



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΨΥΞΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ ΧΡΥΣΑΦΟΥΔΗ

Διπλωματούχου Φυσικού Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΨΥΞΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΑ ΧΡΥΣΑΦΟΥΔΗ

Διπλωματούχου Φυσικού Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Ε. ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΥ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Κ. ΔΕΡΒΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2020

Στη γιαγιά μου

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	6
Περίληψη	7
Abstract.....	8
Εισαγωγή.....	9
1.Ηλιακοί συλλέκτες και ακτινοβολία	13
1.1.Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες.....	13
1.2.Τύποι ηλιακών συλλεκτών	14
1.3.Απόδοση συλλέκτη.....	15
1.4.Απορρόφηση της ακτινοβολίας.....	16
1.5.Ηλιακή ακτινοβολία.....	17
1.5.1.Ηλιακή ενέργεια	17
1.5.2.Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	17
1.5.3.Γεωμετρικά στοιχεία Γης	19
2.Ημιαγωγοί	22
2.1.Δομή ημιαγωγών	22
2.2.Ενεργειακές ζώνες.....	24
2.3.Το πυρίτιο.....	25
2.4.Ημιαγωγοί προσμίξεων	26
2.5.Ηλεκτρικές επαφές	27
3.Φωτοβολταϊκά συστήματα	29
3.1.Εισαγωγή	29
3.2.Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	29
3.3.Ισοδύναμο Ηλεκτρικό κύκλωμα Φωτοβολταϊκού στοιχείου	31
3.4.Κατασκευαστικά στοιχεία φωτοβολταϊκών συστημάτων	32
3.5.Απόδοση	34
3.6.Κοινωνικές- τεχνολογικές- περιβαλλοντικές πτυχές.....	37

3.7.Δομή και τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών.....	38
4.Θερμοδυναμική.....	42
4.1.Μετάδοση θερμότητας.....	42
4.2.Αγωγή.....	42
4.3.Συναγωγή.....	43
4.4.Ακτινοβολία.....	44
5.Μαθηματικό μοντέλο CFX.....	46
5.1.Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	46
5.2.Βασικές εξισώσεις και μεγέθη.....	48
5.3.Μοντέλο k-epsilon.....	51
6.Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου CFX.....	53
6.1.Σχεδιασμός γεωμετρίας.....	53
6.2.Πλεγματοποίηση (Meshing).....	55
6.3.Επιλογή οριακών συνθηκών.....	56
6.4.Επίλυση.....	59
7.Αποτελέσματα (CFX- Post).....	60
7.1.Συμπεριφορά ρευστών.....	60
7.2.Περιπτώσεις.....	63
8.Σύγκριση με Steady-State Thermal.....	69
8.1.Χρήση Steady-State Thermal.....	69
8.2.Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	75
9.Συμπεράσματα.....	77
Βιβλιογραφία.....	78
Εικόνες.....	83

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του κύριου Ευάγγελου Χριστοφόρου, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Η εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής, στο εργαστήριο Ηλεκτρονικών Αισθητηρίων.

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν καθοριστικά στην εκπόνηση της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση του, τον χώρο και χρόνο που μου παρείχε στο εργαστήριο του και το συναίσθημα ότι αποτελώ μέλος του εργαστηρίου του.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Μπάνη για την πολύτιμη βοήθεια του, την άψογη συνεργασιμότητα του και την προθυμία που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους/τις συναδέλφους στο εργαστήριο για το ευχάριστο ερευνητικό περιβάλλον και την παροχή βοήθειας σε οτιδήποτε χρειάστηκα.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη της σε όλα μου τα βήματα και τις επιλογές, καθώς και τους φίλους και τις φίλες μου που μου στάθηκαν και πίστεψαν σε μένα.

Περίληψη

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα, η οποία συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας τους και στην ελάττωση της απόδοσης. Η απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά συντελεί στη μείωση της θερμοκρασίας τους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης τους.

Σκοπός της μελέτης είναι η προσομοίωση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων της υγρής ψύξης Φ/Β συστήματος με επιφανειακή ροή φιλμ νερού. Η διάταξη του υπό μελέτη συστήματος αφορά ένα Φ/Β πάνελ SIEMENS SM55 και ένα σύστημα ακροφυσίων ψεκασμού νερού που τοποθετούνται στην κορυφή του πάνελ.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ANSYS CFX, για την επίλυση των προβλημάτων θερμοδυναμικής και ρευστομηχανικής του συστήματος. Με την μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Ο χρήστης έχει την ευελιξία να τροποποιήσει το μοντέλο ως προς διάφορους παράγοντες όπως διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, διαφορετικές θερμοκρασίες του υγρού ψύξης, ταχύτητα εισόδου του υγρού στο σύστημα ψεκασμού. Με την προσομοίωση παρατηρείται η ρεολογική συμπεριφορά του υγρού ψύξης και δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης της πτώσης την θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, σε σταθερή ροή θερμότητας.

Επιπλέον έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα του προγράμματος ANSYS Steady-State Thermal, όπου ορίστηκαν μόνο οι εξωτερικοί παράμετροι, χωρίς σύστημα ψύξης. Λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες και τις ελάχιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε κάθε υλικό της γεωμετρίας είναι φανερό ότι το σύστημα υγρής ψύξης, χαμηλώνει τις θερμοκρασίες κάνοντας το πιο αποδοτικό.

Η μελέτη αυτή αποτελεί μέρος ερευνητικού προγράμματος (PVBOOSTING) με απώτερο σκοπό την εφαρμογή των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στην πειραματική διάταξη. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια του προγράμματος, θα τοποθετηθεί σε φωτοβολταϊκό πάνελ το σύστημα ψύξης που περιγράφεται στην εργασία και θα συγκριθούν τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Abstract

Most of the solar radiation that is absorbed by photovoltaic systems is not converted into electricity but into heat, which causes the increase of their temperature and the decrease of their efficiency. Heat dissipation from photovoltaic systems helps to reduce their temperature and can be used to increase their energy efficiency.

The purpose of this study is the simulation, with the method of fine elements, of the liquid cooling system of a PV with surface flow of water film. The layout of the system under study concerns a PV panel SIEMENS SM55 and a system of water spray nozzles placed on top of the panel.

The simulation was performed on ANSYS CFX in order to solve the problems of thermodynamics and fluid mechanics of the system. By modeling a photovoltaic panel, the user has the flexibility to modify the system with respect to various factors such as different ambient temperatures, different temperatures of the cooling liquid, the inlet velocity in the water spray system. The simulation observes the rheological behavior of the cooling liquid and provide the ability to evaluate the temperature drop in the layers of the panel, in a given constant heat flow.

In addition, there was a comparison with the results of ANSYS Steady-State Thermal, where the only parameter that was defined was the ambient temperature and the heat flux without the cooling system. Taking into account the maximum and minimum temperatures which are developed in each material of the geometry, it is obvious that the liquid cooling system lowers the temperatures, making it more efficient.

This study is part of a research project (PVBOOSTING) with the ultimate goal of applying the results of the simulations to the experimental device. Specifically, within the framework of the project, the cooling system described in the work will be placed on a photovoltaic panel and the experimental results will be compared with the results of the simulations.

Εισαγωγή

Στις σύγχρονες κοινωνίες, καταναλώνονται υπέρογκες ποσότητες ενέργειας για την κάλυψη καθημερινών ανθρώπινων αναγκών όπως οι μετακινήσεις, η φωταγωγή και η θέρμανση. Η συνεχής βελτίωση του βιοτικού επιπέδου καθιστά απαραίτητη την αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Γίνεται σαφές πως η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την παραγωγή και τα μέσα παραγωγής ενέργειας.

Οι κύριες πηγές ενέργειας από τις οποίες τροφοδοτούνται τα αστικά και βιομηχανικά κέντρα παγκοσμίως είναι οι Συμβατικές Πηγές Ενέργειας. Η καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων και προϊόντων τους αποτελεί την πιο κοινή διαδικασία παραγωγής ενέργειας κάθε μορφής [1],[2]. Τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα διαχωρίζονται σε στερεά, υγρά και αέρια. Στα στερεά καύσιμα περιλαμβάνονται οι ορυκτοί άνθρακες, η βιομάζα, τα πλαστικά κλπ. Τα υγρά καύσιμα είναι οι διάφορες αποστάξεις του αργού πετρελαίου και υγροί υδρογονάνθρακες. Στα αέρια καύσιμα συμπεριλαμβάνονται το φυσικό αέριο και οι αέριοι υδρογονάνθρακες. Η χρήση τους προσδιορίζεται με βάση την χημική τους σύσταση, το ποσοστό του θείου και τη περιεκτικότητά τους σε αδρανή. Η συνεχής ανθρώπινη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων του πλανήτη για την παραγωγή ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την εξάντληση τους. Ακόμη, οι φυσικοί πόροι αναπληρώνονται πολύ αργά καθώς χρειάζονται εκατομμύρια έτη για την ολοκλήρωση των γεωλογικών διεργασιών από όπου προκύπτουν. Τούτο καθιστά αναγκαία την εύρεση νέων μορφών ενέργειας, περισσότερο ήπιων και φιλικών προς το περιβάλλον. Επίσης, δύναται η χρήση τους να είναι όσο το δυνατόν πιο άμεση.

