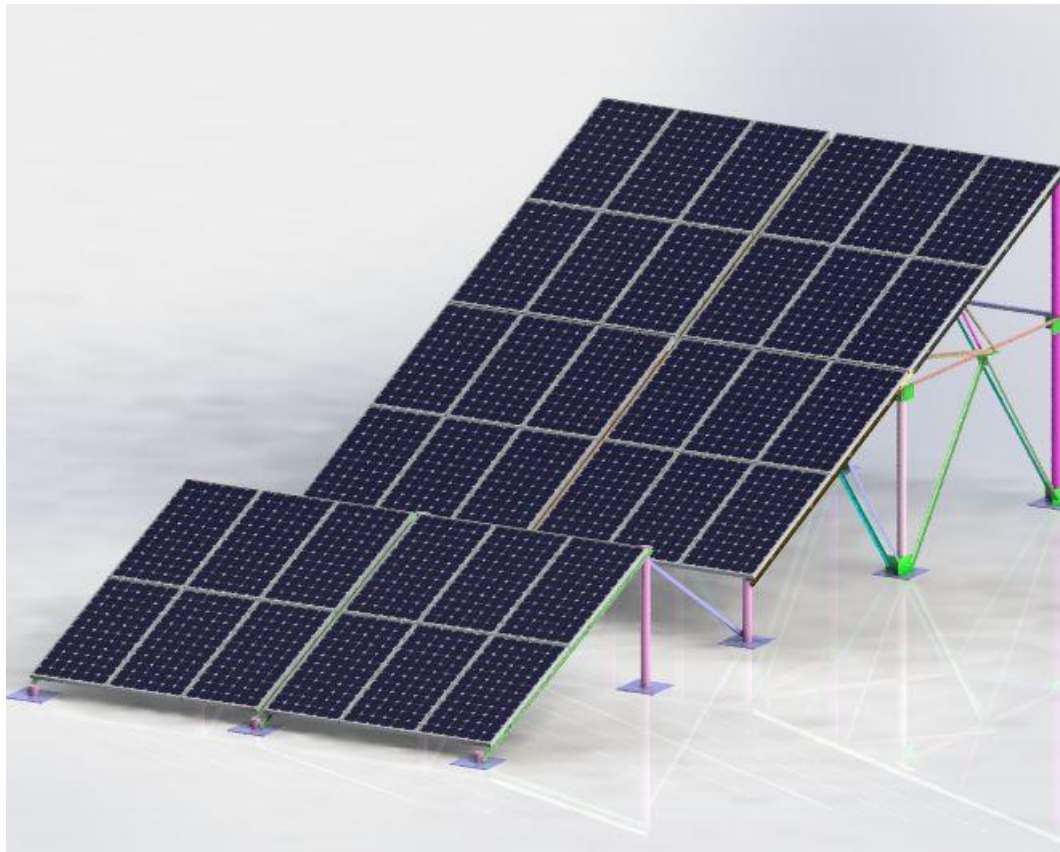




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ANSYS ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛ**



**ΔΗΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΛΑΜΠΡΟΣ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Τζιβανίδης Χρήστος**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται η ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ και η βελτιστοποίηση του με την χρήση ενός τρισδιάστατου μοντέλου στο ANSYS. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα και αποτελούν τον πιο αποτελεσματικό τρόπο αξιοποίησης την ηλιακής ενέργειας. Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η διερεύνηση ενός τρισδιάστατου μοντέλου ενός πάνελ από το ansys και η αξιολόγηση του για μελέτες φωτοβολταϊκών.

Το ANSYS αποτελεί ένα πρόγραμμα δισδιάστατης και τρισδιάστατης μοντελοποίησης. Στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί για θερμικές μελέτες ηλιακών πάνελ οι οποίες βασίζονταν αποκλειστικά σε μετρήσεις και δεδομένα heat fluxes. Επιθυμώντας την γενίκευση της μελέτης χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ενέργειας μεταβαλλόμενη ηλιακή ακτινοβολία και όχι σταθερό φορτίο στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού όπως δηλαδή συμβαίνει στην πραγματικότητα. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το Ansys fluent το οποίο είναι μία εφαρμογή του Ansys η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για υγρά αλλά προσφέρει μοντελοποίηση του ήλιου δημιουργώντας ακτινοβολία η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρόνο και την τοποθεσία. Έτσι, προκύπτουν αποτελέσματα για την θερμοκρασία και την παραγωγή ενέργειας του πάνελ κατά την διάρκεια της ημέρας.

Με την μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ο χρήστης έχει την ευελιξία να τροποποιήσει το μοντέλο ως προς διάφορους παράγοντες. Έτσι, τα υλικά, η τοποθεσία, οι διαστάσεις, η χρονική περίοδος από την οποία προκύπτουν τα αποτελέσματα και η γωνία πρόσπτωσης μπορούν εύκολα να μεταβληθούν. Η χρήση ενός τρισδιάστατου μοντέλου για τα πάνελ μειώνει το κόστος μελέτης αφού δεν απαιτούνται πειραματικές μετρήσεις για την δημιουργία νέων πάνελ με διαφορετικές διαστάσεις και υλικά. Εφόσον μία τέτοια μοντελοποίηση κριθεί επαρκής για την αξιολόγηση των πάνελ και υιοθετηθεί από επιχειρήσεις διαφορετικά είδη πάνελ και γωνίες πρόσπτωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας και την απορρόφηση του συστήματος. Επομένως, με ένα αποτελεσματικό μοντέλο θα ήταν δυνατή η

μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε επένδυσης και η βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για κάθε εφαρμογή.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the utilization of solar energy for electricity generation. In particular, it analyzes and optimizes a photovoltaic panel using a three-dimensional model in ANSYS. Photovoltaic panels convert solar radiation into electricity and heat and are the most efficient way of harnessing solar energy. The purpose of this thesis is to create a three-dimensional model of a panel with ansys and to evaluate it for solar studies.

ANSYS is a 2D and 3D modeling program. In the past it has been used for solar panel thermal studies based solely on measurements and data of heat fluxes of an area. Desiring to generalize the study, variable solar radiation was used as a source of energy and not a constant flux on the surface of the photovoltaic as a more realistic approach. For modeling we used Ansys fluent which is an application of Ansys which is mainly used for liquids but offers the choice of modeling generated radiation by the sun which varies with time and location. This way results are offered about the temperature and power output of the panel during the day.

By modeling a photovoltaic panel the user has the flexibility to modify the model with regard to various factors. Thus, the materials, location, dimensions, the time period from which the results are obtained and the angle of incidence can be easily changed. Using a three-dimensional model for the panels reduces the cost of the study since no experimental measurements are required to create new panels with different dimensions and materials. Provided that such modeling is sufficient for the evaluation of the panels and adopted by companies, different types of panels and angles of incidence can be used depending on the power requirements and system absorption. Therefore, with an effective model it would be possible to maximize the profit of each investment and optimize the solar energy for each application.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	5
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11-18
1.1.ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	11-13
1.1.1)ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	11-12
1.1.2)ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	12-13
1.2)ΠΡΑΣΙΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	14-15
1.2.1)ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	14
1.2.2)ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	15
1.3)ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	16-17
1.3.1)ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	16
1.3.2)ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	17
2)ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	19-38
2.1)ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΩΜΑΤΑ.....	19
2.2)ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	19-21
2.3)ΗΛΙΑΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ.....	21-22
2.4)ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	22-23
2.5)ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΥΛΙΚΑ.....	24-26
2.5.1)ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΥΛΙΚΑ.....	24
2.5.2)ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ.....	24
2.5.3)ΓΥΑΛΙ ΠΑΝΕΛ.....	25
2.5.4)ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.....	25

2.5.5)ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ΠΑΝΕΛ.....	26
2.5.6)ΥΛΙΚΟ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	26
2.6)ΕΙΔΗ ΠΑΝΕΛ.....	27-32
2.6.1)ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΠΑΝΕΛ.....	27
2.6.2)ΣΤΑΘΕΡΑ.....	27
2.6.3)1 ΑΞΟΝΑ.....	28
2.6.4)2 ΑΞΟΝΕΣ.....	29
2.6.5)1,5 ΑΞΟΝΕΣ.....	30
2.6.6)ΣΥΓΓΡΙΣΗ ΕΙΔΩΝ ΑΠΟΔΟΣΗ.....	31-32
2.7)ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	33-35
2.8)ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ SHADING.....	35
2.9)IV CURVE.....	35-36
2.10)ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΑΝΕΛ.....	37-38
3)ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ANSYS.....	40-57
3.1)ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ MESHING.....	40-41
3.2)ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	42-43
3.3)ΔΙΑΠΙΣΤΕΨΗ.....	44-46
3.4)DO RADIATION ΣΤΟ ANSYS.....	46-48
3.5)ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ANSYS.....	48-53
3.6)ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	53-56
3.7)ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	57
4)ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	59-70
4.1)ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΑΝΕΛ.....	59-60
4.2)ΙΣΧΥΣ ΑΘΗΝΑΣ.....	61



4.3)ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ ΣΤΟ ΠΑΝΕΛ.....	62-63
4.4)ΕΠΙΡΡΟΗ ΕΠΟΧΗΣ.....	64-67
4.4.1)ΧΩΡΙΣ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	64-65
4.4.2)ΜΕ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	66-67
4.5)ΚΛΙΣΗ ΠΑΝΕΛ.....	68-70
4.5.1)ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....	68
4.5.2)ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ.....	68-69
4.5.3)ΧΕΙΜΩΝΑ.....	70
5)ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	71-75
5.1) ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΟ ANSYS.....	71
5.2)ΣΥΓΓΡΙΣΗ ANSYS ΜΕ ΑΛΛΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....	72
5.3)ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	73
5.4)ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ FLUENT.....	74
5.5)ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	75
6)ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77-78

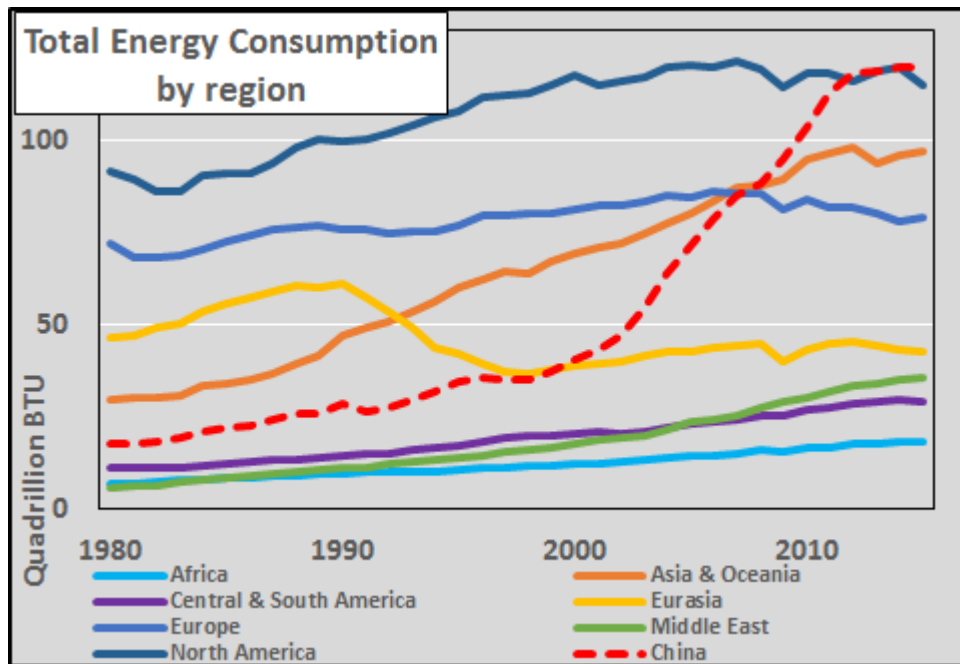


# **1)ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1)Ενεργειακό πρόβλημα**

### **1.1.1) Περιγραφή ενεργειακού προβλήματος**

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα στην σύγχρονη κοινωνία είναι αυτό που ονομάζουμε ενεργειακό πρόβλημα. Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα καταναλώνει ενέργεια για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του. Παλαιότερα η κατανάλωση ενέργειας περιορίζονταν στην καύση ξύλων για την μαγειρική αλλά με την πάροδο των χρόνων και με την εκμετάλλευση του ηλεκτρισμού δημιουργήθηκε μια σημαντική αγορά ενέργειας. Η ιδιαιτερότητα αυτής της αγοράς είναι ότι αυξάνεται διαρκώς λόγω της διάδοσής της σε όλο και περισσότερες χώρες και πολιτισμούς. Σήμερα, οι αναπτυγμένες χώρες έχουν επέλθει σε έναν ενεργειακό κορεσμό δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας έχει σχεδόν σταθεροποιηθεί. Από την άλλη, υπάρχουν πολλές αναπτυσσόμενες χώρες με μεγάλο πληθυσμό οι οποίες έχουν περιορισμένη πρόσβαση στην ενεργειακή αγορά και αναπόφευκτα με την πάροδο του χρόνου θα αυξήσουν την ενεργειακή κατανάλωση. Παρόλαυτα, το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας τα προηγούμενα χρόνια προέρχεται από την καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου πηγές ενέργειας οι οποίες είναι περιορισμένες σε ποσότητα. Λόγω των παραγόντων που αναφέρθηκαν χωρίς την διαφοροποίηση της πολιτικής παραγωγής ενέργειας και την μείωση της κατανάλωσης η προσφερόμενη ποσότητα δεν θα επαρκεί για να καλύψει την ζήτηση με αποτέλεσμα την έλλειψη ενέργειας και την δυσλειτουργία των σύγχρονων κοινωνιών.



Εικόνα 1 Διάγραμμα αυξανόμενης κατανάλωσης

### 1.1.2) Μέτρα αντιμετώπισης ενεργειακού προβλήματος

Για την αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν θεσπιστεί νόμοι οι οποίοι ενθαρρύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από το 1997 με την Λευκή Βίβλο η οποία έθεσε στόχους ώστε οι ΑΠΕ να φτάσουν σε ποσοστό διείσδυσης 12% μέχρι το 2010. Φυσικά οι στόχοι αυτοί αφορούσαν το σύνολο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και επιμέρους στόχοι ανατέθηκαν σε κάθε χώρα ξεχωριστά ανάλογα με την κατανάλωση και τις δυνατότητές της ώστε να περιορίσει την συνολική ζήτηση ενέργειας καθώς και την στροφή στην παραγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην συνέχεια, η συμφωνία αυτή επεκτάθηκε το 2010 αφού οι στόχοι δεν επιτεύχθηκαν αυξάνοντας περαιτέρω τους στόχους εισχώρησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ώστε μέχρι το 2020 να καλύπτουν το 20% της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια και το 10% των καυσίμων μεταφοράς προσφέροντας υψηλότερα οικονομικά κίνητρα στις επενδύσεις ΑΠΕ. Στα πλαίσια προετοιμασίας για το διάστημα μετά το 2020 οι στόχοι που θα τεθούν έχουν είδη προσδιοριστεί και περιέχουν την περαιτέρω αύξηση της προσρόφησης των ΑΠΕ στην ηλεκτρική ενέργεια σε 30% και 14% σε καύσιμα μεταφοράς. Οι στόχοι κάθε χώρας αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου προσφέροντας βεβαιότητα για το

μέλλον της αγοράς των ΑΠΕ. Για την επίτευξη αυτών των στόχων προσφέρονται οικονομικές διευκολύνσεις όπως χορηγίες, επιδόματα και αυξημένες τιμές της παραγόμενης ενέργειας. Από το σύνολο των ΑΠΕ η ηλιακή ενέργεια προσφέρει τις μεγαλύτερες ποσοτικά ενεργειακές αποδόσεις και αναμένεται να καλύψει το 50% της ενεργειακής αγοράς μέχρι τον επόμενο αιώνα.

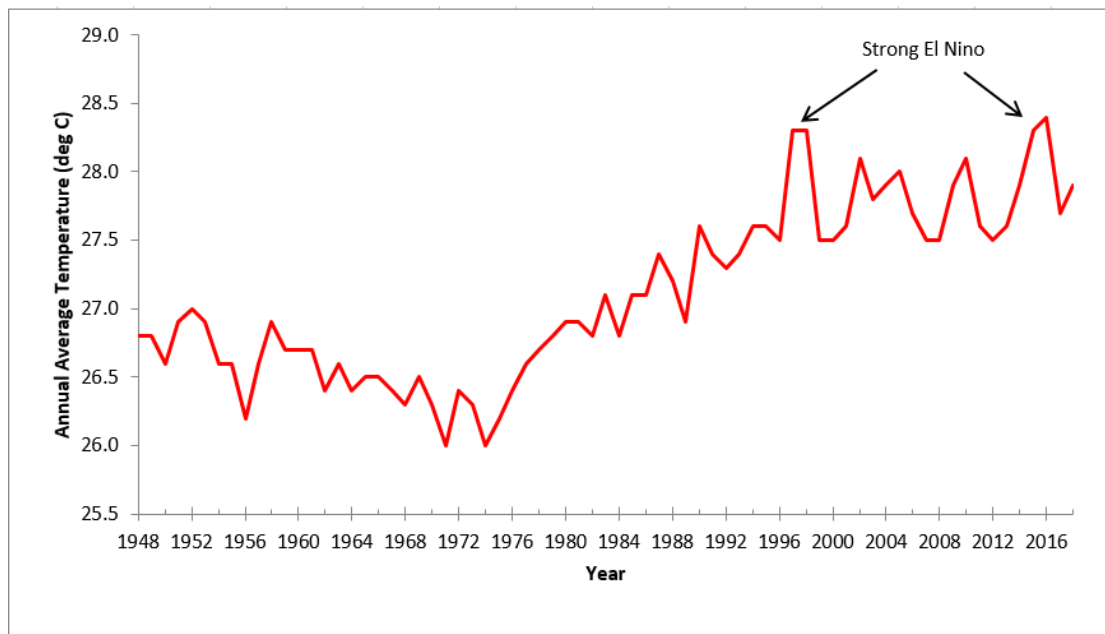
## **1.2)Πράσινη ενέργεια**

### **1.2.1)Περιγραφή πράσινης ενέργειας**

Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας καθώς και η χρήση ορυκτών καυσίμων δημιουργούν ρύπους στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον διαχωρισμό της ενέργειας ανάλογα με την ρύπανση η οποία προκύπτει από την μετατροπή της. Η ενέργεια η οποία δεν δημιουργεί ρύπους στο περιβάλλον ονομάζεται πράσινη ενέργεια. Είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε τις πράσινες με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργεια καθώς αν και φαντάζουν όμοιες έννοιες μπορεί να διαφέρουν. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η περίπτωση της βιομάζας και της γεωθερμίας. Η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί μπορούν να κατασκευαστούν ενεργειακές καλλιέργειες σε εκτάσεις γης οι οποίες μπορούν να προσφέρουν κάθε χρόνο ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας χωρίς να εξαντλούνται. Ταυτόχρονα θεωρείται πράσινη ενέργεια αφού λόγω της κυτταρικής αναπνοής απορροφά το διοξείδιο του άνθρακα το οποίο κατά την καύση απελευθερώνεται επομένως οι συνολικοί ρύποι μίας καλλιέργειας είναι ανεπαίσθητοι. Αντίθετα στην περίπτωση της γεωθερμίας η ενέργεια που παράγεται δεν θεωρείται πράσινη αφού δημιουργεί ρύπους(CO<sub>2</sub>) στο περιβάλλον. Παρ' όλ' αυτά αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αφού αν και θεωρητικά εξαντλείται σχηματίζεται ξανά με την πάροδο των χρόνων και βρίσκεται σε ποσότητες που δεν μπορεί να εξαντληθεί αφού αποτελεί την ενέργεια η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό της Γης. Η χρήση πράσινων πηγών ενέργειας κρίνεται απαραίτητη εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται ότι η θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί σημαντικά από την εποχή της Ευρωπαϊκής επανάστασης και αυτό οφείλεται στους ρύπους που απελευθερώνονται από τα καύσιμα όπως το διοξείδιο του άνθρακα.

