσουμε τα άκρα του με «μηδενική» αντίσταση) ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} (short circuit).



Διάγραμμα 1.3.1:Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού πλαισίου I-V

Η ισχύς που παρέχει ένα Φ/Β στοιχείο στην αντίσταση R δεν είναι σταθερή. Η τιμή της ισχύος θα είναι μηδέν για τιμές της τάσης $V=0$, ενώ το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα θα είναι στη μέγιστη τιμή του $I=I_{sc}$ (ρεύμα βραχυκύκλωσης). Όταν αυξάνεται η τιμή της τάσης, η ένταση του ρεύματος αρχίζει και μειώνεται (με μικρό και σταθερό ρυθμό), ενώ θα παρουσιάζει ένα μέγιστο που ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος ΣΜΙ (Maximum Power Point MPP) στην θέση V_{mp} , από το οποίο ξεκινά η έντονη μείωσή της έως και το σημείο $V=V_{oc}$, όπου η τάση στα άκρα μεγιστοποιείται και η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται ($I=0$). Στην πράξη, για να έχουμε την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του Φ/Β στοιχείου θα πρέπει η αντίσταση R (το «φορτίο» δηλαδή) να είναι προσαρμοσμένη έτσι ώστε το Φ/Β να «δουλεύει» όσο το δυνατόν πιο «κοντά» στο ΣΜΙ όπου θα παρέχει την μέγιστη ισχύ.

Από το γινόμενο της έντασης και της τάσης, προκύπτει η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του εκάστοτε φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Εξίσωση 1.3.2

$$P = I \cdot V \text{ (Watt)}$$

Επομένως, ο υπολογισμός της μέγιστης ισχύος, προκύπτει από το γινόμενο της μέγιστης τάσης (V_{mp}) με την μέγιστη τιμή της έντασης (I_{mp}) (Θεοχάρης Τσούτσος, 2016).

1.4. Απόδοση Φωτοβολταϊκού στοιχείου και Απώλειες

Η αποδοτικότητα αποτελεί την πιο κοινή χρησιμοποιούμενη παράμετρο σύγκρισης της απόδοσης μεταξύ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με ένα άλλο. Εκφράζει την δυνατότητα μετατροπής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

Εξίσωση 1.4.1

$$n = \frac{P_m}{P_{inc}} \cdot 100\%$$

Όπου:

- P_m : Η ισχύς της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- P_{inc} : Η ισχύς της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας.

Ανεξαρτήτως της ραγδαίας εξέλιξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, η απόδοση των συστημάτων δεν ξεπερνά το 20%, μιας και οι καιρικές συνθήκες (όταν έχει ηλιοφάνεια), η θέση (νότιος προσανατολισμός) και η κλίση (10° - 40°) των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η σύνεχης συντήρηση τους (καθαρισμός για αποφυγή επικαθίσεων και απομάκρυνση σκόνης), επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Με την πάροδο του χρόνου και όταν δεν τηρούνται τα παραπάνω, μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος (Monto Mani, Rohit Pillai, 2010).

1.5. Εγκατάσταση και ενσωμάτωση Φωτοβολταϊκών σε Κτίρια(Building Integrated PV)

Η εγκατάσταση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών σε κτίρια(BIPV), αποτελεί μια σύγχρονη και πολλά υποσχόμενη λύση στην σειρά μέτρων που απαιτούνται για τη μακροπρόθεσμη μετάβαση των αστικών περιοχών σε ένα βιώσιμο και αειφόρο περιβάλλον. Τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά, αντικαθιστούν υλικά της εξωτερικής δομής του κτιρίου όπως, σκεπές, προσόψεις, φεγγίτες, παράθυρα, ακόμα και θόλους στάθμευσης. Οι εφαρμογές των (BIPV) επιδιώκονται συνεχώς μιας και σε αντίθεση με τα απλά φωτοβολταϊκά(PV) το επιπλέον κόστος που σχετίζεται με τα (BIPV), αντισταθμίζεται από το κόστος των οικοδομικών υλικών που αντικαθιστά η συγκεκριμένη τεχνολογία. Σε πολλές περιπτώσεις, τα (BIPV) αποδίδουν καλύτερα από παραδοσιακά υλικά κατασκευής. Για παράδειγμα, τα (BIPV) έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν 25 χρόνια ενώ, υλικά όπως, τα βότσαλα ασφάλτου που χρησιμοποιούνται στις σκεπές των κτιρίων, αντέχουν 15 με 20 χρόνια(Owen Temby, Konstantinos Kapsis and others,2014).

Στην διάρκεια της ιστορίας των φωτοβολταϊκών, έχουν κατασκευαστεί διάφορα είδη τεχνολογιών.

- Οι πιο κοινές PV και BIPV μονάδες χρησιμοποιούν μονο-κρυσταλλική(mono-Si), πολύ-κρυσταλλική(poly-Si) ή μονή σύνδεση πυριτίου(Si), με την απόδοση των πρώτων να φθάνουν έως και 21,5%, ξεπερνώντας όλες τις τρέχουσες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στην αγορά, κατάλληλες για εφαρμογές BIPV. Συνήθως έχουν μπλε/ μαύρη εμφάνιση εξαιτίας της αντανάκλαστικής επίστρωσης που εφαρμόζεται στα φωτοβολταϊκά κύτταρα για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες φωτός.
- Η πρόοδος που έχει σημειωθεί στα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα, έχει οδηγήσει στην παραγωγή BIPV με χαμηλότερο κόστος. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες λεπτής μεμβράνης, χρησιμοποιούν άμορφο πυρίτιο(a-Si), τεχνολογίες λεπτού υμενίου-χαλκού-ινδίου-γαλλίου-σεληνίου(CIGS) και τελλουριούχου καδμίου(CdTe), με το προτελευταίο να αποτελεί την κυρίαρχη τεχνολογία στην αγορά καθώς, έχει την μεγαλύτερη, θεωρητική απόδοση που αγγίζει το 20%. Τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα έχουν άκαμπτη ή εύκαμπτη μορφή, σε διάφορα χρώματα, ενώ μπορεί να παρουσιάζουν διαφανή, ημιδιαφανή, αδιαφανή χαρακτηριστικά(όσο μεγαλύτερη η διαφάνεια τόσο χαμηλότερη είναι η απόδοση του Φ/B στοιχείου), κατάλληλη για εφαρμογές σε κάθε εξωτερική δομή του κτιρίου(Owen Temby, Konstantinos Kapsis, Harris Berton, Daniel Rosenbloom, Geoffrey Gibson, Andreas Athienitis & James Meadowcroft,2014).

1.6. Εφαρμογή Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε προσόψεις κτιρίων

Η πρόσοψη κάθε κτιρίου είναι κατασκευασμένη από τοίχους, τζάμια, επένδυση και άλλες κατασκευές όπως, συσκευές σκίασης και μπαλκόνια. Κάθε ένα από αυτά τα δομικά στοιχεία παρέχει ευκαιρίες για ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στο κτίριο. Η πρόσοψη του κτιρίου διαχωρίζει το εσωτερικό με το εξωτερικό τμήμα περιβάλλοντος, αλλά είναι απαραίτητο να παρέχει φωτισμό και να υπάρχει οπτική επαφή με τον εξωτερικό χώρο του κτιρίου. Επιπλέον, είναι αναγκαίο η πρόσοψη να διαθέτει οργανωμένο σύστημα εξαερισμού, με τέτοιο τρόπο, ώστε ο χρήστης να έχει πρόσβαση στα παράθυρα του κτιρίου. Οι διαφανείς και ημιδιαφανείς προσόψεις, έχουν την ικανότητα να απορροφούν την ηλιακή προσπίπτουσα ακτινοβολία και να την μετατρέπουν εκτός από ηλεκτρική ενέργεια και σε θερμότητα, παρέχοντας ικανοποιητικά επίπεδα φωτισμού στην διάρκεια της ημέρας, καθώς και μείωση στις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για ψύξη. Αποτελούν μια αρκετά ενδιαφέρουσα επιλογή για τον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό τομέα ώστε να καθιερωθεί ένα υγιές περιβάλλον βασισμένο στην ανανεώσιμη και βιώσιμη ενέργεια.



Εικόνα 1.6.1: Παράδειγμα εφαρμογής BIPV σε πρόσοψη σπιτιού στο Άνκορατζ της Αλάσκας από την Artic Solar Ventures Corporation, η φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Dennis Schroeder, NREL, 2018.

1.7. Εφαρμογή PV σε οροφές κτιρίων

Η ενσωμάτωση BIPV στις στέγες των κτιρίων αποτελεί την πιο ιδανική λύση μιας και υπάρχει λιγότερη σκίαση στην οροφή από ότι στο επίπεδο του εδάφους αλλά και παρέχει μια μεγάλη, αχρησιμοποίητη επιφάνεια για ενσωμάτωση. Σαν αποτέλεσμα, η ισχύς που παράγεται είναι μεγαλύτερη από αυτή του εδάφους και ταυτοχρόνως επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση από το BIPV σύστημα.

Τα προϊόντα πλακιδίων (BIPV) ενδέχεται να καλύπτουν ολόκληρη τη στέγη ή επιλεγμένα μέρη της οροφής. Συνήθως είναι διατεταγμένα σε δομοστοιχεία με την εμφάνιση και τις ιδιότητες των τυπικών πλακιδίων οροφής και αντικαθιστούν έναν ορισμένο αριθμό παραδοσιακών πλακιδίων οροφής, επιτρέποντας επίσης εύκολη μετασκευή οροφών. Ο τύπος κελιού και το σχήμα πλακιδίων ποικίλλει. Ορισμένα προϊόντα πλακιδίων μπορεί να μοιάζουν με καμπύλα κεραμικά πλακίδια και δεν θα είναι τόσο αποτελεσματικά στην περιοχή λόγω της καμπύλης επιφάνειας, αλλά αναβαθμίζουν την αισθητική του κτιρίου(Bjorn Petter Jelle,2015).



Εικόνα 1.7.1: Παράδειγμα εφαρμογής ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών στην οροφή εκκλησίας, η φωτογραφία τραβήχτηκε από τον Dennis Schroeder, NREL, 2017.

1.8. Εφαρμογή PV σε φεγγίτες κτιρίων

Η προσπάθεια ενσωμάτωσης BIPV σε φεγγίτες, αποτελεί ένα από τα πιο ενδιαφέροντα μέρη σε ένα κτίριο. Σε αυτή την περίπτωση τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και φως στο κτίριο. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες και οι δομές στήριξης που χρησιμοποιούνται είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε ημιδιαφανείς γυάλινες προσόψεις. Οι κατασκευές, οι οποίες μπορεί να είναι μη θεαματικές από το εξωτερικό, στο εσωτερικό βελτιώνουν το αισθητικό περιβάλλον(Marry Debbarma,K.Sudhakar,Prashant Baredar,2017).



Εικόνα 1.8.1:Παράδειγμα ενσωμάτωσης BIPV στην σκεπή ενός σχολείου, σχεδιασμένο από την κατασκευαστική εταιρία Romag.

1.9. Εφαρμογή PV σε χώρους σκίασης

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, διαφορετικών σχεδίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατασκευές σκίασης σε χώρους στάθμευσης, ως προέκταση στο υπάρχον κτίριο(π.χ μπαλκόνια) και με την χρήση ηλιακού ανιχνευτή(tracker), τα εγκατεστημένα BIPV θα έχουν την κατάλληλη κλίση για απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και παράλληλα θα παρέχουν μια ικανοποιητική κλίση για σκίαση.



Εικόνα 1.9.1: Παράδειγμα εφαρμογής BIPV για σκίαση σε χώρο στάθμευσης, κατασκευασμένο από την εταιρία National Renewable Energy Laboratory, 2017.

1.10. Κατηγοριοποίηση τρόπου ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών σε κτίριο

Οι δύο κύριες κατηγορίες που απαρτίζουν τα φωτοβολταϊκά, τα οποία ενσωματώνονται στα κτίρια, είναι τα BIPV και τα BAPV. Η δεύτερη ταξινόμηση αφορά φωτοβολταϊκά που αποτελούν πρόσθετη κατασκευή και δεν αντικαθιστούν κάποιο δομικό στοιχείο του κτιρίου. Τοποθετούνται συνήθως στην οροφή αφού έχει πραγματοποιηθεί η κατασκευή του κτιρίου και όχι ταυτόχρονα(όπως γίνεται, συνήθως, στην περίπτωση των BIPV). Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες του BAPV συστήματος(Standoff και rack-mounted), οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα σε επιφάνειες κεκλιμένων σκεπών και σε επίπεδες στέγες και διαμορφώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν τον βέλτιστο προσανατολισμό και κλίση, αντιστοίχως. Τα BAPV συνδέονται μέσω στηριγμάτων, τα οποία, στερεώνονται μηχανικά σε ένα τμήμα δομής της σκεπής. Αποτελεί σημαντική προτεραιότητα, η συστοιχία των φωτοβολταϊκών στοιχείων να παραμένει σταθερή σε αντίξοες καιρικές συνθήκες(ισχυροί άνεμοι ή άλλα φορτία που θα προκαλούσαν την μετακίνηση της συστοιχίας), ώστε τα BAPV να έχουν καλές αποδόσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.10.1: Παράδειγμα εφαρμογής BAPV σε στέγη κτιρίου, από την NREL(National Renewable Energy Laboratory),2017.

1.11. Σύγχρονη φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Ανεξαρτήτως του πόσο έχει εξελιχθεί σήμερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, η αναζήτηση για καινούργια Φ/Β στοιχεία, έχει επενδύσει σε χαμηλού κόστους με σχετικά χαμηλή απόδοση οργανικά πλαίσια, υψηλής απόδοσης πλαίσια καθώς και ηλιακά συστήματα απορρόφησης ηλιακής ενέργειας, ενσωματωμένα στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

1.12. Πολλαπλά στρώματα φωτοβολταϊκών κυττάρων(Sandwich solar cells)

Ο σχηματισμός πολλαπλών στρώσεων φωτοβολταϊκών κυττάρων, από διαφορετικά υλικά, διαφορετικό πάχος και διαφορετικά ποσοστά απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να αποφέρει υψηλά επίπεδα απόδοσης. Το πρώτο στρώμα, απορροφά το μπλε φως(ορατό,400nm) και επιτρέπει στα υπόλοιπα μήκη κύματος να περάσουν στα υπόλοιπα στρώματα των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το πράσινο και κίτρινο φως απορροφούνται από την μεσαία στρώση, ενώ το κόκκινο φως(700nm) από την τελευταία.

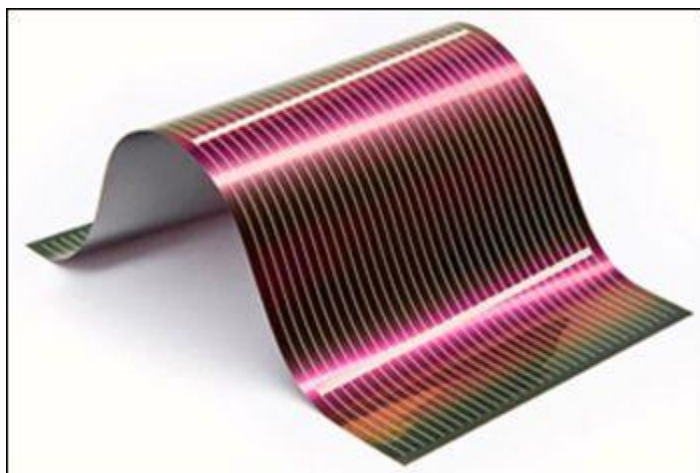
1.13. Φωτοβολταϊκά κύτταρα ευαισθητοποιημένα με βαφή(dye-sensitized solar cells)

Μια άλλη μέθοδος που στοχεύει σε μια πιο οικονομική λύση(χαμηλό κόστος-χαμηλή απόδοση), βασίζεται σε φωτοβολταϊκά κύτταρα <<ευαισθητοποιημένα με βαφή>> ή αλλιώς dye-sensitized solar cells(DSSC), υψηλά συστήματα απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και οργανικά πολυμερή. Ο τρόπος κατασκευής τους δεν αποτελεί δύσκολο έργο, αφού στηρίζεται στην τεχνική εκτύπωσης τους σε ρολό. Επιπλέον, έχουν εύκαμπτη και ημιδιαφανή υφή.Η εξέλιξη του τομέα έχει οδηγήσει, τα οργανικά φωτοβολταϊκά κυττάρνα να ανταγωνίζονται τεχνολογίες, που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα και εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα, εξαιτίας των υψηλών αποδόσεων που έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια(11,5% το έτος 2015). Η τεχνολογία DSSC,

αν και βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο και σε μικρή αγορά, έχει φανερώσει θετικά και υποσχόμενα σημάδια στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών κυττάρων, χάρις του χαμηλού κόστους παραγωγής και της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εξασφαλίζοντας μικρά και σταθερά ποσά παραγωγής ενέργειας τα οποία συνάγουν σε γρήγορο ρυθμό απόσβεσης(Bjorn Petter Jelle,2015).

1.14. Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα CIGS(χαλκού-ινδίου-γάλλιου-σεληνίου)

Τα CIGS αποτελούν μια αρκετά υποσχόμενη φωτοβολταϊκή τεχνολογία,η οποία, αν και βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, σύντομα θα απασχολήσει το ευρύ κοινό. Η υψηλή απόδοση ενέργειας, ο μικρός συντελεστής απώλειας ισχύος, η χαμηλή ευαισθησία στη σκίαση, και η σχετικά γρήγορη απόσβεση, σε περίπτωση εγκατάστασης, απαρτίζουν μερικά από τα πλεονεκτήματα των CIGS έναντι των κλασσικών τεχνολογιών PV. Η ικανότητα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, μαζί με εύκαμπτα και ελαφριά υποστρώματα σε μεγάλες γυάλινες επιφάνειες απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας, ανοίγει νέους δρόμους προς την εφαρμογή της στον διαστημικό τομέα και σε οποιαδήποτε κινητή τεχνολογία. (Thomas Feurer and others,2016).

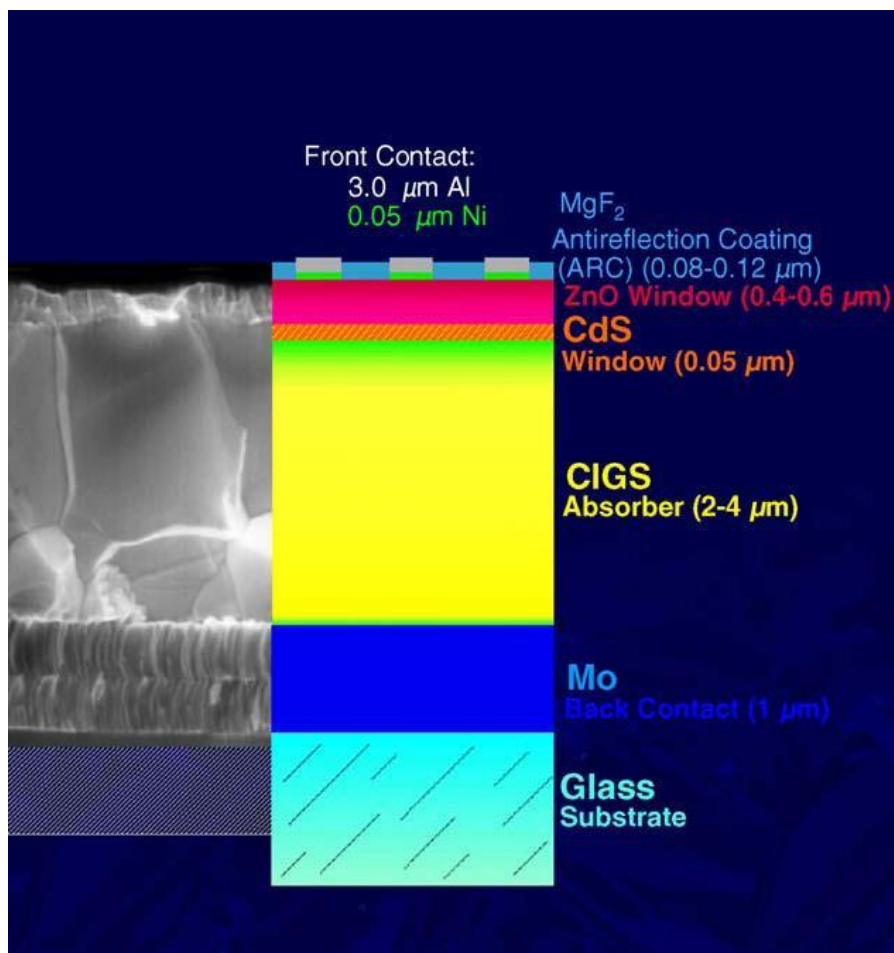


Εικόνα 1.14.1:Παράδειγμα φωτοβολταϊκού λεπτού υμένα CIGS, η φωτογραφία αποτελεί έργο του Frank Peters

1.15. Δομή των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CIGS

Η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας εξαρτάται από την σωστή κατασκευή και λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων.Τα κύτταρα αυτά, εξαρτώνται από ημιαγωγούς, οι οποίοι, παράγουν ηλεκτρισμό όταν θερμαίνονται ή όταν συνδυάζονται με άλλα υλικά. Ο ημιαγωγός που αναμιγνύεται με φώσφορο, αναπτύσσει μια περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων, γνωστός και ως n-type. Από την άλλη, ο ημιαγωγός που αναμιγνύεται με βόριο, αποτελεί τον p-type και δημιουργεί χώρους(οπές) που δέχονται τα ηλεκτρόνια. Η δομή της νεότερης γενιάς φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CIGS, αποτελείται από ένα υπόστρωμα λεπτού γυαλιού μαζί με ένα

μεταλλικό στρώμα μολυβδενίου(Mo).Με την εναπόθεση του μολυβδενίου, σχηματίζεται ένα στρώμα ημιαγωγίμου υλικού με λειτουργία παρόμοια αυτής του p-type. Στο πάνω μέρος αυτού του στρώματος, υπάρχει ένα στρώμα από θειούχο κάδμιο(CdS), που λειτουργεί ως n-type της κλασσικής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Η επόμενη στρώση αποτελείται από οξείδιο του ψευδαργύρου(ZnO), οποίο καλύπτεται από ένα πιο παχύ στρώμα αλουμινίου(Al), ενισχυμένο με οξείδιο του ψευδαργύρου(William Harris,2008).