Η φύση διαθέτει ένα ευρύ φάσμα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) , οι οποίες βασίζονται εξ ολοκλήρου στις φυσικές διεργασίες και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Στις συγκεκριμένες μορφές ενέργειας περιλαμβάνονται: ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Στα πρώτα χρόνια εμφάνισης των ΑΠΕ, οι τιμές λειτουργείας τους ήταν αρκετά υψηλές καθώς βρισκόταν σε πειραματικό επίπεδο. Με την πάροδο των χρόνων και την γέννηση της περιβαλλοντικής συνείδησης παγιώθηκε η ανάγκη για ανάπτυξη των ΑΠΕ. Επιπλέον, οι καταστροφικές επιπτώσεις των Συμβατικών Πηγών Ενέργειας στο περιβάλλον, σε συνδυασμό με τα περιορισμένα αποθέματα τους ωθούν τα σύγχρονα

ανεπτυγμένα κράτη στην εφαρμογή ορίων όσον αφορά τη χρήση Συμβατικών Πηγών Ενέργειας μέσω νόμων αλλά και προστίμων σε παραβάτες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η τροπολογία του IMO (International Maritime Organization) για τον περιορισμό των εκπομπών θείου (S) που παράγεται λόγω της καύσης πετρελαίου (IMO 2019)[3]. Έπειτα, το κόστος εφαρμογής των ΑΠΕ μειώνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, και σε κάποιες περιπτώσεις ανταγωνίζεται επί ίσοις όροις τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Τρανταχτό παράδειγμα είναι η επιδίωξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να καλύπτει το 27% των αναγκών της από ΑΠΕ μέχρι το 2030[4].

Μορφές ΑΠΕ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται με βάση την προέλευση τους. Τα είδη των ΑΠΕ εντάσσονται στις εξής κατηγορίες :

- Ηλιακή ενέργεια
- Αιολική ενέργεια
- Γεωθερμική ενέργεια
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Ωκεάνια ενέργεια
- Βιομάζα

Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλανήτη αποτελεί τη βασικότερη πηγή ενέργειας. Η συνολική ηλιακή ενέργεια που φθάνει στην Γη είναι περίπου $1,5 \cdot 10^{18}$ *KWh/χρόνο*. Από αυτό το ποσό ενέργειας το 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα και η ενέργεια που απορροφάται από τον πλανήτη είναι περίπου 10^{18} *KWh/χρόνο*[5]. Η ενέργεια που απορροφά η γη κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι δεκαπλάσια από την παραγόμενη ενέργεια των ορυκτών καυσίμων που διαθέτει ο πλανήτη. Ποσοστό της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού στη ατμόσφαιρα, για τη φωτοσύνθεση, για τη θέρμανση του πλανήτη κλπ. Στην τελευταία περίπτωση, ένα ποσοστό εκπέμπεται πίσω στο διάστημα υπό μορφή θερμικής ακτινοβολίας, έτσι ώστε η θερμοκρασία της γης να διατηρείται σταθερή.

Αιολική Ενέργεια

Έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας αποτελεί η αιολική ενέργεια. Αποτέλεσμά της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η δημιουργία διαφοράς πίεσης και θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα και συνεπώς επηρεάζεται η διαθέσιμη δυναμική ενέργεια από την οποία προέρχονται οι κινήσεις των αέριων μαζών (άνεμος)[6]. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε αιολική είναι της τάξεως του 1% , που ενώ φαίνεται μικρό αντιπροσωπεύει πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας. Οι συσκευές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμόμυλοι, οι οποίοι μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε αξιοποιήσιμη μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμία αποτελεί ακόμα μια πηγή ενέργειας. Γεωθερμική ενέργεια ή Γεωθερμία ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια που πηγάζει από το εσωτερικό του πλανήτη (πυρήνα) προς την επιφάνεια. Η προέλευση της θερμότητας συνδέεται με την εσωτερική δομή και τις φυσικές διεργασίες του πλανήτη[7]. Οι σεισμοί και τα ρήγματα που δημιουργούνται στο υπέδαφος ευνοούν την ανοδική πορεία του μάγματος και των γεωθερμικών ρευστών προς την επιφάνεια μεταφέροντας τεράστιες ποσότητες θερμικής ενέργειας. Κυριότερες επιφανειακές εκδηλώσεις είναι: οι υδροθερμικοί κρατήρες , οι θερμές πηγές, οι θερμοπίδακες, οι ατμίδες, οι λεκάνες ιλύος και τα θερμά εδάφη.

Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια η οποία αξιοποιεί τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική. Αρχικά η κινητική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε μηχανική καθώς προκαλεί περιστροφές του άξονα της πτερωτής του στροβίλου και στην συνέχεια, μέσω γεννήτριας, μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Ωκεάνια ενέργεια

Η ωκεάνια ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που προσφέρεται από την θάλασσα. Οι κατηγορίες της ωκεάνιας ενέργειας είναι: η παλιρροϊκή ενέργεια, η κυματική ενέργεια, και η θερμική ενέργεια. Η παλιρροϊκή ενέργεια εκμεταλλεύεται τα νερά της πλημμυρίδας που παγιδεύονται σε φράγματα και κατά την άμπωτη ελευθερώνονται και κινούν υδροστρόβιλο. Η κυματική ενέργεια προκύπτει από το θαλάσσιο κυματισμό

και με συσκευές κυματικής ενέργειας (attenuator, point absorbers, Oscillating Wave Surge Converter κλπ) γίνεται μετατροπή της σε ηλεκτρική. Ακόμα, η διαφορά θερμοκρασίας του θερμού στρώματος νερού της επιφάνειας και του ψυχρού νερού του πυθμένα δίνει την δυνατότητα παραγωγής ενέργειας με την αξιοποίηση του θερμού νερού για τον βρασμό της αμμωνίας (χαμηλό σημείο ζέσης). Το παραγόμενο αέριο περιστρέφει τουρμπίνες παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια ψύχεται από το ψυχρό νερό του πυθμένα.

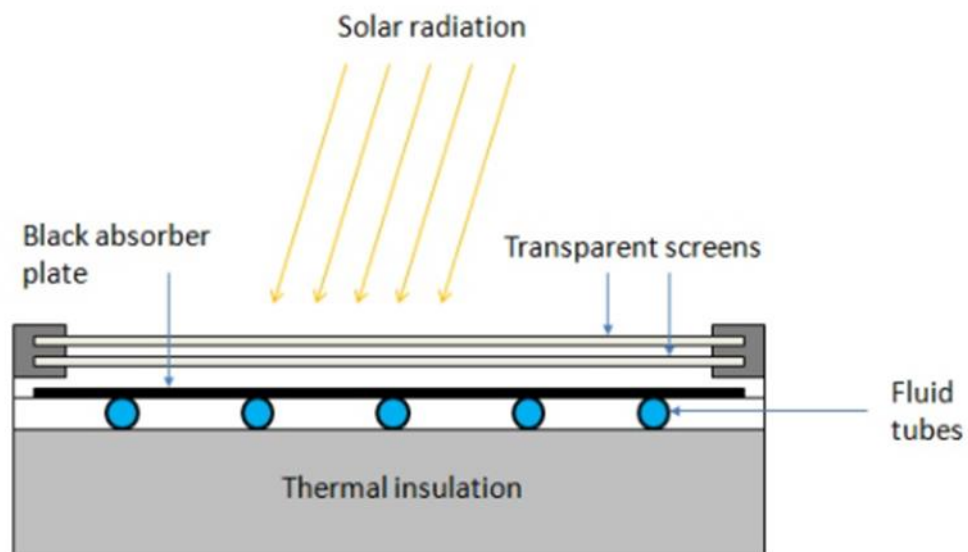
Βιομάζα

Βιομάζα ονομάζεται η αποθηκευμένη χημική ενέργεια στα φυτά και τα ζώα. Περιλαμβάνει τα οργανικά συστατικά των φυτών και από χημική σκοπιά περιέχει κυρίως τα στοιχεία C, H, O που βρίσκονται σε διαφορετική αναλογία στους υδατάνθρακες. Η βιομάζα αποτελεί μια δεσμευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Η αξιοποίηση της βιομάζας πραγματοποιείται είτε με απ' ευθείας καύση, είτε με μετατροπή της σε καύσιμα (σε αέρια, υγρή ή στερεά μορφή) μέσω βιοχημικών διεργασιών [8].

1. Ηλιακοί συλλέκτες και ακτινοβολία

1.1. Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν την πιο περιζήτητη κατηγορία οργάνων συλλογής της ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε μία μαύρη επιφάνεια, η οποία απορροφά την ενέργεια και θερμαίνεται. Η επιφάνεια αυτή τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο ως προς το οριζόντιο επίπεδο και προσανατολίζεται ώστε να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ακτινοβολία σύμφωνα με τη μεταβολή της θέσης του Ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην κάτω πλευρά της μαύρης επιφάνειας βρίσκονται σωλήνες, οι οποίοι διαρρέονται από νερό και είναι σε θερμική επαφή με την μαύρη επιφάνεια. Το νερό στο εσωτερικό των σωλήνων χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας [9]. Πέραν του νερού χρησιμοποιούνται αέρας ή οργανικό διάλυμα για την απαγωγή της θερμότητας. Το μαύρο πλαίσιο τοποθετείται εσωτερικά ενός θερμικά μονωμένου (κάτω πλευρά) περιβλήματος και στην πάνω επιφάνεια υπάρχει διαφανές κάλυμμα. Το διαφανές κάλυμμα αποτελείται από γυαλί ή πλαστικό.



Σχήμα 1: Τομή ηλιακού συλλέκτη
<https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/685>

Κρίσιμος παράγοντας για την λειτουργία του συλλέκτη αποτελεί η απόδοση του. Η αύξηση της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την επιστημονική κοινότητα και εξαρτάται από δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφορά την αύξηση του ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται και το δεύτερο την αύξηση της τελικής θερμοκρασίας του ρευστού. Στην πρώτη περίπτωση, η απαιτούμενη επιφάνεια συλλεκτών καθορίζει τη συλλογή ποσού θερμότητας και

συνεπώς τη συλλεγόμενη ενέργεια. Η δεύτερη περίπτωση, βρίσκει εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες.