## 1.2.2) Δράση για την προώθηση της πράσινης ενέργειας

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο το 2015 πραγματοποιήθηκε η συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement) η οποία ήταν η πρώτη παγκόσμια συμφωνία που προωθούσε την πράσινη ενέργεια. Στην συμφωνία αυτή συμμετείχαν χώρες από όλο τον κόσμο οι οποίες έθεσαν ένα όριο στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης στους 2°C. Πρέπει να σημειώσουμε ότι με τους ρυθμούς αύξησης της θερμοκρασίας που είχαν υπολογιστεί πριν την συμφωνία η αύξηση των 2°C θα επέρχονταν το 2035 αποδεικνύοντας την σοβαρότητα αλλά και την δυσκολία του συγκεκριμένου εγχειρήματος. Κάθε χώρα έχει την δυνατότητα να θέσει τους δικούς της στόχους για την ανάπτυξη πράσινων πηγών ενέργειας και την ενσωμάτωσή τους στην εγχώρια παραγωγή. Η συμφωνία αυτή ανανεώνεται κάθε 5 χρόνια και νέοι στόχοι τίθενται από κάθε χώρα. Για την επίτευξη αυτών των στόχων σημαντικότερες πηγές ενέργειας θεωρούνται ο ήλιος και ο άνεμος καθώς η τεχνολογία που σχετίζεται με αυτά δεν παράγει ρύπους. Συγκεκριμένα, η ηλιακή ενέργεια δεν επηρεάζεται τόσο από γεωγραφικούς προσδιορισμούς οπότε μπορεί να υιοθετηθεί από κάθε χώρα φυσικά με διαφορετική αποδοτικότητα και αποτελεί τον πιο υποσχόμενο τρόπο πράσινης ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 2 Διάγραμμα ρύπανσης πριν το 2012

## 1.3) Ηλιακή ενέργεια

### 1.3.1) Εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που περιέχει η ακτινοβολία η οποία φτάνει στην Γη από τον Ήλιο. Η ενέργεια αυτή αξιοποιούνται από την αρχαιότητα για τον φωτισμό υλικών με την χρήση μεγεθυντικού φακού. Τον 13<sup>ο</sup> αιώνα η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε για την ξήρανση τροφίμων ενώ από τον 16<sup>ο</sup> αιώνα δημιουργήθηκαν τα πρώτα ηλιακά θερμοκήπια. Για πιο άμεση χρήση της ηλιακής ενέργειας χρειάστηκαν αρκετά χρόνια αφού μόνο στα τέλη της δεκαετίας του 1800 κατασκευάστηκαν οι πρώτοι ηλιακοί συλλέκτες οι οποίοι αν και πολύ περιορισμένοι από άποψη απόδοσης τροφοδοτούσαν φούρνους για μακρινά ταξίδια πλοίων. Σήμερα χρησιμοποιούμε τους ηλιακούς συλλέκτες σε διάφορους σκοπούς κατά κύριο λόγο για την θέρμανση νερού με τον ηλιακό θερμοσίφωνα για οικιακή χρήση αλλά και σε άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.



**Global annual PV installed capacity increased by over 29% YoY in 2017**

Εικόνα 3 Διάγραμμα εγκατεστημένης ηλιακής ισχύς στην Ευρώπη



### 1.3.2)Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας

Ίσως η σημαντικότερη ανακάλυψη όσο αν' αφορά την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι το ηλιακό πάνελ. Αποτελούν το μοναδικό βιώσιμο τρόπο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Το 1839 ανακαλύφθηκε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο από τον Edmond Becquerel. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την πρόσπτωση του φωτός σε συγκεκριμένα υλικά. Η πληρέστερη εξήγηση για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δόθηκε από τον Albert Einstein στην ομότιτλη εργασία του η οποία τιμήθηκε με νόμπελ το 1921. Παρόλαυτα, πριν καν εξηγηθεί πλήρως το φαινόμενο ανακαλύφθηκε η φωτοαγωγιμότητα του σεληνίου (1873 Willoughby Smith) και το 1883 η πρώτη κυψέλη από φωτοβολταϊκό στοιχείο σεληνίου κατασκευάστηκε (Charles Fritts). Το 1887 ανακαλύφθηκε (Heinrich Hertz) η αύξηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου με την χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας μεταξύ δύο πολωμένων ηλεκτροδίων. Με την πάροδο των χρόνων τα συστήματα αυτά γίνονταν όλο πιο αποδοτικά και σήμερα φτάνουν μέχρι και αποδόσεις της τάξεως 20% και οι έρευνες στην βελτίωσή τους αυξάνονται διαρκώς.



## 2) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 2.1) Μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας σε σώματα

Ο ήλιος είναι ο κοντινότερος αστέρας στον πλανήτη μας και είναι αυτός που ορίζει το ηλιακό μας σύστημα. Αποτελεί ένα σώμα το οποίο ακτινοβολεί ενέργεια στους υπόλοιπους πλανήτες. Ο όρος ηλιακή ενέργεια περιγράφει την ηλιακή ακτινοβολία την οποία δέχεται ο πλανήτης μας από τον ήλιο. Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από την απόσταση ηλίου-Γης δηλαδή την εποχή την οποία μετράμε την ακτινοβολία το ύψος του ηλίου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου και την ατμόσφαιρα η οποία απορροφά ένα μέρος της ακτινοβολίας. Η μέση ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς τον συνυπολογισμό του υψόμετρου και της περιοχής υπολογίζεται κατά μέσο όρο στα 1367 όμως διαφοροποιείται μέσα στον χρόνο με την μέγιστη τιμή(1416) να παρατηρείται στις 3 Ιανουαρίου και την ελάχιστη (1332) να παρατηρείται στις 4 Ιουλίου. Η ηλιακή απόκλιση περιγράφει την γωνία ανάμεσα στην ευθεία που ορίζεται από τον ήλιο και την Γη και το επίπεδο του Ισημερινού.

### 2.2) Βασικοί όροι ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Ο ήλιος έχει σφαιρικό σχήμα διαμέτρου  $1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$  και απόσταση από την Γη  $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ . Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο με έναν ιδιόμορφο τρόπο καθώς ο Ισημερινός περιστρέφεται γύρω από αυτόν κάθε 27 μέρες ενώ οι 2 πόλοι κάθε 30 μέρες. Η κίνηση αυτή του διαφοροποιεί την απόσταση της επιφάνειας και του ηλίου με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η ένταση της ακτινοβολίας. Η απόσταση της Γης και του ηλίου λόγω της εκκεντρότητας της τροχιάς του μεταβάλλεται κατά 1,7% από την μέση απόσταση. Επιπλέον, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της με αποτέλεσμα η κατεύθυνση της ακτινοβολίας να μεταβάλλεται και να μηδενίζεται το βράδυ.

Για την περιγραφή του παραπάνω φαινομένου ορίζονται κάποιες γωνίες για την σχέση των ακτινών του ηλίου με τις εξεταζόμενες επιφάνειες.

Γωνία ζενίθ  $\theta_z$  ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο κατακόρυφο επίπεδο της επιφάνειας της γης και της ακτίνας του ηλίου. Με την συμπληρωματική γωνία της  $90-\theta_z$  ορίζεται το ηλιακό ύψος. Όσο αν αφορά την τοποθεσία του ηλίου ως προς την Γη λόγω της τοποθεσίας της ως προς τον Ισημερινό χρησιμοποιούμε τον αζιμούθιο επιφάνειας που αποτελεί την γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ηλιακής ακτίνας στην επιφάνεια του σώματος και την νότια κατεύθυνση. Ως αζιμούθιο ηλίου ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της επιφάνειας των ακτινών στο έδαφος και την νότια κατεύθυνση. Για την περιγραφή της ακτινοβολίας συνδυάζοντας τις διαφοροποιήσεις της εποχής και της θέσης της Γης ως προς τον Ισημερινό χρησιμοποιούμε την ηλιακή απόκλιση. Η ηλιακή απόκλιση είναι η ηλιακή θέση του ηλίου κατά το ενεργειακό μεσημέρι σε σχέση με το επίπεδο του Ισημερινού. Το επίπεδο αυτό είναι κεκλιμένο κατά 23,45 μοίρες με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται διαρκώς κατά την διάρκεια του έτους από -23,45 μέχρι 23,45. Ο υπολογισμός της εξαρτάται καθαρά από την ημέρα και εκφράζεται με την εξίσωση:

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360(280+n)}{365}\right) \quad (2.1)$$
 όπου n η μέρα του χρόνου η διαφοροποίησή της μέσα στον χρόνο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Μήνας	Μέρα του χρόνου	Ημερομηνία	N	Απόκλιση $\delta$
Ιανουάριος	I	17	17	-20.9
Φεβρουάριος	31+i	16	47	-13.0
Μάρτιος	59+i	16	75	-2.4
Απρίλιος	90+i	15	105	9.4
Μάιος	120+i	15	135	18.8
Ιούνιος	151+i	11	162	23.1
Ιούλιος	181+i	17	198	21.2
Αύγουστος	212+i	16	228	13.5
Σεπτέμβριος	243+i	15	258	2.2
Οκτώβριος	273+i	15	288	-9.6
Νοέμβριος	304+i	14	318	-18.9
Δεκέμβριος	334+i	11	344	-23.0

Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ορισθεί είναι η κλίση του επιπέδου β. Αποτελεί την κλίση που έχει η εξεταζόμενη επιφάνεια του πάνελ που προσπίπτει η ακτινοβολία σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία αυτή ορίζεται από τον κατασκευαστή και αποτελεί σημαντικό στοιχείο για κάθε φωτοβολταϊκό καθώς η κλίση β καθορίζει τον χρόνο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια αλλά και την έντασή της.

Κατά την διάρκεια της μέρας η ακτινοβολία του ηλίου μεταβάλλεται λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από το εαυτό της. Η μεταβολή αυτή περιγράφεται από την ωριακή γωνία δηλαδή την γωνιακή μετατόπιση του ηλίου δυτικά ή ανατολικά του μεσημβρινού την περιοχής. Η Γη περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $0,25 \text{ } m^{-1}$  άρα η γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται από την σχέση  $\omega = 0,25 \cdot t$  όπου t τα λεπτά από το ηλιακό μεσημέρι.

### 2.3) Ηλιακός χρόνος

Ηλιακό μεσημέρι ονομάζεται η ώρα της ημέρας στην οποία ο ήλιος ευθυγραμμίζεται με τον τοπικό μεσημβρινό δηλαδή, ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται. Γενικά η ακτινοβολία του ηλίου μεγιστοποιείται στις 12 το μεσημέρι αλλά ανάλογα με την περιοχή μπορεί να μεγιστοποιηθεί νωρίτερα ή αργότερα. Ο ηλιακός χρόνος υπολογίζεται από την σχέση:

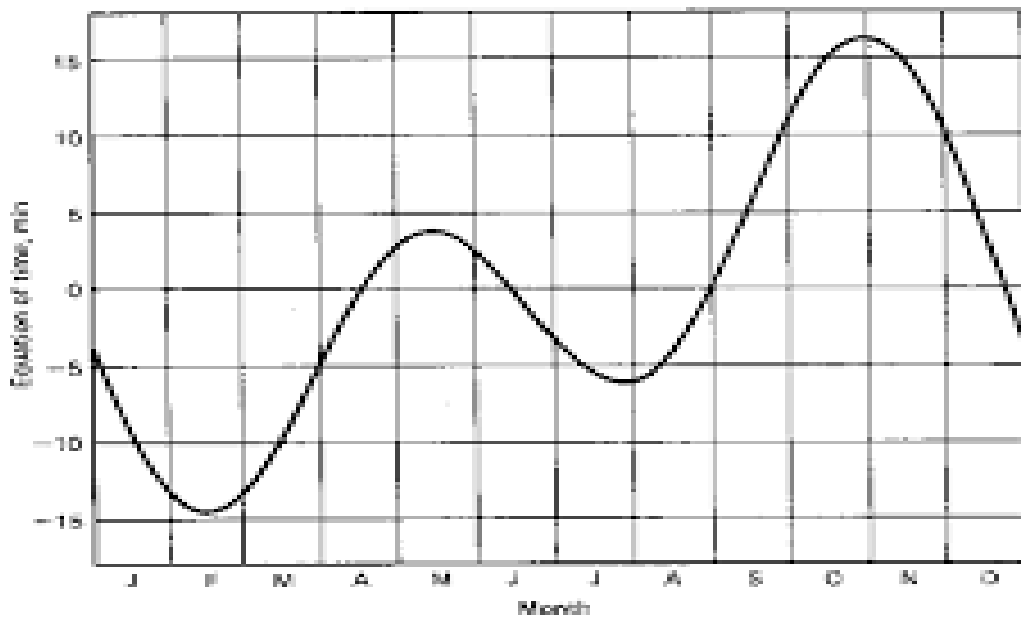
$$t_{\eta\lambda} = t_{\rho\sigma\lambda} + 4(L_{ST} - L_{loc}) + E \quad (2.2)$$

όπου  $t_{\eta\lambda}$  ο ηλιακός χρόνος  $t_{\rho\sigma\lambda}$  ο ωρολογιακός χρόνος της μέρας  $L_{ST}$

το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού,  $L_{loc}$  το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή και E μία εξίσωση χρόνου που λαμβάνεται για κάθε μέρα του έτους:

$$E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (2.3)$$

$$M_E B = 360(n - 81) / 364 \quad (2.4)$$



Εικόνα 4 Εξίσωση χρόνου ανά τον μήνα

Τέλος, ορίζεται το μέγεθος γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  η οποία σχηματίζεται από την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και την κάθετη της επιφάνειας στην οποία προσπίπτει. Η γωνία πρόσπτωσης χρησιμοποιείται συχνά σε υπολογισμούς για την απόδοση του φωτοβολταϊκού και συνδέεται με τα προηγούμενα μεγέθη με την έκφραση:

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

$$\cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \quad (2.4)$$

## 2.4) ΎΝΤΑΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τις σχέσεις κατά Ashrae (2001 Fundamental Handbook). Η ακτινοβολία του ηλίου χωρίζεται σε άμεση ακτινοβολία η οποία προκύπτει από τις ακτίνες του ηλίου που προσπίπτουν στο σώμα και σε διάχυτη η οποία προκαλείτε από την ακτινοβολία του ηλίου που ανακλάται στην επιφάνεια της Γης και από τις ακτίνες που διαχέονται από την ατμόσφαιρα.

Η άμεση ακτινοβολία περιγράφεται από την εξίσωση  $Edn = \frac{A}{e^{\sin \beta}}(2.5)$  όπου

A,B,C είναι σταθερές που ορίζονται από την Ashrae για κάθε μέρα του χρόνου και β είναι η γωνία ανάμεσα στον ήλιο και το οριζόντιο επίπεδο της Γης.

Η διάχυτη ακτινοβολία λόγω της ανάκλασης στο έδαφος σε περιγράφεται από την εξίσωση  $Er = Edn(C + \sin \beta) \rho_g \frac{1 - \cos \varepsilon}{2}(2.6)$

Όπου ε η γωνία της επιφάνειας του σώματος με το οριζόντιο επίπεδο της Γης.

Για μη κάθετες επιφάνειες η διάχυτη ακτινοβολία υπολογίζεται ως :

$$Ed = CEDn \frac{1 + \cos \varepsilon}{2}(2.7)$$

Η συνολική διάχυτη ακτινοβολία  $Edif = Ed + Er$  (2.8)

Η διακύμανση της ακτινοβολίας μπορεί να προσεγγιστεί από την σχέση  $I_{on} = I_{sc}(1 + 0,33 \cos \frac{360n}{365})(2.9)$  όπου  $I_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2}(2.10)$  είναι η ηλιακή σταθερά που αναφέρθηκε

Η μεταβολή της ακτινοβολίας κατά την διάρκεια του χρόνου καθώς και οι μεταβλητές A,B,C περιγράφεται ενδεικτικά από την ASHRAE στον παρακάτω πίνακα:

Month	$I_o$ W/m <sup>2</sup>	Equation of time, min.	Declination, deg.	A W/m <sup>2</sup>	B (Dimensionless ratio)	C (Dimensionless ratio)
Jan	1416	-11.2	-20.0	1209	0.142	0.058
Feb	1404	-13.9	-10.8	1193	0.144	0.060
Mar	1383	-7.5	0.0	1164	0.156	0.071
Apr	1360	1.1	11.6	1115	0.180	0.097
May	1339	3.3	20.0	1084	0.196	0.121
Jun	1330	-1.4	23.45	1069	0.205	0.134
Jul	1328	-6.2	20.6	1166	0.207	0.136
Aug	1343	-2.4	12.3	1088	0.201	0.122
Sep	1364	7.5	0.0	1131	0.177	0.092
Oct	1386	15.4	-10.5	1172	0.160	0.073
Nov	1408	13.8	-19.8	1199	0.149	0.063
Dec	1417	1.6	-23.45	1212	0.142	0.057

Εικόνα 5 Πίνακας ενέργειας από ακτινοβολία ήλιου στη Γη

## 2.5) Ακτινοβολία σε υλικά

### 2.5.1) ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΥΛΙΚΑ

Η ακτινοβολία αφού φτάσει στο εσωτερικό των υλικών επηρεάζεται από τις ιδιότητες των υλικών. Συγκεκριμένα, η ακτινοβολία όταν έρχεται σε επαφή με ένα υλικό ένα ποσοστό της αντανακλάται ένα διασκορπίζεται και ένα απορροφάτε. Ο διαχωρισμός αυτός της ακτινοβολίας εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού.

Η απορροφητικότητα ενός υλικού περιγράφει την ικανότητα του να λάβει ενέργεια από τα φωτόνια που εμπεριέχονται σε μια ακτινοβολία. Αυτή εξαρτάται από τον συντελεστή απορροφητικότητας ο οποίος καθορίζεται από την επιλογή του υλικού. Η απορροφητικότητα του υλικού υπολογίζεται από την

σχέση  $A = \frac{t \cdot a}{2.302}$  (2.11) όπου  $t$  το πάχος του υλικού και  $a$  ο συντελεστής απορροφητικότητας.

Διασκορπισμός ενός υλικού περιγράφει την διαφοροποίηση της κατεύθυνσης της ακτίνας ακτινοβολίας αφού αυτή διαπεράσει το υλικό. Εξαρτάται από τον συντελεστή διασκορπισμού ο οποίος καθορίζεται από το υλικό.

Η ανάκλαση ορίζει το ποσοστό της ακτινοβολίας το οποίο δεν εισέρχεται στο σώμα αλλά απομακρύνεται από την επιφάνεια αυτή και εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Η μεταβλητή που καθορίζει την ανάκλαση της ακτινοβολίας ονομάζεται δείκτης διάθλασης.

### 2.5.2) Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάτε από ημιαγωγούς τα φωτόνια που εκπέμπονται μεταφέρουν την ενέργεια τους στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και δημιουργούν διαφορά δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού δημιουργεί συντονισμένη κίνηση ηλεκτρονίων δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα.



### 2.5.3)ΓΥΑΛΙ ΠΑΝΕΛ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιέχουν ένα προστατευτικό γυαλιού το οποίο ως διαφανές υλικό επιτρέπει στην ακτινοβολία να εισέρθει στις εσωτερικές στρώσεις του πάνελ .Ο ρόλος του γυαλιού είναι να προστατεύει τα εσωτερικά υλικά από κρούσεις και χαράγματα κατά την μεταφορά αλλά και την απομάκρυνση του νερού σε περίπτωση βροχής χωρίς να εισέλθει στο εσωτερικό του πάνελ. Σημαντικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το γυαλί είναι να μην θαμπώνει καθώς μειώνεται η απορροφητικότητά του.

### 2.5.4)ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΥΛΙΚΟ

Φωτοβολταϊκό υλικό ονομάζεται ο ημιαγωγός ο οποίος μετατρέπει μέρος της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται από το ίδιο υλικό ημιαγωγοί n και p επιτρέποντας την κίνηση των ηλεκτρονίων μόνο προς μια κατεύθυνση. Οι ιδιότητες των ημιαγωγών που επηρεάζουν την απόδοση του φωτοβολταϊκού είναι η απορροφητικότητά του η οποία ορίζει το ποσό της ακτινοβολίας που εισέρχεται σε αυτό και το ενεργειακό χάσμα για κάθε ηλεκτρόνιο. Η ενέργεια των φωτονίων υπολογίζεται για κάθε μήκος κύματος από την σχέση  $E = \frac{hc}{\lambda}$  (2.12) όπου h η σταθερά του Planck ( $6.63 \cdot 10^{-34}$ ) c η ταχύτητα του φωτός και λ το μήκος κύματος. Αν η ενέργεια αυτή είναι μικρότερη από την ενέργεια που απαιτείται για την μετάβαση σε άλλη ενεργειακή ζώνη τότε η ενέργεια μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε θερμότητα. Σε περίπτωση που αυτή είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ενέργεια μετάβασης σε άλλη ενεργειακή στοίβα, σε κάθε φωτόνιο δεσμεύεται όση ενέργεια απαιτείται για αυτή την μεταπήδηση της (band gap) και η υπόλοιπη γίνεται θερμότητα.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Material	Band gap	Maximum theoretical efficiency
x-Si	1,1	33
a-Si	1,75	38
CdTe	1,44	33
CdSe	1,73	29
CdS	2,42	14
GaAs	1,38	24
InP	1,35	34

### **2.5.5)ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗ ΠΑΝΕΛ**

Υλικά ενθυλάκωσης είναι τα υλικά τα οποία τοποθετούνται δίπλα στο φωτοβολταϊκό υλικό για να βελτιώσουν τις ιδιότητές τους. Τα υλικά αυτά έχουν υψηλές ηλεκτρικές και οπτικές ιδιότητες έτσι ώστε να διευκολύνουν την κατανομή της ακτινοβολίας στο υλικό. Τοποθετούνται ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και στο υλικό απορρόφησης αλλά και πολλές φορές ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και στο προστατευτικό γυαλί για την απορρόφηση υγρασίας η οποία μπορεί να διαπέρασε το γυαλί σαν επιπλέον μέτρο ασφαλείας.