Εικόνα 1.15.1:Δομή του φωτοβολταϊκού κυττάρου τεχνολογίας CIGS, Kazmerski L,2005

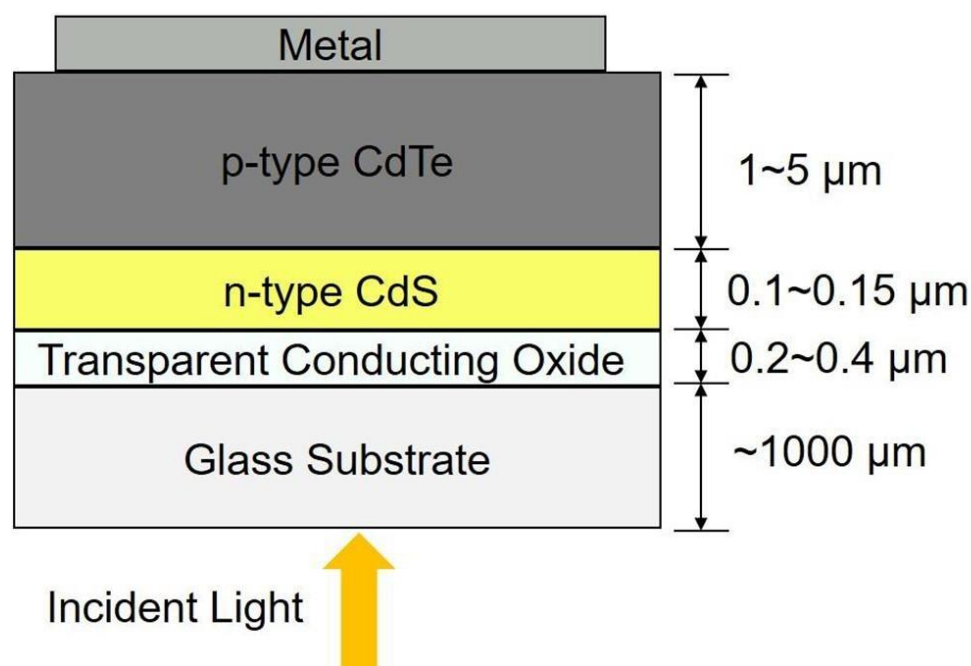
1.16. Φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα CdTe(τελλουριούχου καδμίου)

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα CdTe, αποτελούν το πιο φθηνό προϊόν από αυτά που προσφέρει η τεχνολογία φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα(CIGS, a-Si) αλλά παρουσιάζουν την μεγαλύτερη επίδοση στην σχέση “απόδοση-κόστος” μετατρέποντάς τα, στην πιο αξιόλογη επιλογή στον τομέα τους. Η πρώτη αναφορά τους, πραγματοποιήθηκε το 1972 από τους Bonnet και Rabnehorst, οι οποίοι ανέπτυξαν ένα λεπτό πλαίσιο CdTeCds, με μέγιστη απόδοση 6%. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η απόδοση αυξήθηκε σημαντικά, φθάνοντας μέχρι και σε ποσοστό 21% σε περιβάλλον εργαστηρίου, της First Solar. Το τελλουριούχο κάδμιο έχει αναγνωριστεί ως το πιο κατάλληλο υλικό για τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα, καθώς η ιδιότητα να απορροφά περισσότερο από το 90% των λαμβανόμενων φωτονίων σε πάχος 1μm και η κατάλληλη ενέργεια χάσματος(1.45eV) που διαθέτει, οδηγεί σε

καλύτερη απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου(1-3μm) είναι ιδανικά για την βέλτιστη λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Οι πηγές του τελλουρίου είναι περιορισμένες, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανησυχία στον επιστημικό κλάδο, όσον αφορά την κατασκευή μεγάλων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Για την εξισορρόπηση αυτής της έλλειψης, υπάρχει ανάγκη δημιουργίας λεπτότερων CdTe πλαισίων. Σε βάση κύκλου ζωής, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία CdTe, έχει το μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα, την μικρότερη χρήση νερού, τον συντομότερο χρόνο απόσβεσης, καθώς και χρόνο ζωής 10 με 15 χρόνια.

1.17. Δομή των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CdTe(τελλουριούχου καδμίου)

Η δομή ενός CdTe μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτή του CIGS. Αποτελείται από ένα υπόστρωμα γυαλιού, ένα διάφανο αγωγίμο υλικό, όπως αυτό του οξειδίου κασσιτέρου(TCO), ένα στρώμα θειούχου καδμίου(CdS), το οποίο λειτουργεί ως n-type ημιαγωγός,ακολουθεί το στρώμα του τελλουριούχου καδμίου(CdTe), με λειτουργία παρόμοια του p-type ημιαγωγού και τέλος μια μεταλλική στρώση μολυβδενίου(Mo)(Kazi Sajedur Rahman and others,2019).



Εικόνα 1.17.1: Η κατασκευαστική δομή ενός CdTe/CdS φωτοβολταϊκού κυττάρου

2.0 Μεθοδολογία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα σχολιαστούν διεξοδικά, τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

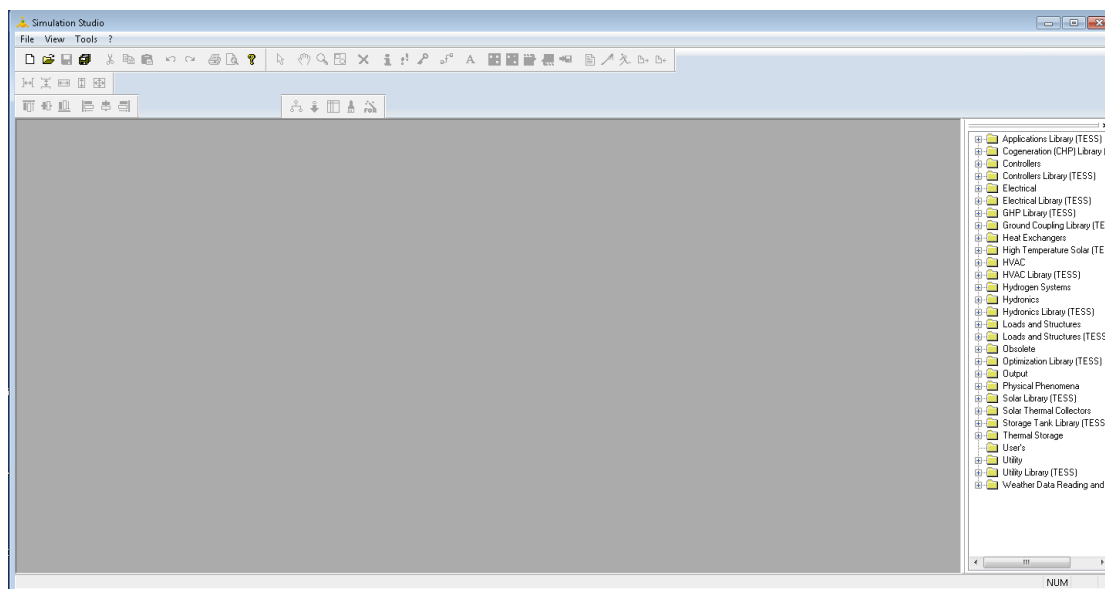
2.1.Λογισμικό TRNSYS(Transient System Simulation Tool)

Το TRNSYS αποτελεί ένα ευέλικτο λογισμικό περιβάλλον που στοχεύει στην προσομοίωση παροδικών συστημάτων, ενώ η αρχική του εφαρμογή αποσκοπούσε στην δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός ηλιακού συλλέκτη σε διάστημα ενός χρόνου, ώστε να υπολογιστεί η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση κόστους ενός τέτοιου συστήματος. Χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα της μηχανικής σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αξιολόγηση απόδοσης συστημάτων θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι και στην μοντελοποίηση δυναμικών συστημάτων όπως αυτά των βιολογικών διεργασιών.

Το συγκεκριμένο λογισμικό αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο είναι μια μηχανή, που ονομάζεται πυρήνας, επεξεργάζεται τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, επιλύει το σύστημα σε πολλές επαναλήψεις και εμφανίζει τις μεταβλητές σε διαγράμματα. Το δεύτερο τμήμα το λογισμικού, αποτελεί μια εκτεταμένη βιβλιοθήκη στοιχείων καθένα από τα οποία προσομοιάζουν την απόδοση και συμπεριφορά τους στο συνολικό σύστημα. Περιλαμβάνει περίπου 150 στοιχεία και μοντέλα με πληθώρα χρήσεων σε κατηγορίες όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(π.χ ηλιακοί συλλέκτες, φωτοβολταϊκά), συστήματα εξαερισμού(HVAC), κατασκευαστικά μοντέλα(π.χ αντλίες), συστήματα παραγωγής υδρογόνου,κ.α. Η γενική ιδέα του λογισμικού ήταν και εξακολουθεί να είναι, η προσομοίωση της συμπεριφοράς ολόκληρου του συστήματος διασπώντας το σε ξεχωριστά τμήματα/στοιχεία, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στον χρήστη να τροποποιήσει τα υπάρχοντα δεδομένα, επεκτείνοντας με αυτό τον τρόπο τις δυνατότητες του προγράμματος.

2.2. Simulation Studio

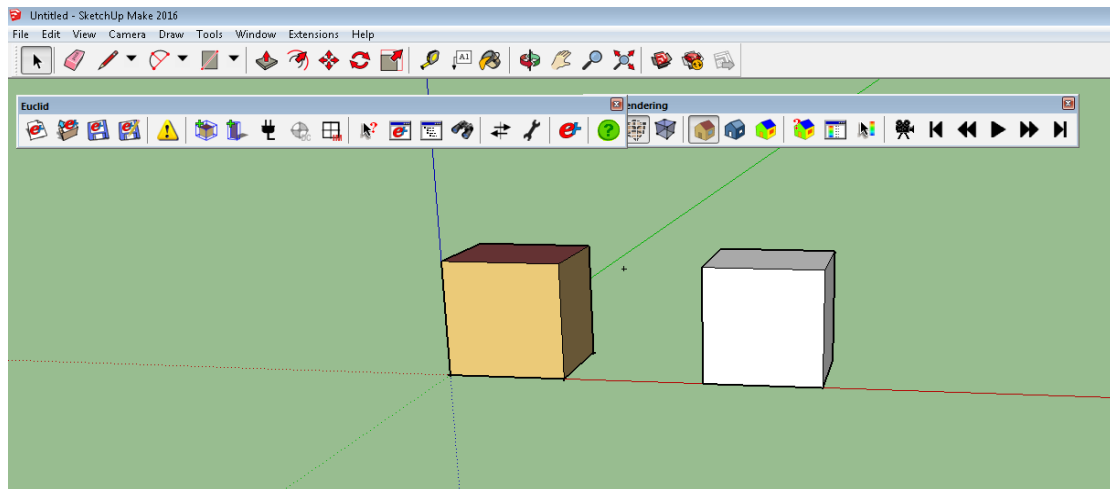
Το στούντιο προσομοίωσης(simulation studio), αποτελεί το κύριο τμήμα του λογισμικού, με υψηλές δυνατότητες εξοικίωσης του χρήστη, μέσα από το οποίο, θα είναι ικανός να συναρμολογήσει κάθε είδους σύστημα, επικεντρώνοντας την προσοχή του σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά αλλά και στις συνδέσεις αυτού. Τα δεδομένα εξόδου κάθε στοιχείου αποτελούν δεδομένα εισόδου κάποιου άλλου. Για την ορθή κατασκευή ενός μοντέλου προσομοίωσης, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τα στοιχεία που χρειάζεται από την εκτενή βιβλιοθήκη του λογισμικού, να επεξεργαστεί τα χαρακτηριστικά του κάθε στοιχείου, δεδομένα εισόδου και παραμέτρους, να ολοκληρώσει τις μεταξύ τους συνδέσεις και να <<τρέξει>> την προσομοίωση. Στην διάρκεια της προσομοίωσης, εκτελούνται όλες οι μαθηματικές εξισώσεις που απαρτίζουν το σύνολο του συστήματος ενώ, τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε μια ξεχωριστή επιφάνεια εργασίας στην μορφή διαγράμματος.



Εικόνα 2.2.1: Αρχική επιφάνεια εργασίας του Simulation Studio.

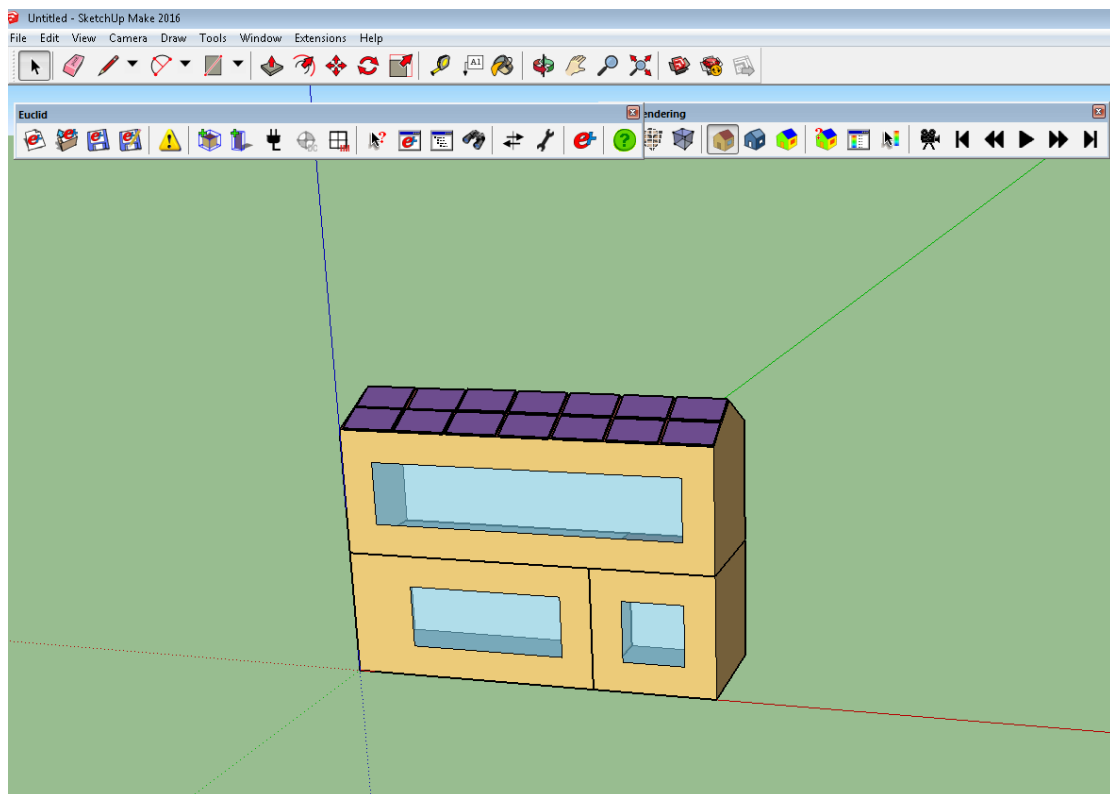
2.3.Λογισμικό Sketch Up

Το πρώτο βήμα της εργασίας, αποτέλεσε ο σχεδιασμός του κτιρίου με το λογισμικό Sketch up, με την βοήθεια των εργαλείων(tools), της επιφάνειας του λογισμικού περιβάλλοντος Energy plus. Η εργαλειοθήκη του Energy plus, κατέχει διάφορες επιλογές που βοήθησαν στην καλύτερη εξοικείωση του λογισμικού και στην σωστή κατασκευή του κτιρίου της εργασίας. Επίσης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο περιβαλλόντων εργασίας ήταν ότι το Sketch up δεν αναγνωρίζει το είδος των επιφανειών που καλύπτουν το κτίριο (π.χ πόρτες, οροφή, παράθυρα) με αποτέλεσμα να έχει ομοιόμορφη χρωματική απεικόνιση(άσπρη) ενώ, το Energy plus αναγνωρίζει τις διαφορετικές επιφάνειες και τους δίνει διαφορετικά χρώματα(σκούρο καφέ για τις πόρτες, γαλάζιο για τα παράθυρα, σκούρο κόκκινο για την οροφή.



Εικόνα 2.3.1:Αριστερά, παρατηρείται το κτίριο στο λογισμικό περιβάλλον του Energy plus ενώ δεξιά, στο λογισμικό Sketch up.

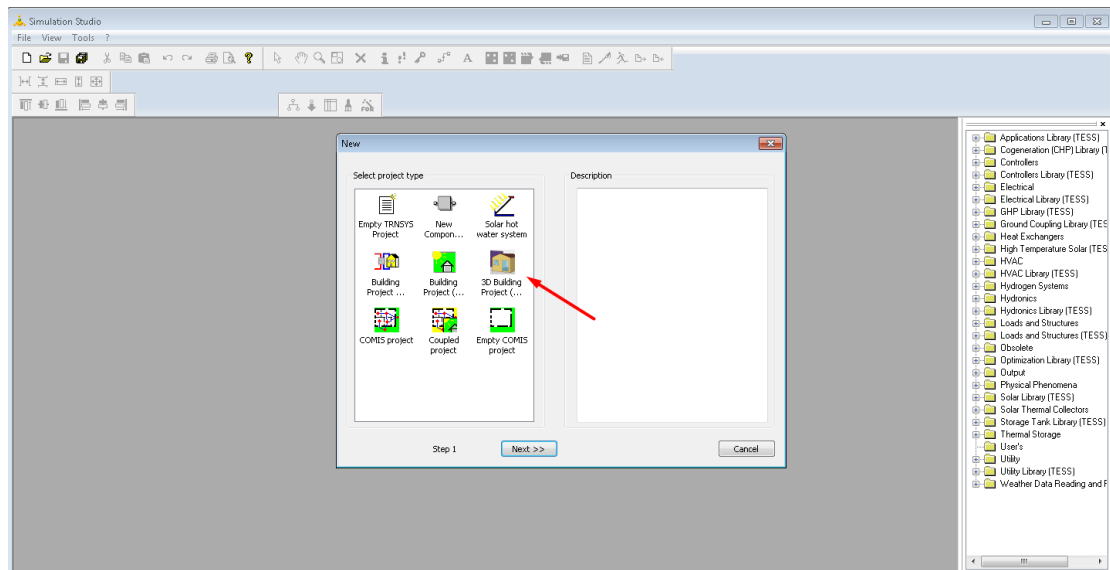
Το υπό μελέτη κτίριο δεν αντιπροσωπεύει κάποια ήδη υπάρχουσα κατασκευή, αλλά δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας. Αποτελεί μια διώροφη κατασκευή, όπου στεγάζεται μια τετραμελής οικογένεια, στον νομό Χανίων.