1.2. Τύποι ηλιακών συλλεκτών

Η απλούστερη μορφή επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι αυτή χωρίς μπροστινό προστατευτικό κάλυμμα. Ο συγκεκριμένος συλλέκτης χαρακτηρίζεται από μικρή απόδοση και χαμηλές θερμοκρασίες καθώς μεγάλα ποσά θερμότητας χάνονται στο περιβάλλον.

Η τοποθέτηση προστατευτικού διαφανούς καλύμματος σηματοδοτεί τον επόμενο τύπο επίπεδου ηλιακού συλλέκτη. Το διαφανές κάλυμμα τοποθετείται στο πάνω μέρος του συλλέκτη προφυλάσσοντας έτσι την μαύρη επιφάνεια από φθορές και αποτρέπει την ελεύθερη μεταφορά θερμότητας προς το περιβάλλον. Καθ' αυτό τον τρόπο, η θερμοκρασία του καλύμματος κυμαίνεται μεταξύ της θερμοκρασίας της μαύρης επιφάνειας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Οι απώλειες πλέον εξαρτώνται σχεδόν αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του καλύμματος αφού συντελείται μικρή απώλεια στην ηλιακή ενέργεια διότι ένα μέρος ανακλάται στο κάλυμμα και το υπόλοιπο απορροφάται από αυτό.

Για εφαρμογές όπου απαιτούνται αυξημένες θερμοκρασίες υπάρχει η προοπτική για εφαρμογή δύο διάφανων καλυμμάτων. Τα καλύμματα τοποθετούνται παράλληλα στη μαύρη επιφάνεια και μεταξύ τους σε απόσταση μερικών εκατοστών. Κάτι τέτοιο επιφέρει μείωση της οπτικής απόδοσης του συλλέκτη καθώς ορίζεται ως ο λόγος της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τη μαύρη επιφάνεια προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο συλλέκτη.

Με βάση το ρευστό μεταφοράς θερμότητας οι συλλέκτες διακρίνονται σε συλλέκτες υγρού (νερό, οργανικά ρευστά κλπ.) και αέρα.

Επιπρόσθετα, υπάρχουν ειδικοί τύποι συλλεκτών που έχουν στόχο την αύξηση της απόδοσης και της τελικής θερμοκρασίας. Τέτοιοι είναι οι συλλέκτες κενού όπου υπάρχει κενό μεταξύ της μαύρης επιφάνειας και του καλύμματος με σκοπό, η μεταφορά θερμότητας να επιτυγχάνεται μόνο με ακτινοβολία. Επίσης, υπάρχουν συλλέκτες με επιλεκτική μαύρη επιφάνεια με συντελεστή απορρόφησης $\alpha^s \cong 0.95$ και συντελεστή εκπομπής ϵ πολύ χαμηλό στο υπέρυθο. Συνεπώς, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία προς το κάλυμμα περιορίζεται σημαντικά. Τέλος, υπάρχουν και ειδικοί συλλέκτες με διαφανές εξαγωνικό πλέγμα μεταξύ μαύρης

επιφάνειας και καλύμματος που τείνει να περιορίσει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ των επιφανιών.

1.3. Απόδοση συλλέκτη

Η απόδοση ενός ηλιακού συλλέκτη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς αποτελεί μέγεθος που φανερώνει την ενέργεια που δεσμεύεται στον ηλιακό συλλέκτη προς την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση συλλογής n ενός συλλέκτη ορίζεται σαν το λόγο της ωφέλιμης συλλεγόμενης ενέργειας Q ανά μονάδα χρόνου, δια της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά μονάδα χρόνου στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη $A_C \cdot G_T$. Συνεπώς, για έναν ηλιακό συλλέκτη με επιφάνεια συλλογής A_C ισχύει:

$$n = \frac{Q}{A_C \cdot G_T} \quad (1.1)$$

όπου G_T η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη.

Η ποσότητα Q αποτελεί τη διαφορά της απορροφημένης ηλιακής ακτινοβολίας από τον ηλιακό συλλέκτη με τις θερμικές απώλειες. Οι θερμικές απώλειες είναι οι διαφορετικοί τύποι διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας (αγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία) και συμβολίζονται ως U_L . Επομένως για την ωφέλιμη ενέργεια έχουμε:

$$Q = A_C \cdot F_R \cdot [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (1.2)$$

όπου S η συνολική απορροφημένη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, T_i η θερμοκρασία εισόδου ρευστού στο συλλέκτη, T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος και F_R ο λόγος μεταφοράς θερμότητας προς τη μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_R = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right) \cdot c_p \cdot (T_o - T_i)}{A_C \cdot [S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (1.3)$$

όπου T_o η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον συλλέκτη, C_p η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση και $\frac{dm}{dt}$ η ροή μάζας ρευστού από τον συλλέκτη στη μονάδα του χρόνου. Συνεπώς είναι φανερό πως το μέγιστο ενεργειακό κέρδος επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού είναι σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

1.4.Απορρόφηση της ακτινοβολίας

Όταν στην επιφάνεια ενός σώματος προσπίπτει ακτινοβολία, ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται, ένα μέρος της ανακλάται και το υπόλοιπο διέρχεται στο εσωτερικό του σώματος. Η αλληλεπίδραση της ανταλλαγής ενέργειας με θερμική ακτινοβολία, η οποία παράγεται στον ήλιο και προσπίπτει στη γη, χαρακτηρίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (1.4)$$

όπου τα μεγέθη ρ , τ και α είναι η ανακλαστικότητα, η διαπερατότητα και η απορροφητικότητα αντίστοιχα και εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας[10].

Για τον υπολογισμό της έντασης μονοχρωματικής ακτινοβολίας I_λ που περνά μέσα από ένα σώμα χρησιμοποιείται η σχέση:

$$dI_\lambda(x) = -k_\lambda \cdot I_\lambda(x) dx \quad (1.5)$$

όπου $I_\lambda(x)$ η ένταση μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε μήκος x στο εσωτερικό του υλικού και k_λ ο συντελεστής αποσβέσεως. Η διαπερατότητα μιας πλάκας τ_λ , ως προς την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$\tau_\lambda = \frac{I_\lambda}{I_{\lambda_0}} = e^{-k_\lambda D} \quad (1.6)$$

όπου I_{λ_0} η αρχική και I_λ η τελική ένταση της ακτινοβολίας, D η διαδρομή της ακτινοβολίας. Λαμβάνοντας τον συντελεστή απόσβεσης K για όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας η διαδρομή στο εσωτερικό της πλάκας θα έχει μήκος $L \cos\theta$ (L το πάχος της πλάκας και θ η γωνία διαθλάσεως) και η διαπερατότητα εξαιτίας της απορρόφησης δίνεται από το τύπο:

$$\tau_\alpha = e^{-\frac{KL}{\cos\theta}} \quad (1.7)$$

Η διαπερατότητα της πλάκας ως προς την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_r(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{1-r_\perp}{1+r_\perp} + \frac{1-r_\parallel}{1+r_\parallel} \right] \quad (1.8)$$

όπου ο δείκτης r συμβολίζει την ανάκλαση. Η συνολική διαπερατότητα μπορεί να υπολογιστεί από την προσεγγιστική σχέση:

$$\tau \cong \tau_r \cdot \tau_\alpha \quad (1.9)$$

Καθώς η απορρόφηση α της ηλιακής ακτινοβολίας από το υλικό της πλάκας είναι $\alpha \cong 1 - \tau_\alpha$ η ανακλαστικότητα ρ για γωνία πρόσπτωσης θ υπολογίζεται από :

$$\rho \cong \tau_\alpha - \tau_r \cdot \tau_\alpha \quad (1.10)$$

1.5. Ηλιακή ακτινοβολία

1.5.1. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια της γης. Αποτελεί καθαρή μορφή ενέργειας και έχει την δυνατότητα να μετατραπεί σε άλλες μορφές. Ωστόσο, είναι ενέργεια χαμηλής πυκνότητας και χαρακτηρίζεται από ασυνέχεια στο χρόνο [10]. Στα ανώτατα στρώματα της ατμόσφαιρας η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθετη επιφάνεια είναι 1367 W/m^2 και χαρακτηρίζεται ως ηλιακή σταθερά I_{sc} [11]. Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται σε ένα εύρος $\pm 1,5\%$ λόγω της μεταβολής της εκπομπής της από τον ήλιο και κατά 3% λόγω της μεταβολής της απόστασης Γη-Ήλιος. Συνεπακόλουθα, η εξάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας από τον χρόνο είναι :

$$I_{on} = I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (1.11)$$

Κατά τη διαδρομή της, η ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας χάνει την ένταση της λόγω ανακλάσεων, απορροφήσεων και σκεδάσεων. Κατ' αυτό τον τρόπο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης έχει μικρότερη ένταση.