### **2.5.6)ΥΛΙΚΟ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ**

Τέλος το πάνελ στο πίσω μέρος του έχει μία στρώση από υλικό το οποίο ονομάζεται PVF.Ο ρόλος αυτού του υλικού είναι να μειώσει την φθορά στο πάνελ και να αποφευχθεί η αντικατάστασή του. Όπως και το γυαλί προστατεύει το εσωτερικό από την υγρασία τον άνεμο και την σκόνη. Η κυριότερη ιδιότητα αυτού του υλικού είναι η προστασία του πάνελ και κυρίως τα πολυμερή υλικά από την υπεριώδη ακτινοβολία. Συνήθως το PVF δεν είναι διαπερατό από το φως καθώς αυτή η επιφάνεια δεν χρειάζεται να απορροφήσει φως από έξω καθώς αυτή η πλευρά είναι σκιασμένη από το ίδιο φωτοβολταϊκό. Εξαίρεση αποτελούν τα όπου διφασικά πάνελ στα οποία το πάνελ απορροφά ακτινοβολία και από τις δύο πλευρές με σκοπό να αυξηθεί η ενέργεια που προσδίδει η ακτινοβολία στο πάνελ τα PVF είναι ημιδιαφανή.

## 2.6)ΕΙΔΗ ΠΑΝΕΛ

### 2.6.1)ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΠΑΝΕΛ

Τα ηλιακά πάνελ απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια του. Η ηλιακή ακτινοβολία επιρρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο πάνελ. Η γωνία αυτή εξαρτάται από την θέση του ηλίου κατά την διάρκεια της μέρας και την κλίση του επιπέδου β. Η κλίση του επιπέδου β δημιουργείται κατά την τοποθέτηση του πάνελ και μπορεί να είναι σταθερή ή ασταθής ανάλογα με το είδος του πάνελ. Τα πάνελ διαφοροποιούνται ως προς την κλίση του επιπέδου ως εξής:

### 2.6.2)ΣΤΑΘΕΡΑ

Τα πάνελ αυτά τοποθετούνται σε μία βάση η οποία είναι μόνιμα τοποθετημένη στο έδαφος. Αποτελείται από σιδερένιους άξονες οι οποίοι στηρίζουν τα πάνελ και δημιουργούν μία σταθερή γωνία κλίσης με το έδαφος κατά την διάρκεια της ημέρας. Τα σταθερά πάνελ έχουν μικρότερη απόδοση από τα πάνελ που χρησιμοποιούν τεχνολογία tracker. Παρόλαυτα, έχουν πολύ πιο απλή τεχνολογία και είναι αρκετά φθηνότερα και πιο εύκολα στην εγκατάσταση.



Εικόνα 6 Σταθερά πάνελ

### 2.6.3)1 ΑΞΟΝΑ

Τα μη σταθερά πάνελ χρησιμοποιούν μία τεχνολογία η οποία ονομάζεται τράκερ. Κατά την τοποθέτηση των πάνελ τοποθετούνται σε μία βάση η οποία μετακινείται σε 1 ή περισσότερους άξονες

Τα single axis panel αποτελούνται από ένα πάνελ το οποίο στηρίζεται σε ένα άξονα ο οποίος συνδέεται με ένα μοτορ το οποίο περιστρέφει το πάνελ για να ακολουθεί την πορεία του ηλίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει στο πάνελ σε ευνοϊκότερη γωνία και επομένως να αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς του πάνελ κατά την διάρκεια της ημέρας. Συνήθως, δίνεται ελευθερία περιστροφής του πάνελ ώστε η επιφάνειά τους να μεταβιβάζεται προς τον βορρά ή τον νότο και να είναι κάθετη στον ήλιο. Αυτό που προτιμάται ως η πιο αποδοτική λύση είναι η επιλογή μίας γωνίας πρόσπτωσης και η διατήρησή της κατά την διάρκεια της ημέρας. Διαφορετικά μπορεί να περιστρέφει το πάνελ ανατολικά και δυτικά με σκοπό να μετακινήσει τα πάνελ ανάλογα με την ηλιακή απόκλιση κατά την διάρκεια του χρόνου.



Εικόνα 7 Single axis tracker

## 2.6.4)2 ΑΞΟΝΕΣ

Σε περίπτωση που επιζητάτε η επιπλέον απόδοση ενός πάνελ χρησιμοποιούνται dual axis panels. Τα πάνελ αυτά διαθέτουν δύο διαφορετικά motors ο ένας περιστρέφει το πάνελ έτσι ώστε να ακολουθεί την καθημερινή κίνηση του ηλίου προς βορά ή νότο όμοια με τους single axis trackers. Το δεύτερο motor μετακινεί έναν άλλο άξονα για ώστε να υπάρχει και δεύτερος βαθμός ελευθερίας σε άλλον άξονα διαφοροποιώντας την θέση του πάνελ ανάλογα με τον μήνα με την περιστροφή του πάνελ προς ανατολή και δύση. Με αυτό τον τρόπο συνδυάζονται τα είδη των single axis panel για βέλτιστη απόδοση.



Εικόνα 8 Dual axis tracker

### 2.6.5) 1,5 ΑΞΟΝΕΣ

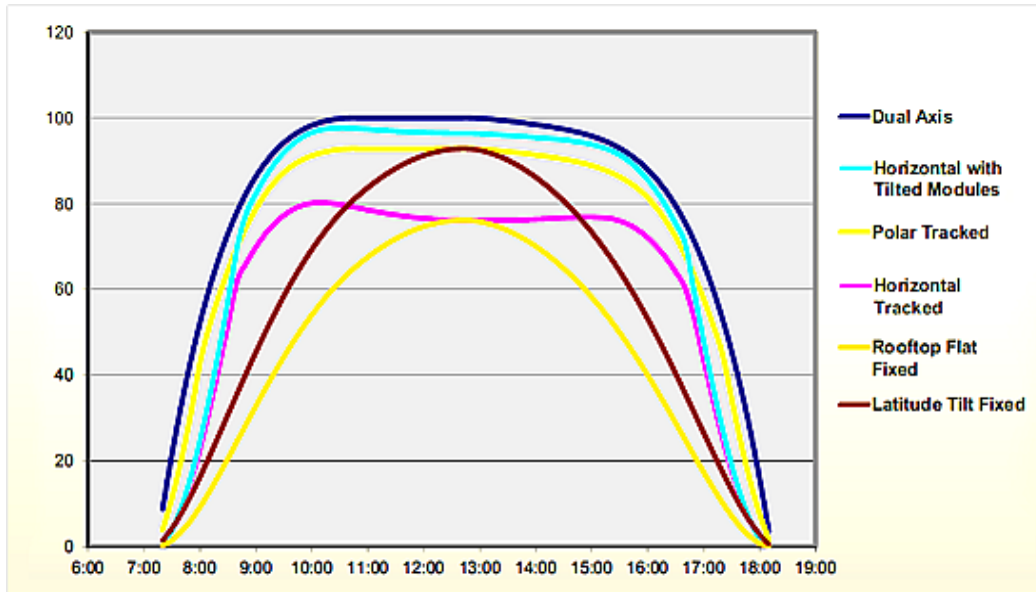
Τα τελευταία χρόνια έχει σχεδιαστεί και ένα νέο είδος tracker το οποίο ονομάζεται 1,5 axis tracker το οποίο προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω ειδών. Αποτελείται από έναν μόνο motor ο οποίος συνδέεται με ένα σύστημα αξόνων που στηρίζουν το πάνελ και δημιουργούν μία σύνθετη κίνηση μεταβαλλόντας την γωνία πρόσπτωσης ώστε να ακολουθεί την κίνηση του ηλίου κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και την ηλιακή απόκλιση κατά την διάρκεια του χρόνου. Η περιστροφή αυτή του φωτοβολταϊκού σε μία ενδιάμεση γωνία έχει σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί η απόδοση του σε σχέση με τους single axis tracker αλλά όχι στα επίπεδα των dual axis tracker καθώς μόνο με ένα motor δεν μπορούν να προσφέρουν την ακρίβεια στην κίνηση.



Εικόνα 9 1,5 axis tracker

## 2.6.6) Σύγκριση ειδών απόδοσης

Όπως αναφέρθηκε τα τράκερ αυξάνουν την παραγόμενη ενέργεια κατά την διάρκεια της ημέρας συγκριτικά με τα σταθερά πάνελ. Το πιο σημαντικό στοιχείο για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας είναι η γωνία πρόσπτωσης του ηλίου στην επιφάνεια του πάνελ. Όταν η γωνία κλίσης είναι μηδενική (Roof top flat fixed) είτε λόγω δυσκολίας τοποθέτησης (υπερβολικό ύψος σε οροφές αντίθετο σε νομοθεσία) είτε λόγω αμέλειας έχουμε σημαντική μείωση της απόδοσης των πάνελ. Σε περίπτωση τοποθέτησης των πάνελ σε σταθερή βέλτιστη γωνία κλίσης ως προς το έδαφος η απόδοση αυξάνεται σημαντικά και φτάνει την μέγιστη τιμή ενέργειας που μπορεί να παράγει το πάνελ κατά το ηλιακό μεσημέρι. Η χρησιμοποίηση single tracker ο οποίος ακολουθεί την πορεία του ηλίου ως προς την ηλιακή απόκλιση με μηδενική κλίση επιπέδου κατά (Horizontal tracked) αν και δεν πρόκειται να παράγει την μέγιστη ενέργεια που μπορεί το πάνελ ακόμα και κατά το ηλιακό μεσημέρι δημιουργεί μία πιο σταθερή παραγωγή ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας. Σε περίπτωση όμως που μία ίδια τεχνολογία (Horizontal tracked) χρησιμοποιηθεί σε πάνελ με βέλτιστη σταθερή κλίση η αυτή μπορεί να μεγιστοποιηθεί και να διατηρηθεί. Αντίθετα όταν τα single axis trackers λειτουργούν με polar tracking τα πάνελ περιστρέφονται ώστε να προσπίπτουν διαρκώς στον ήλιο με σταθερή γωνία κλίσης μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοσή τους αλλά και διατηρώντας την για μεγαλύτερη διάρκεια της μέρας αλλά και προσφέροντας λίγο μεγαλύτερη διάρκεια ηλιακής ακτινοβολίας κατά την ανατολή και δύση του ηλίου. Σε περίπτωση Dual axis tracker τα πάνελ κινούνται σε δύο ξεχωριστούς άξονες προσομοιάζοντας την κίνηση του ηλίου κατά την διάρκεια της ημέρας αλλά και την απόκλισή του κατά την διάρκεια του χρόνου. Τέλος η τεχνολογία των 1.5 axis trackers είναι αρκετά καινούρια και προσομοιάζει αρκετά τα dual axis trackers ως προς την παραγωγή ενέργειας χωρίς όμως να υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα για αυτήν.



Εικόνα 10 Ισχύς πάνελ με διαφορετική κλίση



## 2.7) Οικονομική κατάσταση

Η επιλογή των πάνελ γίνεται με βάση οικονομικά κριτήρια σε περίπτωση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου που προσφέρει ρεύμα στην εταιρία παροχής ρεύματος ή με κριτήρια αυτονομίας αν προσφέρει ενέργεια για κατανάλωση σε μία περιοχή. Γενικά λόγω επιδοτήσεων των πράσινων και ανανεώσιμων πηγών ενέργεια η τιμή του ρεύματος που προσφέρεται στο δίκτυο είναι αυξημένη οπότε συνηθίζεται να πωλείται. Σε περιπτώσεις όπου η σύνδεση ενός οικισμού ή μίας εγκατάστασης με το δίκτυο είναι ανεπαρκής ή μη αποδοτική η κατανάλωση του ρεύματος από φωτοβολταϊκά αλλά και η αποθήκευσή τους σε μπαταρίες είναι δελεαστική. Ανάλογα με το είδος του τράκερ μεταβάλλεται σημαντικά το κόστος του πάνελ τόσο λόγω των υλικών όσο και της αύξησης της εργατοώρας λόγω της εγκατάστασης.

Σε περίπτωση παραδοσιακού φωτοβολταϊκού πάρκου αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η μέγιστη τροφοδότηση ρεύματος στην γραμμή του δικτύου. Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα η ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του κάθε τράκερ κατά την διάρκεια της μέρας. Για την οικονομική αξιολόγηση πρέπει να αναφερθεί ότι ανάλογα με το συμβόλαιο η ενέργεια αυτή μπορεί να μην απορροφάτε πλήρως και να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο μέγιστο όριο ισχύς το οποίο απορροφάτε. Αυτό συμβαίνει διότι το δίκτυο τροφοδοτείται και από άλλες πηγές ενέργειας ο οποίες δεν μπορούν να σταματήσουν την απόδοση ισχύος στο σύστημα. Επομένως από το παραπάνω διάγραμμα μας ενδιαφέρει να έχουμε μέγιστη ισχύς για κατά την διάρκεια της ημέρας με την μέγιστη ισχύ να περιορίζεται σε ένα μέγεθος  $P_{max}$ . Για την αξιολόγηση των tracker πρέπει να υπολογίσουμε το κόστος της επένδυσης με αναγωγή ως προς τον μήνα ή στην αρχή της επένδυσης. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να λάβουμε υπόψιν την διαχρονική αξία του χρήματος δηλαδή τον πληθωρισμό  $r$ . Μία επένδυση φωτοβολταϊκών πάνελ υπολογίζεται για χρόνο 20 ετών μετά από αυτό τα πάνελ κρίνεται ότι πρέπει να αντικατασταθούν αφού η απόδοσή τους με την πάροδο του χρόνου μειώθηκε σημαντικά.

Τα αρχικά κόστη  $C_{mic}$  ενός φωτοβολταϊκού πάρκου περιέχουν το κόστος του οικοπέδου, το κόστος των υλικών και των πάνελ και το κόστος εργατοωρών κατά

την εγκατάσταση των πάνελ αυτά δαπανώνται κατά την αρχή της επένδυσης οπότε δεν μεταβάλλονται κατά την αναγωγή στον αρχικό χρόνο.

Τα μεταβλητά κόστη  $C_{var}$  αποτελούνται από το κόστος φύλαξης των πάνελ και τα κόστη συντήρησης των πάνελ. Τα κόστη αυτά είναι ένα σταθερό ποσό κάθε μήνα το οποίο για να αναχθεί στον αρχικό χρόνο πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο πληθωρισμός  $r$ .

$$C_{var} = \sum_{i=0}^n C * (1 + r)^i \quad (2.13)$$

Επομένως υπάρχει συνολικό κόστος:

$$C_{tot} = C_{inic} + C_{var} \quad (2.14)$$

Τα έσοδα  $In$  μιας επένδυσης αποτελούνται από την ηλεκτρική ενέργεια ( $E$ ) την οποία αγοράζει η ΔΕΗ από το φωτοβολταϊκό πάρκο επί την τιμή ( $P$ ) της ενέργειας που πωλείται.

$$In = E * P \quad (2.15)$$

Τα έσοδα αυτά είναι ένα ποσό που λαμβάνεται κάθε μήνα και ανάγονται στον αρχικό χρόνο ως εξής:

$$In_{tot} = \sum_{i=0}^n In \times (1 + r)^i \quad (2.16)$$

Άρα το κέρδος με αναγωγή στην αρχή της επένδυσης υπολογίζεται ως εξής:

$$K = In_{tot} + C_{tot} \quad (2.17)$$

Σε περίπτωση που τα πάνελ τοποθετούνται για ιδιωτική χρήση της ενέργειας και κατανάλωση της η χρήση tracker είναι πιο σπάνια λόγω αυξημένου κόστους. Όταν χρησιμοποιούνται είναι tracker ενός άξονα ο οποίος αυξάνει την παραγόμενη ενέργεια αρκετά ώστε να καλύπτει την ζήτηση. Για την οικονομική αξιολόγηση της κάθε επένδυσης σε τράκερ πρέπει να υπολογιστεί το LCOE (Levelized cost of energy) το οποίο λαμβάνει υπόψιν την διαχρονική αξία του χρήματος και υπολογίζει το κόστος σε χρήματα προς παραγόμενη ενέργεια (ευρώ/kW). Ο σημαντικότερος παράγοντας για την τοποθέτηση πάνελ σε αυτήν την περίπτωση είναι η αυτάρκεια ως προς την ενέργεια η οποία προφανώς δεν μπορεί να καλυφθεί πλήρως μόνο από φωτοβολταϊκά αφού δεν

παράγεται ενέργεια το βράδυ. Το LCOE αναφέρεται στον λόγο της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας  $E_{tot}$  προς το ολικό κόστος με αναγωγή στον αρχικό χρόνο  $C_{tot}$ :

$$LCOE = \frac{E_{tot}}{C_{tot}} \quad (2.18)$$

## 2.8) ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ SHADING

Σε φωτοβολταϊκά πάρκα που χρησιμοποιούν τράκερ πολλές φορές είτε λόγω λανθασμένης σχεδίασης είτε οικονομικής βελτιστοποίησης του πάρκου εμποδίζουν την βέλτιστη λειτουργία του κάθε πάνελ αφού καθώς περιστρέφονται σκιάζουν μερικώς τα άλλα πάνελ. Αυτό συμβαίνει γιατί πολλές φορές το κόστος της γης αλλά και της εγκατάστασης είναι πιο σημαντικό από το κόστος των πάνελ και τοποθετούνται περισσότερα πάνελ τα οποία προσφέρουν βέλτιστη ισχύ αλλά όχι βέλτιστη λειτουργία. Για την βελτιστοποίηση των πάνελ υπάρχει ένα σύστημα που λέγεται shading algorithm ο οποίος περιστρέφει τα πάνελ έτσι ώστε να μην σκιάζει τα άλλα πάνελ. Αυτό αν και μεταβάλλει την κλίση του επιπέδου η οποία δεν έχει τη θεωρητική βέλτιστη για κάθε πάνελ αποτρέπει την σκίαση των υπόλοιπων πάνελ οπότε αυξάνει την παραγόμενη ενέργεια.

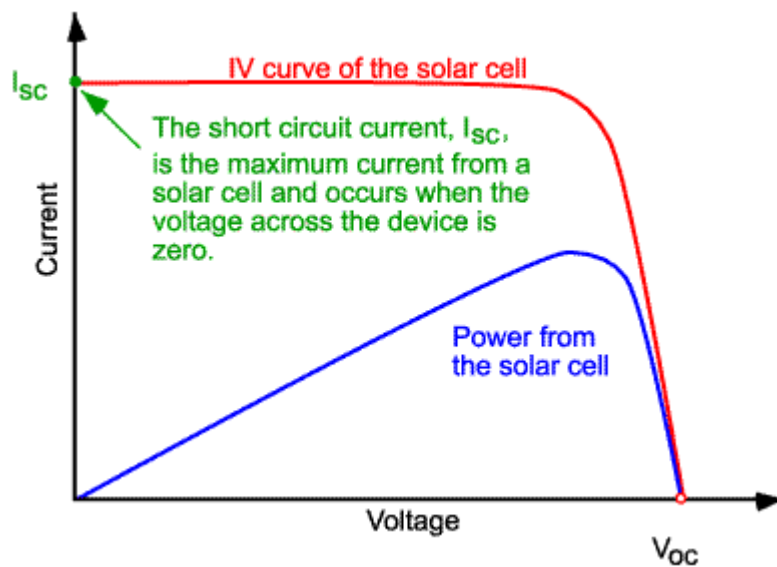
## 2.9) I-V CURVE

Κατά την λειτουργία τους τα πάνελ παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο εκφράζεται από μία τάση  $V$  και μία ένταση ρεύματος  $I$ . Η συσχέτιση αυτών των 2 μεγεθών γίνεται με ένα διάγραμμα το οποίο είναι γνωστό ως I-V curve. Το I-V curve είναι σημαντικό σε κάθε πάνελ προκειμένου να τοποθετηθούν τα κατάλληλα καλώδια και να κατασκευαστούν ορθά οι υποδομές υποδοχής της τάσης. Το I-V curve στα φωτοβολταϊκά περιγράφεται από αυτήν την εξίσωση:

Όπου ο όρος  $-1$  αγνοείται αφού γενικά  $e^{\frac{qV}{nkT}} \gg 1$  σε τάσεις ανώτερες των 100mV ενώ σε μικρότερες τάσεις  $I_L \gg I_0$  οπότε και πάλι ο όρος  $-1$  δεν επηρεάζει το  $I$

Όπου  $I_L$  η ένταση που θα δημιουργούνταν από την ακτινοβολία σε ιδανικές συνθήκες και  $I_0$  ή  $I_{dark}$  η ένταση η οποία δημιουργείται σε έναν ημιαγωγό σε αντίθετη φορά από την κανονική.