Εικόνα 2.3.2:Το υπό μελέτη κτίριο στο λογισμικό του Sketch up, με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στην οροφή

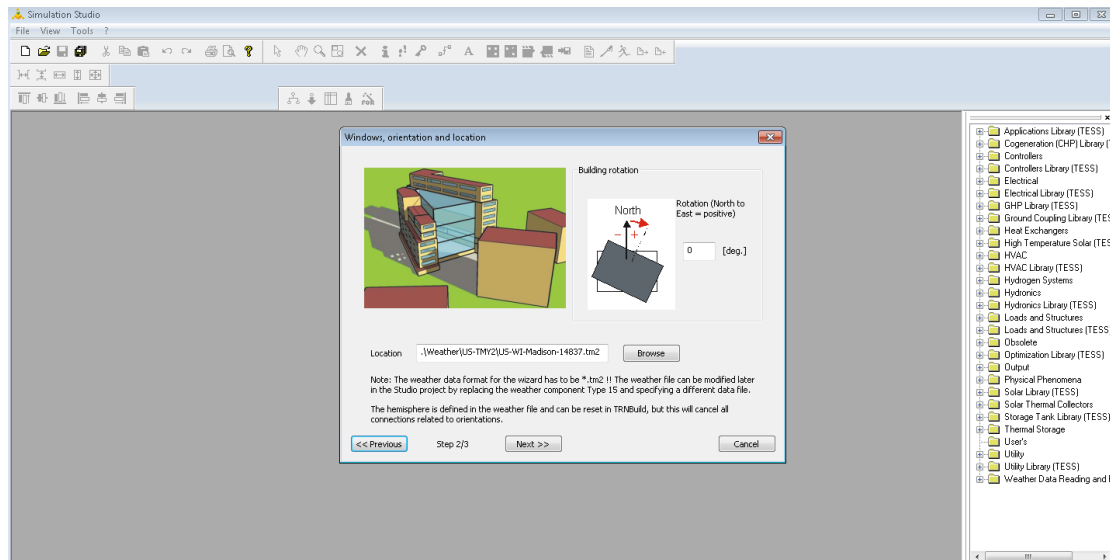
2.4. Μοντέλο προσομοίωσης (3D Multizone Building Project)

Στην επιφάνεια εργασίας του λογισμικού TRNSYS, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα από διάφορα πρότζεκτ, το κάθε ένα με ξεχωριστές εφαρμογές και δυνατότητες. Αφού επιλέχθηκε το 3D Multizone Building,

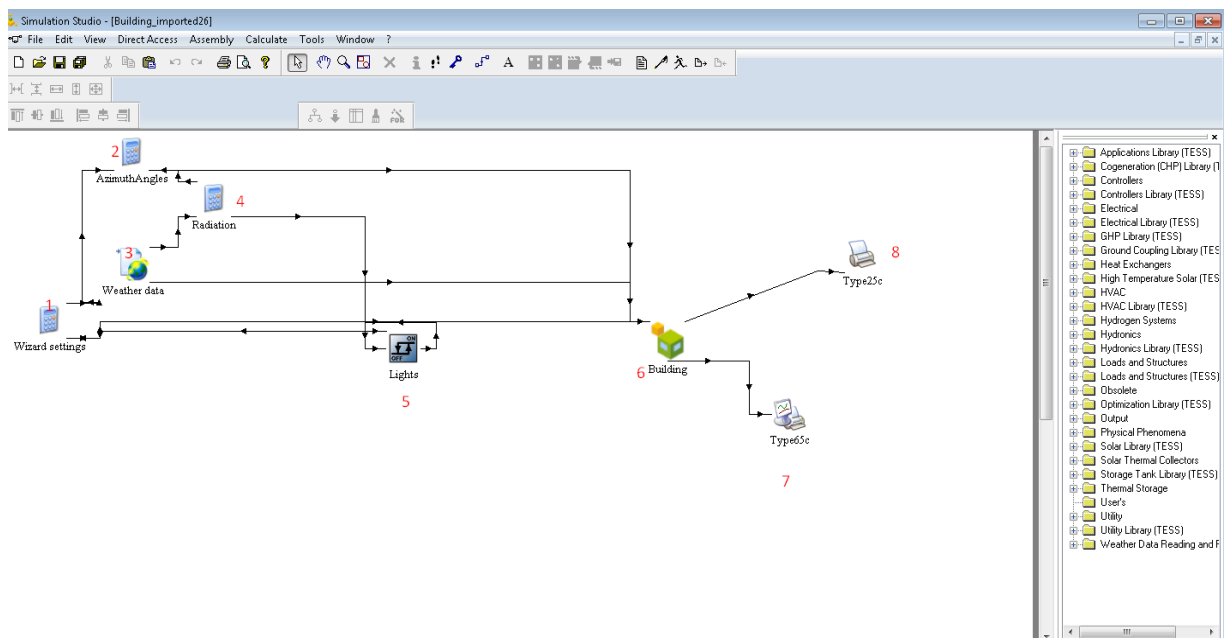


Εικόνα 2.4.1: Παράδειγμα επιλογής τύπου πρότζεκτ στην επιφάνεια εργασίας του TRNSYS

Πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή δεδομένων σχετικά με την τοποθεσία και τον προσανατολισμό του κτιρίου ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο, την μοντελοποίηση του κτιρίου στο λογισμικό περιβάλλον του TRNSYS.



Εικόνα 2.4.2: Εισαγωγή στοιχείων προσανατολισμού και τοποθεσίας του κτιρίου



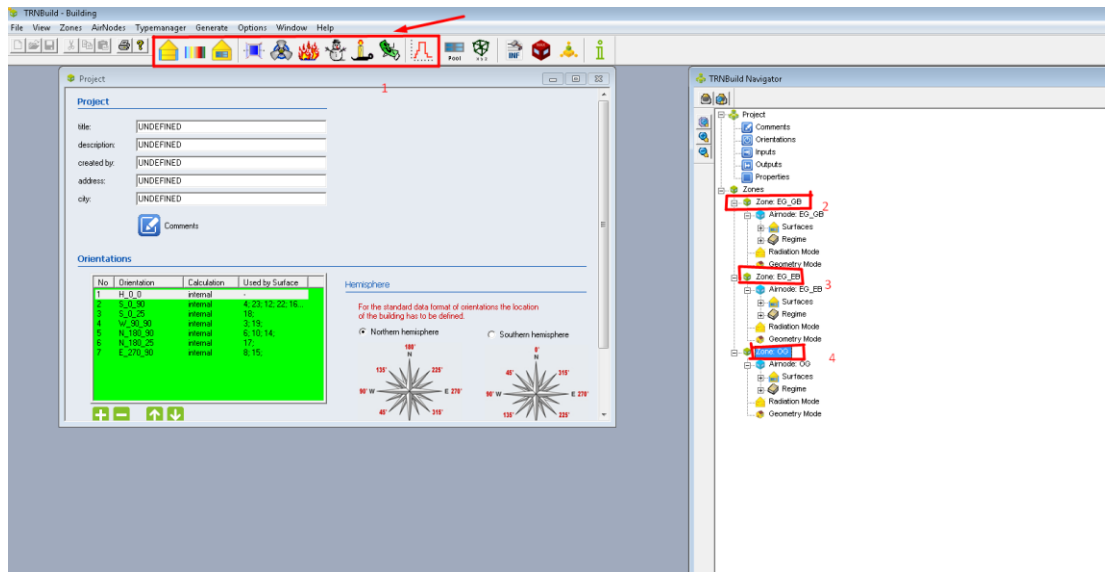
Εικόνα 2.4.3: Το μοντέλο προσομοίωσης (3D Building Project) στο λογισμικό TRNSYS

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί την αρχική προσομοίωση του κτιρίου χωρίς την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών και χωρίς σύστημα εξαερισμού HVAC. Παρακάτω θα γίνει η ανάλυση των στοιχείων που αποτελούν το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης. Τα δεδομένα 1 έως 6 προκύπτουν αυτόματα από το μοντέλο και οι μοναδικές συνδέσεις που πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα, ήταν αυτές των 6,7 και 8.

1. Αποτελεί ένα σύνολο εξισώσεων, όπου εμπεριέχουν όλα τα δεδομένα και τις μεταβλητές σχετικά με προσπίπτουσα ακτινοβολία στην πρόσοψη του κτιρίου και την επιμέρους σκίαση του. Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται αυτομάτως από το λογισμικό.
2. Περιλαμβάνει τα δεδομένα προσανατολισμού του κτιρίου.
3. Type 15: Εμπεριέχει όλα τα καιρικά δεδομένα για τον νομό Χανίων, τα οποία πρέπει βρίσκονται και στην ανάλογη μορφή αρχείου (.tm2), ώστε να αναγνωριστεί από το λογισμικό TRNSYS.
4. Σύνολο εξισώσεων, όπου περιλαμβάνει το σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων(ζενίθ, αζιμούθιο) και την συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στις επιφάνειες του κτιρίου.
5. Type 2: Αποτελεί έναν ελεγκτή, ο οποίος, δημιουργεί μια λειτουργία ελέγχου του φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου, που μπορεί να έχει τιμές μεταξύ 0(για $i=0$, κλειστά φώτα) και 1(για $i=1$, ανοιχτά φώτα). Η τιμή που θα λάβει η μεταβλητής, επιλέγεται ως συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ ορίων που θέτει το πρόγραμμα.
6. Type 56: Μοντελοποιεί την θερμική συμπεριφορά του κτιρίου και πιο συγκεκριμένα των ζωνών που αυτό αποτελείται. Για να λειτουργήσει σωστά αυτό το στοιχείο, είναι απαραίτητο να εκτελεστεί ένα ξεχωριστό πρόγραμμα(TrnBuild), το οποίο θα αναλύσουμε αργότερα.
7. Type 65c: Παρουσιάζει με γραφική απεικόνιση τις τιμές των μεταβλητών, που έχει επιλέξει ο χρήστης να εξετάσει.
8. Type 25c: Εμφανίζει τις τιμές των δεδομένων μέσω ενός εξωτερικού προγράμματος (της μορφής, .out, notepad) ώστε να μεταφερθούν στο excel, σε περίπτωση καλύτερης ανάλυσης και περαιτέρω επεξεργασίας από τον χρήστη.

2.5. TrnBuild

Το TrnBuild αποτελεί μια πλατφόρμα του TRNSYS, η οποία, εμπεριέχει το ανάλογο αρχείο του Sketch up και περιλαμβάνει όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά σχετικά με τους τοίχους, τις στρώσεις μονώσεων και τα παράθυρα του κτιρίου. Επιπροσθέτως, επιτρέπει στον χρήστη να επεξεργαστεί τα παραπάνω και να δημιουργήσει καινούργια συστήματα εξαερισμού, θέρμανσης, ψύξης, θερμικής άνεσης, αλλά και να ορίσει τις θερμικές ζώνες που απαρτίζουν το κτίριο.



Εικόνα 2.5.1: Επιφάνεια εργασίας στο TrnBuild

1. Στην εργαλειοθήκη, ο χρήστης μπορεί να προσδιορίσει τα γενικά τεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κτιρίου.
2. TrnBuild Navigator, περιλαμβάνει όλες τις θερμικές ζώνες του κτιρίου, τη γεωμετρική περιγραφή του κτιρίου καθώς και τα δεδομένα από την εργαλειοθήκη.

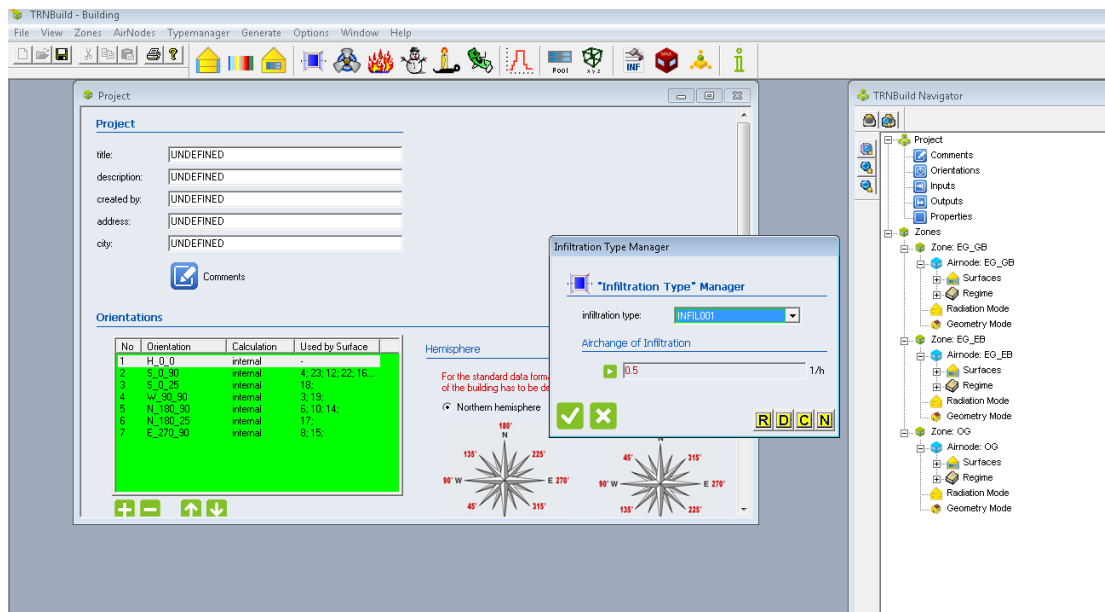
Το πρώτο στάδιο αφορά τον προσδιορισμό των υλικών που απαρτίζουν τους τοίχους, την οροφή και το πάτωμα του κτιρίου. Πρόκειται για ένα διώροφο κτίριο, με τρεις θερμικές ζώνες. Παρακάτω παρατίθενται τα υλικά κατασκευής, από τα οποία κατασκευάστηκαν οι τοίχοι, το δάπεδο και η οροφή του κτιρίου.

Πίνακας 2.5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά κατασκευής του κτιρίου

Κατασκευές	Υλικό	Πάχος(thickness)(m)	Πυκνότητα(Density)(kg/m^3)	Αγωγιμότητα(Conductivity)($W/m \cdot K$)	Ειδική Θερμοχωρητικότητα(Capacity)($kJ/kg \cdot K$)
Κεκλιμένη οροφή	Κεραμίδια	0,015	1400	2,52	1
	Ασφαλτόπανο	0,03	60	0,144	1
	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	0,16	2200	7,56	1
Εσωτερικός τοίχος	Επίχρισμα(τσιμεντοκόβια)	0,013	900	0,756	1
	Τούβλο	0,1	60	0,144	1
	Επίχρισμα(τσιμεντοκόβια)	0,013	900	0,756	1
Εξωτερική	Επίχρισμα(0,015	1400	2,52	1

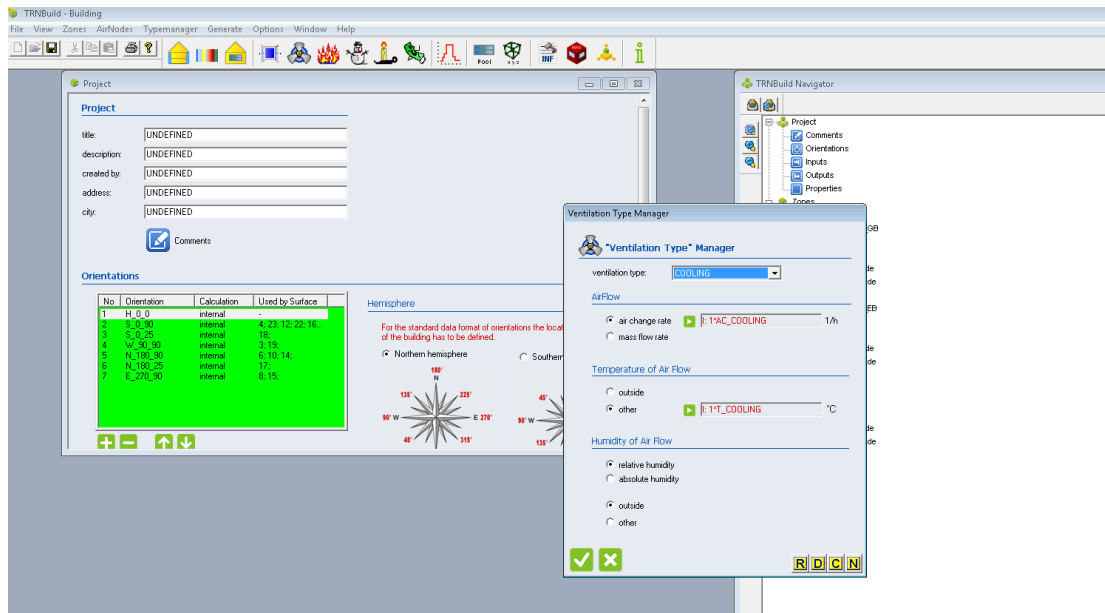
κός τοίχος	τσιμεντοκο νίαμα)				
	Τούβλο	0,175	1600	3,564	1
	Επίχρισμα(τσιμεντοκο νίαμα)	0,015	1400	2,52	1
Ταβάνι 1^{ου} ορόφου	Ασφαλτόπ ανο	0,015	1400	2,52	1
	Σκυρόδεμα μέσης πυκνότητα ς	0,16	2200	7,56	1
	Οπλισμένο σκυρόδεμα (1% χάλυβα)	0,3	60	0,173	1
Πάτωμα 1^{ου} ορόφου	Αμμοχάλικ ο	0,121	60	0,144	1
	Τσιμέντο	0,2	2200	7,56	1
	Επίχρισμα(τσιμεντοκο νίασμα)	0,05	2000	5,04	1
	Πλακάκι	0,005	700	0,288	1,3
Πάτωμα 2^{ου} ορόφου	Επίχρισμα(τσιμεντοκο νίασμα)	0,03	60	0,144	1,3
	Σκυρόδεμα μέσης πυκνότητα ς	0,05	2000	1,3	1
	Πλακάκι	0,005	700	0,288	1

Στη συνέχεια, επιλέχτηκε μια σχετικά φυσιολογική τιμή αερισμού του μεταξύ των θερμικών ζωνών, μιας και καθοριστικός παράγοντας στη μελέτη και σχεδιασμό του κτιρίου αποτέλεσε και ο άνεμος. Η κάθε πλευρά του κτιρίου επηρεάζεται διαφορετικά, ανάλογα με τον προσανατολισμό της προς την κύρια κατεύθυνση του. Οι διευθύνσεις και οι εντάσεις των επικρατούντων ανέμων επηρεάζουν σημαντικά τους χρήστες αλλά και το κτίριο.

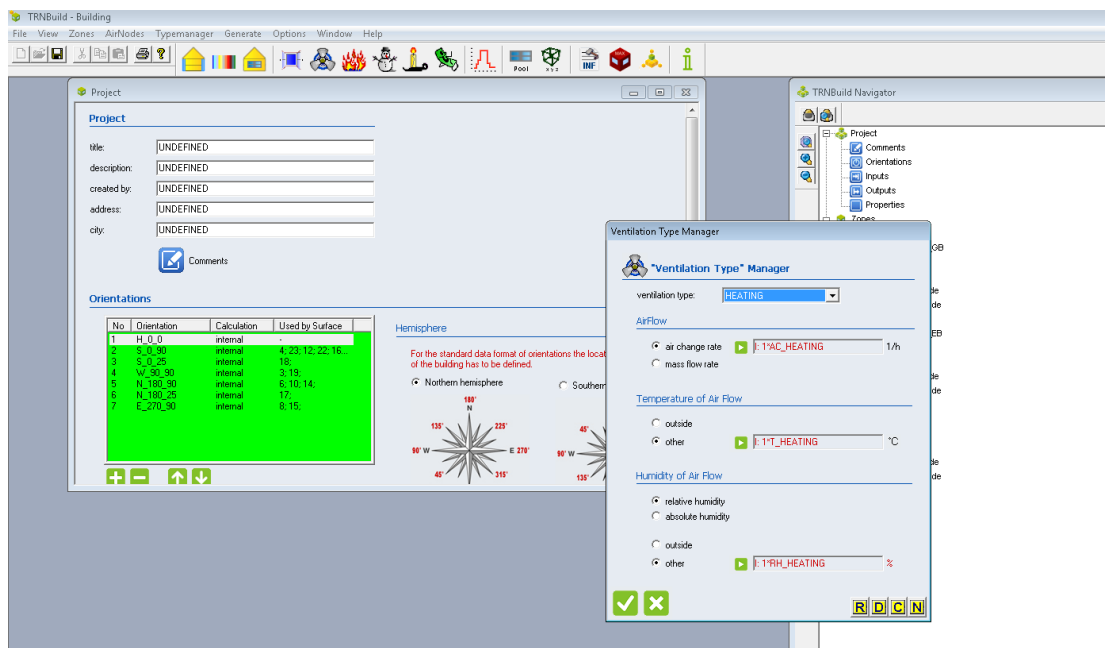


Εικόνα 2.5.3: Ενδεικτική τιμή αερισμού στο κτίριο

Τα βασικά τμήματα ενός ολοκληρωμένου συστήματος αυτοματισμού κτιρίου είναι η θέρμανση, ο εξαερισμός και ο κλιματισμός(HVAC). Όσον αφορά το σύστημα θέρμανσης χώρων, στηρίζεται συνήθως σε μια κεντρικά τοποθετημένη θερμαντική μονάδα ή αντλία θερμότητας, στην οποία αυξάνεται η θερμοκρασία του μέσου που χρησιμοποιείται για τη διανομή της θερμότητας στους χώρους που πρέπει να θερμανθούν. Το σύστημα κλιματισμού, περιλαμβάνει συγκεντρωμένα(ή κεντρικά) συστήματα αέρα, στα οποία όλα τα φορτία θέρμανσης και ψύξης παράγονται σε ένα κεντρικό δωμάτιο εγκαταστάσεων και μεταβιβάζονται στα δωμάτια με τη βοήθεια ενός δικτύου αγωγών. Σύμφωνα με όσα προηγήθηκαν, σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικές λειτουργίες στο σύστημα εξαερισμού του TrnBuild, έγινε η εισαγωγή των παραμέτρων εισόδου για θέρμανση και ψύξη, σχετικά με την ροή του αέρα, την θερμοκρασία του καθώς και την σχετική υγρασία.