1.5.2. Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Κατά την διέλευση των ηλιακών ακτινών από την ατμόσφαιρα της γης τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας αλλά και σε αιωρήματα όπως η σκόνη και οι υδρατμοί. Ένα ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται από συστατικά της ατμοσφαιράς και ακόμη ένα φτάνει στην επιφάνεια. Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας αποτελεί την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάποια επιφάνεια.

$$I = I_B + I_D \quad (1.12)$$

όπου I η ολική ηλιακή ακτινοβολία, I_B η ηλιακή ακτινοβολία η οποία δεν έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και I_D η ηλιακή ακτινοβολία που έχει αλλάξει διεύθυνση από σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Στην περίπτωση που η επιφάνεια είναι κεκλιμένη τότε στον τύπο προστίθεται η ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος.

$$I_T = I_{B,T} + I_{D,T} + I_{GR} \quad (1.13)$$

όπου I_T η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, $I_{B,T}$ η άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, $I_{D,T}$ η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο και I_{GR} η διάχυτη ανακλώμενη από το έδαφος.

Η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία μεταβάλλονται με βάση τα παρακάτω:

- Την ημέρα του έτους
- Την κατάσταση της ατμόσφαιρας
- Το ύψος του Ήλιου

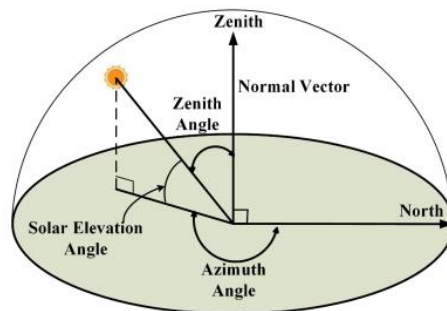
Η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες νέφωσης και την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών. Τις ημέρες ηλιοφάνειας η άμεση ακτινοβολία αποτελεί την μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ακτινοβολίας. Στον αντίποδα, σε ημέρες με ισχυρή νέφωση, η συνολική ακτινοβολία οφείλεται στην ύπαρξη της διάχυτης ακτινοβολίας. Η μορφολογία του εδάφους, καθώς και το χρώμα του επηρεάζουν τη διάχυτη ανακλώμενη ακτινοβολία. Ο συντελεστής διάχυτης ανάκλασης ονομάζεται albedo. Η μεταβλητότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος είναι υψηλή. Εκτός της διαρκούς μεταβολής λόγω της κίνησης του Ήλιου, απροσδιόριστες μεταβολές προκαλούνται και από τις συνθήκες ατμόσφαιρας.

Ο λόγος του μήκους της διαδρομής των ακτινών του Ήλιου L προς το πάχος H της ατμόσφαιρας ονομάζεται αέρια μάζα, συμβολίζεται με m ή AM και δίνεται από την σχέση:

$$m = \frac{L}{H} \quad (1.14)$$

Ο λόγος αυτός φανερώνει πόσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα συγκριτικά με την κατακόρυφη διαδρομή [12]. Η αέρια μάζα σχετίζεται άμεσα με τη ζενίθια γωνία z . Ζενίθια γωνία είναι η γωνία που σχηματίζεται

μεταξύ της καθέτου στο οριζόντιο επίπεδο ενός τόπου και της ευθείας που ενώνει τον τόπο με τον ήλιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



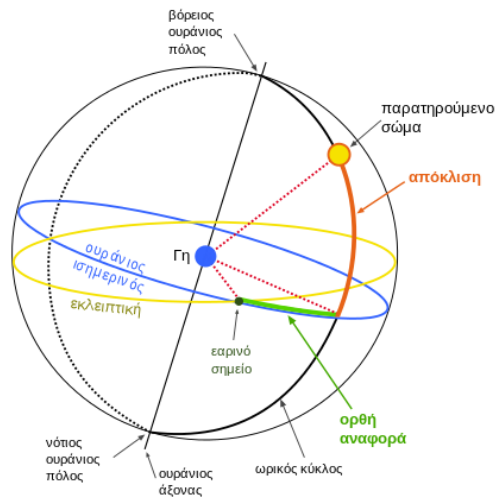
Σχήμα 2 : Προσδιορισμός ζενίθιας γωνίας [13]

Προσεγγιστικά μπορεί να γραφεί ως:

$$m = \frac{1}{\cos z} \quad (1.15)$$

1.5.3. Γεωμετρικά στοιχεία Γης

Η Γη ακολουθεί ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, με εκκεντρότητα 0.0167 και μεγάλο ημιάξονα $1.5 \cdot 10^{10} \text{m}$ [14]. Ακόμη η περίοδος κίνησης είναι 365.25 μέρες. Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η κίνηση της Γης πρέπει να οριστεί η ουράνια σφαίρα. Η ουράνια σφαίρα είναι μια φανταστική σφαίρα άπειρης ακτίνας με κέντρο το κέντρο της Γης, πάνω στην επιφάνεια της οποίας γίνεται υπόθεση ότι προβάλλονται όλα τα ουράνια σώματα ανεξάρτητα από της απόστασή τους από τη Γη. Οι ουράνιοι πόλοι αποτελούν προέκταση των γεωγραφικών πόλων και το ισημερινό επίπεδο της Γης είναι κάθετο στον άξονα περιστροφής της και αυτό συνεπάγεται ότι το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού είναι φυσική προέκταση του γήινου [15]. Το επίπεδο της κίνησης που ακολουθεί η Γη γύρω από τον Ήλιο τέμνει την ουράνια σφαίρα κατά ένα μέγιστο κύκλο. Κατά αυτό τον τρόπο η κίνηση αυτή διαγράφει έλλειψη. Ο άξονας της έλλειψης είναι η διάμετρος της ουράνιας σφαίρας που είναι κάθετη προς την εκλειπτική τροχιά και τα σημεία της τροχιάς που τέμνουν την ουράνια σφαίρα ονομάζονται βόρειος και νότιος πόλος της εκλειπτικής. Ο άξονας της εκλειπτικής σχηματίζει γωνία με τον άξονα περιστροφής της Γης ίση με 23.5° (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Ουράνια σφαίρα

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%85%CF%81%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%B3%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B5%CF%82

Το γεωγραφικό μήκος και πλάτος χρησιμοποιούνται για να δηλωθεί η απόσταση ενός αντικειμένου από τον μεσημβρινό που διέρχεται από το παλιό Βασιλικό Αστεροσκοπείο του Greenwich (πρώτος Μεσημβρινός) και από τον ισημερινό, αντίστοιχα. Το γεωγραφικό μήκος προσδιορίζεται, πάνω στον ισημερινό, από 0° έως +180° δυτικά του μεσημβρινού του Greenwich κι από 0° έως -180° ανατολικά του και συμβολίζεται με λ. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται πάνω στο μεσημβρινό ενός τόπου και συμβολίζεται με γράμμα φ. Λαμβάνει τιμές από 0° έως +90° βόρεια και από 0° έως -90° νότια του ισημερινού.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι θέσεις των ουράνιων σωμάτων χρησιμοποιείται το αλτιζιμουθιανό σύστημα συντεταγμένων. Η θέση ενός αστέρα προσδιορίζεται από το αζιμούθιο (A) και το ύψος (u). Ύψος ονομάζεται η γωνιακή απόσταση ενός σώματος πάνω από τον ορίζοντα του τόπου όπου βρίσκεται ο παρατηρητής και μετράται πάνω στον κατακόρυφο του σώματος με αρχή μέτρησης τον ορίζοντα δηλαδή 0° έως 90° στο ζενίθ. Το αζιμούθιο είναι η γωνιακή απόσταση ενός σώματος και μετράται πάνω στον ορίζοντα με αρχή μέτρησης από το Βορρά από 0° κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού προς την Ανατολή (90°), το Νότο (180°) και τη Δύση (270°) μέχρι τον κατακόρυφο του σώματος.

Το ύψος και το αζιμούθιο του Ήλιου μπορούν να προσδιοριστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sin u = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega \quad (1.16)$$

$$\sin A = -\frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \nu} \quad (1.17)$$

όπου δ η απόκλιση του Ήλιου την συγκεκριμένη μέρα και ω η ωριαία γωνία. Η ωριαία γωνία είναι η γωνία που σχηματίζει ο μεσημβρινός του τόπου με τον μεσημβρινό του Ήλιου. Υπολογίζεται, πάνω στον ισημερινό, με αρχή τον μεσημβρινό του Ήλιου και κυμαίνεται από 0° έως 360° . Η απόκλιση είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της Γης με το κέντρο του Ήλιου και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284+n}{365} \right) \quad (1.18)$$

όπου n η ημέρα του έτους ξεκινώντας από την 1^η Ιανουαρίου.

2. Ημιαγωγοί

2.1. Δομή ημιαγωγών

Οι ημιαγωγοί έχουν την ικανότητα απορρόφησης φωτός και την διανομή μέρους ενέργειας των απορροφούμενων φωτονίων στους φορείς αγωγιμότητας (ηλεκτρόνια και οπές). Μια ημιαγώγιμη δίοδος διαχωρίζει και συλλέγει τους φορείς και επιτρέπει την αγωγή ρεύματος προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η ημιαγώγιμη δίοδος δημιουργείται με μεταλλουργική ένωση ενός ημιαγωγού τύπου n με έναν τύπου p[16].

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί μέγεθος που επιτρέπει τον διαχωρισμό των υλικών σε μονωτές, αγωγούς και ημιαγωγούς. Η ειδική αντίσταση των ημιαγωγών έχει εύρος από 10^{-2} έως 10^9 Ωcm. Οι ενδογενής ημιαγωγοί ονομάζονται οι ημιαγωγοί που έχουν την ίδια στοιχειακή σύνθεση σε όλη την έκτασή τους, ενώ οι ημιαγωγοί προσμίξεων δημιουργούνται με εμπλουτισμό από άτομα άλλου στοιχείου σε ενδογενή ημιαγωγό.

Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές διατάξεις είναι υψηλής καθαρότητας κρυσταλλικά υλικά. Η κρυσταλλικότητα των υλικών φανερώνει ευθυγράμμιση των ατόμων με περιοδικότητα που σε συνδυασμό με τις ατομικές ιδιότητες των στοιχείων που τα απαρτίζουν, προσδίδουν τις ηλεκτρονικές ιδιότητες. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται τμήμα του περιοδικού πίνακα, όπου τα πιο κοινά ημιαγώγιμα υλικά φαίνονται με μπλε χρώμα.

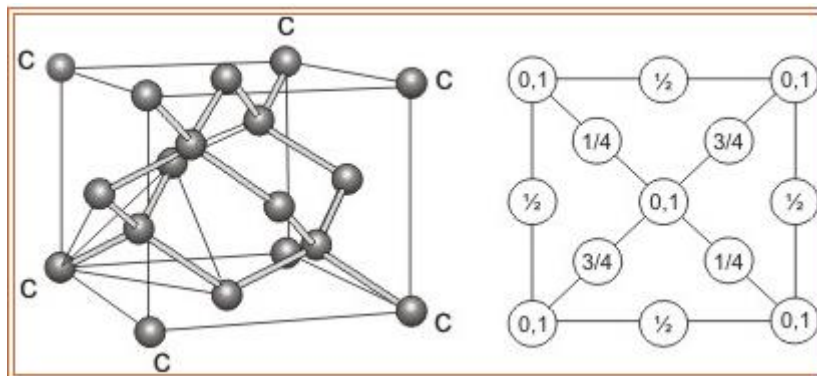
									VIIIA 2 He 4.003
		III A	IV A	V A	VI A	VII A			
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183		
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948		
IB	IIB								
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80		
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30		
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)		

Σχήμα 4: Τμήμα του περιοδικού πίνακα
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>

Οι στοιχειώδεις ημιαγωγοί σχηματίζονται από έναν απλό τύπο ατόμου της στήλης IV A του περιοδικού πίνακα των στοιχείων ενώ οι σύνθετοι ημιαγωγοί μπορούν να σχηματιστούν από συνδυασμούς των στοιχείων των στηλών III A και V A ή IIB και

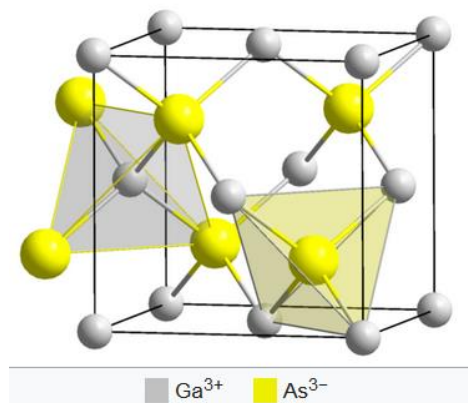
VIA [17]. Το γερμάνιο ήταν από τους πρώτους ημιαγωγούς που χρησιμοποιήθηκαν αλλά σύντομα αντικαταστάθηκε από το πυρίτιο. Το ενεργειακό χάσμα του γερμανίου είναι 0,66eV ενώ του πυριτίου είναι 1,12 eV, δίνοντας πλεονέκτημα στις εφαρμογές του πυριτίου για χρήση του σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Το πυρίτιο βρίσκεται στην στήλη IVA, που σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, τα οποία μοιράζεται με τα γειτονικά άτομα σχηματίζοντας ομοιοπολικούς δεσμούς. Στην περίπτωση του κρυσταλλικού πυριτίου, τα άτομα είναι διατεταγμένα σε δομή διαμαντιού (τετραεδρική διάταξη- sp^3 υβριδισμός), στην οποία η γωνία μεταξύ των δεσμών κάθε ατόμου με το γειτονικό του είναι $109,5^\circ$. Η διεύθυνση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από δυο αλληλοδιεισδυτικά εδροκεντρομένες κυβικές μοναδιαίες κυψελίδες, όπου η δεύτερη κυψελίδα μετατοπίζεται κατά το ένα τέταρτο της απόστασης κατά μήκος της διαγωνίου της πρώτης. Δομή σφαλερίτη εμφανίζουν οι ημιαγωγοί όπως GaAs και CdTe, οι οποίες είναι στερεές ενώσεις ομοιοπολικής κατασκευής ανάμεσα σε στοιχεία των στηλών IIIA και VA ή IIB και VIA του περιοδικού πίνακα αντίστοιχα.



Σχήμα 5: Δομή Διαμαντιού

https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/113104005/lecture2/2_8.htm



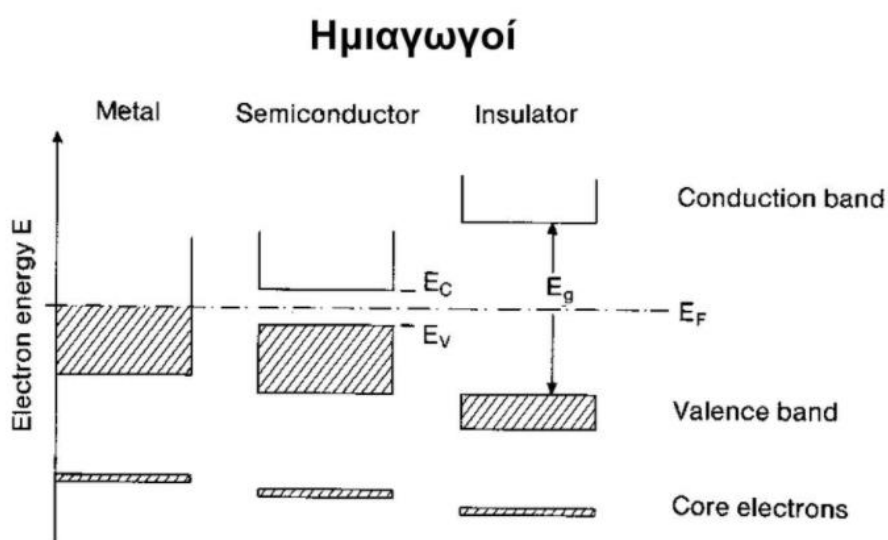
Σχήμα 6: Δομή Σφαλερίτη

http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/bands/bandstructures/GaAs/gaas_bands.html

2.2.Ενεργειακές ζώνες

Η ηλεκτρική συμπεριφορά των στερεών ερμηνεύεται με βάση το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών. Σύμφωνα με τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών, οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων ενός κρυσταλλικού πλέγματος διευρύνονται σε ζώνες που αποτελούνται από πλήθος ενεργειακών σταθμών οι οποίες βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Σε έναν κρύσταλλο υπάρχουν τρεις ενεργειακές ζώνες: η ζώνη σθένους (η ανώτερη ζώνη που είναι πλήρως κατειλημμένη από ηλεκτρόνια σε θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός), η απαγορευμένη ζώνη (δεν έχει καμία ενεργειακή στάθμη) και η ζώνη αγωγιμότητας (η επόμενη ενεργειακή ζώνη που δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός). Ενεργειακό χάσμα, E_g , είναι η ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Ουσιαστικά, το ενεργειακό χάσμα είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και της κορυφής της ζώνης σθένους.

Με την αύξηση θερμοκρασίας, ορισμένα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας και δημιουργούν κενές θέσεις (οπές), με αποτέλεσμα η ζώνη σθένους να είναι μερικώς συμπληρωμένη. οι οπές δρουν ως φορείς θετικού φορτίου. Με την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές που βρίσκονται στη ζώνη σθένους συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του υλικού.

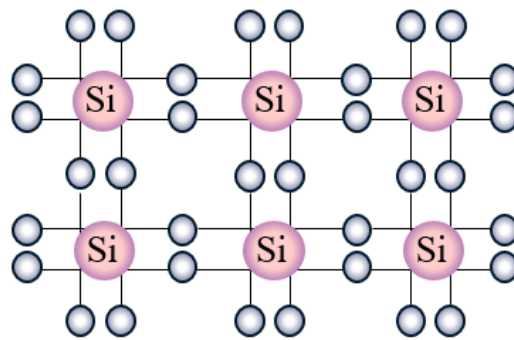


Σχήμα 7: Ενεργειακές ζώνες στα στερεά (μέταλλα, ημιαγωγοί, μονωτές)
<https://slideplayer.gr/slide/12211721/>

Ανάλογα με το ενεργειακό χάσμα τα στερεά μπορούν να είναι μέταλλα, ημιαγωγοί ή μονωτές. Τα μέταλλα παρουσιάζουν μηδενικό ενεργειακό χάσμα όταν επικαλύπτεται η ζώνη σθένους με τη ζώνη αγωγιμότητας. Οι ημιαγωγοί έχουν πλήρως κατειλημμένη τη ζώνη σθένους και ενεργειακό χάσμα εύρους από 0.2eV έως 2.5eV. οι μονωτές έχουν πλήρη ζώνη σθένους και μεγάλο ενεργειακό χάσμα (πάνω από 2.5eV) που καθιστά τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας πολύ δύσκολή.