Η εξίσωση αυτή καθορίζει και την μέγιστη ισχύ ενός πάνελ στο σημείο όπου το γινόμενο  $IV$  θα έχει την μέγιστη τιμή του. Μία ενδεικτική απεικόνιση του διαγράμματος  $IV$  και της ισχύς που προκύπτει από αυτό παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 11 IV curve

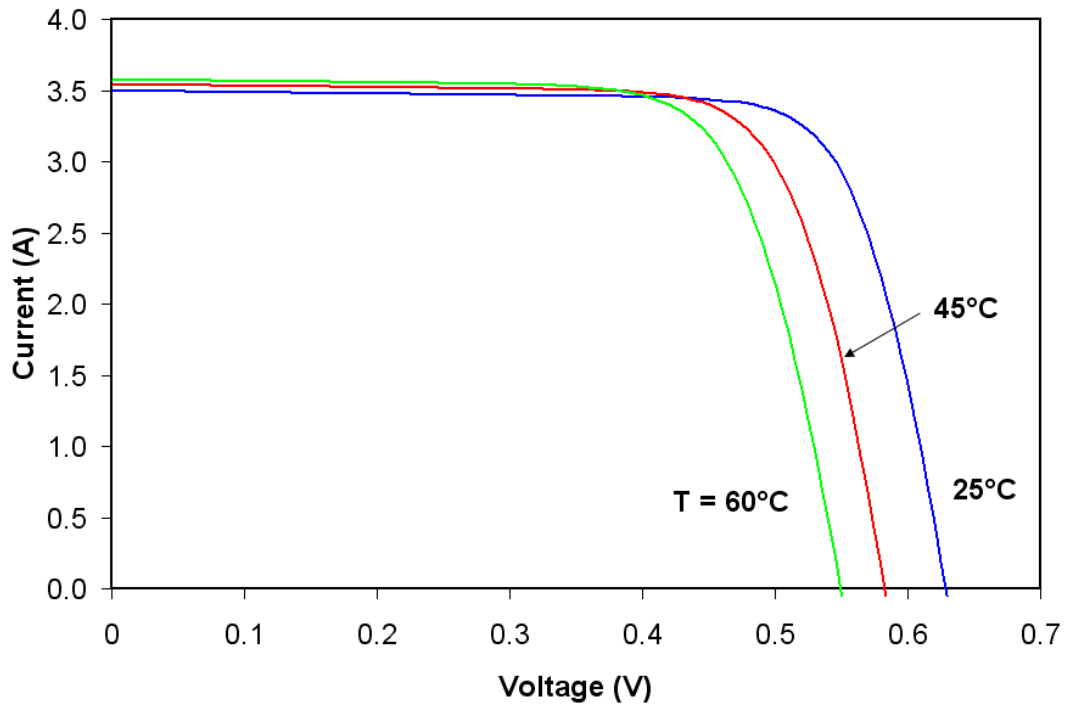
## 2.10)Θερμοκρασία πάνελ

Όπως αναφέραμε τα ηλιακά κελιά αποτελούν έναν ημιαγωγό. Οι ημιαγωγοί επηρεάζονται σημαντικά από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος αφού ραγδαία αύξησή της μπορεί να επηρεάσει το εύρος της ενεργειακής στοίβας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δεσμεύεται λιγότερη ενέργεια από τα ηλεκτρόνια και να μειώνεται η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό. Επιπλέον, η αυξημένη θερμοκρασία αυξάνει τη φορά ενός φωτοβολταϊκού μειώνονται σημαντικά τον χρόνο ζωής του. Η μείωση αυτή της ενέργειας εξαρτάται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο καθώς μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ο συντελεστής θερμοκρασίας. Αυτό το μέγεθος προσδιορίζει το ποσοστό της ισχύος που χάνεται για κάθε  $10^{\circ}\text{C}$  που αυξάνεται από τις συνθήκες δοκιμής (δηλαδή  $20^{\circ}\text{C}$ ).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές θερμοκρασίας στα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Είδος φωτοβολταϊκού στοιχείου	Temperature coefficient( $\%/^{\circ}\text{C}$ )
Μονοκρύσταλλα ή πολυκρύσταλλα	-0,45 έως -0,5
Άμορφα με λεπτά φιλμ	-0,2 έως -0,25
Υβριδικά	-0,32

Η επιρροή της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας στην καμπύλη IV απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



*Εικόνα 12 IV curve ανά θερμοκρασία*

Για την αντιμετώπιση της θερμοκρασιακής αύξησης υπάρχουν διάφορες λύσεις για την ψύξη του πάνελ έτσι ώστε να μειωθούν οι ενεργειακές απώλειες. Κάποιοι από αυτούς παρουσιάζονται παρακάτω.



### 3) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ANSYS

#### 3.1) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ MESHING

Το φωτοβολταϊκό πάνελ μοντελοποιήθηκε ως ορθογώνιες πλάκες οι οποίες έχουν όλες τις διαστάσεις τους ίδιες εκτός από το πάχος και ενώνονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ορθογώνιο. Το ορθογώνιο αυτό έχει διαστάσεις  $155 \times 155 \text{ mm}^2$  αποτελεί την συνολική μοντελοποίηση του πάνελ ενώ τα επιμέρους ορθογώνια αντιπροσωπεύουν τις στρώσεις υλικών οι οποίες αποτελούν το πάνελ. Για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση και εφόσον η μελέτη θα γίνει στην Ελλάδα το ορθογώνιο τοποθετείται σε γωνία 30 μοιρών με το αυτό που ορίζεται ως οριζόντιο επίπεδο της Γης. Για τον ορισμό της γωνίας αυτής στρέφουμε το επίπεδο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά -60 μοίρες ως προς τον άξονα x αφού το έδαφος αποτελεί την συμπληρωματική το πάνελ.

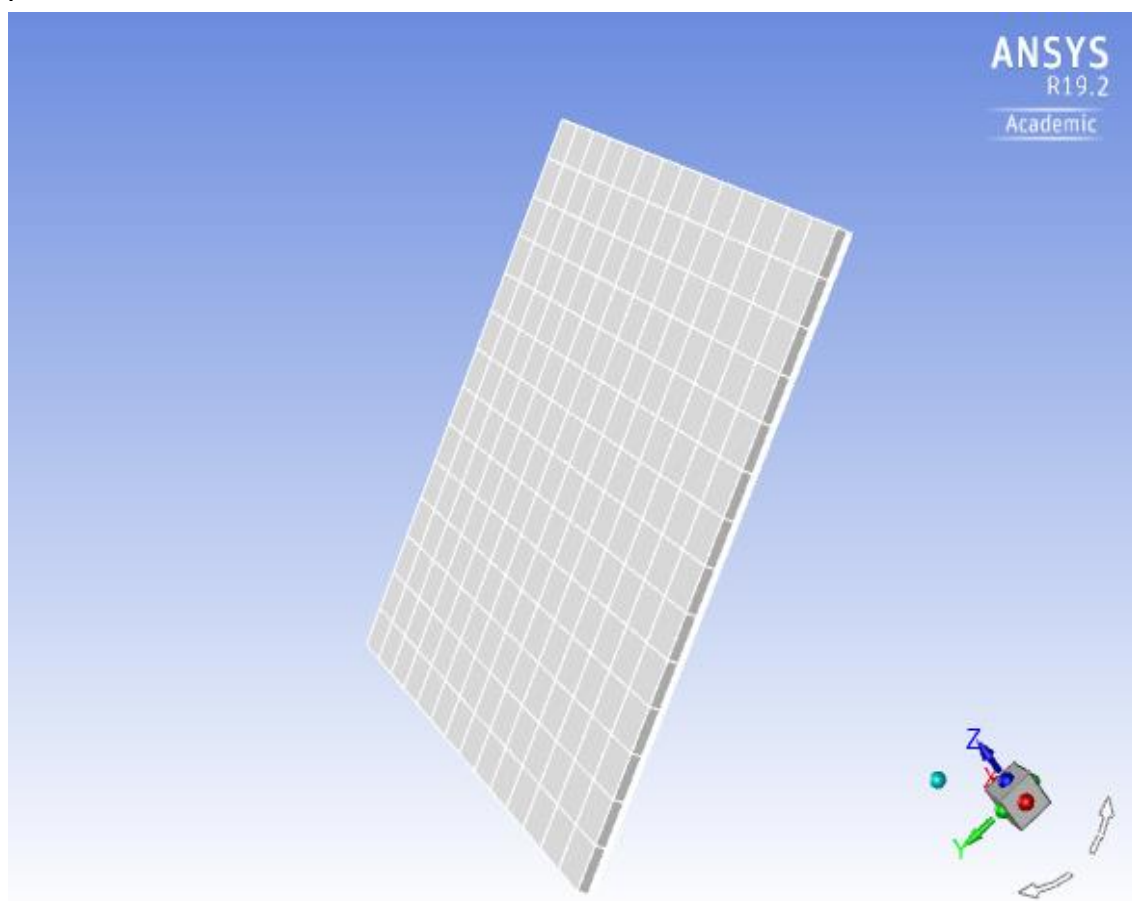
Details of Plane4	
Plane	Plane4
Sketches	1
Type	From Plane
Base Plane	XYPlane
Transform 1 (RMB)	Rotate about X
<input type="checkbox"/> FD1, Value 1	-60 °
Transform 2 (RMB)	None
Reverse Normal/Z-Axis?	No
Flip XY-Axes?	No
Export Coordinate System?	No

Εικόνα 13 Περιστροφή πάνελ Ansys

Το μεταλλικό τμήμα το οποίο στηρίζει το πάνελ καθώς και οι συγκολλήσεις μεταξύ των στρώσεων αγνοούνται αφού θεωρούνται αμελητέα για την μετάδοση της ακτινοβολίας στο εσωτερικό τους. Επιπλέον, το εσωτερικό του φωτοβολταϊκού υλικού περιέχει κάποια καλώδια στα οποία γίνεται η διοχέτευση του ρεύματος και βρίσκονται ανάμεσα στα τμήματα p,n του αγωγού τα οποία δεν τοποθετήθηκαν στο μοντέλο. Τα επιμέρους τμήματα του σώματος πρέπει να δηλωθούν στο λογισμικό ως ένα κοινό σώμα ώστε να αποφευχθεί η αυτόματη συμπλήρωση αέρα στο εσωτερικό τους. Το meshing ορίζεται με ορθογώνια κελιά έτσι ώστε κάθε επιμέρους υλικό να έχει ξεχωριστά κελιά κατά μήκος και πλάτος



του ορθογωνίου. Σε περίπτωση που δεν γίνει διαχωρισμός των υλικών δεν θα επιτραπεί η διαφοροποίηση των ιδιοτήτων τους καθώς το ίδιο κελί δεν μπορεί να έχει περισσότερες από μία ιδιότητες. Κάθε υλικό περιέχει 14\*14 κελιά με 14 στήλες κατά την άξονα χχ' 14 στήλες κατά τον άξονα yy' ενώ για το πάχος υπάρχει μόνο μία στήλη.



Εικόνα 14 Γεωμετρία πάνελ Ansys

#### Πίνακας ιδιοτήτων υλικών

ΟΝΟΜΑ ΥΛΙΚΟΥ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ $\frac{kg}{m^3}$	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ $\frac{W}{m \cdot K}$	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ $\frac{J}{kg \cdot K}$	ΠΑΧΟΣ (mm)
ΓΥΑΛΙ ΙΤΟ	2450	2	500	3
EVA	950	0.311	2090	0.5
SILICON	2330	130	677	0.3
TEDLAR	1200	0.15	1250	0.5

### 3.2) ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Για την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται το solar calculator το οποίο είναι ένα εργαλείο του Ansys fluent το οποίο μοντελοποιεί την κίνηση του ηλίου κατά την διάρκεια της ημέρας. Για τη χρήση του solar calculator πρέπει να ορισθεί το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος της εξεταζόμενης περιοχής ώστε να καθορισθεί το ύψος του ήλιου από τον ορίζοντα. Επιπλέον, πρέπει να ορίσουμε την χρονική στιγμή την οποία γίνεται ο υπολογισμός καθώς και την κατεύθυνση του εδάφους δηλαδή την θέση του ηλίου σε σχέση με τις συντεταγμένες x,y,z. Σε μία transient μελέτη όπου ο χρόνος μεταβάλλεται αυτόματα και η ώρα στο solar calculator ανάλογα με το χρονικό βήμα μεταβάλλοντας την θέση του ηλίου. Το solar calculator δίνει τιμές σε direct και diffuse irradiation και προσδιορίζει την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από τον μήνα, την μέρα και την τοποθεσία (γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος)

Solar Calculator

Global Position

Longitude (deg) 23.71

Latitude (deg) 37.97

Timezone (+GMT) 2

Mesh Orientation

North		East	
X	0	X	1
Y	0	Y	0
Z	-1	Z	0

Starting Date and Time

Day of Year

Day 21

Month 6

Time of Day

Hour 0

Minute 0

Solar Irradiation Method

Theoretical Maximum

Fair Weather Conditions

Options

Sunshine Factor 1

Apply Close Help

Εικόνα 15 Solar calculator Ansys

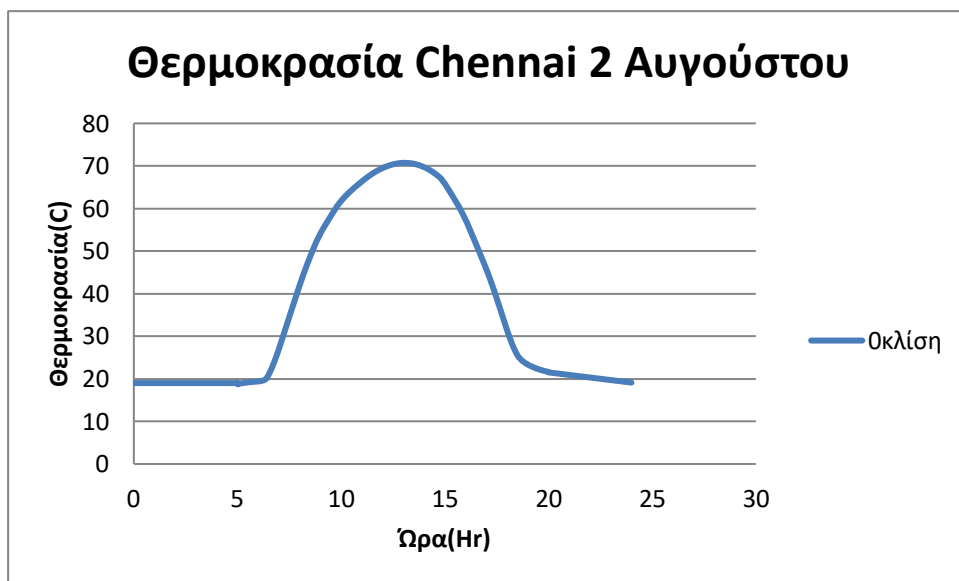
Για τον ορισμό της ακτινοβολίας στο fluent απαιτείται επίσης ο καθορισμός της μορφής και διάστασης της ακτινοβολίας αλλά και η μέθοδος με την οποία μεταφέρει ενέργεια

Για την μοντελοποίηση της ακτινοβολίας το fluent διαθέτει 5 μοντέλα προσομοίωσης της ακτινοβολίας (DTRM discrete Transfer Radiation Model,P-1 Radiation,Roseland Radiation,Surface To Surface,DO radiation (Discrete Ordinates)).Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα χρήσης του DO model και του solar ray racing για την μοντελοποίηση της μεθόδου μετάδοσης της ενέργειας από την ακτινοβολίας τα οποία είναι συμβατά με το solar calculator.

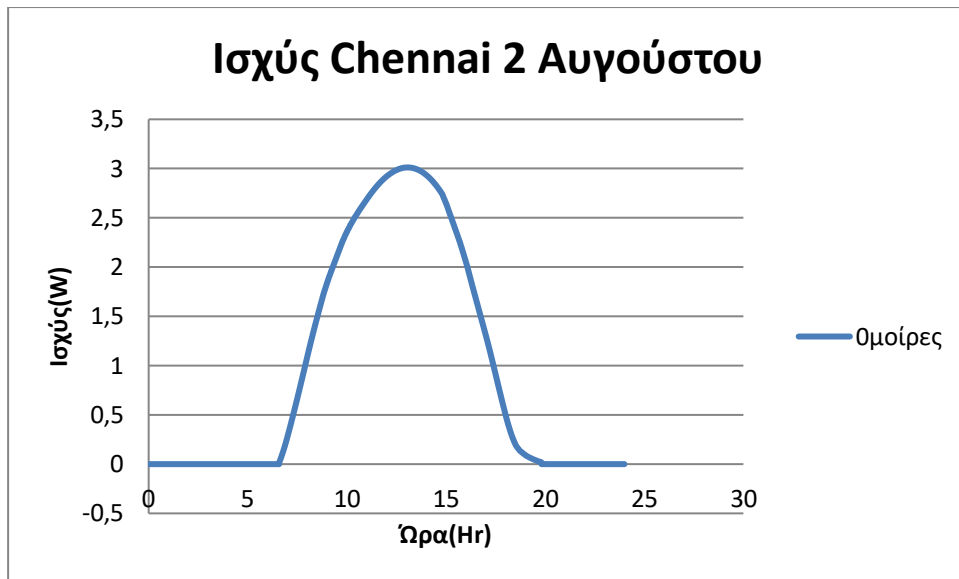
Με την μέθοδο του solar ray racing περιγράφονται οι ιδιότητες των υλικών από τα τοιχώματα του υλικού με πειραματικές μεθόδους ως προς το πάχος του για την ανακλαστικότητα και την απορροφητικότητά του. Η μέθοδος αυτή μπορεί να λειτουργήσει με οποιαδήποτε από τα παραπάνω μοντέλα αλλά το solar calculator λειτουργεί μόνο στην DO και την DTRM για στερεά σώματα. Με αυτόν την χρήση του DTRM όμως δεν περιγράφονται επαρκώς οι ιδιότητες των υλικών καθώς δεν έχει δημιουργηθεί για την περιγραφή στερεών σωμάτων.

### 3.3) Διαπίστεψη

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζουν την προβλεπόμενη μορφή και οι τιμές τους τείνουν στα λογικά όρια δεν μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης μέχρι να διαπιστωθεί η εγκυρότητά τους. Για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει να γίνει σύγκρισή τους με πειραματικά μεγέθη. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από KC G COLLEGE of technology στο Chennai της Ινδίας με το ίδιο πάνελ. Το διάγραμμα θερμοκρασίας αλλά και της ισχύς που προέκυψε από το Ansys για τις 2 Αυγούστου στο Chennai φαίνεται παρακάτω.