Εικόνα 2.5.4: Σύστημα εξαερισμού για ψύξη

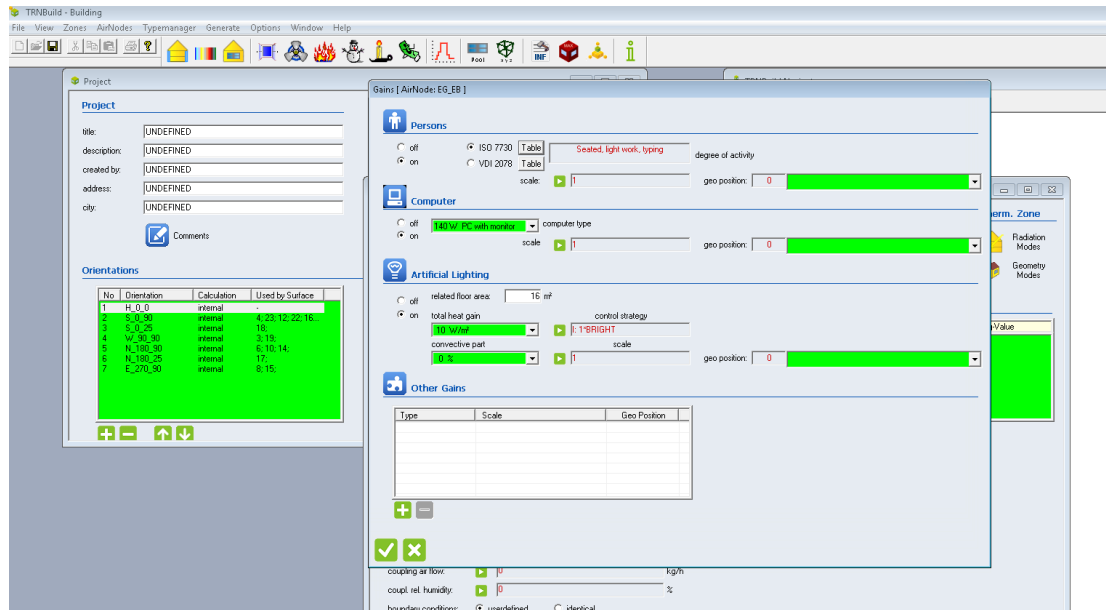


Εικόνα 2.5.5: Σύστημα εξαερισμού για θέρμανση

Επόμενο βήμα, αποτέλεσε ο προσδιορισμός του αριθμού των ατόμων, των ηλεκτρικών συσκευών καθώς και του φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου. Οι παραπάνω μεταβλητές είναι προκαθορισμένες από το σύστημα καθώς αναφέρονται μόνο στην περίπτωση που υπάρχει ένα άτομο στο κτίριο, αλλά δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει τα δεδομένα για τη δική του προσομοίωση. Για την ολοκλήρωση των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών δεδομένων του κτιρίου, θεωρήθηκαν τα παρακάτω:

Πίνακας 2.5.6: Χαρακτηριστικά της κατηγορίας "Gains" του κτιρίου

Θερμικές ζώνες	Εμβαδόν(m^2)	Άτομα(Persons)	Υπολογιστές(Computer)	Φωτισμός(Artificial Lighting)
1 ^η	32	1	140 W	17 W/ m^2
2 ^η	16	1	140 W	10 W/ m^2
3 ^η	48	2	280 W	55 W/ m^2



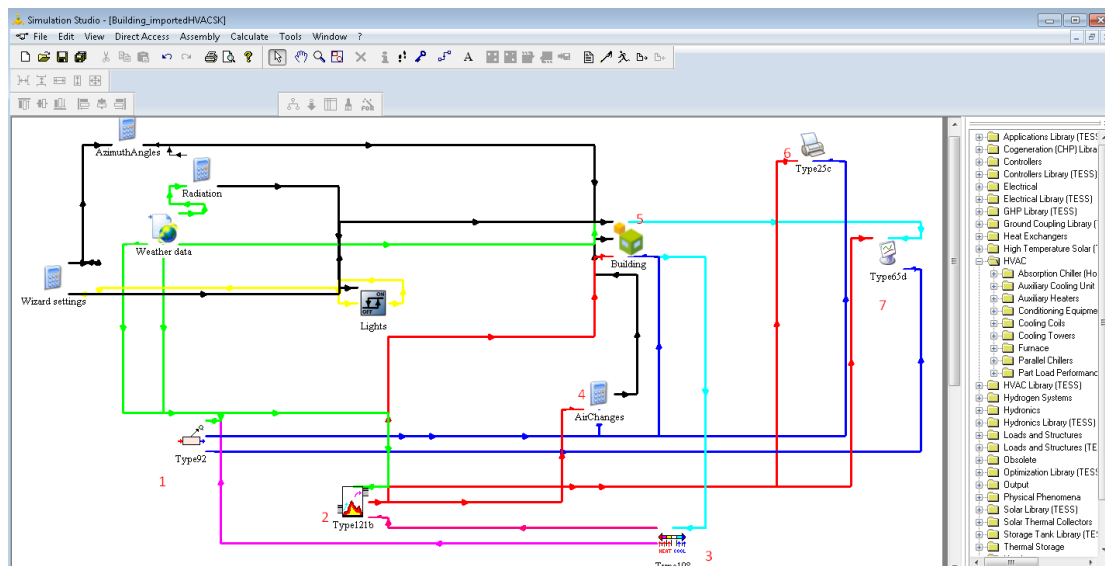
Εικόνα 2.5.7: Παράδειγμα εισαγωγής δεδομένων για εσωτερικά κέρδη (Gains) σε μία από τις τρεις θερμικές ζώνες

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης(ISO) προσδιορίστηκε η θερμική άνεση στο υπό μελέτη περιβάλλον.

Πίνακας 2.5.8: Χαρακτηριστικά θερμικής άνεσης

Βαθμός δραστηριότητας	Χώρος εφαρμογή	Συνολική ρυθμιζόμενη θερμότητα (total heat adjusted)(W)	Ειδική Θερμότητα (Sensible heat)(W)	Λανθάνουσα θερμότητα (latent heat)(W)
Καθιστική, ήπιας μορφής εργασία	Γραφείο, Ξενοδοχείο	150	75	75

Αφού ολοκληρώθηκε ο προσδιορισμός των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων του κτιρίου, στο λογισμικό περιβάλλον του TrnBuild, ακολούθησε η αναδιαμόρφωση του μοντέλου προσομοίωσης στο TRNSYS, ώστε να τοποθετηθούν τα κατάλληλα στοιχεία/ εξαρτήματα, να συνδεθούν μεταξύ τους αλλά και με τα προϋπάρχοντα δεδομένα της αρχικής προσομοίωσης, με απώτερο σκοπό την εγκατάσταση ενός HVAC συστήματος.



Εικόνα 2.5.9: Προσομοίωση του μοντέλου με εγκατάσταση HVAC συστήματος

1. Type 92: Αποτελεί μια βοηθητική συσκευή ψύξης, η οποία έχει σχεδιαστεί για την αφαίρεση της θερμικής ενέργειας (θερμότητας) από τον αέρα του κλιματιζόμενου χώρου, με σκοπό τη πτώση της θερμοκρασίας ή τη διατήρηση της σε καθορισμένα επίπεδα.
2. Type 121: Ο κλίβανος, αντιπροσωπεύει μια συσκευή θέρμανσης αέρα η οποία, είτε θα ελέγχεται από τον χρήστη, είτε θα ρυθμιστεί, να βρίσκει και να διατηρεί την επιθυμητή θερμοκρασία αυτομάτως. Μόλις ο κλίβανος θερμάνει τον αέρα, τον εκδιώκει μέσω του συστήματος των αγωγών που υπάρχουν στους τοίχους, στην οροφή ή στο δάπεδο. Η μαθηματική σχέση μεταξύ της απόδοσης του κλίβανου και των θερμικών απωλειών, παρουσιάζεται παρακάτω:

Εξίσωση 2.5.10

$$h_{air_{out}} = h_{air_{in}} + \frac{q_n}{\dot{m}} - \frac{UA}{\dot{m}} \cdot (\bar{T} - T_{env})$$

Όπου:

- $h_{air_{out}}$, η ενθαλπία εξόδου του κλιβάνου
- $h_{air_{in}}$, η ενθαλπία εισόδου του κλιβάνου
- q_n , ο μέγιστος ρυθμός θέρμανσης του κλιβάνου(αποδοτικότητα)
- \dot{m} , ο ρυθμός ροής της μάζας του αέρα
- UA , ο συντελεστής της συνολικής θερμικής απώλειας για τον κλίβανο
- \bar{T} , η μέση θερμοκρασία στο εσωτερικό του κλιβάνου
- T_{env} , η θερμοκρασία περιβάλλοντος

3. Type 108: Ο θερμοστάτης χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ενός συστήματος με πηγή θερμότητας δύο σταδίων, έναν βοηθητικό θερμαντήρα και εάν σύστημα ψύξης δύο σταδίων. Ο ελεγκτής, στο πρώτο στάδιο, δίνει εντολή ψύξης σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες δωματίου, ενώ στο δεύτερο στάδιο για ακόμα πιο υψηλές θερμοκρασίες του χώρου. Όσον αφορά τα τρία στάδια θέρμανσης, στο πρώτο στάδιο δίνεται εντολή για θέρμανση σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες δωματίου, στο δεύτερο για ακόμα πιο χαμηλές θερμοκρασίες και στο τρίτο στάδιο μπορεί να χρησιμοποιήσει το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης.
4. Εξίσωση, η οποία σχετίζεται με τις αλλαγές αέρα ανά ώρα(ACPH) ή αλλιώς ο ρυθμός αλλαγής αέρα, όπου υπολογίζει τον όγκο του αέρα που προστίθενται ή αφαιρείται από ένα χώρο και ορίζεται από τον παρακάτω τύπο(για θέρμανση και ψύξη):

Εξίσωση 2.5.11

$$ACPH = \frac{Q}{V_{ol} \cdot \rho}$$

Όπου,

- $ACPH$, ο συνολικός αριθμός αλλαγών αέρα ανά ώρα
 - Q , ο ρυθμός ροής αέρα εξόδου($\frac{kg}{hr}$)
 - V_{ol} , ο όγκος της θερμικής ζώνης(m^3)
 - ρ , η πυκνότητα του αέρα($\frac{kg}{m^3}$)
5. Type 56: Αποτελεί το κτίριο υπό μελέτη (παρόμοιο με αυτό της αρχικής προσομοίωσης), με τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στον σχεδιαστικό και κατασκευαστικό τομέα, στο λογισμικό περιβάλλον TrnBuild.
 6. Type 25c, εκτυπωτής, ο οποίος, μεταφέρει τα αποτελέσματα σε μορφή συγκεκριμένου αρχείου (.out), στο excel, για καλύτερη επεξεργασία και ανάλυση.
 7. Type 65d, διαδικτυακός σχεδιαστής, ο οποίος, φανερώνει τις επιλεγμένες μεταβλητές του χρήστη με τη μορφή διαγραμμάτων, κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση του μοντέλου προσομοίωσης, αποτέλεσε η εγκατάσταση/ σύνδεση των απαραίτητων στοιχείων, στο λογισμικό περιβάλλον του TRNSYS, που απαρτίζουν την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών σε κτίριο.

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

Εξίσωση 2.5.14

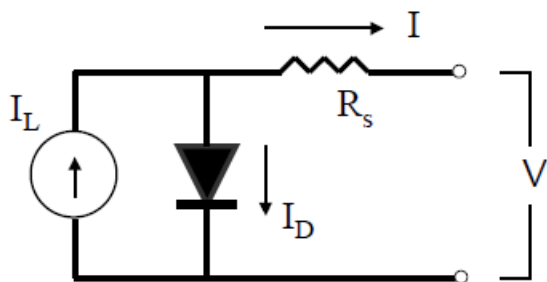
$$\lambda = \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0}$$

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 2.5.15: Κύκλωμα μαθηματικού μοντέλου, σύμφωνα με το λογισμικό TRNSYS

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 (Ω)
- 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 $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ , R_s , σχεδιάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη I-V.

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

Εξίσωση 2.5.16

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

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

Εξίσωση 2.5.17

$$I_L = I_{L,ref} \cdot \frac{G_T}{G_{T,ref}}$$

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 W/m^2 .

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

Εξίσωση 2.5.18

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

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

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

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

Υπολογισμός μεταβλητών $I_{0,ref}$, $I_{L,ref}$, γ 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 $I_{0,ref}$, $I_{L,ref}$, γ 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}

Εξίσωση 2.5.19

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

- Τις τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης:

Εξίσωση 2.5.20

$$V_{OC,ref} = I_{sc,ref} \cdot R_{sh} \quad (2)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2) στη (1) προκύπτει:

Εξίσωση 2.5.21

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot I_{sc,ref} \cdot R_s}{\gamma \cdot k \cdot T_{C,ref}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{OC,ref}}{R_{sh}}$$

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

Εξίσωση 2.5.22

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_{C,ref}} \cdot (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s)\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s}{R_{sh}}$$

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 $I_{0,ref}$, $I_{L,ref}$, γ .

Εξίσωση 2.5.23

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref}$$

Εξίσωση 2.5.24

$$\gamma = \frac{q \cdot (V_{mp,ref} - V_{OC,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s)}{k \cdot T_{C,ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)}$$

Εξίσωση 2.5.25

$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{OC,ref}}{\gamma \cdot k \cdot T_{C,ref}}\right)}$$

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.

4. Type 24, στο οποίο, πραγματοποιείται η ολοκλήρωση των μεταβλητών που ορίζει ο χρήστης. Στην προκειμένη περίπτωση, υπολογίστηκε η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια, μέσω της ολοκλήρωσης, της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια με την ολοκλήρωση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

5. Εξίσωση, στην οποία, υπολογίζεται η συνολική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

Εξίσωση 2.5.26

$$n = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}}$$

Όπου,

- n , η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου
- $I_m \cdot V_m$, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς
- P_{in} , η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς στο φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα υπόλοιπα στοιχεία, που απαρτίζουν το μοντέλο προσομοίωσης έχουν αναλυθεί σε προηγούμενα υποκεφάλαια και δεν έχουν δεχθεί κάποια μετατροπή στις παραμέτρους, τις οποίες, εμπεριέχουν.

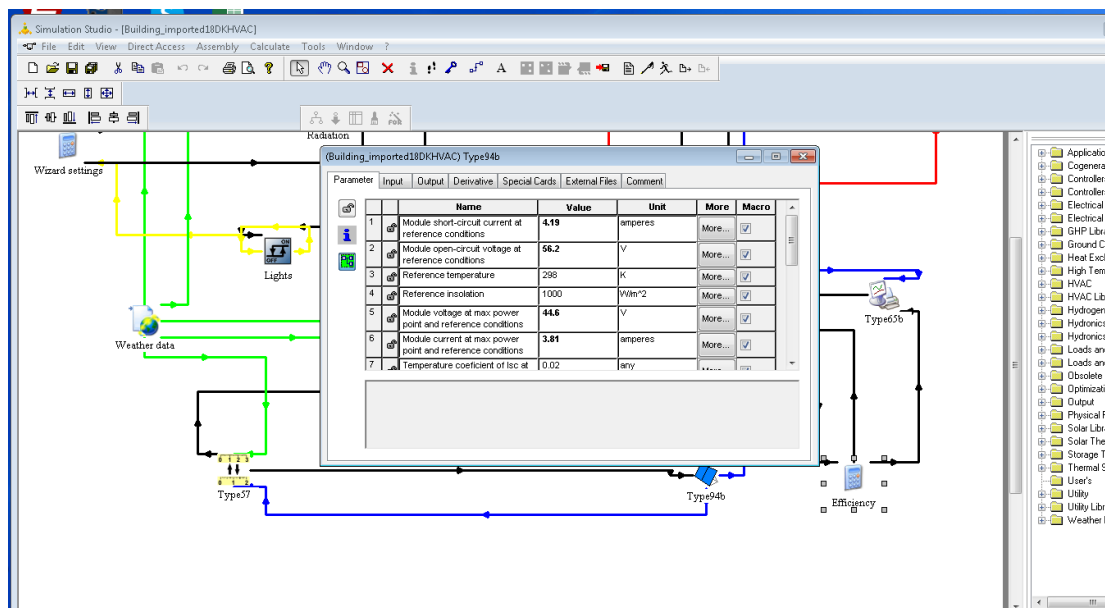
Με την ολοκλήρωση του μοντέλου προσομοίωσης στο λογισμικό, TRNSYS, επόμενο βήμα, αποτέλεσε η επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα του excel. Ο απώτερος σκοπός ήταν η μελέτη των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου για θέρμανση και ψύξη, καθώς και ο προσδιορισμός της παραγωγής ενέργειας από το σύστημα HVAC και από τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα, ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό ενεργειακής κάλυψης που μπορούν να προσφέρουν στο υπό μελέτη κτίριο.

2.6. Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας έχει ως στόχο την εξέταση και παρατήρηση των παραμέτρων όπου επηρεάζουν σε ένα σχετικά μεγάλο βαθμό την απόδοση των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη επιλογή στα τεχνικά χαρακτηριστικά αλλά και στο είδος της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

2.6.1 Αρχικό σενάριο: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου-χαλκού-ινδίου-γάλλιου-σεληνίου(CIGS), στην οροφή του υπό μελέτη κτιρίου, με προσανατολισμό τον Νότο και κλίση 35°.

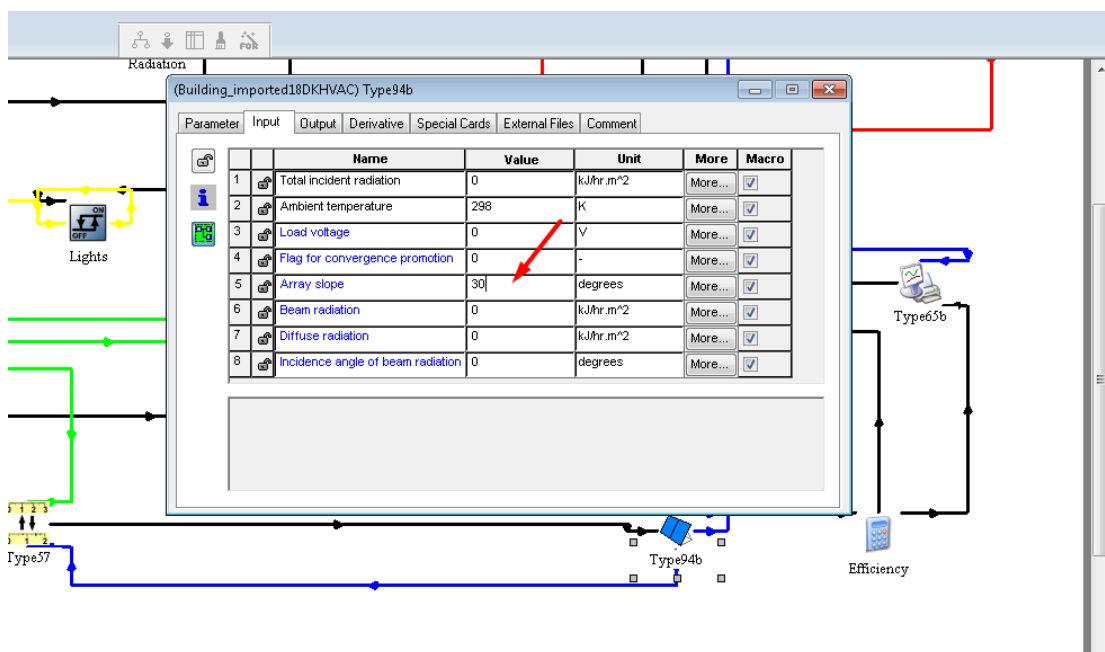
Η προσθήκη της συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, προσπαθεί να αποδείξει την αξιοπιστία της ως ,φθηνή παραγωγή - υψηλή απόδοση, προϊόν.



Εικόνα 2.6.2:Τεχνικά χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών CIGS

2.6.3 Δεύτερο σενάριο: Αλλαγή κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο(30°)

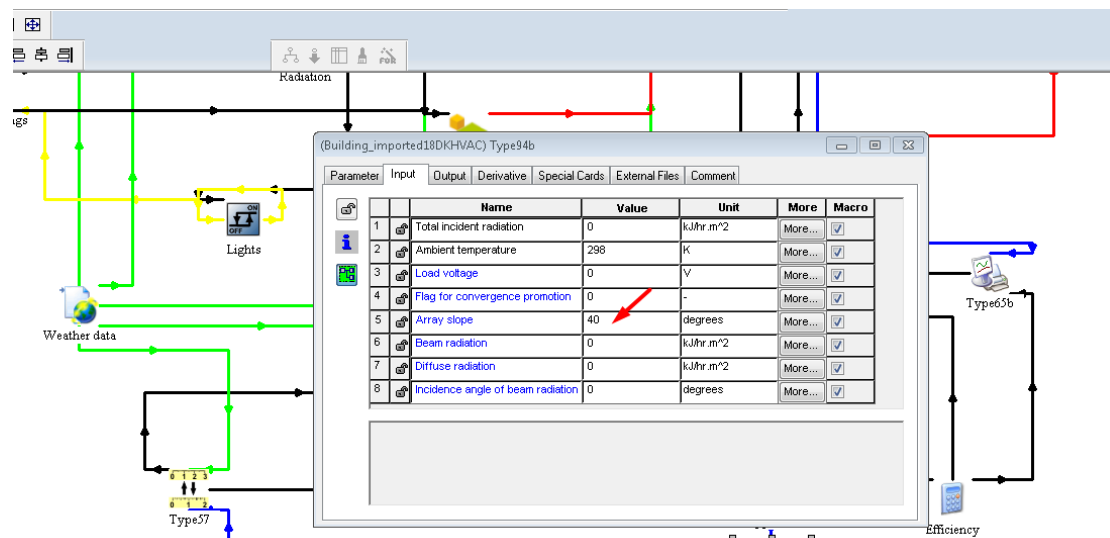
Η πρώτη αλλαγή που εφαρμόστηκε στο μοντέλο προσομοίωσης ήταν η αλλαγή της κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στις 30°, προκειμένου να καταγραφεί η αύξηση/μείωση στην απόδοση του συστήματος.