2.3. Το πυρίτιο

Η ηλεκτρονιακή διάταξη ενός απομονωμένου ατόμου πυριτίου είναι $[Ne]3s^2p^2$, όταν όμως βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με άλλα άτομα, τότε τα ενεργειακά επίπεδα 3s και 3p απέχουν πολύ λίγο μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν. Αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης είναι η δημιουργία τεσσάρων νέων υβριδικών ($\psi_{υβριδικά}$) τα οποία διατάσσονται συμμετρικά. Τα τέσσερα υβριδικά τροχιακά έχουν από ένα ηλεκτρόνιο το καθένα και είναι κατά το ήμισυ κατειλημμένα[18]. Το κάθε τροχιακό του ατόμου του πυριτίου επικαλύπτεται με ένα τροχιακό ενός γειτονικού ατόμου πυριτίου δημιουργώντας έναν ομοιοπολικό δεσμό με ηλεκτρόνια που είναι ζευγαρωμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Δισδιάστατη απεικόνιση ενός κρυστάλλου Si
https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi_basic.html

Ένα υβριδικό τροχιακό Si μπορεί να επικαλύπτεται με τα τροχιακά ενός άλλου ατόμου Si με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι τα δύο τροχιακά να βρίσκονται σε συμφωνία φάσης και δημιουργούνται δεσμικά τροχιακά και ο άλλος τρόπος να υπάρχει ασυμφωνία φάσης και δημιουργούνται αντιδεσμικά μοριακά τροχιακά. Στην πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί ενέργεια E_{Δ} και στη δεύτερη E_{Λ} . Σε ένα κρύσταλλο υπάρχουν N άτομα πυριτίου. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δεσμικών τροχιακών έχουν σαν αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του ενεργειακού επιπέδου E_{Δ} και τη δημιουργία N

διαφορετικών επιπέδων(δημιουργία ζώνης σθένους). Οι αλληλεπιδράσεις των N αντιδεσμικών τροχιακών έχουν σαν αποτέλεσμα το διαχωρισμό του ενεργειακού επιπέδου E_A και τη δημιουργία N διαφορετικών επιπέδων (δημιουργία ζώνης αγωγιμότητας, η οποία είναι εντελώς κενή)

Τα δύο ηλεκτρόνια των δέσμιων τροχιακών έχουν αντιπαράλληλο spin. Όταν σπάσει ένας δεσμός μεταξύ δύο ατόμων πυριτίου τότε δημιουργείται ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, το οποίο έχει τη δυνατότητα να μετακινείται στο εσωτερικό του κρυστάλλου. Ο σπασμένος δεσμός πλέον έχει απουσία αρνητικού φορτίου και η περιοχή είναι θετικά φορτισμένη. Το κενό που δημιουργείται στη θέση του ηλεκτρονίου καλείται οπή. Όταν ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο μεταφερθεί και καταλάβει τη θέση του σπασμένου δεσμού, τότε υπάρχει μετατόπιση της οπής στη θέση από την οποία προήλθε το ηλεκτρόνιο. Με αυτόν το μηχανισμό, οι οπές συνεισφέρουν στη μεταφορά ηλεκτρισμού.

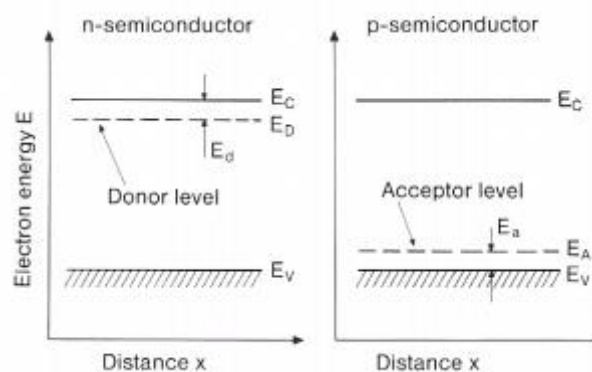
2.4. Ημιαγωγοί προσμίξεων

Η αντικατάσταση ατόμων στο πλέγμα ενός ενδογενούς ημιαγωγού με άτομα μεγαλύτερου ή μικρότερου σθένους ονομάζεται νόθευση (doping). Ανάλογα με το σθένος των ατόμων πρόσμιξης ταξινομούνται σε ημιαγωγούς τύπου n και τύπου p . Η εισαγωγή προσμίξεων συμβάλλει στην αγωγιμότητα του ημιαγωγού (εξαιτίας των επιπλέον φορέων αγωγιμότητας)[19].

Οι ημιαγωγοί n -τύπου δημιουργούνται με την πρόσμιξη ατόμων μεγαλύτερου σθένους (συνήθως στοιχείων της ομάδας VA του περιοδικού πίνακα). Τα άτομα της πρόσμιξης προκαλούν εισαγωγή πρόσθετης επιτρεπόμενης ενεργειακής στάθμης, εντός της απαγορευμένης ζώνης (κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας) και λειτουργούν ως δότες ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια από τη στάθμη πρόσμιξης, απορροφώντας ένα μικρό ποσό ενέργειας μπορούν εύκολα να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας και να καταστούν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η παρουσία των ατόμων της πρόσμιξης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πρόσθετων ελεύθερων ηλεκτρονίων (φορείς πλειονότητας).

Οι ημιαγωγοί p -τύπου δημιουργούνται με την πρόσμιξη ατόμων μικρότερου σθένους (συνήθως στοιχείων της ομάδας IIIA του περιοδικού πίνακα). Τα άτομα της πρόσμιξης προκαλούν εισαγωγή πρόσθετης επιτρεπόμενης ενεργειακής στάθμης, εντός της απαγορευμένης ζώνης (κοντά στη ζώνη σθένους) και λειτουργούν ως δέκτες ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους, απορροφώντας ένα μικρό ποσό ενέργειας μπορούν εύκολα να μεταπηδήσουν στη στάθμη πρόσμιξης και να

δημιουργήσουν οπές. Η παρουσία των ατόμων της πρόσμιξης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση περισσείας οπών στη ζώνη σθένους (φορείς πλειονότητας).



Σχήμα 9: Διαγράμματα ενεργειακών σταθμών ημιαγωγών προσμίξεων
http://users.auth.gr/~paloura/sterea_MA8HMA%205.pdf

2.5. Ηλεκτρικές επαφές

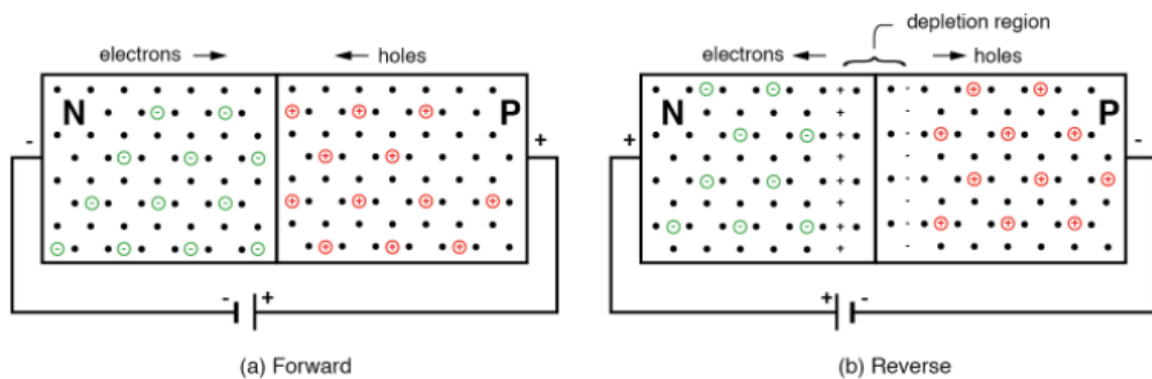
Μια επαφή ή δίοδος p-n δημιουργείται με μεταλλουργική επαφή δύο ημιαγωγών που διαθέτουν διαφορετικό είδος φορέων πλειονότητας (οπές και ηλεκτρόνια)[20]. Τα δύο τμήματα προκύπτουν είτε με ομοένωση είτε με ετεροένωση. Στην πρώτη περίπτωση μια επαφή p-n αναπτύσσεται όταν δημιουργηθεί επαφή δύο περιοχών από το ίδιο μονοκρυσταλλικό υλικό με διαφορετικό είδος προσμίξεων ενώ στη δεύτερη περίπτωση το τμήμα ενός ημιαγωγού τύπου n είναι από διαφορετικό υλικό από το τμήμα του ημιαγωγού p (π.χ. p-Cu₂/n-CdS).

Στην περιοχή όπου οι δύο ημιαγωγοί έρχονται σε επαφή, προκαλείται διάχυση φορέων από τη μια περιοχή στην άλλη. Μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την περιοχή n, εισέρχονται στην περιοχή p και επανασυνδέονται με τις οπές. Τα ηλεκτρόνια αυτά αφήνουν την περιοχή n θετικά φορτισμένη (δημιουργώντας οπές) και αντίστροφα η περιοχή p παρουσιάζει πλεόνασμα ηλεκτρονίων. Τα φορτισμένα άτομα παράγουν ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή γύρω από την επαφή, το οποίο εμποδίζει τη διάχυση των φορέων πλειοψηφίας δημιουργώντας μια ζώνη εξάντλησης φορέων.

Η σύνδεση της περιοχής p με τον θετικό πόλο μιας μπαταρίας και η περιοχή n με τον αρνητικό καλείται ορθή πόλωση [20]. Ο θετικός πόλος αποσπά ηλεκτρόνια από την περιοχή p με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες οπές και ο αρνητικός πόλος παρέχει ηλεκτρόνια στην περιοχή n. Η κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών έχει

κατεύθυνση προς την περιοχή της επαφής και εκεί επανασυνδέονται. Κατά την ορθή πόλωση η ζώνη εξάντλησης περιορίζεται ή εκμηδενίζεται.

Η σύνδεση της περιοχής p με τον αρνητικό πόλο μιας μπαταρίας και η περιοχή n με τον θετικό καλείται ανάδρομη πόλωση [20]. Ο αρνητικός πόλος έλκει τις οπές της περιοχής p και τα ηλεκτρόνια της περιοχής n έλκονται από το θετικό πόλο. Οι φορείς αγωγιμότητας απομακρύνονται από την περιοχή της επαφής με αποτέλεσμα η ζώνη εξάντλησης να διευρύνεται αρκετά. Η νέα ζώνη καθιστά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος δύσκολή και συμπεριφέρεται σαν μονωτής.