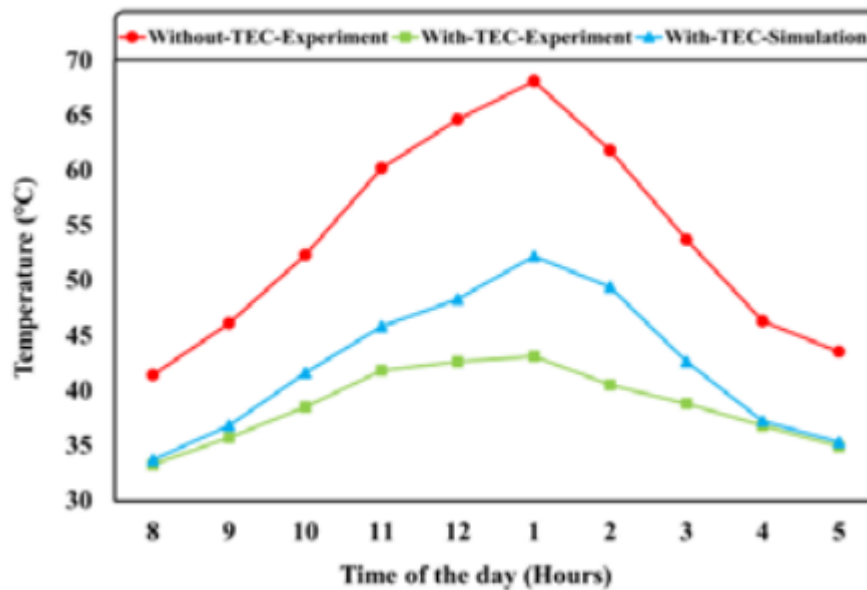


Εικόνα 16 Θερμοκρασία Chennai 2 Αυγούστου



Εικόνα 17 Ισχύς Chennai 2 Αυγούστου

Μετρήσεις από πάνελ με ίδια μεγέθη και χαρακτηριστικά ως προς την θερμοκρασία στο Chennai παρουσιάζονται:



Εικόνα 18 Πειραματικές μετρήσεις Chennai

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται μετρήσεις για ένα πάνελ χωρίς ψύξη και ένα πάνελ με ψύξη. Εμείς θα χρησιμοποιήσαμε τις μετρήσεις για ένα πάνελ χωρίς ψύξη (κόκκινη καμπύλη) αφού σαν αρχική προσέγγιση δεν χρησιμοποιήσαμε κάποια τεχνολογία ψύξης. Έτσι συγκρίνουμε τα αποτελέσματα ε την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι η προσομοίωση και τα αποτελέσματά της είναι ρεαλιστικά

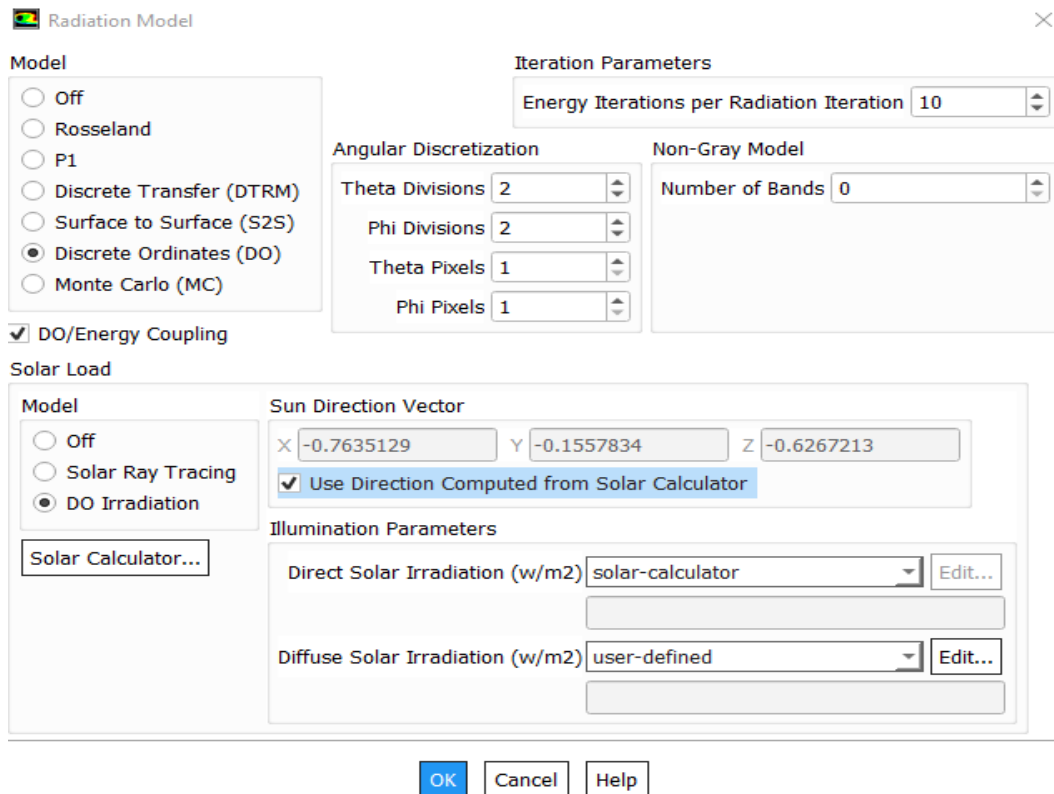
$$RMSE_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m d_i^2}{m}} = 3,667 \quad (3.1)$$

$$RMSE_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{d_i}{Y_i}\right)^2}{m}} = 0,082368 \quad (3.2)$$

$$R - Squared = \left( \frac{m \sum_{i=1}^m X_i Y_i - \sum_{i=1}^m X_i \sum_{i=1}^m Y_i}{(m \sum_{i=1}^m X_i^2 - (\sum_{i=1}^m X_i)^2)(m \sum_{i=1}^m Y_i^2 - (\sum_{i=1}^m Y_i)^2)} \right)^2 = 0,8765 \quad (3.3)$$

### 3.4) DO RADIATION ΣΤΟ ANSYS

Με την χρήση του Do model με energy coupling για την μοντελοποίηση των ακτινών αλλά και των μεθόδων μοντελοποίησης στις ακτινοβολίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες του υλικού στο σώμα για την ακτινοβολία χωρίς απλοποιήσεις. Η ακτινοβολία εισέρχεται στο σώμα και ανάλογα με τις ιδιότητές του ανακλάται, διασκορπίζεται ή απορροφάται από αυτό. Πρέπει να σημειωθεί ότι μαζί με την ακτινοβολία μετράτε και η ακτινοβολία που εκπέμπει το σώμα λόγω της θερμοκρασίας του το οποίο πρέπει να αφαιρεθεί στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Επίσης, αν και το μοντέλο δέχεται την χρήση μη γκρίζας ακτινοβολίας η οποία θα διευκόλυνε τους υπολογισμούς και θα πρόσθετε ακρίβεια στους συντελεστές απορρόφησης, διασκορπισμού και ανάκλασης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς η ακτινοβολία λόγω θερμοκρασίας μεταβιβάζεται αυτόματα στην πρώτη κλάση και δεν επιτρέπει την χρήση του solar calculator. Παρόλαυτα, το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε στην παρακάτω μελέτη καθώς τα μειονεκτήματα του κρίθηκαν ότι μπορούν να επιλυθούν παραμετρικά.



Εικόνα 19 Μοντέλο περιγραφής της ακτινοβολίας Ansys

Το DO radiation που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να υπολογίσει την εξίσωση μετάδοσης της ακτινοβολίας:

$$\nabla \cdot \left( I \left( \vec{r}, \vec{s} \right) \vec{s} \right) + (a + \sigma_s) I \left( \vec{r}, \vec{s} \right) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I \left( \vec{r}, \vec{s}' \right) \Phi \left( \vec{s} \cdot \vec{s}' \right) d\Omega' \quad (3.4)$$

Όπου  $\vec{s}$  η κατεύθυνση της ακτινοβολίας,  $\vec{r}$  το διάνυσμα θέσης,  $I$  η έντασή της  $T$  η θερμοκρασία σε K,  $n$  το refractive index,  $a$  absorption coefficient και  $\Phi$  η εξίσωση φάσης.

Η εξίσωση ενέργειας ολοκληρωμένη σε έναν χώρο  $i$  (κελί) που χρησιμοποιείται είναι η παρακάτω:

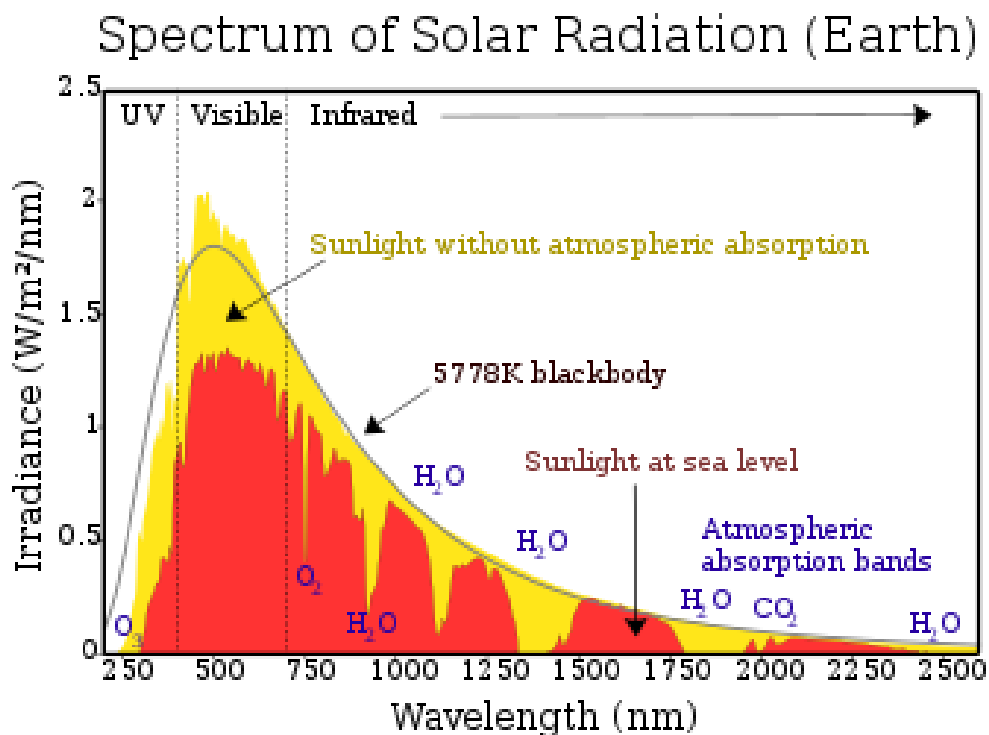
$$\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^T Y_j - \beta_i^T T_i - a_i^T \sum_{k=1}^L I_i^k \omega_k - S_i^T S_i^h \quad (3.5)$$

Όπου:  $a_i^T = \kappa \Delta V_i$ ,  $\beta_i^T = 16\kappa\sigma T_i^3 \Delta V_i$ , με  $\kappa$  absorption coefficient και  $\Delta V_i$  ο όγκος που ελέγχεται,  $S_i$  οι πηγές και  $\mu$  ο συντελεστής διακριτοποίησης

Το solar calculator υπολογίζει τις direct και diffuse irradianations με τις σχέσεις Ashrae (2001 Fundamental Handbook) που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

### 3.5) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΟ ΑΝΣΥΣ

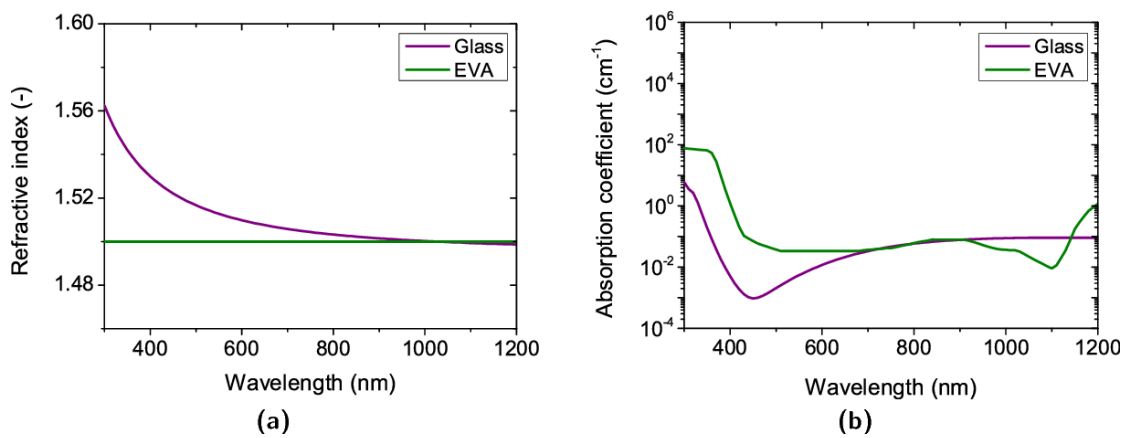
Για τον προσδιορισμό των υλικών τοποθετούμε στην καρτέλα materials όλα τα ονόματα των υλικών και τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν. Το DO model όπως αναφέρθηκε δεν μπορεί να προσφέρει αξιόπιστη μοντελοποίηση της γκρι ακτινοβολίας. Επομένως οι τιμές που ορίζουν την απορροφητικότητα την ανακλαστικότητα και την διάχυση θα πρέπει να περιγράφουν προσεγγίστεκα. Για τον υπολογισμό αυτών των τιμών χρησιμοποιούμε τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία είναι και η ακτινοβολία που θερμαίνει το πάνελ. Έτσι μοντελοποιείται η κάθε ιδιότητα του υλικού σε κλάσεις ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για κάθε μία από αυτές τις κλάσεις υπολογίζεται το ποσοστό της ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας για τα μήκη κύματος της κλάσης η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 20 Κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης



Πολλαπλασιάζοντας το ποσοστό κάθε κλάσης με τον συντελεστή απορροφητικότητας της κλάσης και αθροίζοντας τα αποτελέσματα υπολογίζεται ο προσεγγιστικός συντελεστής απορροφητικότητας του κάθε υλικού για την ηλιακή ακτινοβολία. Οι σημαντικότερες διαφορές παρουσιάζονται στον συντελεστή απορροφητικότητας της σιλκόνης αλλά και στους συντελεστές διακύμανσης και διασκορπισμού υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση και στα άλλα υλικά. Οπότε, με αντίστοιχο τρόπο διαίρεσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα και των διαγραμμάτων των αντίστοιχων υλικών υπολογίζονται και οι υπόλοιπες ιδιότητες στα υλικά



Εικόνα 21 absorption coefficient and refractive index for glass and eva

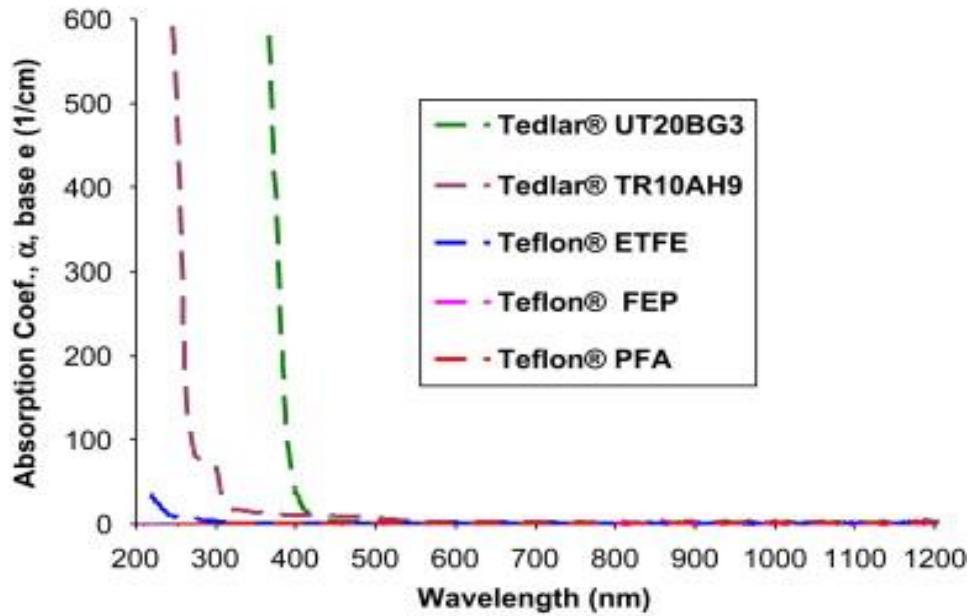
glass

WAVELENGTH (nm)	% SOLAR IRRADIANCE	ABSORPTION COEFFICIENT (m-1)	REFRACTIVE INDEX
200-250	13,13485	7,5	2,5
250-300	14,5359	80	2,9
300-400	12,60946	26,25	3,1
400-1200	17,8634	51,25	0,1
TOTAL	-	84,45	1,5

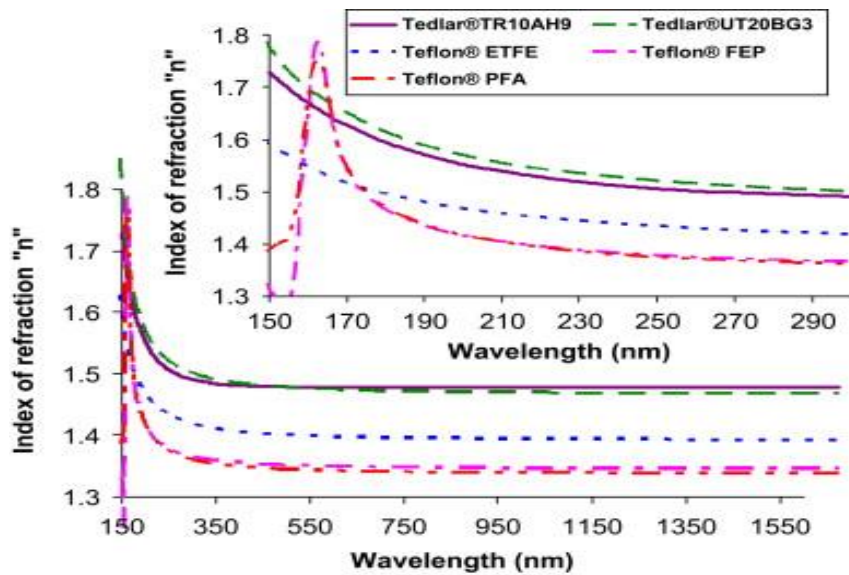
eva

WAVELENGTH (nm)	% SOLAR IRRADIANCE	ABSORPTION COEFFICIENT (m-1)	REFRACTIVE INDEX
200-250	13,13485	7,5	2,5

250-300	14,5359	80	2,9
300-400	12,60946	26,25	3,1
400-1200	17,8634	51,25	0,1
TOTAL	-	84,45	1,5

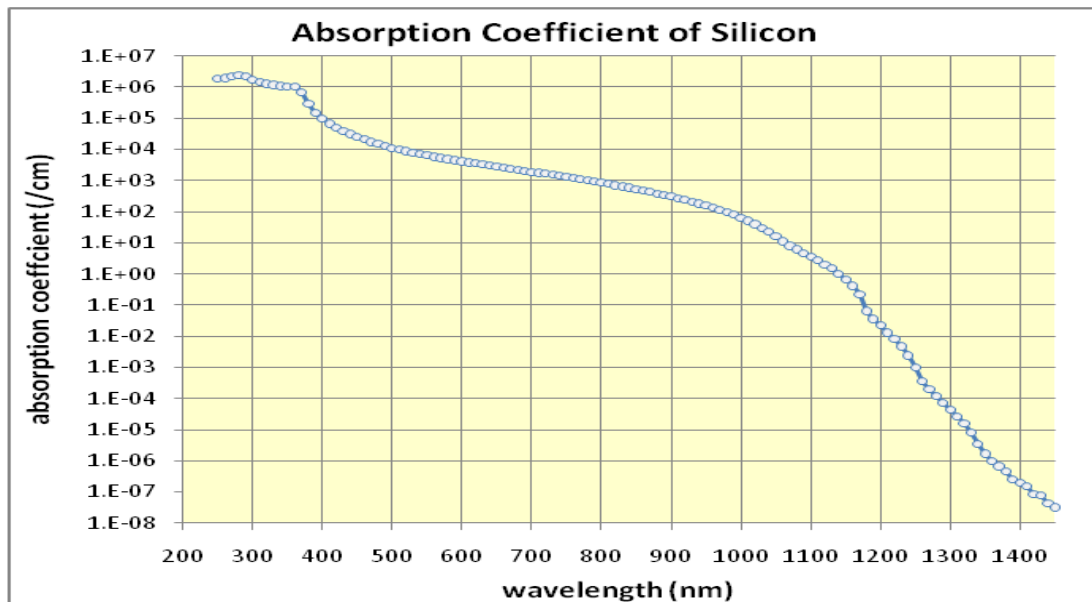


Εικόνα 22 absorption coefficient tedlar

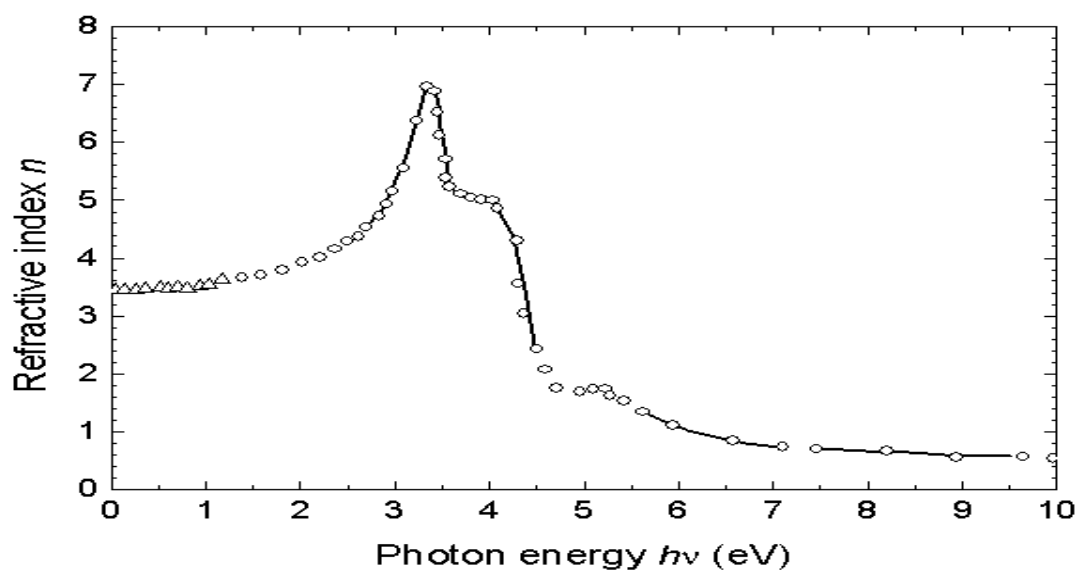


Εικόνα 23 refractive index tedlar

WAVELENGTH (nm)	% SOLAR IRRADIANCE	ABSORPTION COEFFICIENT (m-1)	REFRACTIVE INDEX
200-250	13,13485	7,5	2,5
250-300	14,5359	80	2,9
300-400	12,60946	26,25	3,1
400-1200	17,8634	51,25	0,1
TOTAL	-	84,45	1,5



Εικόνα 24 Absorption coefficient silicon



Εικόνα 25 Refractive index silicon

(ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΙΛΙΚΟΝΗΣ)

WAVELENGTH (nm)	% SOLAR IRRADIANCE	ABSORPTION COEFFICIENT (m <sup>-1</sup> )	REFRACTIVE INDEX
300-400	13,13485	50000000	1,57
400-500	14,5359	5000000	1,53
500-600	12,60946	800000	1,52
600-800	17,8634	200000	1,51
800-1000	10,15762	50000	1,51
1000-1200	7,355517	100	1,51
TOTAL	-	7435909	1,52

Οι υπόλοιπες ιδιότητες των υλικών δεν επηρεάζονται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και συμπληρώνονται άμεσα και χωρίς επεξεργασία στο πρόγραμμα.