Εικόνα 2.6.4: Διαμόρφωση νέας κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.6.5 Τρίτο σενάριο: Αλλαγή κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο(40°)

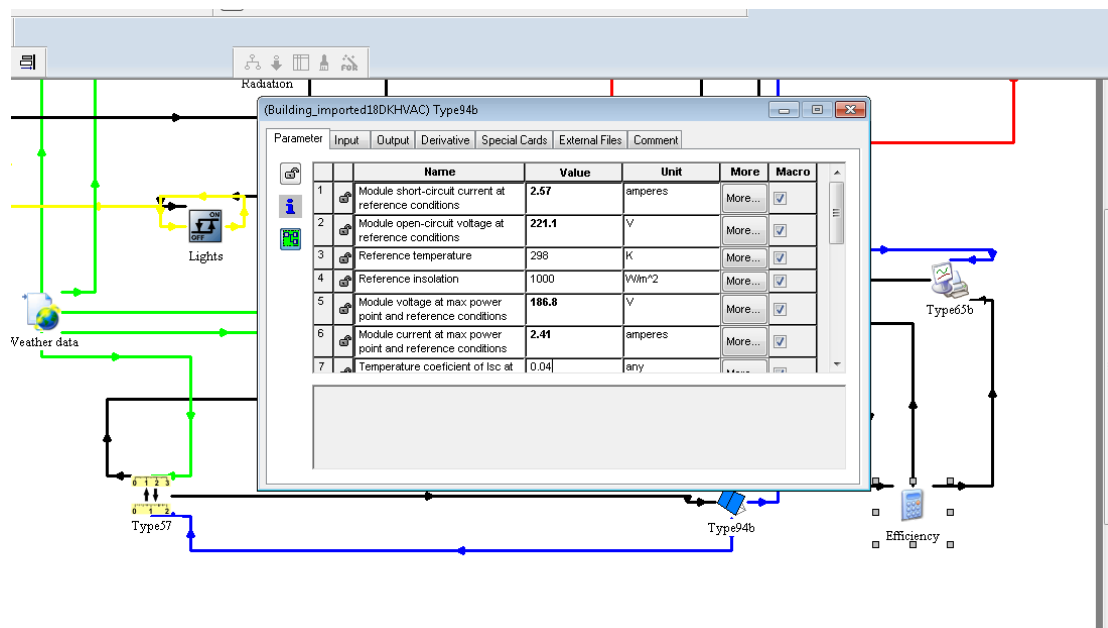
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή του πρώτου σεναρίου και αποσκοπεί στον προσδιορισμό της απόδοσης των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Εικόνα 2.6.6: Τροποποίηση κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων

2.6.7 Τέταρτο σενάριο: Αλλαγή στο είδος της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, με την εισαγωγή τελλουριούχου καδμίου(CdTe) φωτοβολταϊκών κυττάρων και την διαφοροποίηση των υπαρχουσών τεχνικών χαρακτηριστικών.

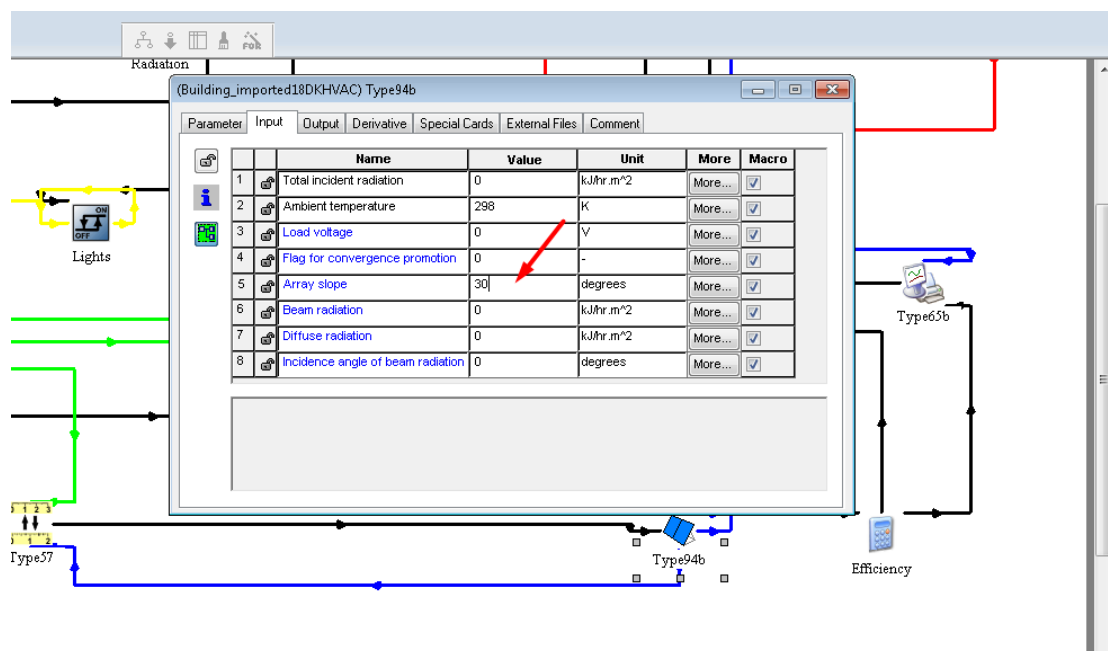
Η αντικατάσταση της αρχικής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε, καθώς οι CdTe συσκευές παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των CIGS. Η απόδοση των CdTe φωτοβολταϊκών πλαισίων πλησιάζει αυτή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και αποτελεί αξιόλογο παράδειγμα ως προς ανάλυση, για τον σκοπό της εργασίας.



Εικόνα 2.6.8:Τεχνικά χαρακτηριστικά CdTe φωτοβολταϊκής τεχνολογίας

2.6.9 Πέμπτο σενάριο: Αλλαγή κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο(30°)

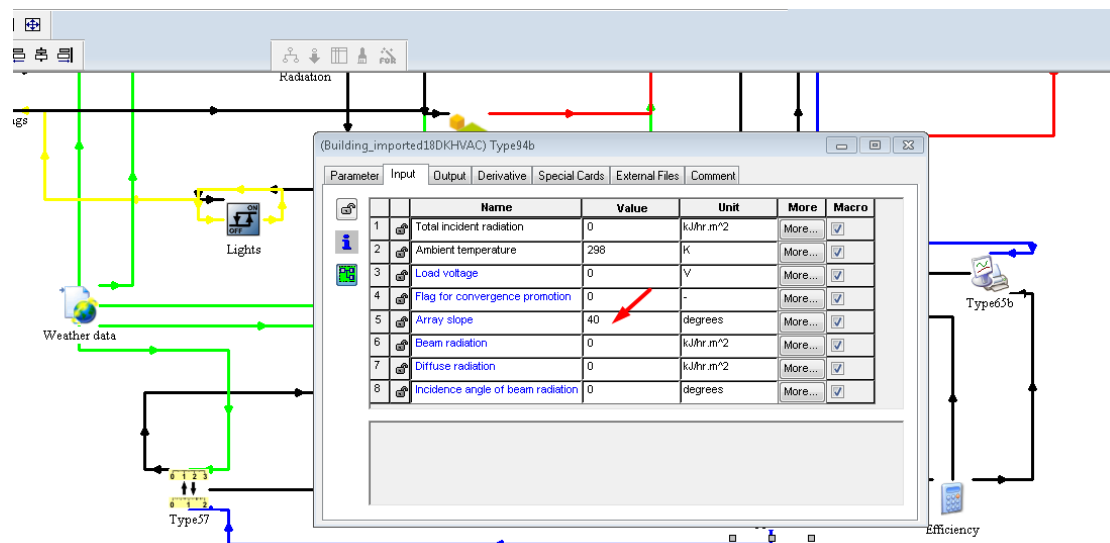
Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, πραγματοποιείται τροποποίηση στην κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης, του συστήματος.



Εικόνα 2.6.10: Αλλαγή στην κλίση των CdTe φωτοβολταϊκών πλαισίων

2.6.11 Έκτο σενάριο: Αλλαγή κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο(40°)

Παρόμοια διαδικασία με τα προηγούμενα σενάρια



Εικόνα 2.6.12: Αλλαγή της κλίσης από 30° στις 40°

3. Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί η παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς και των διαφορετικών σεναρίων, που επιλέχθηκαν.

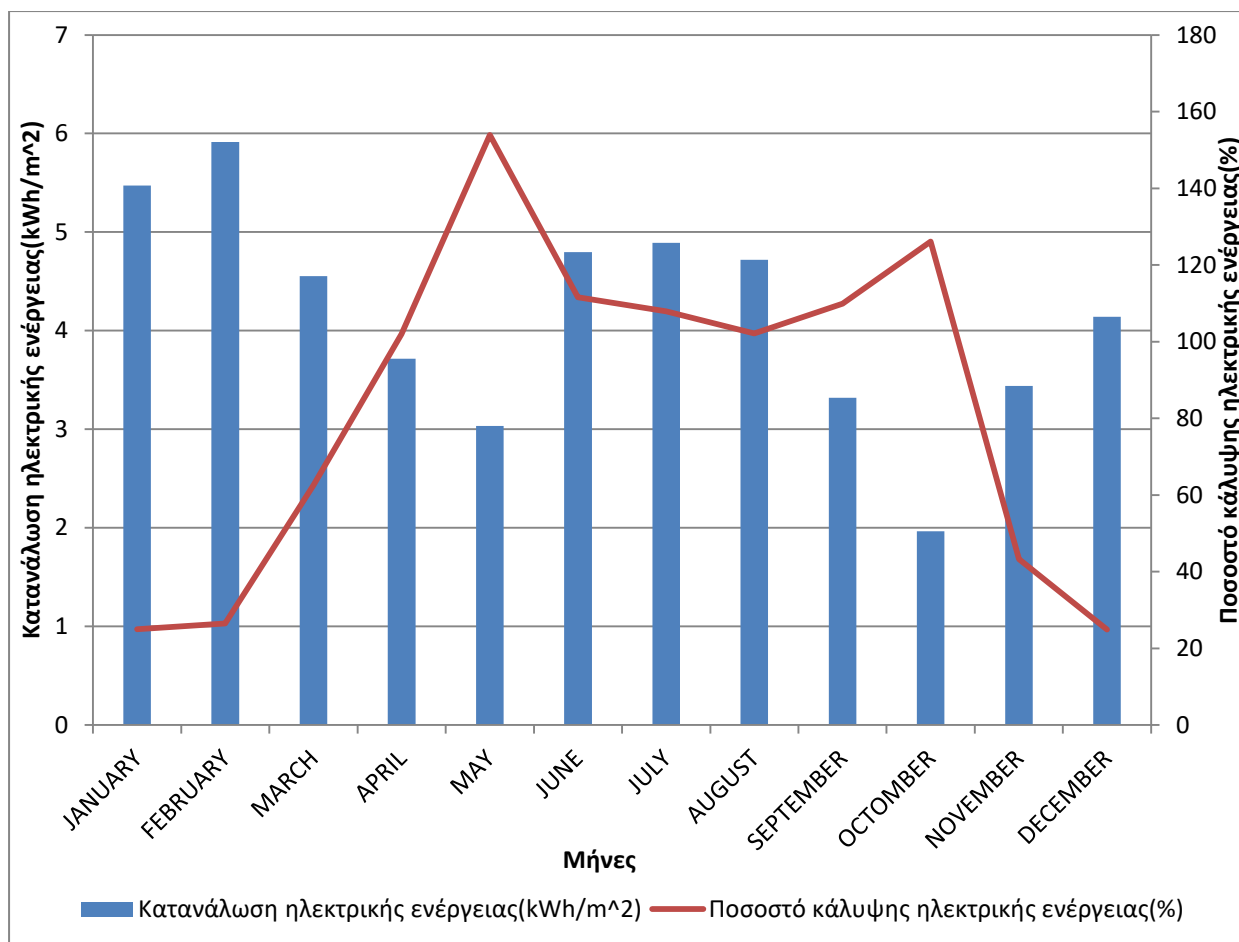
3.1. Αρχικό σενάριο

Με την ολοκλήρωση του μοντέλου προσομοίωσης, υπολογίστηκαν οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη των θερμικών ζωνών του κτιρίου. Με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα CIGS, στην οροφή του κτιρίου, προσδιορίστηκε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και τέλος, με την τοποθέτηση συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού υπολογίστηκε η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την επιμέρους κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου.

Όσο αφορά το πρόγραμμα του TrnBuild, είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός, πως ανεξαρτήτως της πληθώρας επιλογών σχετικά με τα αποτελέσματα εξόδου, που μπορεί ο χρήστης να επιλέξει, τα φορτία που εκπροσωπούν τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου, συμπεριλαμβάνουν όλα τα δεδομένα που ορίζει ο χρήστης από την εργαλειοθήκη(εικόνα 18) και είναι αδύνατο να αναλυθούν το καθένα ξεχωριστά.

Πίνακας 3.1.1: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CIGS(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών(%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	1.37	5.472	0	25.03
Φεβρουάριος	20.7	0	1.57	5.915	0	26.5
Μάρτιος	15.9	0	2.85	4.553	0	62.6
Απρίλιος	7.61	0.106	3.79	3.68	0.035	102.0
Μάιος	2.06	1.55	4.67	2.18	0.854	153.9
Ιούνιος	0	8.27	5.35	0	4.796	111.5
Ιούλιος	0	22.2	5.28	0	4.89	107.9
Αύγουστος	0	20.6	4.82	0	4.72	102.1
Σεπτέμβριος	0	9.95	3.65	0	3.32	109.9
Οκτώβριος	0.366	3.14	2.48	0.921	1.046	126.1
Νοέμβριος	3.769	0.116	1.49	3.41	0.028	43.3
Δεκέμβριος	14.5	0	1.03	4.14	0	24.9
Σύνολο	83.9	66.1	38.4	30.27	19.68	83



Διάγραμμα 3.1.2: Διαγραμματική απεικόνιση ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CIGS.

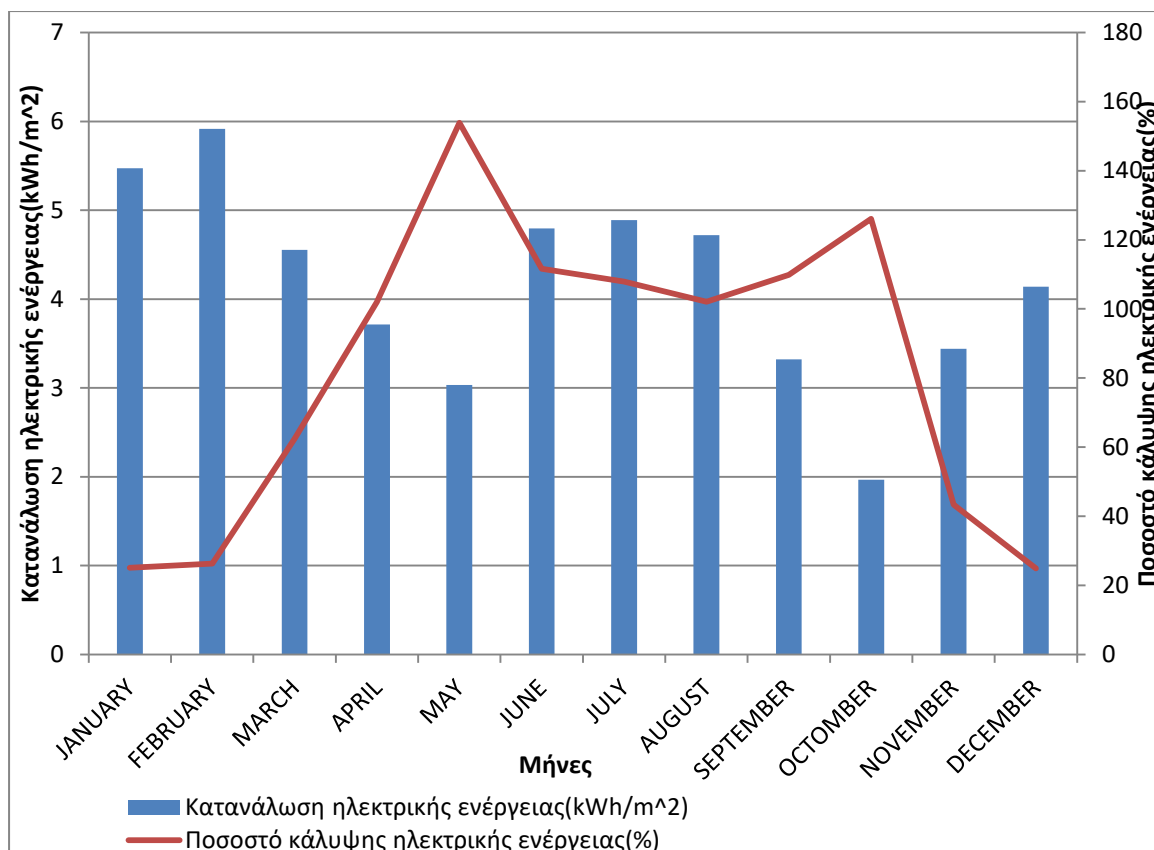
3.2. Σενάριο 2ο: Αλλαγή κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων(30°)

Η αλλαγή της κλίσης επηρεάζει μόνο τις τιμές παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος από τα φωτοβολταϊκά και όχι τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου ή την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των πρώτων.

Η διαφορά της κλίσης δεν είναι μεγάλη (35° στο αρχικό σενάριο), με αποτέλεσμα οι τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, να μην αλλάζουν σε μεγάλο βαθμό, αλλά μπορεί κανείς να παρατηρήσει την μείωση στην συνολική απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Πίνακας 3.2.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση (kWh/m ²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη (kWh/m ²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CIGS (kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση (kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη (kWh/m ²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών (%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	1.37	5.472	0	25.03
Φεβρουάριος	20.7	0	1.56	5.915	0	26.3
Μάρτιος	15.9	0	2.84	4.553	0	62.4
Απρίλιος	7.61	0.106	3.79	3.68	0.035	102
Μάιος	2.06	1.55	4.67	2.18	0.854	153.9
Ιούνιος	0	8.27	5.35	0	4.796	111.5
Ιούλιος	0	22.2	5.28	0	4.89	107.9
Αύγουστος	0	20.6	4.82	0	4.72	102.1
Σεπτέμβριος	0	9.95	3.65	0	3.32	109.9
Οκτώβριος	0.366	3.14	2.48	0.921	1.046	126.1
Νοέμβριος	3.769	0.116	1.49	3.41	0.028	43.3
Δεκέμβριος	14.5	0	1.03	4.14	0	24.9
Σύνολο	83.9	66.1	38.3	30.27	19.68	82.93



Διάγραμμα 3.2.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των CIGS, σε καινούργια κλίση 30 μοιρών.