Σχήμα 10: Επαφή p-n σε ορθή(αριστερά) και ανάστροφη (δεξιά) πόλωση
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/the-p-n-junction/>

3.Φωτοβολταϊκά συστήματα

3.1.Εισαγωγή

Ο Γάλλος φυσικός Alexander Edmund Becquerel ανακάλυψε το 1839 αιώνα ότι είναι δυνατόν να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν ημιαγώγιμα υλικά εκτίθενται στο ηλιακό φως, καθώς πειραματιζόταν με ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελούμενο από δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε αγωγίμο υγρό[21]. Μερικές δεκαετίες αργότερα οι Αμερικάνοι Adams και Smith κάνοντας χρήση ενός κρύσταλλου από Σελήνιο, παρουσίασαν πειραματικά το φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό, αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το 1904, ο Albert Einstein γράφει την πλήρη θεωρία γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τιμήθηκε με βραβείο Nobel. Το 1918, ο Jan Czochralski κατασκεύασε το πρώτο στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο που κατασκευάστηκε το 1956 είχε απόδοση περίπου 6% ενώ αργότερα κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκού πυριτίου με απόδοση 10%[22].

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν οι προοπτικές για την εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυττάρων. Τη δεκαετία του 70 η ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων για διαστημικές εφαρμογές έφτανε μόλις τα $500m^2$. Στόχος της επιστημονικής κοινότητας ήταν η μείωση του κόστους παραγωγής των φωτοβολταϊκών, με την εύρεση νέων φθηνότερων υλικών [23]. Με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση των αναγκών για δαπάνη ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά αποτελούν πλέον μέρος της καθημερινότητας. Η εφαρμογή τους καλύπτει ένα φάσμα που καλύπτει τη λειτουργία συστημάτων ενέργειας μικρής κλίμακας μέχρι και εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, με απόδοση εύρους από 12% έως 18 %.

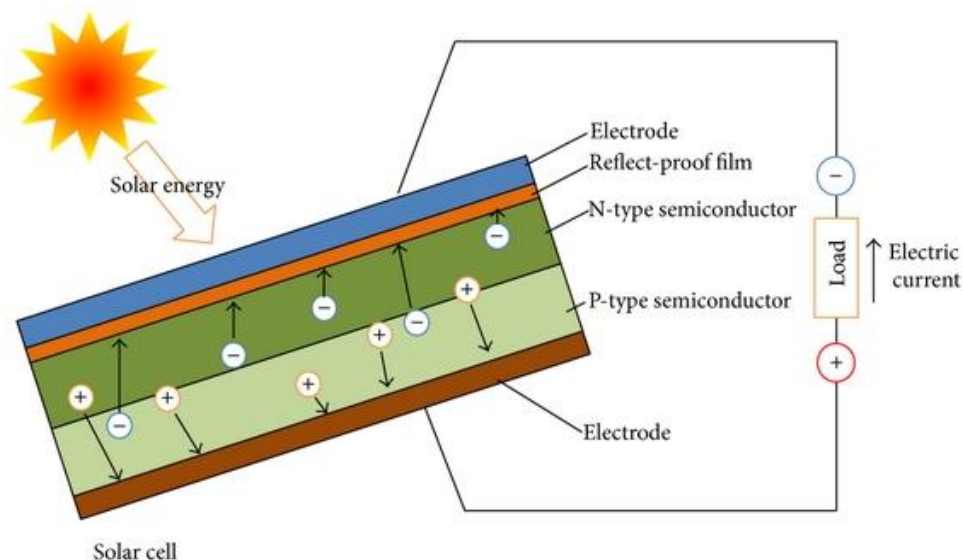
3.2.Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων στηρίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικού (συνεχούς-DC) ρεύματος από ημιαγωγούς στους οποίους διέρχονται φωτόνια [24]. Όσο παρέχεται ηλιακό φως στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, τόσο αυτό συνεχίζει να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Τα ηλιακά κύτταρα (solar cells) κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, τα οποία έχουν ασθενώς συνδεδεμένα ηλεκτρόνια που καταλαμβάνουν την ενεργειακή ζώνη σθένους. Όταν η ενέργεια υπερβεί ένα συγκεκριμένο κατώφλι (ενεργειακό χάσμα), τότε οι δεσμοί των ηλεκτρονίων σθένους σπάνε και το ηλεκτρόνιο μπορεί να μετακινηθεί σε μια νέα ενεργειακή ζώνη, τη ζώνη

αγωγιμότητας. Όσο βρίσκεται στην ζώνη αγωγιμότητας το ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο και μπορεί να “άγει” ηλεκτρισμό στο εσωτερικό του υλικού. Συνεπώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας διαχωρίζονται από τα ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους με το ενεργειακό χάσμα.

Το φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία παρέχουν στα ηλεκτρόνια την απαιτούμενη ενέργεια για την υπερπήδηση του ενεργειακού χάσματος. Όταν το φωτοβολταϊκό κύτταρο εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία, τα φωτόνια δίνουν στα ηλεκτρόνια σθένους την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου να σπάσουν τους δεσμούς, μετακινώντας τα από την ζώνη σθένους (Valence Band) στη ζώνη αγωγιμότητας (Conduction Band).

Όταν φτάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από μια ειδικά κατασκευασμένη επαφή που τα οδηγεί στο εξωτερικό κύκλωμα. Το εξωτερικό κύκλωμα είναι ουσιαστικά οι ανθρώπινες ενεργειακές ανάγκες δηλαδή το ρεύμα που τροφοδοτεί διάφορες συσκευές. Λόγω της κίνησης των ηλεκτρονίων στο κύκλωμα χάνουν ενέργεια. Αποκαθίστανται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο μέσω βρόγχου επιστροφής από μια δεύτερη επαφή, η οποία τα επιστρέφει στην ζώνη σθένους με την ίδια ενέργεια με την οποία ξεκίνησαν.



Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας φωτοβολταϊκού κελιού [25]

Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια διαφορετικού μήκους κύματος και ενέργειας. Τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη του ενεργειακού διάκενου αποτυγχάνουν να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια και αυτή η ενέργεια ταξιδεύει στο εσωτερικό του ηλιακού κυττάρου και απορροφάται στο πίσω μέρος με τη μορφή θερμότητας, έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών (20° – 30° C υψηλότερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος) όταν βρίσκονται σε άμεσο ηλιακό φως .

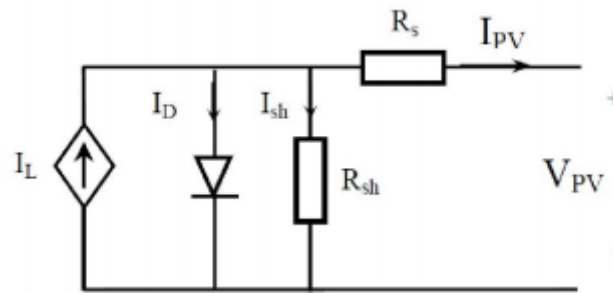
Στο κέντρο κάθε φωτοβολταϊκού κυττάρου βρίσκεται μια επαφή pn. Οι επαφές pn προκύπτουν από πρόσμιξη που παράγουν ζώνες αγωγιμότητας ή σθένους, με την μια πλευρά να γίνεται ημιαγωγός τύπου n (πλειονότητα αρνητικών φορέων) και την άλλη ημιαγωγός τύπου p (πλειονότητα θετικών φορέων). Το κύριο ημιαγωγικό υλικό που χρησιμοποιείται στις φωτοβολταϊκές διατάξεις είναι το πυρίτιο (Si) μονοκρυσταλικό, πολυκρυσταλικό και άμορφο. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι το *GaAs*, *GaInP*, *Cu(InGa)Se₂* και *CdTe* κλπ.

Το φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι μια ημιαγώγιμη δίοδος που απορροφά και μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό φωτοβολταϊκών κυττάρων που διασυνδέονται και ενθυλακώνονται. Το μεταλλικό πλέγμα, στο οποίο τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά κύτταρα σχηματίζει μια από της ηλεκτρικές επαφές της διόδου. Υπάρχει ένα ανακλαστικό στρώμα μεταξύ των γραμμών πλέγματος που αυξάνει την ποσότητα του φωτός που μεταδίδεται στον ημιαγωγό. Η άλλη ηλεκτρική επαφή της διόδου σχηματίζεται από ένα μεταλλικό στρώμα στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού κυττάρου. Επιπλέον, το παραγόμενο ρεύμα μετατρέπεται από DC σε AC μέσω μετασχηματιστή.