Create/Edit Materials ×

Name:  Material Type:

Chemical Formula:  Fluent Solid Materials:

Mixture:

Order Materials by:  Name  Chemical Formula

Properties

Density (kg/m <sup>3</sup> )	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="2330"/>	
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="677"/>	
Thermal Conductivity (w/m-k)	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="130"/>	
Absorption Coefficient (1/m)	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="7435909"/>	
Scattering Coefficient (1/m)	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="0"/>	
Scattering Phase Function	<input type="text" value="isotropic"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text"/>	
Refractive Index	<input type="text" value="constant"/>	<input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="1.52"/>	

Εικόνα 26 Materials panel

### 3.6) ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Για τις οριακές συνθήκες το fluent χρησιμοποιεί τις εξωτερικές επιφάνειες των σωμάτων σαν τοίχους. Σε κάθε έναν από αυτούς πρέπει να τοποθετήσουμε το αντίστοιχο υλικό το οποίο προηγουμένως ορίσαμε. Στην επιφάνεια που ορίζουμε ως μπροστινή δηλαδή την επιφάνεια του γυαλιού που είναι στραμμένη ως προς τον ήλιο πρέπει να τοποθετήσουμε την ακτινοβολία. Η κατεύθυνση και το μέτρο της ακτινοβολίας προσδιορίζεται από το solar calculator ανάλογα με την γωνία που σχηματίζει με τον ήλιο κατά την διάρκεια της μέρας τόσο η ένταση όσο και η κατεύθυνση της ακτινοβολίας μεταβάλλονται μέχρι να μηδενιστεί η ένταση της ακτινοβολίας το οποίο σημαίνει ότι η ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος δεν φτάνει στην επιφάνεια απορρόφησης δηλαδή είναι πλέον νύχτα. Σε περίπτωση διαφορετικής γωνίας πρόσπτωσης ο ήλιος είναι σε τέτοια κατεύθυνση που οι ακτίνες του δεν ακτινοβολούν στην επιφάνεια.

Wall

Zone Name  
front

Adjacent Cell Zone  
part\_2-glass

Momentum Thermal **Radiation** Species DPM Multiphase UDS Wall Film Potential

BC Type  
semi-transparent

Direct Irradiation  
(w/m2) 0 constant

Apply Direct Irradiation Parallel to the Beam

Beam Width  
Theta (deg) 0.53 P  
Phi (deg) 0.53 P

Diffuse Irradiation  
(w/m2) 200 constant

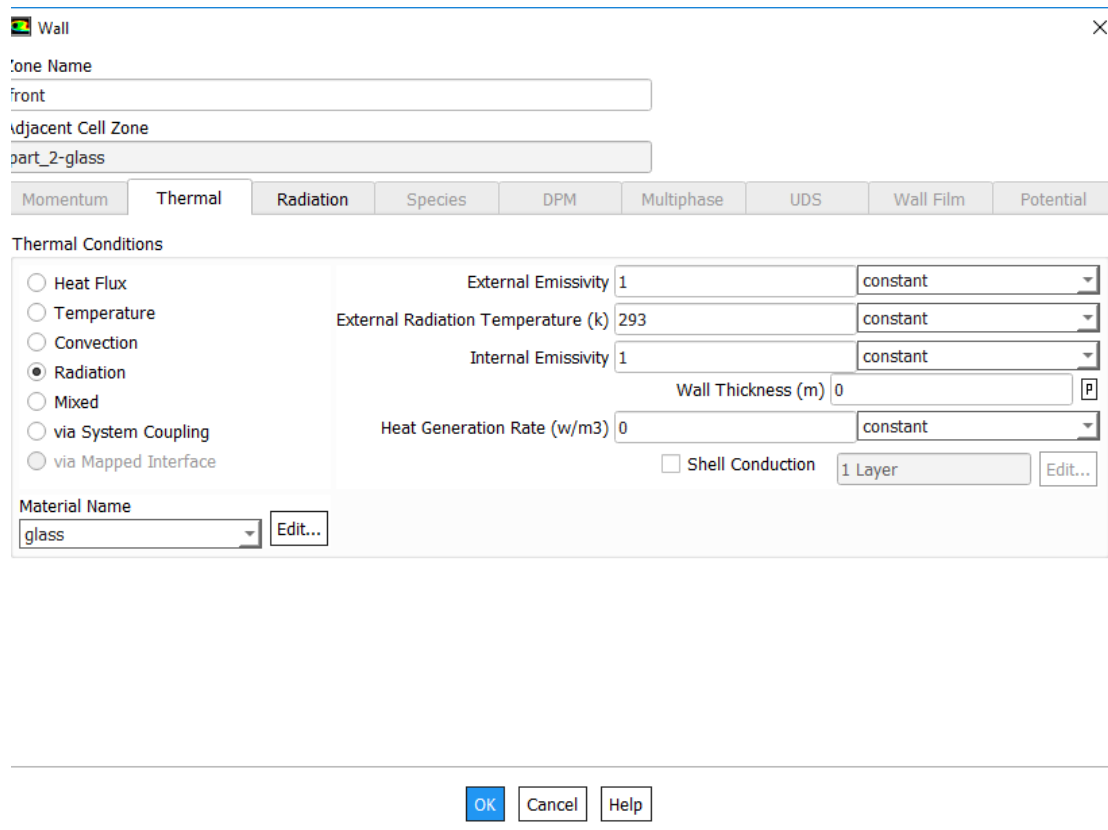
Beam Direction  
X 0.7635 constant  
Y 0.1558 constant  
Z 0.6267 constant

Diffuse Fraction  
1 P

Solar BC Options  
 Use Beam Direction from Solar Load Model Settings  
 Use Direct and Diffuse Irradiation from Solar Load Model Settings

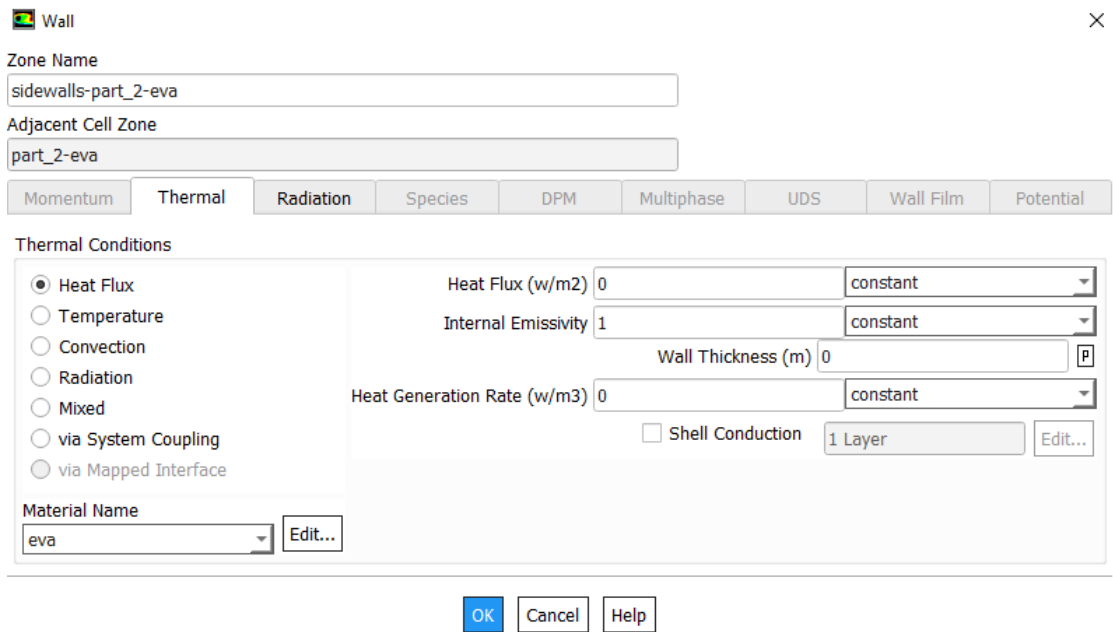
OK Cancel Help

Εικόνα 27 Οριακές συνθήκες ακτινοβολίας Ansys



Εικόνα 28 Οριακές θερμικές συνθήκες

Στις πλάγιες επιφάνειες όλων των υλικών η ακτινοβολία αγνοείται αφού στα σημεία αυτά τοποθετείται μεταλλικός σύνδεσμος ο οποίος συγκρατεί το πάνελ και καλύπτει τα υλικά. Στις εσωτερικές επιφάνειες μεταξύ των υλικών χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες coupling του fluent οι οποίες ορίζουν την επαφή των υλικών και την μεταφορά ενέργειας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η ακτινοβολία μεταφέρεται μέσω των υλικών και όχι του άμεσου radiation αφού τα υλικά σκιάζονται.



Εικόνα 29 Θερμικές οριακές συνθήκες Eva

Τέλος, η πίσω επιφάνεια του πανελ δεν επηρεάζεται από την ακτινοβολία. Αφού λόγω της γωνίας τοποθέτησης το υλικό σκιάζεται. Σε όλες τις επιφάνειες που αναφέρθηκαν υπάρχει προσδιορίζουμε την ακτινοβολία λόγω διαφοράς θερμοκρασίας με το εξωτερικό περιβάλλον η θερμοκρασία του οποίου θεωρείται σταθερή στους 20οC. Η ακτινοβολία αυτή είναι υπεύθυνη για την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον και είναι αυτή που ψύχει το πάνελ κατά την διάρκεια της νύχτας. Ιδιαίτερη σημασία για την ακρίβεια της μελέτης έχει να οριστεί η θερμοκρασία του πάνελ όταν αρχίζει η μελέτη καθώς θεωρείται ότι αναφερόμαστε σε συνεχόμενη λειτουργία και όχι την αρχική κατά την τοποθέτηση. Η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται με την χρήση του ίδιου του προγράμματος αφού αρχικά τοποθετούμε μία αυθαίρετη θερμοκρασία την οποία μεταβάλλουμε σε κάθε επανάληψη μέχρι η αρχική συνθήκη για την θερμοκρασία στο τέλος της μέρας (12μ) να συμπίπτει με την αρχή της. Βέβαια, υπάρχει μία απόκλιση εφόσον η μέρα μεταβάλλεται αλλά θεωρείται ότι η διαφοροποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια 2 συνεχόμενων ημερών δεν επηρεάζει τις τιμές της τελικής θερμοκρασίας.



### 3.7) ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ υπολογίζεται από την ακτινοβολία η οποία απορροφάται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο στο ενεργειακό χάσμα και το ποσοστό αυτής που γίνεται θερμότητα και ενέργεια. Από πίνακες βλέπουμε ότι το 33% της ενέργειας που απορροφάται από την σιλικόνη γίνεται ηλεκτρική. Μέσω του ansys μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που απορροφάται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αναλύοντας την ακτινοβολία σε κλάσεις όπως κάνουμε παραπάνω υπολογίζουμε ότι από την ενέργεια που φτάνει σε αυτό το 53% απορροφάτε σαν ηλεκτρόνια. Άρα η το 15.6 της ακτινοβολίας που φτάνει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο γίνεται ισχύς. Για τον συνυπολογισμό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και για να αφαιρέσουμε την θερμότητα αυτή χρησιμοποιούμε ένα udf.UDF (user defined function) αποτελούν εντολές τις οποίες εισάγουμε οι ίδιοι στο Ansys μέσω προγραμματισμού ενός αρχείου σε γλώσσα C. Το αρχείο αυτό αποτελεί μία εξίσωση η οποία τοποθετείται σαν source στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Χρησιμοποιούμε την εντολή DEFINE\_SOURCE για να τοποθετήσουμε την παραγόμενη ενέργεια σαν μία πηγή. Το αποτέλεσμα έχει αρνητικό πρόσημο ή μηδέν αφού συμβολίζει την ενέργεια που αφαιρείται από το υλικό ως ηλεκτρισμός. Από την ενέργεια που φτάνει αφαιρείται το 920(KW/m<sup>2</sup>) που αποτελεί την ενέργεια που έχει το πάνελ λόγω της αρχικής θερμοκρασίας του. Η εντολή C\_DO\_IRRAD υπολογίζει την ακτινοβολία η οποία εισέρχεται στο εσωτερικό ενός κελιού (KW/m<sup>3</sup>). Για να αναχθεί σε μονάδες επιφανείας το πολλαπλασιάζουμε με την σταθερά 0.233607 η οποία προκύπτει από το μέγεθος του κελιού. Το udf που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω.