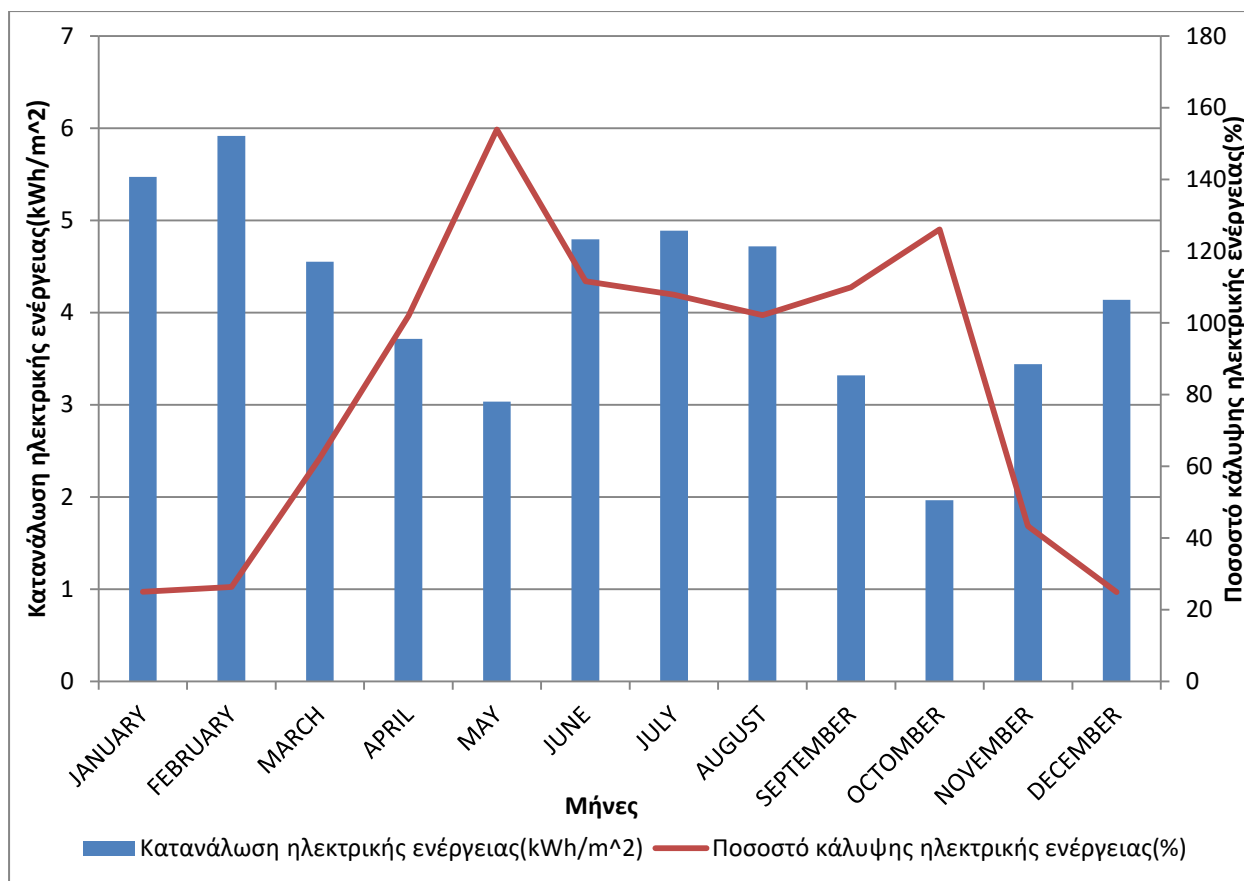
3.3. Σενάριο 3ο : Αλλαγή κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων(45°)

Ίδια διαδικασία με αυτή του δεύτερου σεναρίου, με τις μόνες μετατροπές να παρατηρούνται στις τιμές παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος.

Σε αυτή την περίπτωση, η ποσοστιαία τιμή κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών, παρουσιάζει μια ελάχιστη αύξηση συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα σενάρια. Αποτελεί την πιο κατάλληλη κλίση για την βέλτιστη παραγωγή και αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, με μόνιμο προσανατολισμό τον Νότο.

Πίνακας 3.3.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με αλλαγή κλίσης, σε νέα διεύθυνση των 40 μοιρών.

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CIGS(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών(%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	1.37	5.472	0	25.03
Φεβρουάριος	20.7	0	1.56	5.915	0	26.3
Μάρτιος	15.9	0	2.84	4.553	0	62.3
Απρίλιος	7.61	0.106	3.79	3.68	0.035	102
Μάιος	2.06	1.55	4.67	2.18	0.854	153.9
Ιούνιος	0	8.27	5.35	0	4.796	111.6
Ιούλιος	0	22.2	5.28	0	4.89	107.9
Αύγουστος	0	20.6	4.82	0	4.72	102.1
Σεπτέμβριος	0	9.95	3.65	0	3.32	109.9
Οκτώβριος	0.366	3.14	2.48	0.921	1.046	126
Νοέμβριος	3.769	0.116	1.49	3.41	0.028	43.3
Δεκέμβριος	14.5	0	1.03	4.14	0	24.8
Σύνολο	83.9	66.1	38.37	30.27	19.68	82.92



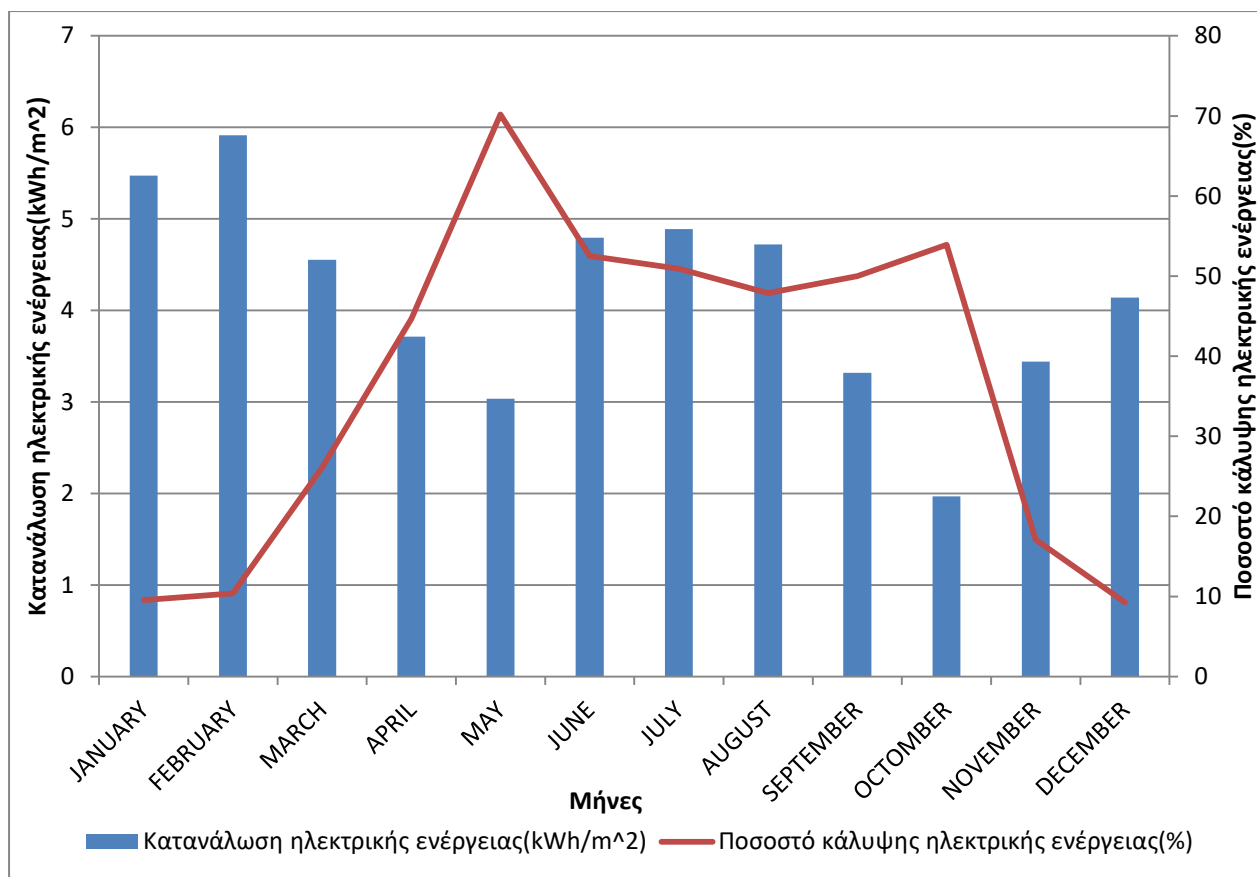
Διάγραμμα 3.3.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ενεργειακών απαιτήσεων του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας από τα CIGS, σε καινούργια κλίση 40 μοιρών.

3.4. Σενάριο 4ο: Αντικατάσταση των CIGS, με φωτοβολταϊκά κύτταρα CdTe, νότιος προσανατολισμός, με κλίση 35°.

Οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη, καθώς και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των προηγούμενων, παραμένουν σταθερές.

Πίνακας 3.4.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία.

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CdTe(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών(%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	0.523	5.472	0	9.56
Φεβρουάριος	20.7	0	0.612	5.915	0	10.4
Μάρτιος	15.9	0	1.19	4.553	0	26.1
Απρίλιος	7.61	0.106	1.66	3.68	0.035	44.7
Μάιος	2.06	1.55	2.13	2.18	0.854	70.2
Ιούνιος	0	8.27	2.52	0	4.796	52.5
Ιούλιος	0	22.2	2.49	0	4.89	50.9
Αύγουστος	0	20.6	2.26	0	4.72	47.9
Σεπτέμβριος	0	9.95	1.66	0	3.32	50
Οκτώβριος	0.366	3.14	1.06	0.921	1.046	53.9
Νοέμβριος	3.769	0.116	0.587	3.41	0.028	17.1
Δεκέμβριος	14.5	0	0.383	4.14	0	9.25
Σύνολο	83.9	66.1	17.1	30.27	19.68	37



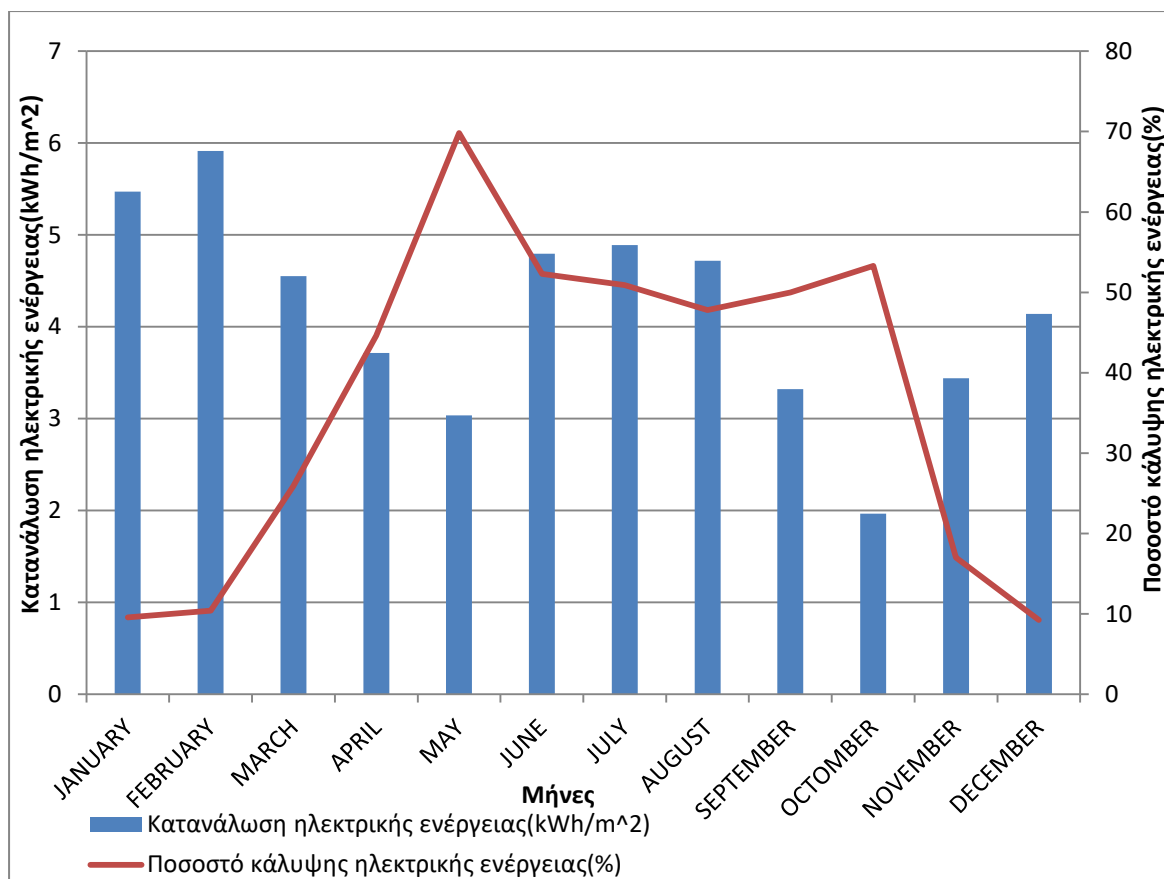
Διάγραμμα 3.4.2: Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων τελλουριούχου καδμίου.

3.5. Σενάριο 5ο: Αλλαγή της κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στις 30°.

Ακολουθείται ίδια διαδικασία με αυτήν του 2^{ου} και 3^{ου} σεναρίου και η μόνη αλλαγή που πραγματοποιείται είναι αυτή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά τεχνολογίας CdTe.

Πίνακας 3.5.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία, κλίσης 30 μοιρών.

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CdTe(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση(kWh/m ²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη(kWh/m ²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών(%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	0.523	5.472	0	9.55
Φεβρουάριος	20.7	0	0.611	5.915	0	10.3
Μάρτιος	15.9	0	1.18	4.553	0	25.9
Απρίλιος	7.61	0.106	1.66	3.68	0.035	44.6
Μάιος	2.06	1.55	2.12	2.18	0.854	69.8
Ιούνιος	0	8.27	2.51	0	4.796	52.3
Ιούλιος	0	22.2	2.49	0	4.89	50.9
Αύγουστος	0	20.6	2.26	0	4.72	47.8
Σεπτέμβριος	0	9.95	1.66	0	3.32	50
Οκτώβριος	0.366	3.14	1.05	0.921	1.046	53.3
Νοέμβριος	3.769	0.116	0.586	3.41	0.028	17.0
Δεκέμβριος	14.5	0	0.383	4.14	0	9.25
Σύνολο	83.9	66.1	17.07	30.27	19.68	36.7



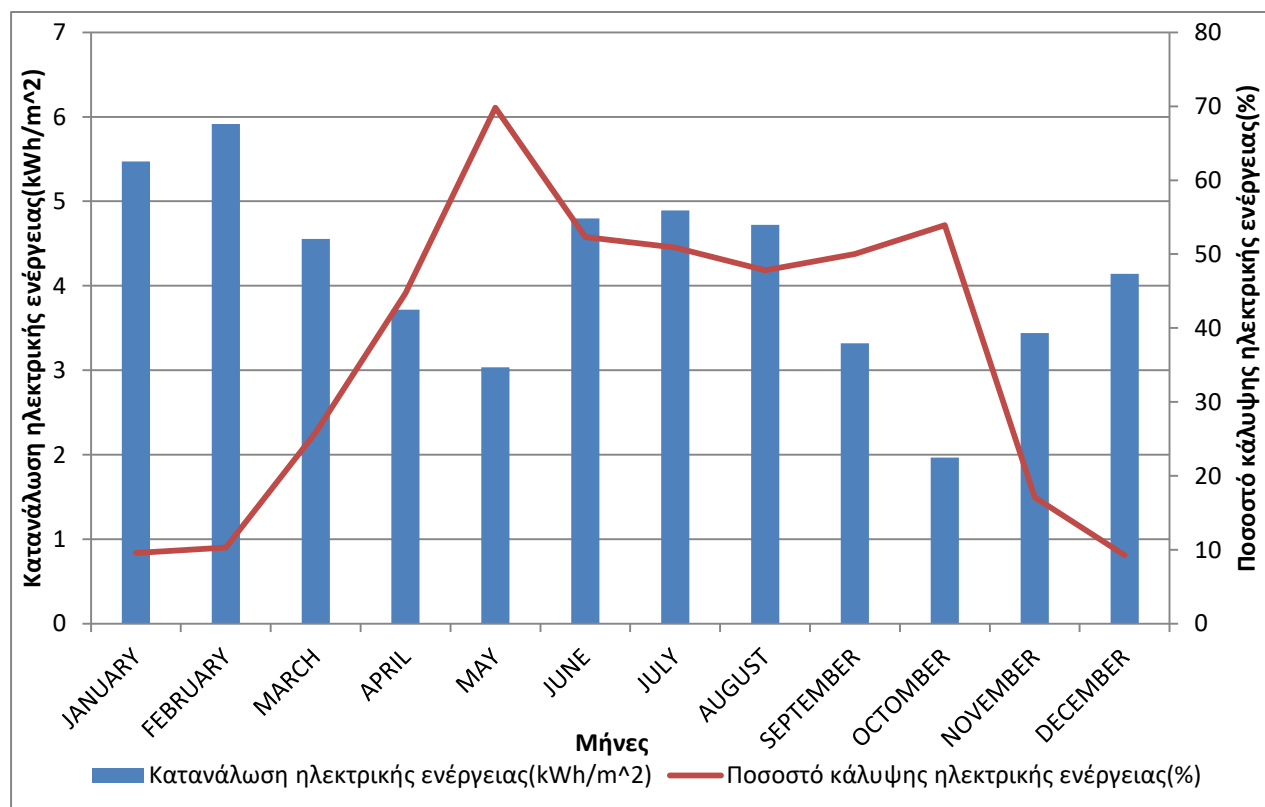
Διάγραμμα 3.5.2: Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων τελλουριούχου καδμίου, νέας κλίσης 30 μοιρών.

3.6. Σενάριο 6ο: Μετατόπιση της κλίσης των φωτοβολταϊκών τελλουριούχου καδμίου, στις 40°.

Πίνακας 3.6.1: Αποτελέσματα εξόδου της προσομοίωσης, με CdTe φωτοβολταϊκή τεχνολογία, κλίσης 40 μοιρών.

Μήνες	Ζήτηση ενέργειας για θέρμανση (kWh/m²)	Ζήτηση ενέργειας για ψύξη (kWh/m²)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά CdTe (kWh/m²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση (kWh/m²)	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη (kWh/m²)	Ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών (%)
Ιανουάριος	18.9	0.141	0.523	5.472	0	9.56

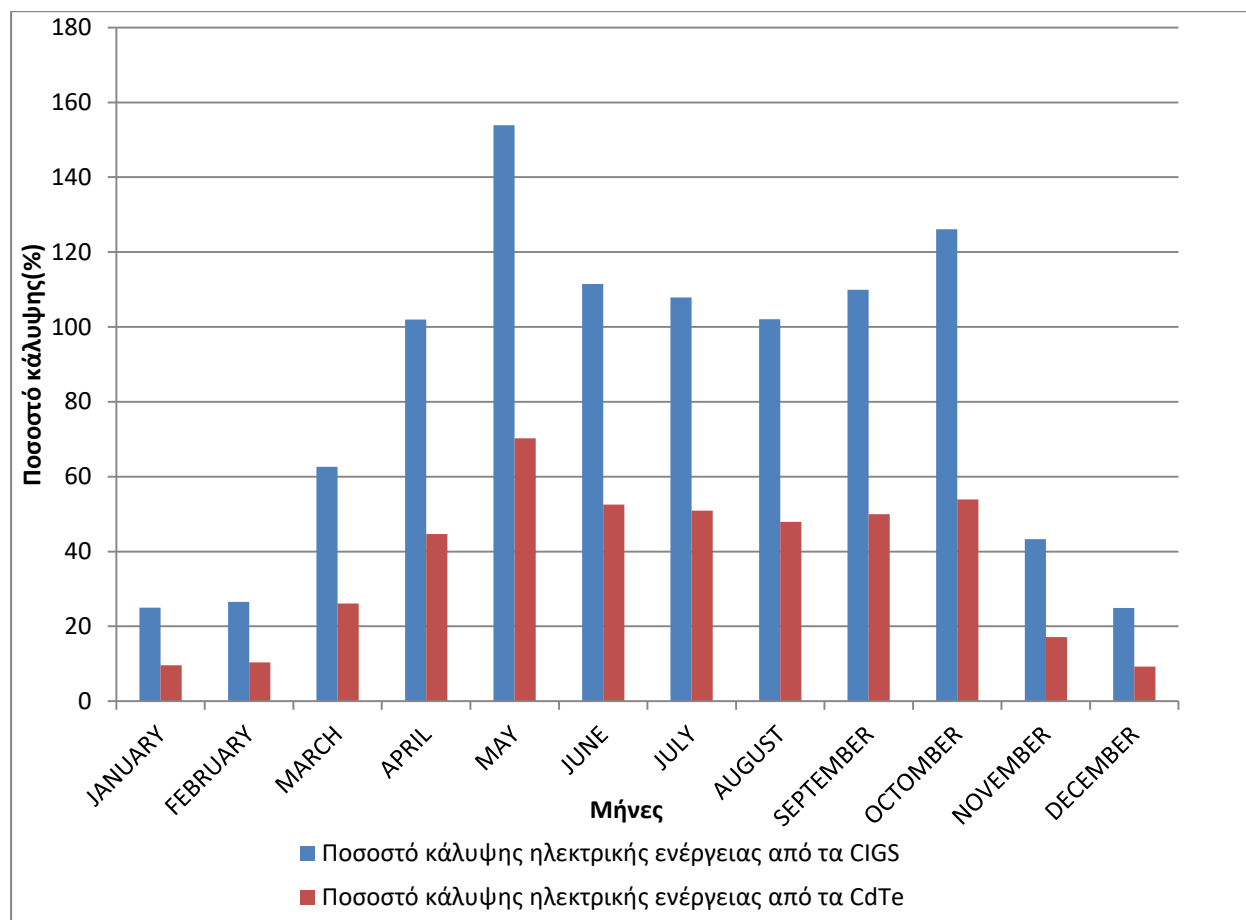
Φεβρουάριος	20.7	0	0.611	5.915	0	10.3
Μάρτιος	15.9	0	1.18	4.553	0	25.9
Απρίλιος	7.61	0.106	1.66	3.68	0.035	44.7
Μάιος	2.06	1.55	2.12	2.18	0.854	69.8
Ιούνιος	0	8.27	2.51	0	4.796	52.3
Ιούλιος	0	22.2	2.49	0	4.89	50.9
Αύγουστος	0	20.6	2.26	0	4.72	47.8
Σεπτέμβριος	0	9.95	1.66	0	3.32	50
Οκτώβριος	0.366	3.14	1.06	0.921	1.046	53.9
Νοέμβριος	3.769	0.116	0.587	3.41	0.028	17.1
Δεκέμβριος	14.5	0	0.383	4.14	0	9.25
Σύνολο	83.9	66.1	17.08	30.27	19.68	36.8