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_SOURCE(xmom_source,c,t,dS,eqn)
{
    real source;
    source = -0.156*(C_DO_IRRAD(c,t,0)*0.233607-920)/0.0003;
    if (source>=0)
    {
        source=0;
    }
    dS[eqn]=0;
    return source;
}
```

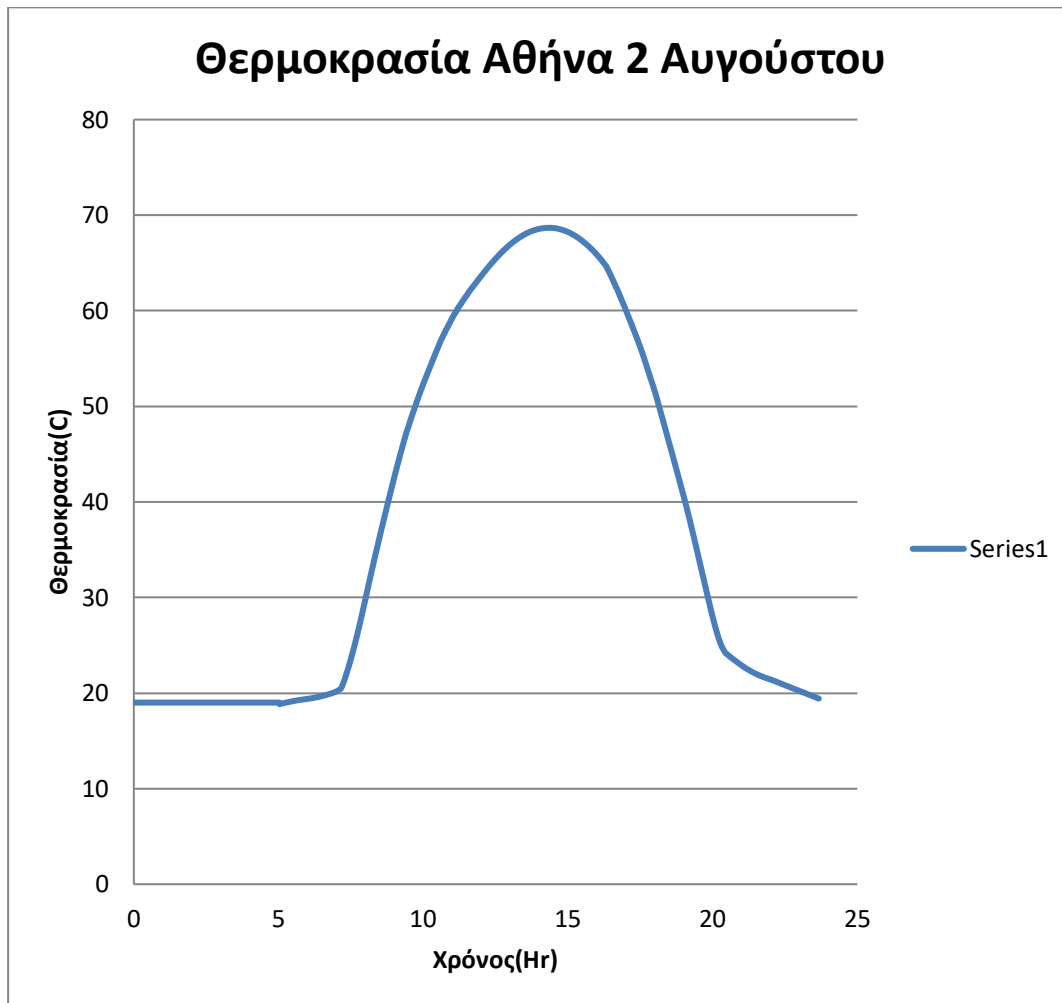


## **4) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **4.1) ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΑΝΕΛ**

Σε μία πρώτη προσέγγιση η μελέτη έγινε στις 2 Αυγούστου από την αρχή της ημέρας μέχρι το τέλος της. Για τον προσδιορισμό της αρχικής θερμοκρασίας του πάνελ στις 00:00 2 Αυγούστου γίνονται διαδοχικές εκτελέσεις του προγράμματος μέχρι η θερμοκρασία εκκίνησης να είναι ίδια με την θερμοκρασία κατά τον τερματισμό του εφόσον λειτουργεί για 24 ώρες. Κατά την διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε ότι μέχρι τις 7 προ μεσημβρίας η θερμοκρασία του πάνελ μειώνεται καθώς η ηλιακή ακτινοβολία δεν προσπίπτει στην επιφάνειά του και επηρεάζεται από την εξωτερική ατμόσφαιρα η οποία είναι πιο ψυχρή από αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη του πάνελ και την μείωση της θερμοκρασίας του στους 19,5 βαθμούς C. Στην συνέχεια, η ηλιακή ακτινοβολία αρχίζει να προσπίπτει στο πάνελ και το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας την θερμοκρασία του πάνελ. Η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται διαρκώς μέχρι τις 3 το μεσημέρι όπου μεγιστοποιείται. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν το αναμενόμενο αφού το ηλιακό μεσημέρι στην περιοχή της Αθήνας που επιλέχτηκε υπολογίζεται ότι είναι στις 3 μετά μεσημβρίας. Μετά από αυτή την χρονική στιγμή υπάρχει μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι τις 6 μετά μεσημβρίας όπου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μηδενίζεται. Στον χρόνο αυτό παρόλο που υπάρχει ακόμα ηλιακή ακτινοβολία η διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας του πάνελ. Παρατηρούμε ότι η κλίση με την οποία μεταβάλλεται η θερμοκρασία διαφοροποιείται συνεχώς δημιουργώντας μία κοίλη. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό των δύο παραγόντων που επηρεάζουν την θερμοκρασία του πάνελ. Ο πρώτος είναι η διαφορά θερμοκρασίας με την εξωτερική ατμόσφαιρα η οποία θεωρείται σταθερή καθώς το πάνελ δεν μπορεί να επηρεάσει τη τοπική θερμοκρασία. Ο δεύτερος η ακτινοβολία του ηλίου η οποία μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Επομένως, οι παράγοντες αυτοί είναι μεταβαλλόμενοι κατά την διάρκεια της ημέρας και προκαλούν την συνεχή διαφοροποίηση της κλίσης του διαγράμματος. Τέλος, από τις 6 μετά μεσημβρίας μέχρι το βράδυ ο ήλιος δεν επηρεάζει την θερμοκρασία του πάνελ το οποίο ψύχεται με ελάχιστων κλίση μέχρι τις 12 μέρα μεσημβρίας. Το φαινόμενο που

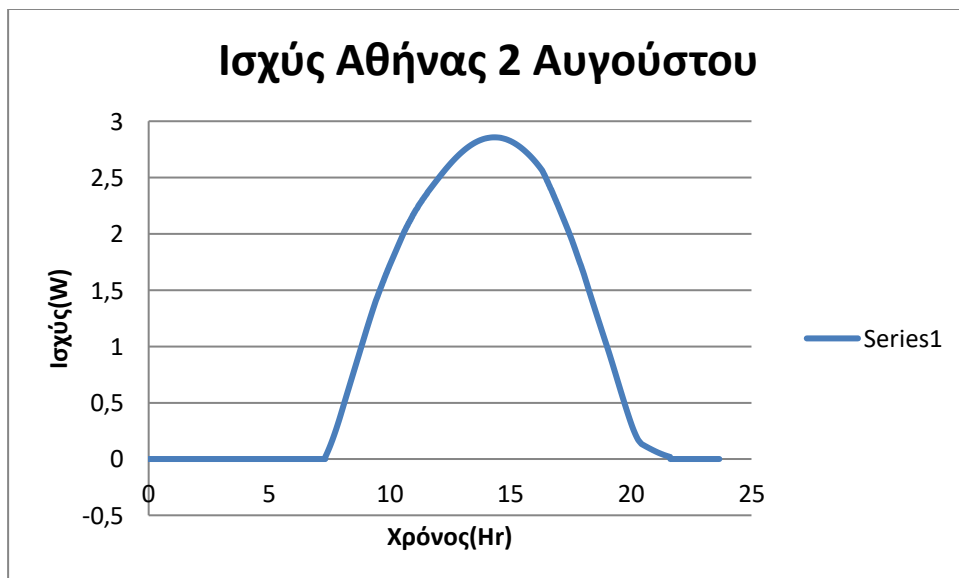
περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα και επαναλαμβάνεται σαν μορφή καθημερινά ακολουθώντας τον κύκλο του ηλίου.



Εικόνα 30 Θερμοκρασία πάνελ Αθήνας 2 Αυγούστου

## 4.2)Ισχύς Αθήνας

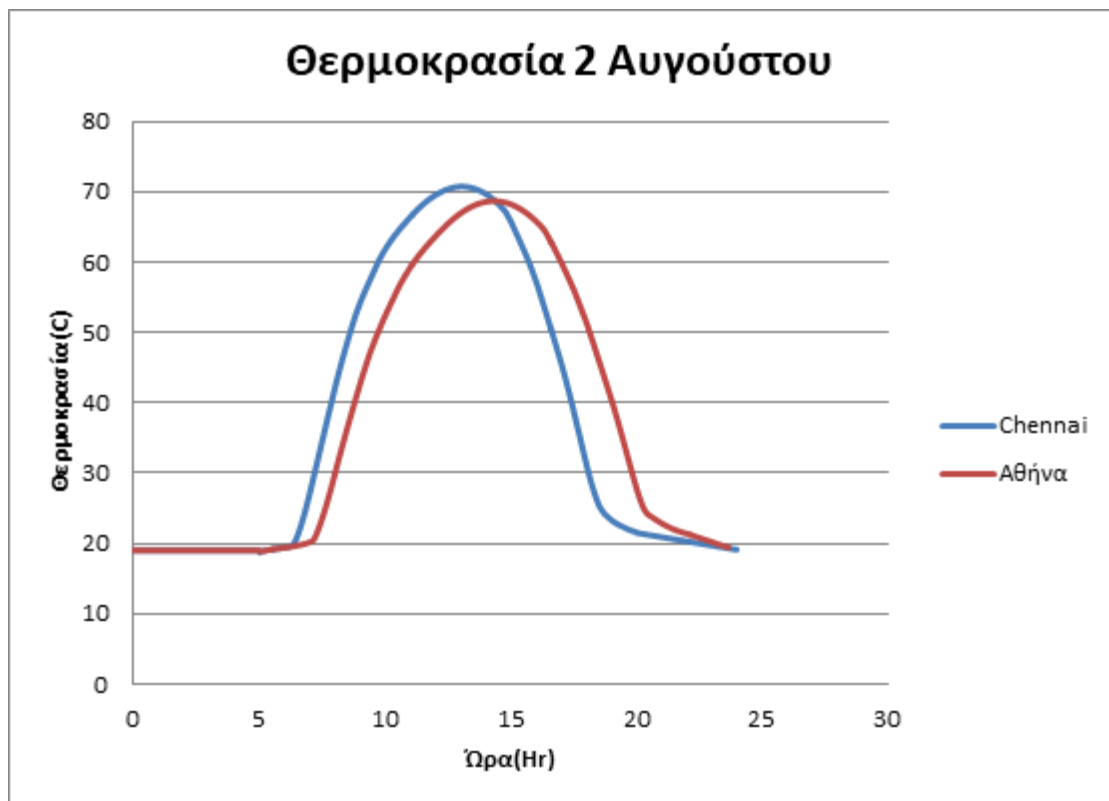
Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια της ημέρας εξαρτάται από το φορτίο ηλιακής ενέργειας που φτάνει στο πάνελ και από το υλικό του. Το πάνελ προφανώς δεν μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δεν φτάνει ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα τον μηδενισμό της ενεργειακής απόδοσής του τις ώρες αυτές. Όταν όμως φτάνει ηλιακή ενέργεια σε αυτό ένα ποσοστό αυτής μετατρέπεται σε σταθερό ηλεκτρισμό(DC) ο οποίος απομακρύνεται μέσω των καλωδίων. Από το παραπάνω διάγραμμα της θερμοκρασίας διακρίνουμε δύο σημεία στα οποία εμφανίζεται το ηλεκτρικό φορτίο και δημιουργούν μία αρχική αύξηση της θερμότητας. Αυτά τα σημεία σηματοδοτούν την εκκίνηση της ηλεκτροπαραγωγής και καθώς το Fluent υπολογίζει το αντίστοιχο flux από την αύξηση της ακτινοβολίας η οποία εμπεριέχει την θερμότητα ορίζουμε τα σημεία αυτά ως μηδενική ενέργεια. Παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ενέργεια μεγιστοποιείται περίπου στα 3 W(2,91) όπως περιέχουν οι προδιαγραφές του συγκεκριμένου πάνελ κατά το ηλιακό μεσημέρι στην Αθήνα όπου τοποθετήθηκε (3 μετά μεσημβρίας).Στην συνέχεια η ακτινοβολία μειώνεται με αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας μέχρι τον μηδενισμό της στις 6 μετά μεσημβρίας.



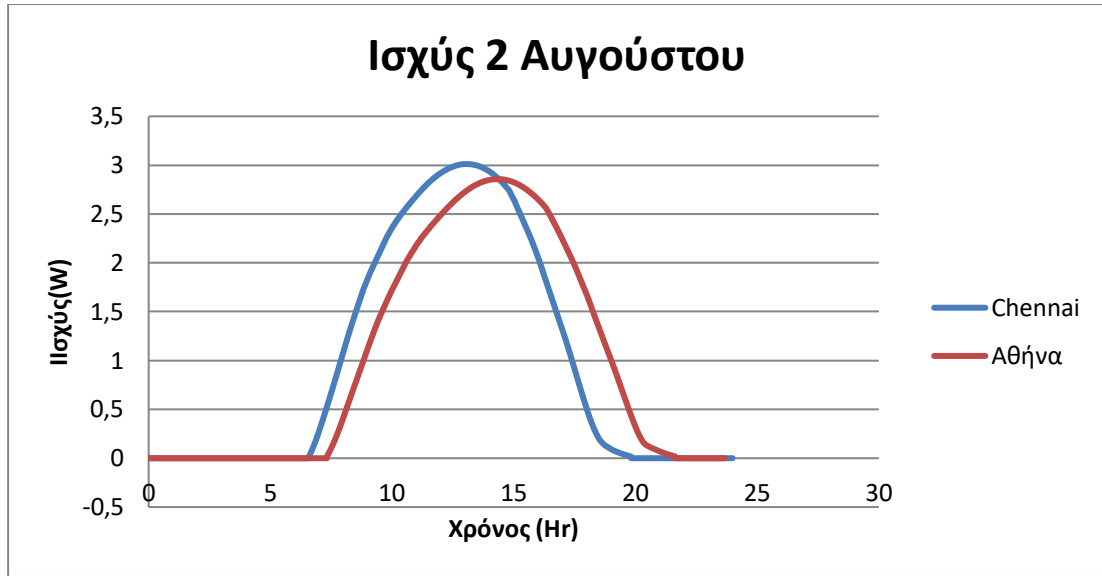
Εικόνα 31 Ισχύς πάνελ Αθήνας 2 Αυγούστου

### 4.3)Επιρροή της τοποθεσίας στο πάνελ

Η τοποθεσία στην οποία εγκαθίσταται ένα φωτοβολταϊκό πάνελ επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτροπαραγωγή αφού η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση από τον Ισημερινό. Για την ακρίβεια λόγω της σύνθετης κίνησης που υπάρχει διαφορά χρόνου από το ηλιακό μεσημέρι για την κάθε τοποθεσία με αποτέλεσμα να μετατοπίζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας και ισχύς. Επιπλέον η απόσταση ανάμεσα στο πάνελ και τον ήλιο μεταβάλλεται ελαφρώς ανάλογα με την περιοχή. Συγκεκριμένα, στο παρακάτω διάγραμμα όπου συγκρίνουμε την Αθήνα με την Chennai φαίνεται η μετατόπιση λόγω διαφοράς χρόνου ως προς το ηλιακό μεσημέρι αλλά και της συνολικής ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας με την ακτινοβολία στην Chennai να είναι διαφορετική από αυτή της Αθήνας. Πρέπει να τονίσουμε ότι η κλίση που επιλέχθηκε είναι 0 μοίρες η οποία ενδέχεται να είναι πιο ευνοϊκή για τον συγκεκριμένο μήνα και την συγκεκριμένη εποχή για κάποια από τις 2 περιοχές.



Εικόνα 32 Θερμοκρασία πάνελ Αθήνας 2 Αυγούστου

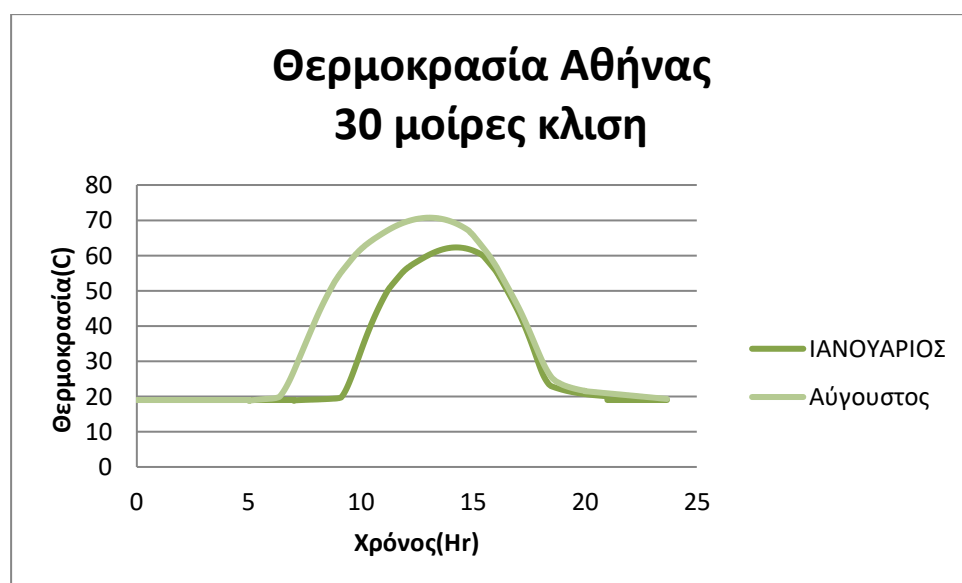


Εικόνα 33 Ισχύς πάνελ 2 Αυγούστου

## 4.4)ΕΠΙΡΡΟΗ ΕΠΟΧΗΣ ΣΤΑ ΠΑΝΕΛ

### 4.4.1)ΧΩΡΙΣ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

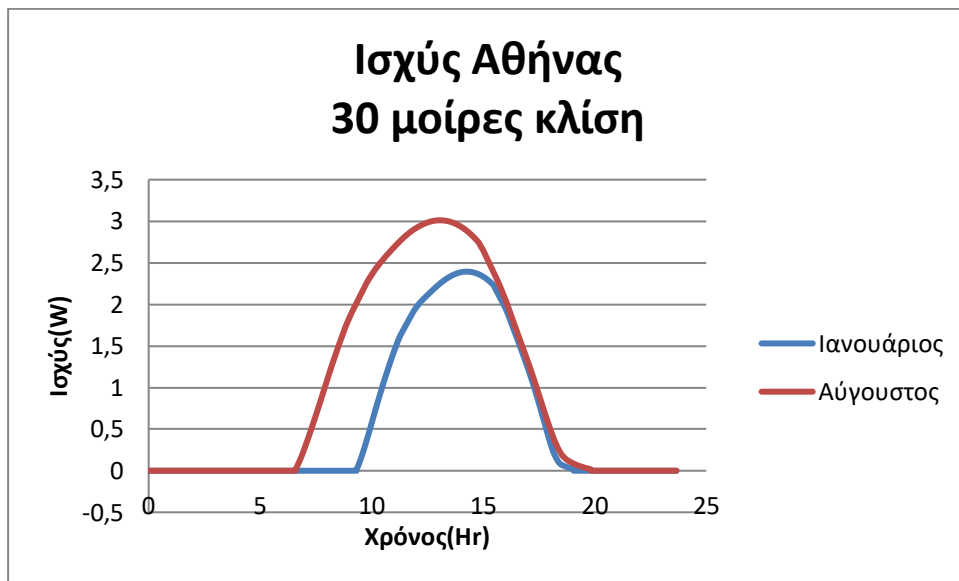
Η εποχή επηρεάζει αρκετά την ηλεκτροπαραγωγή αφού διαφοροποιεί αρκετά την ηλιακή ακτινοβολία αλλά και την διάρκειά της. Είναι γνωστό ότι το καλοκαίρι οι μέρες είναι μεγαλύτερες από ότι τον χειμώνα. Αυτό σημαίνει ότι η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην γη για μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι τον χειμώνα. Μετά από προσομοιώσεις υπολογίσαμε ότι το καλοκαίρι ο ήλιος προσπίπτει στην Γη από τις 7 προ μεσημβρία μέχρι τις 8 μετά μεσημβρίας. Αντίθετα το χειμώνα η μέρα διαρκεί από τις 9:30 το πρωί μέχρι τις 5 το απόγευμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ηλεκτροπαραγωγής αφού τα πάνελ λειτουργούν για λιγότερες ώρες.



Εικόνα 34 Θερμοκρασία πάνελ Αθήνας με 30 μοίρες κλίση χειμώνα και καλοκαίρι



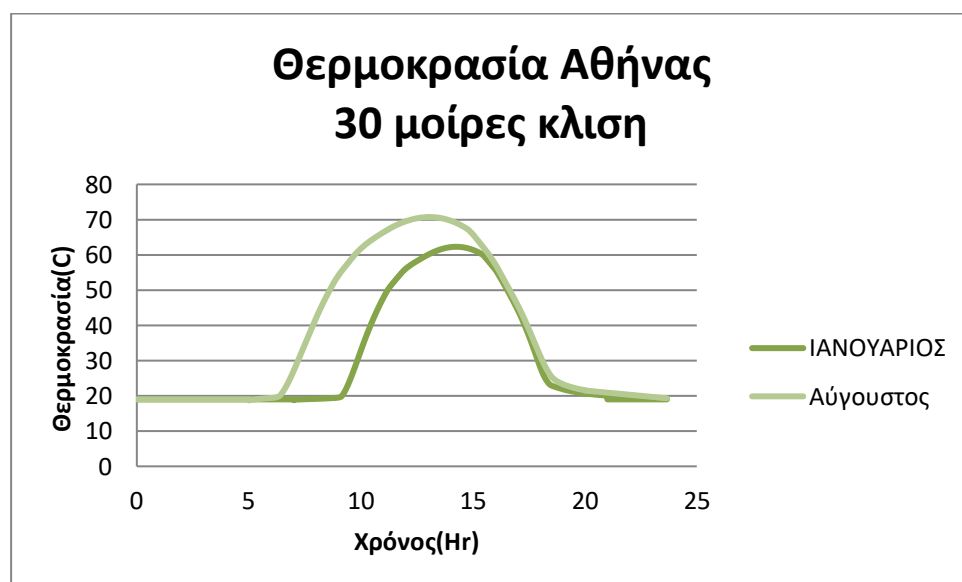
Μήνας	Ημερήσια Ενέργεια(KW)
Ιανουάριος	82
Αύγουστος	93



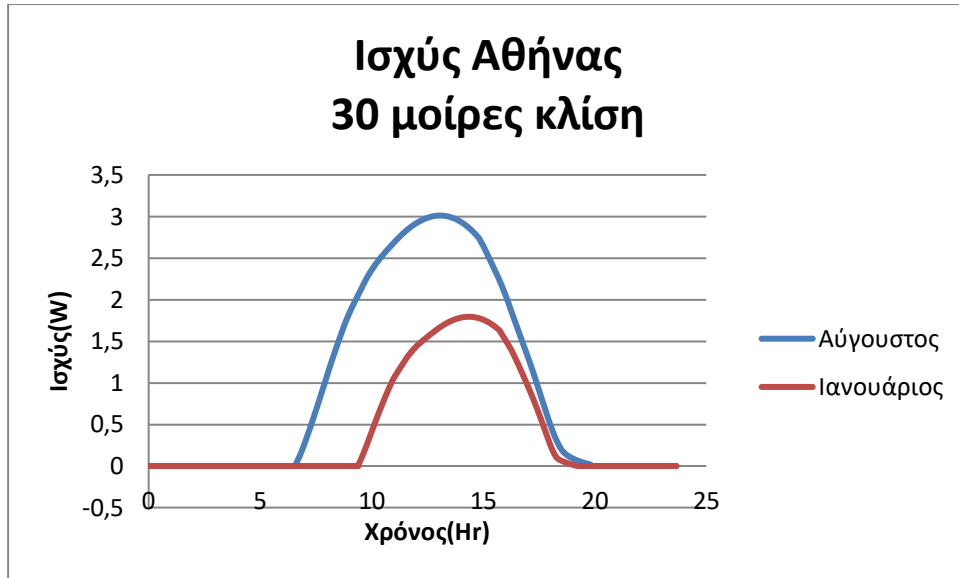
Εικόνα 35 Ισχύς πάνελ Αθήνας με 30 μοίρες κλίση χειμώνα και καλοκαίρι

#### 4.4.2) ΜΕ ΚΑΙΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Η παραπάνω σύγκριση όπως θα δούμε παρακάτω επηρεάστηκε σημαντικά από την γωνία κλίσης αφού η προτεινόμενη γωνία κλίσης για την χώρα μας είναι 30 και διαφέρει σημαντικά από την βέλτιστη γωνία για χειμώνα σε σχέση με αυτή που βελτιστοποιεί την ισχύ για το καλοκαίρι. Στην πραγματικότητα η ηλιακή ακτινοβολία τον Ιανουάριο είναι ελαφρώς υψηλότερη αφού η Γη είναι πιο κοντά στον ήλιο τον συγκεκριμένο μήνα. Επιπλέον, για όλη την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση ότι τα σύννεφα δεν επηρεάζονται από την εποχή αφού χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεταβλητή στο sunshine factor όμως είναι γνωστό ότι τον χειμώνα οι νεφώσεις είναι πιο σημαντικές από ότι το καλοκαίρι. Οι νεφώσεις επηρεάζουν άμεσα την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς αποτρέπουν τις ακτίνες του ηλίου να φτάσουν στην Γη. Χρησιμοποιώντας, μετεωρολογικά στοιχεία από την ΕΜΥ θέτουμε τον Sunshine factor 0,65. Έτσι, προκύπτουν τα παρακάτω διορθωμένα διαγράμματα για τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Αυτά αν και δεν αντικατοπτρίζουν μία συγκεκριμένη μέρα με νεφώσεις αφού οι νεφώσεις υπολογίζονται από έναν μέσο όρο του Σεπτεμβρίου αλλά προσφέρουν μία καλύτερη αναπαράσταση της επιρροής της εποχής στην ηλεκτροπαραγωγή.



Εικόνα 36 Θερμοκρασία Αθήνας για 30 μοίρες κλίση για χειμώνα και καλοκαίρι



Εικόνα 37 Ισχύς Αθήνας 30 μοίρες κλίση Χειμώνα και καλοκαίρι με νεφώσεις

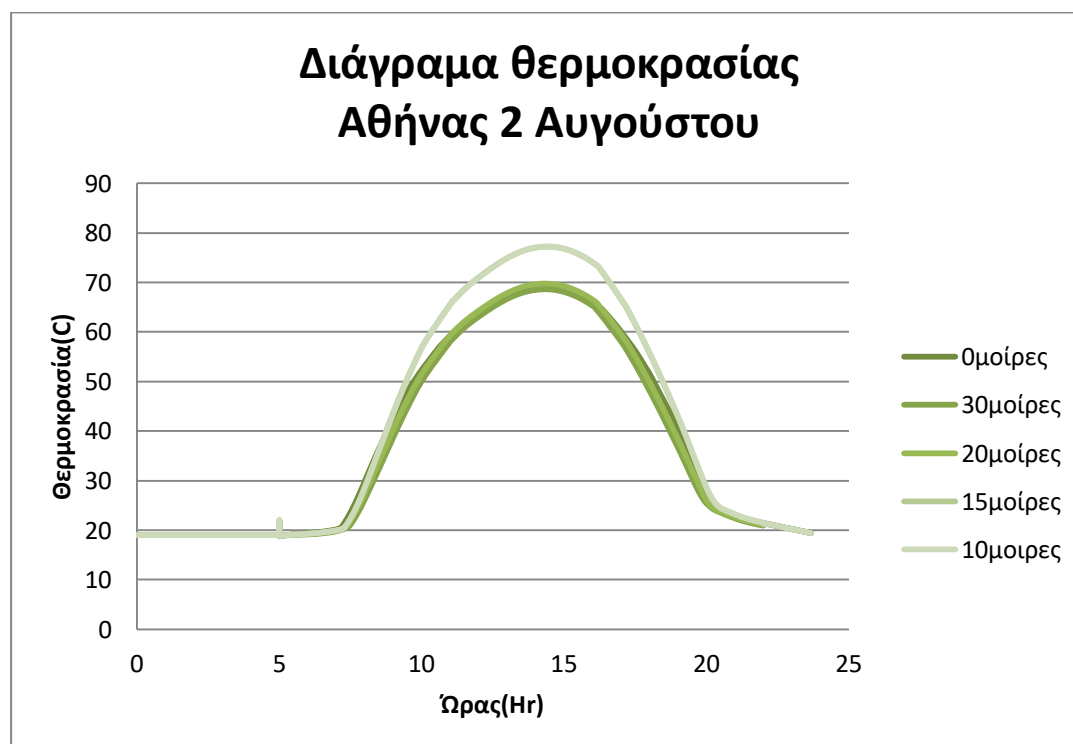
Μήνας	Ημερήσια Ενέργεια(KW)
Ιανουάριος	39
Αύγουστος	82

## 4.5)Κλίση πάνελ

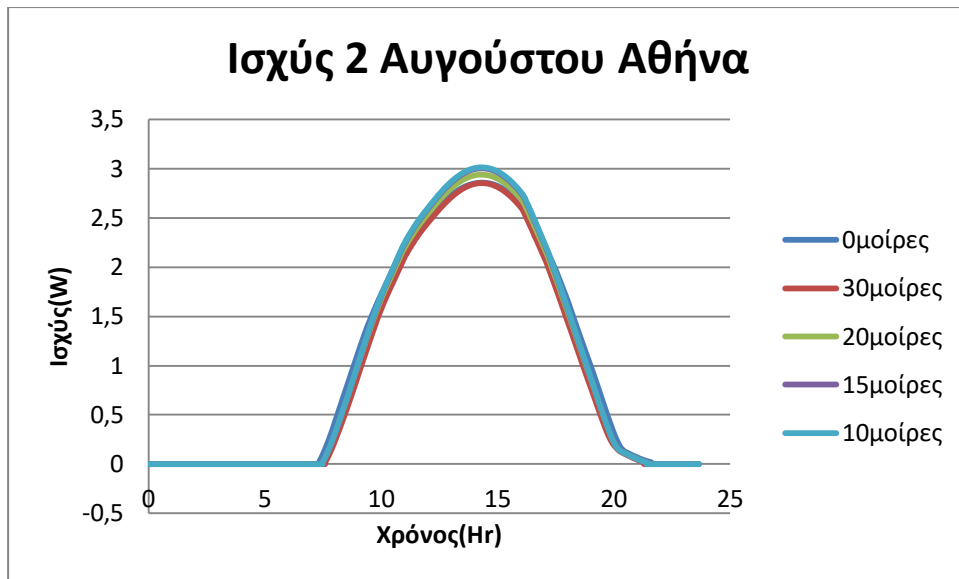
### 4.5.1)ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Η γωνία στην οποία τοποθετούνται τα πάνελ επηρεάζει την ηλεκτροπαραγωγή σημαντικά. Η ηλιακή ενέργεια ανάλογα με την εποχή και την περιοχή μεγιστοποιείται σε διαφορετική γωνία κλίσης. Συγκεκριμένα προτείνεται η γωνία κλίσης να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αυτό όμως δεν προσδιορίζει ακριβώς την κατάλληλη κλίση των πάνελ αφού δεν περιγράφει κατάλληλα την βέλτιστη γωνία σε κάθε εποχή. Πιο συγκεκριμένα το χειμώνα προτείνονται μεγαλύτερες γωνίες προσεγγιστικά προτείνεται 15 μοίρες αυξημένο το γεωγραφικό πλάτος ενώ τον χειμώνα μικρότερες προσεγγιστικά κατά 15 μοίρες. Στην περιοχή της Αθήνας που εξετάζουμε η προτεινόμενη γωνία κλίσης για σταθερά πάνελ είναι 30 μοίρες. Για να υπολογίσουμε την βέλτιστη γωνία για διαφορετικούς μήνες πρέπει να γίνουν προσομοιώσεις τόσο έναν χειμερινό όσο και ένα καλοκαιρινό μήνα για διαφορετικές κλίσεις πάνελ.

### 4.5.2)Καλοκαίρι



Εικόνα 38 Θερμοκρασία Αυγούστου ανά κλίση πάνελ

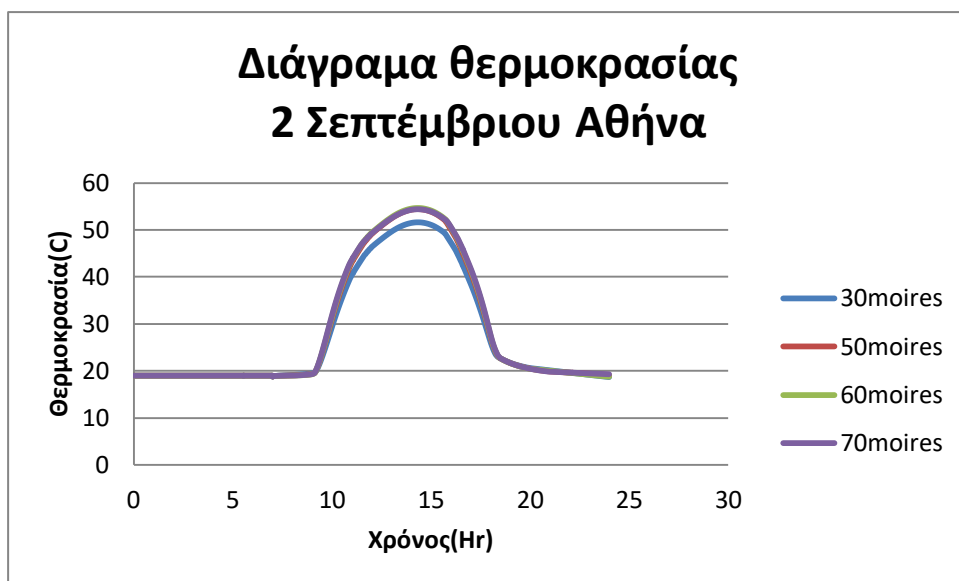


Εικόνα 39 Ισχύς Αυγούστου ανά κλίση πάνελ

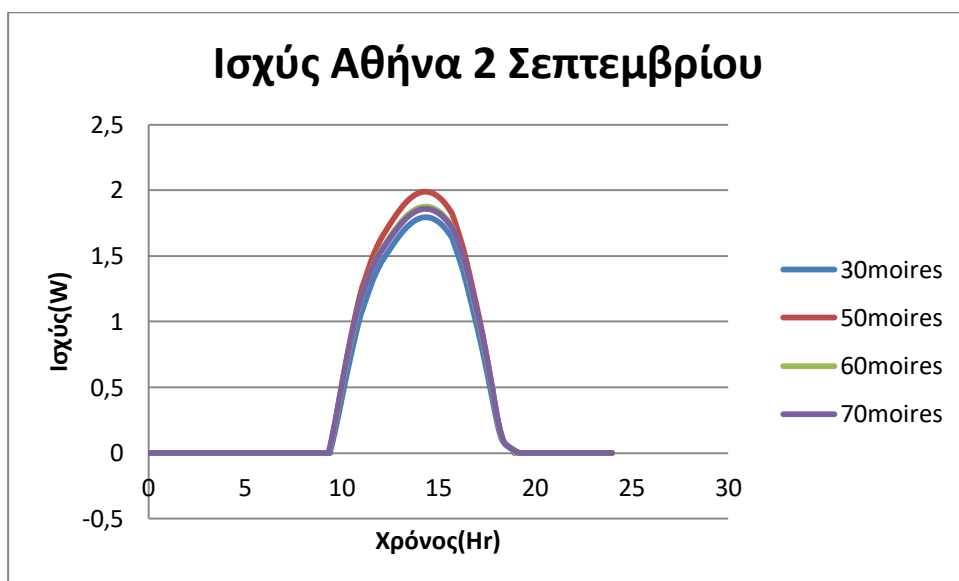
Συγκεκριμένα η ημερήσια ενέργεια που παράγεται για κάθε κλίση τον Αύγουστο φαίνεται παρακάτω:

Κλίση	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (KW)
0	87,39
10	88,1
15	87,75
20	86,1
30	81,96

### 4.5.3) ΧΕΙΜΩΝΑΣ



Εικόνα 40 Θερμοκρασία Αθήνας ανά κλίση πάνελ



Εικόνα 41 Ισχύς Αθήνας ανά κλίση πάνελ

Συγκεκριμένα η ημερήσια ενέργεια που παράγεται για κάθε κλίση τον Αύγουστο φαίνεται παρακάτω:

Κλίση	Ημερήσια Ενέργεια(KW)
30	39
50	44,1
60	41,9
70	41,9