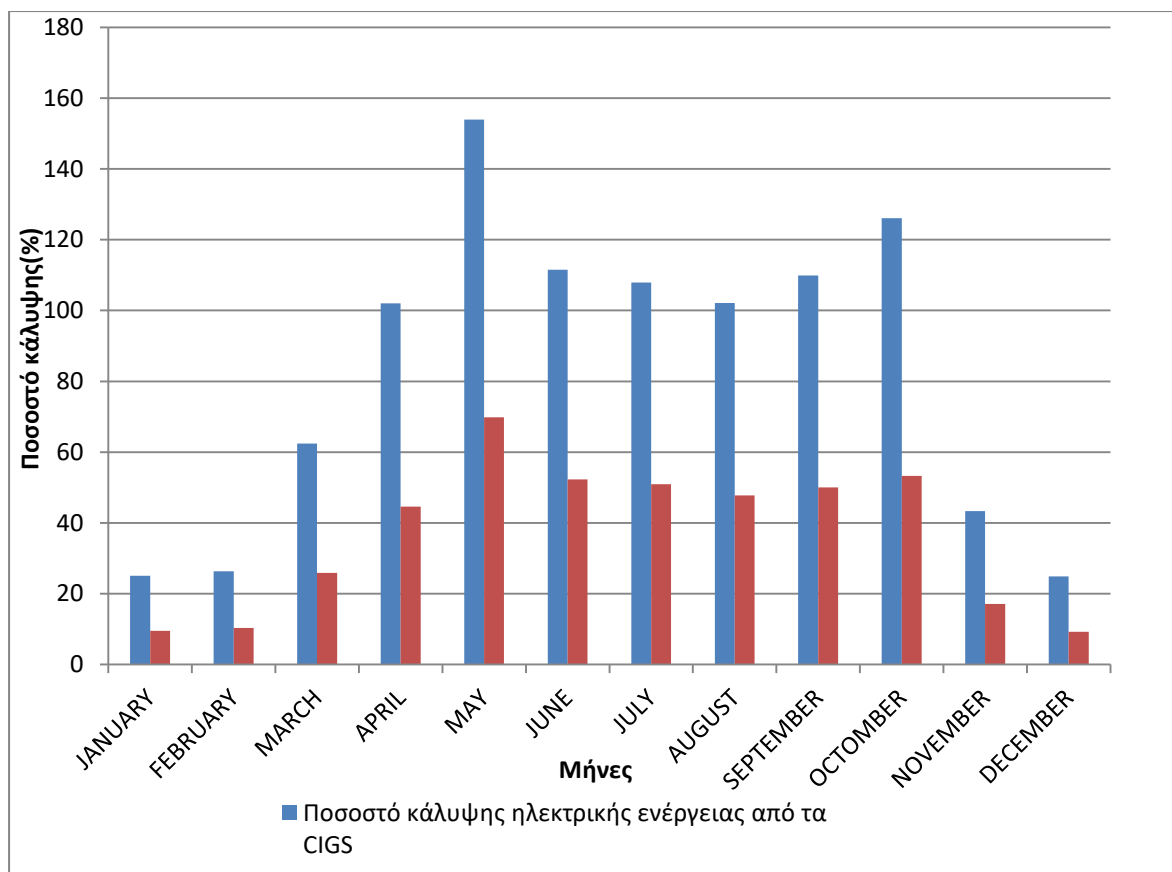
Διάγραμμα 3.6.2: Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργειακής απαίτησης του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια, συγκριτικά με το ποσοστό κάλυψης αυτής μέσω των φωτοβολταϊκών κυττάρων τελλουριούχου καδμίου, νέας κλίσης 40 μοιρών.

3.7. Σύγκριση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών CIGS και CdTe

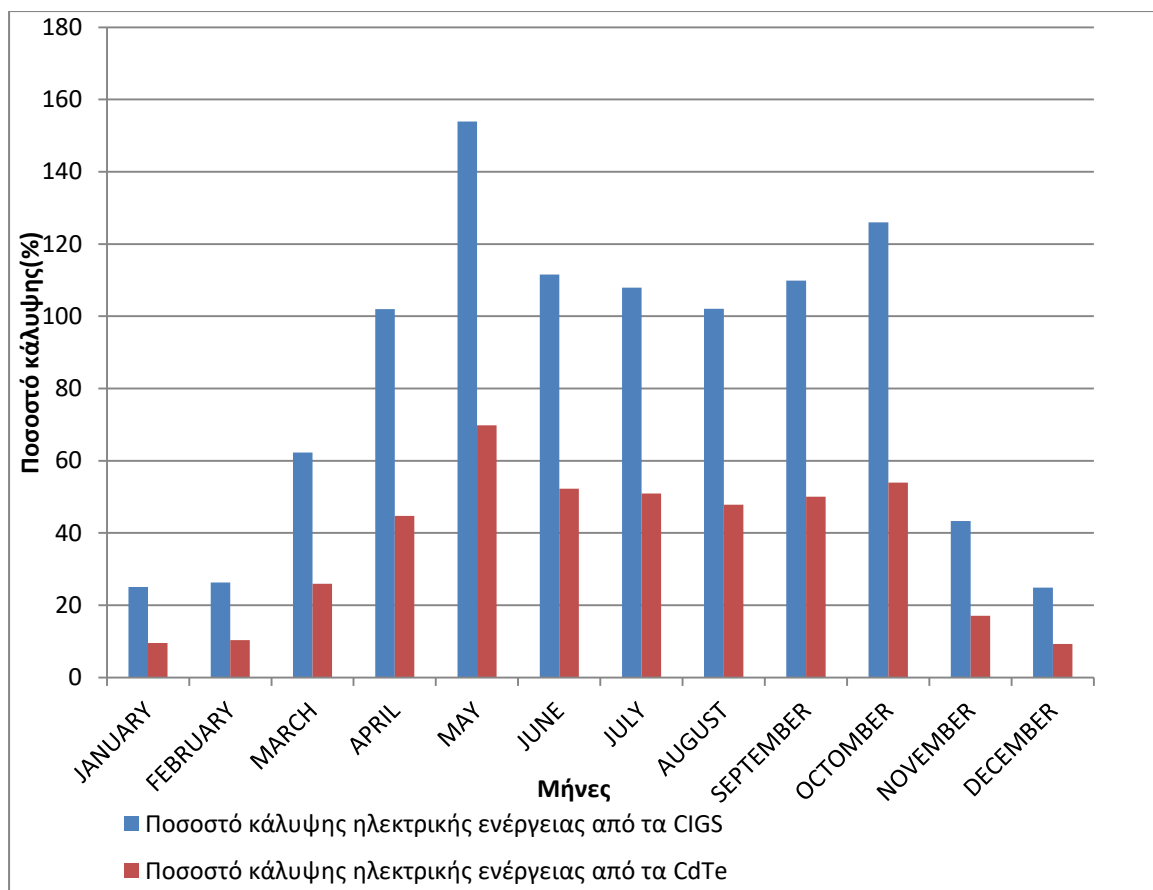
Στη συνέχεια, παρατίθενται οι διαφορές που παρατηρήθηκαν στα ποσοστά κάλυψης της ηλεκτρικής ενέργειας από τις δύο φωτοβολταϊκές τεχνολογίες CIGS και CdTe, με απώτερο σκοπό την επιλογή του βέλτιστου φωτοβολταϊκού κυττάρου για την εξοικονόμηση ενέργειας του κτιρίου.



Διάγραμμα 3.7.1: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 35 μοιρών.



Διάγραμμα 3.7.2: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 30 μοιρών.



Διάγραμμα 3.7.3: Διαγραμματική απεικόνιση των ποσοστών κάλυψης ηλεκτρικής ενέργειας, για τις ανάγκες του κτιρίου, με χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, με γωνία κλίσης 40 μοιρών.

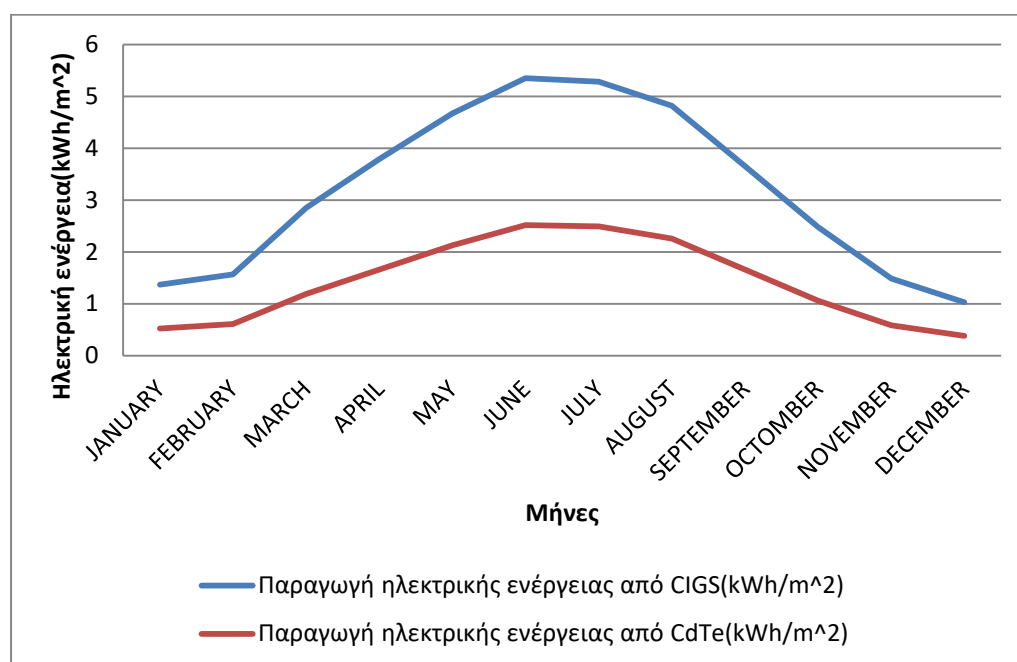
4. Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα πραγματοποιηθεί μια επισκόπηση των παραπάνω αποτελεσμάτων και θα αναλυθούν οι διαφορές των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεκπεραίωση των σεναρίων, παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα των δύο φωτοβολταϊκών κυττάρων που χρησιμοποιήθηκαν στο υπό μελέτη κτίριο.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Είδος φωτοβολταϊκού λεπτού υμένα	Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια(kWh/m ²)	Ετήσιο ποσοστό κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών του κτιρίου(%)
CIGS(χαλκού-ινδίου- γάλλιου-σεληνίου)	38.4	83
CdTe(τελλουριούχου καδμίου)	17.1	37



Διάγραμμα 4.1.1: Διαγραμματική, συγκριτική απεικόνιση της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών χωριστά.

Τα παραπάνω δεδομένα, φανερώνουν την συντριπτική διαφορά τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στο ποσοστό κάλυψης αυτής, μεταξύ των CIGS και CdTe. Αυτή η διαφοροποίηση οφείλεται στο γεγονός πως μια σημαντική ποσότητα ηλιακού φωτός, η οποία, προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου CdTe, δεν μπορεί να απορροφηθεί από το υπόστρωμα θειούχου καδμίου(CdS) με αποτέλεσμα, να χάνεται ένα σημαντικό μέρος του φωτορεύματος, η

επαφή p-n του τελλουριούχου καδμίου να φθείρεται και να χάνει σε αποδοτικότητα ολόκληρο το σύστημα(C.S Ferekides, R. Mamazza and others,2004).

Στο σύνολο της μελέτης, έλαβαν χώρα έξι σενάρια, δύο από τα οποία, είχαν στόχο την αλλαγή του είδους των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, ενώ τα υπόλοιπα αποσκοπούσαν στην αλλαγή της κλίσης των φωτοβολταϊκών. Όπως ήταν αναμενόμενο, η διαφορά κλίσης δεν τροποποίησε σε μεγάλο βαθμό τις τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να το επιβεβαιώνουν. Η αιτιολόγηση στηρίζεται στο γεγονός πως οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν(30°, 35°, 40°), προσφέρουν τη μεγαλύτερη απόδοση μιας και ο προσανατολισμός είναι νότιος, επομένως δεν υπήρξε λόγος να εξεταστούν περαιτέρω κλίσεις, οι οποίες, θα μείωναν ακόμα περισσότερο την απόδοση του συστήματος. Η διαφορά μεταξύ των κλίσεων είναι μικρή($\pm 5^\circ$), το οποίο δικαιολογεί τις πολύ μικρές αποκλίσεις στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Οι ηλεκτρικές προδιαγραφές των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 4.1.2: Παρουσίαση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, όπου το φωτοβολταϊκό πλαίσιο CIGS, αποτελεί προϊόν της κατασκευαστικής εταιρείας xSUNx, με έδρα το Οχάιο των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ενώ οι ηλεκτρικές προδιαγραφές του CdTe, πάρθηκαν από το επιστημονικό άρθρο των Agata Zdyb, Slawomir Gulkowski,2020.

Παράμετροι	CIGS	CdTe
Απόδοση(%)	23.5	10.6
Μέγιστη ισχύς(W)	170	75
Συνολική επιφάνεια πλαισίων(m²)	22.4	22.4
Ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}) (A)	4.19	2.15
Τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) (V)	56.2	59.6
I_{mpp}(A)	3.81	1.82
V_{mpp}(V)	44.6	42

Όπως έχει προαναφερθεί, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία CIGS ανταγωνίζεται σε μεγάλο βαθμό τα παραδοσιακά πάνελ πυριτίου(Si), εξαιτίας των υψηλών αποδόσεων της, που ξεπερνούν το ποσοστό της τάξεως του 20% σε εργαστηριακές συνθήκες, εδραιώνουν τη θέση τους στον χώρο της αγοράς, αποτελώντας αξιόπιστες πηγές παραγωγής ενέργειας.

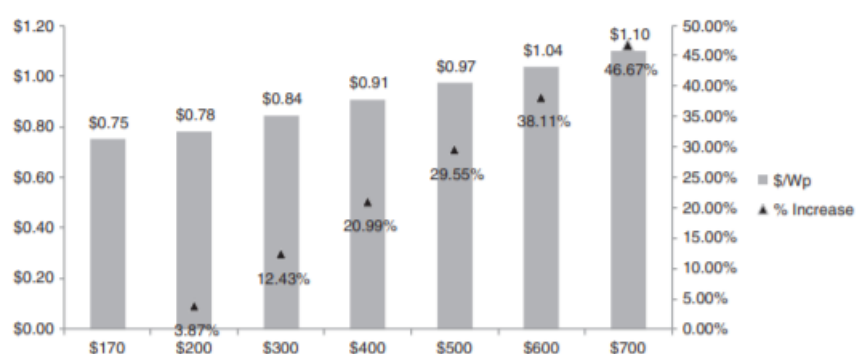
Από την άλλη πλευρά, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια CdTe, δεν προσφέρουν υψηλές αποδόσεις, με αυτές να κυμαίνονται από 10% μέχρι 11%, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να το επιβεβαιώνουν.

Σύμφωνα με τις ετήσιες απολαβές σε ηλεκτρική ενέργεια και σε θέματα εξοικονόμησης, είναι εύκολο να εννοηθεί πως η εγκατάσταση φωτοβολταϊκής τεχνολογίας CIGS στην οροφή του κτιρίου, απαρτίζει την βέλτιστη επιλογή.

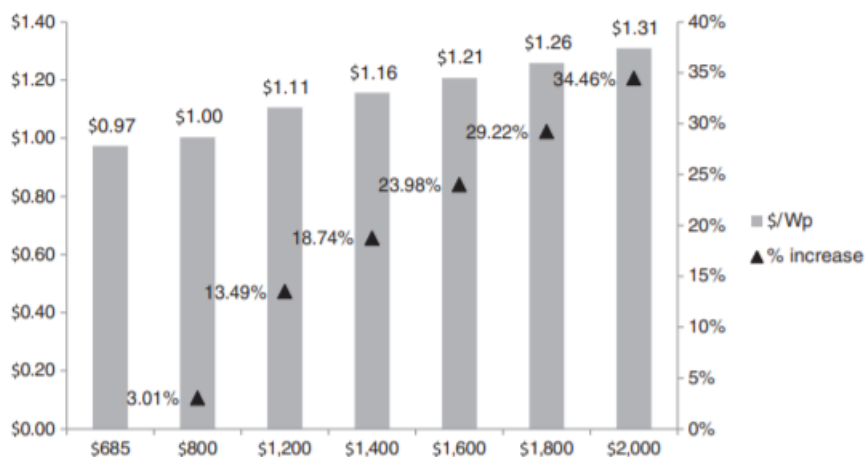
4.2. Κοστολόγηση

Σημαντικός παράγοντας στην επιλογή του βέλτιστου φωτοβολταϊκού πλαισίου λεπτού υμένα, αποτελεί και η σχέση κόστους παραγωγής- απόδοσης του προϊόντος. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος παραγωγής λεπτής μεμβράνης εξαρτάται από πληθώρα τεχνολογικών και οικονομικών παραγόντων, όπως μέθοδοι παραγωγής, κόστος εξοπλισμού, κόστος υλικού, αποδοτικότητα μετατροπής ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, κόστος εργασίας κ.α.

Σύμφωνα με δεδομένα που έχουν εξαχθεί από την κατασκευαστική εταιρεία First Solar, η τιμή της πρώτης ύλης, των ημιαγωγών εξαρτάται από το είδος της εναπόθεσης που χρησιμοποιήθηκε και από την συνολική ποσότητα που αγοράστηκε, με ελάχιστη τιμή 170\$/kg φτάνοντας μέχρι και τα 700\$/kg τελλουρίου. Όσον αφορά την τεχνολογία του CIGS, το πιο κρίσιμο στοιχείο είναι το ίνδιο, το οποίο ξεκινά από τα 685\$/kg και φτάνει έως τα 2000\$/kg.

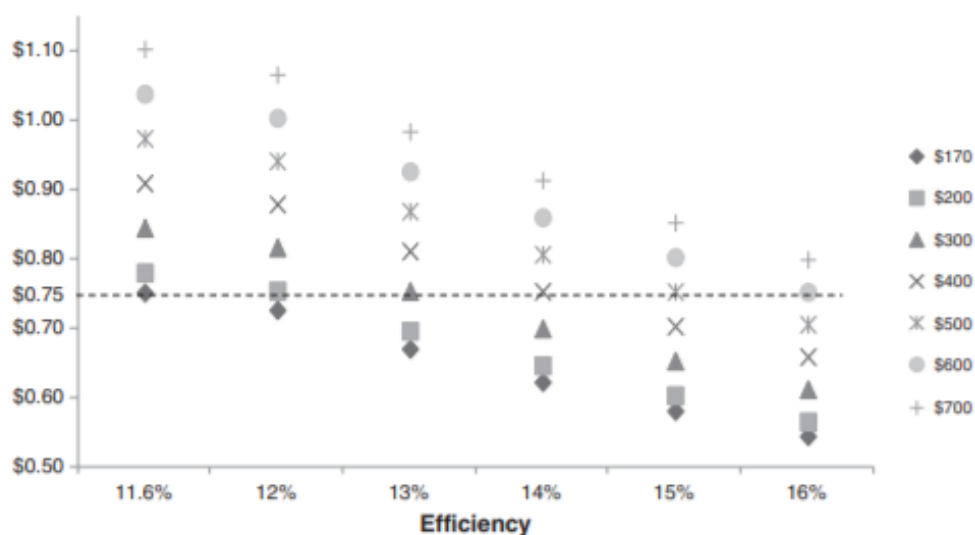


Διάγραμμα 4.2.1: Διαγραμματική απεικόνιση του ποσοστού αύξησης του κόστους παραγωγής συγκριτικά με τιμή του τελλουρίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).