## **5)Συμπεράσματα**

### **5.1)ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΤΟ ANSYS**

Συνοψίζοντας, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης φωτοβολταϊκού πάνελ στο Ansys. Μετά από συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα αλλά και την σχετική θεωρία φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός φωτοβολταϊκού μέσω του προγράμματος Ansys είναι εφικτή. Με την προσομοίωση αυτή μας δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης των πάνελ που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μία τοποθεσία και μας προκύπτουν λεπτομερείς στοιχεία για την απόδοση των πάνελ αλλά και το αποτέλεσμα της ακτινοβολίας πάνω τους. Με την χρήση ακτινοβολίας, τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας και της ισχύς μέσω των ιδιοτήτων των υλικών ενθαρρύνεται η δοκιμή νέων υλικών και η βελτιστοποίηση των πάνελ ανάλογα με την χρήση. Μέσω του Ansys έχουμε πρόσβαση σε διαγράμματα κατά την διάρκεια της ημέρας και μπορούμε να υπολογίσουμε καλύτερα την ενεργειακή αυτάρκεια που προσφέρεται από ηλιακά πάνελ για αυτόνομες κατοικίες. Η προσομοίωση δεν περιορίζεται από την περιοχή ή τον χρόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε επιχείρηση η οποία διαθέτει τα πακέτα του Ansys.



## **5.2)ΣΥΓΓΡΙΣΗ ANSYS ΜΕ ΑΛΛΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ**

Η προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ μπορεί να πραγματοποιηθεί με προγράμματα όπως το PVsyst, το Solar Pro, Homer Pro και System Advisor Model. Με την σύγκριση αυτών των λογισμικών με το Ansys για την υλοποίηση του συγκεκριμένου project παρατηρούμε ότι τα λογισμικά που ειδικεύονται σε ηλιακά πάνελ πρέπει να προτιμώνται σε περιπτώσεις επιλογής πάνελ σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή για χρήση μέγιστης ισχύς. Για αυτές τις περιπτώσεις λόγω ειδίκευσης τα λογισμικά αυτά είναι πιο εύχρηστα αφού περιέχουν καταλόγους με πάνελ και όλες τις ιδιότητές τους. Επιπλέον, ο υπολογισμός του κάθε πάνελ είναι αρκετά πιο σύντομος σε σχέση με το ansys αφού η μοντελοποίηση της ακτινοβολία με ξεχωριστές ακτίνες αν και πιο ρεαλιστική αυξάνει την πολυπλοκότητα της μελέτης και επομένως τον χρόνο επεξεργασίας. Παρ' όλ' αυτά, η παρούσα μελέτη πλεονεκτεί ως προς την αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών για ιδιωτική χρήση ή για ενεργειακές κοινότητες αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα τόσο για τα σύννεφα όσο και την θερμοκρασία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια για τις μέρες του χειμώνα όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν σαφώς λιγότερο και η ενεργειακή αυτάρκεια περιορίζεται. Τέλος, η χρήση του Ansys ενδείκνυται για έρευνα για την κατασκευή ηλιακών πάνελ. Οι ιδιότητες των υλικών τοποθετούνται ξεχωριστά από τον χρήστη επομένως τα υλικά των πάνελ τόσο σε μέγεθος όσο και σε είδος μπορούν να μεταβληθούν με τις κατάλληλες τροποποιήσεις και να δημιουργηθεί το βέλτιστο πάνελ για την τοποθεσία και κυρίως την χρήση του.

### 5.3) ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το Ansys αλλά και κάθε μοντέλο προσομοίωσης δεν αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα πλήρως και επιπλέον μετρήσεις πρέπει να γίνουν για την επιβεβαίωση μίας μελέτης. Ο ρόλος της μοντελοποίησης είναι η αξιολόγηση διαφόρων μοντέλων και λύσεων με γνώμονα πάντα τις παραδοχές που έγιναν σε κάθε μοντέλο. Στο συγκεκριμένο μοντέλο έγιναν παραδοχές τόσο στην σχεδίαση του πάνελ, στον υπολογισμό της ακτινοβολίας, στις συνθήκες του περιβάλλοντος και στον προσδιορισμό της ισχύς. Τα πάνελ μοντελοποιήθηκαν σαν πλάκες χωρίς καλώδια στο εσωτερικό τους τα οποία θα αλλοίωναν λίγο τα αποτελέσματα λόγω τοπικής απομάκρυνσης του ρεύματος αλλά και χωρίς βάση στήριξης η οποία συμβάλει στην ψύξη του πάνελ λόγω μετάδοσης θερμότητας μέσω αυτής. Επιπλέον, στην περίπτωση των καιρικών συνθηκών θεωρήθηκε σταθερή θερμοκρασία ανάλογα με την εποχή το οποίο προφανώς δεν ισχύει για την διάρκεια της ημέρας αλλά η διαφοροποίησή επηρεάζει τις τελικές θερμοκρασίες του πάνελ και όχι τον ρυθμό ψύξης του πάνελ. Ιδιαίτερα, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει την ηλεκτροπαραγωγή καθώς δεν λήφθηκε υπόψιν το φαινόμενο Peltier για την ηλεκτροπαραγωγή. Ακόμα, στην περίπτωση των νεφώσεων θεωρήθηκαν σταθερές σε κάθε μήνα το οποίο αλλοιώνει αρκετά τα ημερήσια αποτελέσματα αφού ακόμα και τον χειμώνα υπάρχουν μέρες με ηλιοφάνεια οπότε τα αποτελέσματα αυτά θα πρέπει να υπολογιστούν ως μέσος όρος ηλεκτροπαραγωγής ως προς τους μήνες αυτούς. Τέλος, η βασικότερη παραδοχή της μελέτης είναι η μοντελοποίηση της ακτινοβολίας με μία ακτίνα χωρίς τον διαχωρισμό του σε μήκη κύματος (gray model). Για την κατάλληλη μοντελοποίηση με βάση το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν τιμές στα υλικά με βάση την ακτινοβολία που δέχονταν αφού οι τιμές των μεταβλητών απορρόφησης, μετάδοσης και ανάκλασης της ακτινοβολίας θεωρήθηκαν σταθερές για την λειτουργία τους με γκριζα ακτινοβολία.

## **5.4) ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ FLUENT**

Το περιβάλλον του Ansys Fluent προσφέρει αρκετές επιλογές για την μοντελοποίηση της ακτινοβολίας όμως το λογισμικό αυτό έχει κάποιες ελλείψεις. Η λειτουργία των μοντέλων αυτών έχει δοκιμαστεί στην χρήση ρευστών ενώ τα στερεά θεωρούνται τοίχοι οι οποίοι τα διαχωρίζουν. Επιπλέον, πολλά από τα

μοντέλα λαμβάνουν δεδομένα από τις ακτινοβολίες στους τοίχους αυτούς και όχι από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν άμεσα. Πολλά από αυτά τα μοντέλα δεν λειτουργούν καθόλου σε στερεά όπως τα πάνελ που μελετήθηκαν κάτι το οποίο πρέπει να διορθωθεί. Τέλος, το Fluent προσφέρει την δυνατότητα να διαχωριστούν οι ιδιότητες των υλικών ανάλογα με τα μήκη κύματος αλλά και να διαχωριστεί η ακτινοβολία ανάλογα με αυτό το οποίο σε συνδυασμό με την επιλογή του DO radiation προσφέρει μία χρονοβόρα λύση. Το πρόβλημα παρατηρείται στην χρήση του solar calculator το οποίο μεταβάλλει διαρκώς την ακτινοβολία που φτάνει στα πάνελ κατά την διάρκεια της ημέρας και δεν είναι δυνατόν να διαχωριστεί η ακτινοβολία σε μήκη κύματος αφού η μεταβολή αυτή τοποθετείται αυτόματα στην πρώτη κλάση.

## **5.5) ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη αν και αποτελεσματική φέρει βελτιώσεις. Καταρχάς το γεωμετρικό μοντέλο θα μπορούσε να διευρυνθεί προσφέροντας μία πιο ακριβής αλλά και πιο χρονοβόρα λύση. Με την τοποθέτηση της στήριξης των φωτοβολταϊκών μπορεί να υπάρχουν υπολογισμοί για τις δυνάμεις που δέχονται από τον άνεμο ο οποίος μπορεί να προκαλέσει σημαντικές φθορές στα πάνελ. Με την στήριξη θα είχε νόημα η τοποθέτηση περισσότερων φωτοβολταϊκών για να μελετηθούν φαινόμενα σκίασης και να συγκριθούν διαφορετικά είδη ως προς την ισχύς ως προς τον χώρο. Θα μπορούσε επίσης να γίνει πιο ακριβής περιγραφή της θερμότητας με την κατασκευή των καλωδίων και μέσω udf να συμπεριληφθούν φαινόμενα Peltier προσφέροντάς μας μεγαλύτερη ακρίβεια για την παραγόμενη ισχύ. Οι βελτιώσεις αυτές αν και κρίθηκαν δυνατές και σημαντικές προσθήκες για την βελτίωση της μελέτης όμως αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα της μελέτης με αποτέλεσμα να απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ.



## 6)ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1.KIMΩΝΟΣ Α.ANTONΟΠΟΥΛΟΥ(ΑΘΗΝΑ 2015). ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΡΟΣ 1

2.ΑΡΘΟΥΡΟΣ ΖΕΡΒΟΣ (ΑΘΗΝΑ 2014).ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.ANSYS 14 FLUENT GUIDE

4.UDF MANUAL RELEASE 17.0 (2012)

5.SENTHIL KUMAR,N. PUJA PRIYADHARSHINI AND E.NATARAJAN (Chennai 2014)Experimental and numerical analysis of photovoltaic solar panel using thermoelectric cooling

6.ΑΝΑΣΤΟΣΟΠΟΥΛΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ (ΑΘΗΝΑ 2016) Μεγιστοποίηση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλιακούς συλλέκτες για διαφορετικά χρονικά διαστήματα εντός του έτους με σκοπό χρονικά αντίστοιχες εφαρμογές

7.ΑΙΜΙΛΙΟΣ-ΣΤΑΥΡΟΣ ΚΟΛΟΒΟΣ(ΑΘΗΝΑ 2015). Τεχνοοικονομική αξιολόγηση αυτόνομου φ/β συστήματος σε οικιακή εγκατάσταση

8.JOHN A.DUFFIE&WILLIAM A.BECKMANSOLAR( 2013) ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES 4<sup>th</sup> EDITION UNIVERSITY OF WISCONSIN

9.HITESH N PANCHAL,P.K.SHAH(2011) MODELLING AND VERIFICATION OF SINGLE SLOPE SOLAR STILL USING ANSYS-CFX KADI SARVAVISHWAVIDYALAYA UNIVERSITY&SILVER OAK COLLEGE OF ENGINEERING & TECHNOLOGY

10.M.U.SIDDIQUI(2012)ELECTRICAL THERMAL AND STRUCTURAL PERFORMACE OF A COOLED PV MODULE TRANSIENT ANALYSIS USING A MULTIPHYSICS MODEL KING FAHD UNIVERSITY

11.pveducation.org

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

EIKONA 1.Christopher Hamilton Article:Global Energy Consumption Appears To Have Begun The Inescapable Process Of Rolling Over

EIKONA 2 Meteorological Service Singapore:

<http://www.weather.gov.sg/climate-past-climate-trends/>

EIKONA 3 Yale School of Forestry and Enviromental Studies

EIKONA 4 KIMΩΝΟΣ Α.ANTONΟΠΟΥΛΟΥ(ΑΘΗΝΑ 2015). ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΡΟΣ 1

EIKONA 5 ASHRAE 2001 HANDBOOK

EIKONA 6 URL:<https://www.theverge.com/2019/7/5/20679189/solar-panel-price-incentive-federal-tax-credit-2019>

EIKONA 7 URL:<https://www.solarpowerworldonline.com/2018/05/trending-in-mounting-single-axis-trackers-are-adapting-to-bifacial-designs/>

EIKONA 8 URL: [https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-for-the-dual-axis-solar-tracker\\_fig2\\_315666507](https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-for-the-dual-axis-solar-tracker_fig2_315666507)

EIKONA 9 URL: <https://www.pv-tech.org/products/helioslites-disruptive-1.5-axis-pv-tracker>

EIKONA 10 URL: <http://www.redrok.com/led3xassm.htm>

EIKONA 11 URL:<https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/iv-curve>

EIKONA 12 URL: <http://opvap.com/jsc.php>

EIKONA 18 SENTHIL KUMAR,N. PUJA PRIYADHARSHINI AND E.NATARAJAN (Chennai 2014)Experimental and numerical analysis of photovoltaic solar panel using thermoelectric cooling

EIKONA 20 URL: <https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/683>

EIKONA 21 Ibadillah Ardhi Digdaya(2012) Masters Thesis: Optical Enhancement for Heterojunction Silicon Solar Cells

EIKONA 22 R.H.French (2011) Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems

EIKONA 23 R.H.French (2011) Optical properties of polymeric materials for concentrator photovoltaic systems

EIKONA 24 URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/materials/optical-properties-of-silicon>

EIKONA 25 URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/optic.html>