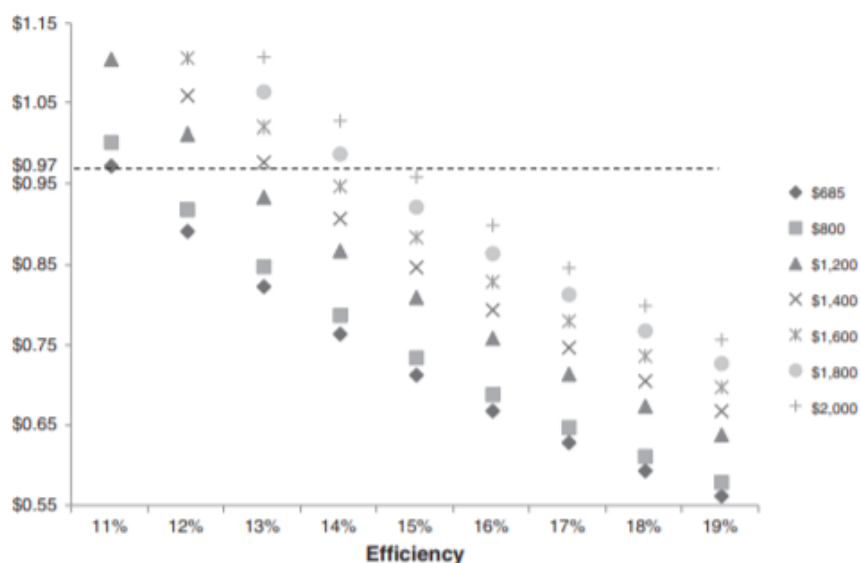


Διάγραμμα 4.2.2: Διαγραμματική απεικόνιση του ποσοστού αύξησης του κόστους παραγωγής συγκριτικά με τιμή του ινδίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).

Οι υψηλές τιμές οφείλονται στο γεγονός ότι οι πηγές του τελλουρίου και καδμίου είναι άφθονες αλλά διασκορπισμένες, με αποτέλεσμα να καθιστούν δύσκολη τη συλλογή και εδραίωση τους ως βασικά στοιχεία της δομής των CIGS και CdTe. Επομένως, γίνονται προσπάθειες αντικατάστασης αυτών των στοιχείων μέσω υποπροϊόντων άλλων μετάλλων, όπως χαλκού για το ίνδιο και ψευδαργύρου για το τελλούριο.



Διάγραμμα 4.2.3: Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους παραγωγής συγκριτικά με την απόδοση του τελλουριούχου καδμίου και της τιμής του τελλουρίου (Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).



Διάγραμμα 4.2.4: Διαγραμματική απεικόνιση του κόστους παραγωγής συγκριτικά με την απόδοση του CIGS και της τιμής του ινδίου(Chiara Candelise, Mark Winskel, Robert Gross, 2011).

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, η διαφορά κόστους παραγωγής μεταξύ των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών είναι αισθητή και μειώνει τις πιθανότητες εφαρμογής των CIGS στο υπό μελέτη κτίριο. Αν και αποτελούν εξαιρετική επιλογή, με μεγάλες αποδόσεις, το υψηλό κόστος μειώνει τον ανταγωνισμό τους σε σχέση με τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Από την άλλη πλευρά, τα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα CdTe, διέπονται από μια ισορροπία μεταξύ του χαμηλού κόστους παραγωγής και της χαμηλής απόδοσης, μετατρέποντας τα στην δεύτερη πιο κοινή φωτοβολταϊκή τεχνολογία στην αγορά.

4.3. Net metering(αυτοπαραγωγή)

Όσον αφορά το υπό μελέτη κτίριο, στην περίπτωση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα τελλουριούχου καδμίου(CdTe) και CIGS, οι τιμές που σχετίζονται με το κόστος εγκατάστασης είναι αρκετά πιο χαμηλές για τα δεδομένα της Ελλάδας, προσφέροντας εξοικονόμηση και γρήγορη απόσβεση, σε περίπτωση επένδυσης στον συγκεκριμένο τομέα.

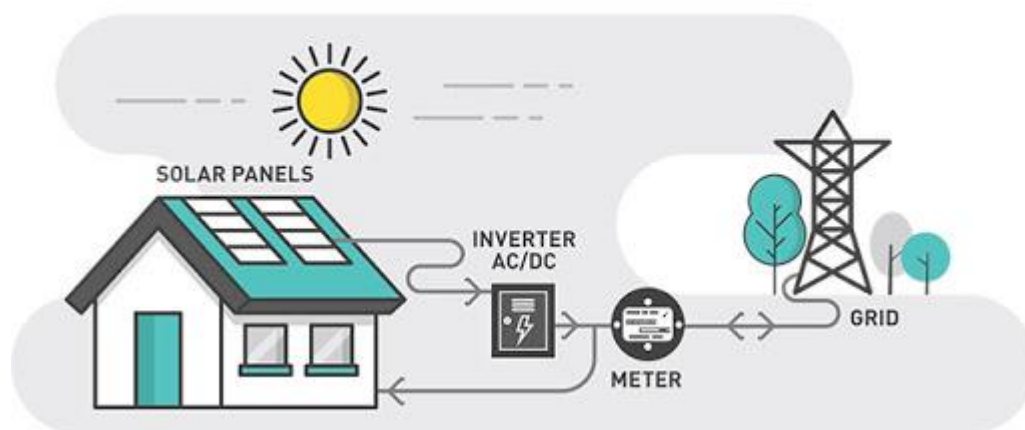
Πίνακας 4.3.1:Ενδεικτικό κόστος και απόδοση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe

Παράμετροι	CIGS	CdTe
Ισχύς Φ/Β στοιχείου(kWp)	2.38(14 πλαίσια · 0.170kWp)	1.05(14 πλαίσια · 0.075 kWp)
Κόστος υλικών(€/Watt)	0.46 έως 0.55	0.42 έως 0.5
Κόστος εγκατάστασης (€)	7306,6	2646
Ετήσια Ενέργεια(kWh)	3760.83	1673.3
Εκτίμηση Απόδοσης(σε €)	470	209

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, παρουσιάζουν το κόστος εγκατάστασης των δύο φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, καθώς και το ετήσιο ποσό εξοικονόμησης ρεύματος από τα CIGS και CdTe, με τον χρόνο απόσβεσης να κυμαίνεται στα 15 περίπου χρόνια για το πρώτο και στα 12 χρόνια για το τελλουριούχο κάδμιο.

Για την πλήρη αξιοποίηση των ενσωματωμένων φωτοβολταϊκών και την αποφυγή πιθανής ενεργειακής σπατάλης, μια σύγχρονη επιλογή, αποτελεί η αυτοπαραγωγή ή αλλιώς *net metering*. Ουσιαστικά, τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συνδέονται με έναν αντιστροφέα τάσης (*inverter*), ο οποίος, μετατρέπει τον παραγόμενο ηλεκτρισμό σε μορφή, κατάλληλη για καθημερινή χρήση και στη συνέχεια συνδέεται με έναν μετρητή που καταγράφει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των φωτοβολταϊκών. Υπάρχει ένας επιπλέον μετρητής, ο οποίος καταγράφει την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το ακίνητο από το δημόσιο δίκτυο (ΔΕΗ) σε περιπτώσεις, όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των φωτοβολταϊκών δεν καλύπτει τις ανάγκες του κτιρίου. Στο τέλος κάθε μετρητικής περιόδου, ο ιδιοκτήτης καλείται να πληρώσει την διαφορά (σε kWh) μεταξύ των δύο μετρητών. Σε περίπτωση όπου υπάρξει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσό προστίθεται στον επόμενο λογαριασμό για τα επόμενα τρία χρόνια. Με το πέρασμα των τριών ετών, εάν δημιουργείται πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των δύο μετρητών, αυτό μηδενίζεται και δεν αποζημιώνεται.

BI-DIRECTIONAL METERING (WHICH ENABLES NET METERING)

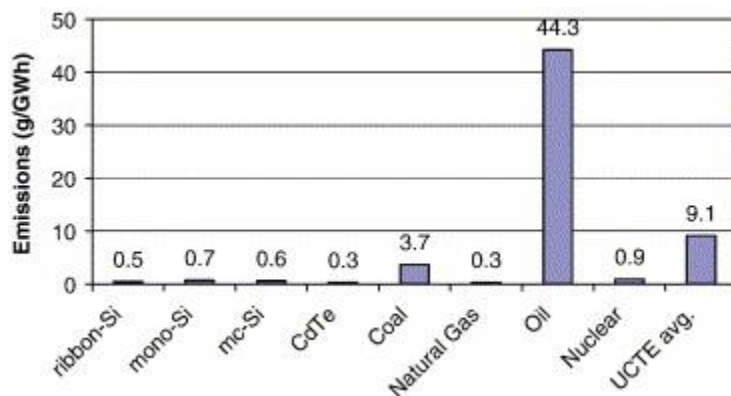


Εικόνα 4.3.2: Σύστημα *net metering*

4.4. Ανακύκλωση

Η χρήση σπάνιων, ακριβών και επικίνδυνων υλικών, όπως το γάλλιο και το ίνδιο από την φωτοβολταϊκή τεχνολογία CIGS, έχει αυξήσει το ενδιαφέρον της σωστής διαχείρισης και ανακύκλωσης των παραπάνω στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, το 2010, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνώρισε τόσο ίνδιο όσο και το γάλλιο ως κρίσιμα και ακατέργαστα υλικά όσον αφορά την έλλειψη εφοδιασμού και την οικονομική επίπτωση τους, προς την Ευρωπαϊκή Ένωση. Με την βοήθεια της ανακύκλωσης, εκτός από την επαναχρησιμοποίηση των υλικών για την κατασκευή καινούργιων φωτοβολταϊκών κυττάρων, το κόστος παραγωγής των CIGS παραμένει σταθερό(Anna M. K. Gustafsson, 2014).

Το κάδμιο, το οποίο, αποτελεί ένα από τα δύο κύρια υλικά κατασκευής της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας CdTe, είναι ευρέως διαδεδομένο ως καρκινογόνος ουσία, με σοβαρές επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον. Υπάρχουν ανησυχίες όσον αφορά τις εκπομπές καδμίου που παράγουν τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά στον κύκλο ζωής τους, αλλά έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί(Vasilis M.Fthenakis, 2010) έδειξαν πως οι εκπομπές καδμίου, όχι μόνο δεν θα αυξηθούν αλλά θα μειωθούν μέσα στο επόμενο χρονικό διάστημα 50 ετών. Βασικό κριτήριο αυτής της πρόβλεψης, αποτελεί η σωστή επεξεργασία και ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων CdTe, για την μείωση των εκπομπών καδμίου αλλά και για την διατήρηση των πηγών τελλουρίου(Max Marwede, Armin Reller, 2012).



Διάγραμμα 4.4.1: Διαγραμματική απεικόνιση των ετήσιων εκπομπών καδμίου από διάφορες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η εικόνα πάρθηκε από το άρθρο "CdTe photovoltaics: Life cycle environmental profile and comparisons", Vasilis M. Fthenakis, 2007.

4.5. Πλεονεκτήματα Ενσωματωμένων Φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κτίρια

Η πολυλειτουργικότητα των BIPV εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους έχουν σαν αποτέλεσμα:

- Σχεδιαστικά πλεονεκτήματα όπως, καλύτερη αισθητική, προστασία από τον Ήλιο, σκίαση, εφαρμογή ως γυαλί προστασίας, προστασία από την ηχορύπανση, θερμική μόνωση.
- Οικονομικά πλεονεκτήματα όπως, μείωση δαπανών για υποδομή και συντήρηση, εξοικονόμηση υλικού, εργασίας καθώς, και μείωση ηλεκτρικού κόστους, εξάλειψη της ανάγκης για μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις από την ισχύ.
- Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα όπως, μείωση εκπομπών άνθρακα, μείωση του κοινωνικού κόστους του άνθρακα(SCC) σχετικά με την υγεία του κοινού και του περιβάλλοντος(Daniel Efurosibina Attoye, Kheira Anissa Tabet Aoul, Ahmed Hassan,2017).

4.6.Αντλία Θερμότητας

Όσον αφορά το σύστημα θέρμανσης που έχει τοποθετηθεί στο υπό μελέτη κτίριο, ο κλίβανος δεν αποτελεί την καλύτερη επιλογή σε θέματα απόδοσης αλλά και εξοικονόμησης. Μια εναλλακτική λύση, θα ήταν η αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος, με μια αντλίας θερμότητας, η οποία, εξάγει τη θερμότητα από έναν κρύο χώρο, ζεσταίνει τον αέρα και τον απελευθερώνει στο εσωτερικό ενός δωματίου. Αποτελεί την οικονομικότερη λύση όταν υπάρχει ανάγκη για συνεχή θέρμανση τις κρύες μέρες του χειμώνα, με μεγάλη απόδοση, καθώς και με τον συνδυασμό της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες λειτουργίας της.

4.7.Αποθήκευση ενέργειας

Η εγκατάσταση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα της παρούσας εργασίας στοχεύει στην δημιουργία ενός συστήματος εξοικονόμησης και όχι αυτονομίας. Η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες μη αιχμής, συντελεί στην πλήρη αξιοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η πιο συχνή επιλογή στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί η χρήση συσσωρευτών, οι οποίοι, αποθηκεύουν την ενέργεια όσο αυτή είναι διαθέσιμη και την χρησιμοποιούν όταν υπάρχει ανάγκη. Η λειτουργία της μπαταρίας εξαρτάται από τον ελεγκτή φόρτισης, ο οποίος, ορίζει πότε θα διακοπεί η φόρτισή της, ώστε να αποτραπεί η υπερφόρτιση, αυξάνοντας παράλληλα και τον χρόνο ζωής της μπαταρίας. Προς το παρόν, το υψηλό κόστος αγοράς, συντήρησης αλλά και η αυξημένη πολυπλοκότητα τους, αποτελούν εμπόδιο στην απόκτησή τους.

5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των κεφαλαίων 3 και 4, η εγκατάσταση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα, CIGS και CdTe, αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη επιλογή, καθώς το κόστος εγκατάστασης των δύο τεχνολογιών είναι σχετικά μικρό από ότι το μέσο κόστος των φωτοβολταϊκών πυριτίου, ανάλογης ισχύος(3000€ έως 5500€). Πιο συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων CIGS, αποφέρει υψηλές αποδόσεις στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με ποσά που μπορούν να καλύψουν ένα σχετικά μεγάλο μέρος των αναγκών του κτιρίου, μειώνοντας τον μέσο χρόνο απόσβεσης(8 με 9 χρόνια) στα 7 έτη. Τα φωτοβολταϊκά τελλουριούχου καδμίου(CdTe), αποτελούν την πιο οικονομική επιλογή, προσφέροντας χαμηλότερες αποδόσεις, με πιο ταχύ ρυθμό απόσβεσης(4 έτη).

Οι δύο φωτοβολταϊκές τεχνολογίες που απασχολούν το υπό μελέτη κτίριο, δεν βρίσκονται σε θέση να λειτουργήσουν ως κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με τα δεδομένα χαρακτηριστικά. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, τους μήνες με μικρή ηλιοφάνεια, δεν είναι αρκετή ώστε να καλύψει εξ ολοκλήρου τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η διαδικασία net metering, το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας από τους μήνες με υψηλή ηλιοφάνεια, θα χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών, του κτιρίου και για το υπόλοιπο έτος. Μακροπρόθεσμα όμως(μετά το πέρας των τριών ετών), αυτό το πλεόνασμα δεν θα αξιοποιείται προς όφελος του ιδιοκτήτη. Λύση αυτού του προβλήματος, αποτελεί η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, όπου η ετήσια παραγόμενη ενέργεια θα καλύπτει πλήρως αυτήν της κατανάλωσης. Στο κτίριο υπό μελέτη, οι ετήσιες, ενεργειακές ανάγκες για ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου 5821.84 kWh, ενώ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά CIGS και CdTe είναι 3760.83 kWh και 1673.30 kWh αντιστοίχως. Η εξισορρόπηση μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μεγαλύτερες επιφάνειες, με νότιο προσανατολισμό και ιδανική κλίση 30 με 35 μοίρες. Μια δεύτερη επιλογή, αποτελεί η χρήση φωτοβολταϊκών CIGS και CdTe, διαφορετικών μοντέλων, τα οποία, βρίσκονται στην αγορά, όπου οι τιμές της μέγιστης ισχύος είναι μεγαλύτερες από αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο της εργασίας.

Στην περίπτωση που πραγματοποιηθούν οι παραπάνω επιλογές για βελτίωση της συνολικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η περίσσεια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί διαμέσου της εγκατάστασης μιας αντλίας θερμότητας, όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στην οροφή του κτιρίου, οδηγεί σε αισθητική αναβάθμιση και πραγματοποιείται πλήρης αξιοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας, με υψηλές αποδόσεις μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας, αποφέροντας οικονομικό κέρδος και ενίσχυση της περιβαλλοντικής εικόνας του ιδιοκτήτη.

Η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμένα CIGS, αν και εμφανίζει υψηλές αποδόσεις, το κόστος κατασκευής τους, μειώνει την αξιοπιστία τους, καθώς οι υπόλοιπες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες που λειτουργούν με βάση το πυρίτιο(Si),

παρουσιάζουν ίδιες ή και μεγαλύτερες αποδόσεις, έχοντας το ίδιο κόστος. Το επίτευγμα των φωτοβολταϊκών πλαισίων τελλουριούχου καδμίου(CdTe), να εξισορροπούν την σχέση κόστους-απόδοσης, με ικανοποιητικά επίπεδα εξοικονόμησης ενέργειας, τα εγκαθιστά ως την βέλτιστη επιλογή ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών αναβαθμίζοντας με αυτό τον τρόπο, αισθητικά, οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά το κτίριο.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση, δεν αποτελούν απόλυτα στοιχεία και μπορούν να συγκριθούν, να αξιολογηθούν και να επαναπροσδιοριστούν από όποιον επιθυμεί να ασχοληθεί με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Η χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, αποσκοπεί στην διεξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα, καθώς και στην ανάλυση τόσο των πλεονεκτημάτων όσο και των μειονεκτημάτων αυτής της τεχνολογίας.

Το λογισμικό της μελέτης(TRNSYS), δεν υποστηρίζει τη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων ως δομικά υλικά, αλλά ως παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που προκύπτουν, να δίνουν περιορισμένες απαντήσεις. Σε μελλοντικές έρευνες, η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτού υμένα ως δομικά υλικά, θα προσέφερε πιο ολοκληρωμένες απαντήσεις, σε όλους τους τομείς που καλύπτει η συγκεκριμένη τεχνολογία τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον.

Η συνεχής εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, έχει δημιουργήσει καινούργια και καινοτόμα πεδία εφαρμογής φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία, ξεφεύγουν από τις κλασσικές κατασκευές κτιρίων και περιοχών στέγασης και η μελέτη τους, θα αποσκοπούσε στην περαιτέρω εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Μια τέτοια τεχνολογία, αποτελούν τα φωτοβολταϊκά, που επιπλέουν σε λίμνες, φράγματα και άλλα υδατικά συστήματα(floating solar farms), αξιοποιώντας την ιδιότητα του νερού, να δρα ως ψυκτικό στην αύξηση θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, με αποτέλεσμα να σημειώνεται αύξηση, της τάξης του 10%, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Βιβλιογραφία

Agata Zdyb and Slawomir Gulkowski (2020) *'Performance Assessment of Four Different Photovoltaic Technologies in Poland'*.

ANNA M. K. GUSTAFSSON (2014) *'Recycling of CIGS solar cell waste materials'*.

Bjørn Petter Jelle (2015) *'Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways'*.

Changhai Penga, Ying Huang, Zhishen Wu (2011) *'Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China'* Energy and Buildings, pp. 3592-3598.

Chiara Candelise, Mark Winskel and Robert Gross (2011) *'Implications for CdTe and CIGS technologies production costs of indium and tellurium scarcity' Progress in photovoltaics: research and applications*, pp. 816-831.

Daniel Efurosibina Attoye, Kheira Anissa Tabet Aoul and Ahmed Hassan (2017) *'A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials'*.

E. Delyannis(2003) *'Historic background of desalination and renewable energies' Solar Energy*, pp. 357-366.

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.

Mary Debbarma, K. Sudhakar, Prashant Baredar (2016) *'Comparison of BIPV and BIPVT: A review'* Resource-Efficient Technologies, pp. 263-271.

Max Marwede, Armin Reller (2012) *'Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste'*.

M.A Green (2000) *'Photovoltaics: technology overview'* Energy Policy, pp. 989-998.

Owen Temby, Konstantinos Kapsis, Harris Berton, Daniel Rosenbloom, Geoffrey Gibson, Andreas Athienitis & James Meadowcroft (2014) *'Building-Integrated*

Photovoltaics: Distributed Energy Development for Urban Sustainability'
Environment: Science and Policy for Sustainable Development.

Product manual (2009) xSunx.

Raugei M, Fthenakis (2010) V. Cadmium flows and emissions from CdTe PV: *'future expectations'*. Energy Policy

Thomas Feurer, Patrick Reinhard, Enrico Avancini, Benjamin Bissig, Johannes Löckinger, Peter Fuchs, Romain Carron, Thomas Paul Weiss, Julian Perrenoud, Stephan Stutterheim, Stephan Buecheler and Ayodhya N. Tiwar (2016) *'Progress in thin film CIGS photovoltaics – Research and development, manufacturing, and applications'* Progress in photovoltaics: research and applications, pp. 645-667.

Tiantian Zhang, Meng Wang and Hongxing Yang (2018) *'A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems'*.

Θεοχάρης Τσούτσος, 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'*.

HomeAdvisor (2020), *'Install Solar Panels'*