3.3.Ισοδύναμο Ηλεκτρικό κύκλωμα Φωτοβολταϊκού στοιχείου

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορούν να εκτιμηθούν με τη θεώρηση ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 12. Στο ισοδύναμο κύκλωμα υπάρχουν δύο αντιστάσεις, η R_s και η R_{sh} . Η R_s παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-N), που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια

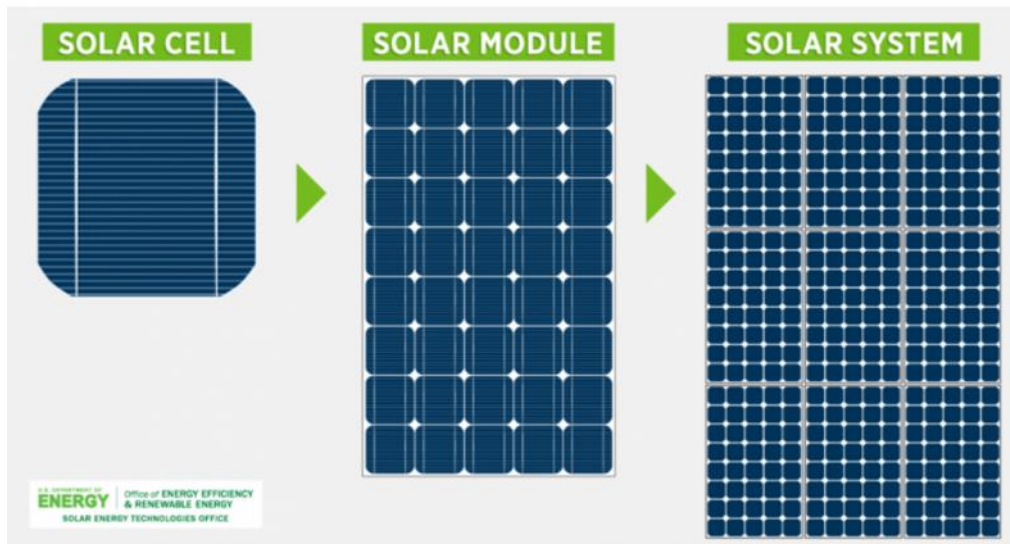
μεταξύ ημιαγωγού – ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Η αντίσταση R_s είναι συνήθως μικρότερη από 1Ω . Η R_{sh} παριστάνει τις διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή p-n (επανασύνδεση), είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου και δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την επιφάνεια του κελιού ούτε μεταξύ δυο όμοιων κελιών. Η αντίσταση R_{sh} είναι συνήθως της τάξης των $k\Omega$.



Σχήμα 12: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κελιού [26]

3.4.Κατασκευαστικά στοιχεία φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η πληθώρα των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατασκευάζεται από πυρίτιο. Αρχικά συνδέονται σε σειρά ένα πλήθος φωτοβολταϊκών κυττάρων (συχνότερα 36) με σκοπό την ανάπτυξη τάσης ανοιχτού κυκλώματος έως 22 V και έπειτα τοποθετούνται σε επίπεδη γυάλινη πλάκα, η οποία προσαρμόζεται σε μεταλλικό πλαίσιο (αλουμίνιο) υψηλής αντοχής. Η πίσω όψη καλύπτεται από ειδικό πλαστικό ενθυλάκωσης. Η τελική κατασκευή πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές ώστε να διαθέτει την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, τις σωστές υποδοχές στήριξης και την κατάλληλη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Ακόμη, καθίσταται απαραίτητο η κατασκευή να είναι ανθεκτική σε καταστάσεις υψηλής αλατότητας, σε χαλαζοπτώσεις και σε θερμικές καταπονήσεις. Η κατασκευή η οποία περιγράφεται παραπάνω ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο και αποτελεί την τυπική βιομηχανική μονάδα. Οι αξιοποιήσιμες τιμές ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου κυμαίνονται από 25W έως 85W . Πρόσφατες κατασκευές διαθέτουν μεγαλύτερη ισχύ. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν σχήμα τετραγωνικό ή τετραγωνικό με κομμένες τις γωνίες του όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.



Σχήμα 13: Φωτοβολταϊκό κύτταρο, μονάδα και σύστημα
<https://www.energy.gov/eere/solar/articles/pv-cells-101-primer-solar-photovoltaic-cell>

Η όψη του φωτοβολταϊκού καλύπτεται από διαφανή μεμβράνη (SiO_2 , AlO_3 , TiO_2 , Si_3N_4 , MgF_2). Ο δείκτης διάθλασης την μεμβράνης είναι τέτοιος ώστε για τιμές μηκών κύματος κοντά στα 600nm δηλαδή κοντά στο μέγιστο της ηλιακής ενέργειας (480nm) να ελαχιστοποιείται η ανάκλαση του φωτός. Αυτό αποτελεί το αντανάκλαστικό στρώμα. Πρόσθετα τα μεταλλικά ηλεκτρόδια που συλλέγουν τους φορείς τοποθετούνται κοντά στην ενεργό περιοχή. Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται πίσω από το φωτοβολταϊκό αποτελεί ένα λεπτό και πυκνό μεταλλικό πλέγμα, ενώ το ηλεκτρόδιο που τοποθετείται στην πάνω όψη είναι ένα μεταλλικό πλέγμα με σχήμα αραιής μεταλλικής σχάρας με σκοπό την συλλογή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από όλη την έκταση της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού συνδυάζοντας την ελαχιστοποίηση της μείωσης της διέλευσης του φωτός.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Ο συνδυασμός πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η φωτοβολταϊκή συστοιχία. Ένα σύνολο συστοιχιών δημιουργούν το φωτοβολταϊκό συγκρότημα. Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Τα αυτόνομα συστήματα
- Τα συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα

Τα αυτόνομα συστήματα δεν τροφοδοτούνται από το δημόσιο δίκτυο και συνήθως συνδυάζονται με ηλεκτρικό συσσωρευτή. Σε ένα σύστημα το οποίο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, η ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος καταλήγει στο κτίριο που

βρίσκεται, μέσω ενός μετατροπέα ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στα περισσότερα αυτόνομα συστήματα είναι απαραίτητη η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και μετατροπή της σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος. Άρα, η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος καθιστά αναγκαίο τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων. Τα βασικότερα τμήματα ενός φωτοβολταϊκού σταθμού είναι οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και τα ηλεκτρονικά ισχύος όπως οι μετατροπείς τάσεως σε συνεχή ή εναλλασσόμενη για τα συστήματα ελέγχου της λειτουργίας φόρτισης.

3.5.Απόδοση

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει ως αντίκτυπο την αύξηση της απόδοσης τους, τη μείωση του κόστους και την αύξηση της παραγωγής τους. Ακόμη, σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών αποτέλεσε η εφαρμογή τους σε ευρεία κλίμακα. Η απόδοση των σύγχρονων φωτοβολταϊκών πλαισίων από κρυσταλλικό πυρίτιο βρίσκεται στο εύρος του 14% έως 17%. Στον αντίποδα, τα φωτοβολταϊκά προηγούμενης γενιάς (από άμορφο πυρίτιο) η απόδοση δεν υπερβαίνει το 6%. Στην κατηγορία των φωτοβολταϊκών στοιχείων πολυκρυσταλλικού πυριτίου συνδυάζεται: καλή ποιότητα κατασκευής, καλή απόδοση (13%-14%) και μικρότερο κόστος κατασκευής συγκριτικά με τα μονοκρυσταλλικά, με τα οποία έχουν τον ίδιο περίπου χρόνο ζωής. Σήμερα, δίδονται εγγυήσεις καλής λειτουργίας για τουλάχιστον 30 χρόνια και συνάμα δίνονται και εγγυήσεις αντικατάστασης όσων πλαισίων η απόδοση μειώνεται περισσότερο του 10% στη δεκαετία ή 20% στα 25 χρόνια.

Καθοριστικοί παράγοντες για την μεταβολή της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αποτελούν η πυκνότητα της ακτινοβολίας και η θερμοκρασία. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας της ακτινοβολίας και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού. Οι υψηλές τιμές θερμοκρασιών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η υγρασία και άλλες αλλοιώσεις στη δομή του φωτοβολταϊκού μειώνουν σταδιακά την απόδοση του. Ακόμη, ξένα σώματα και σκόνες στην επιφάνεια των πλαισίων ελαττώνουν την απόδοση τους.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την κλίση και τον προσανατολισμό τους. Η απόκλιση από το οριζόντιο επίπεδο ονομάζεται κλίση και η απόκλιση από το νότο ονομάζεται προσανατολισμός. Η κλίση που λαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά είναι γύρω από τον οριζόντιο άξονα, ενώ το προσανατολισμός είναι γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών απορρέει από το γεωγραφικό πλάτος τοποθέτησης ενώ ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι ο νότιος. Εξαιτίας της τροχιάς που ακολουθεί ο ήλιος, οι διαφορές στην κλίση ανά εποχή και ανά περιοχή είναι σημαντικές. Για την αύξηση της απόδοσης δύναται να τοποθετηθούν στα πλαίσια μηχανισμοί οι οποίοι κινούν την κατασκευή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα πλαίσια να κινούνται γύρω από έναν άξονα ακολουθώντας μονίμως την τροχιά του ήλιου με σκοπό την αύξηση της λήψης ηλιακής ακτινοβολίας. Ενόσω υπάρχει χαμηλή ηλιοφάνεια, τα φωτοβολταϊκά εκμεταλλευόμενα το διάχυτο φως, παράγουν ηλεκτρισμό έστω και με μειωμένη απόδοση.

Λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λαμβάνει τιμές, οι οποίες μειώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών. Ο σωστός αερισμός συντελεί στη μείωση της θερμοκρασίας έτσι το φωτοβολταϊκό δεν πρέπει να έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια τοποθέτησης του. Η χρήση των υβριδικών φωτοβολταϊκών αποτελεί μια επιλογή για την αύξηση της απόδοσης. Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία μειώνει τη απόδοση του συστήματος. Έπειτα, ένα μέρος της ενέργειας μέσω του υβριδικού συλλέκτη όπου τοποθετείται στο κάτω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου δύναται να χρησιμοποιηθεί για να θερμανθεί αέρας ή νερό. Έτσι, μειώνεται η θερμοκρασία του και αυξάνεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού αλλά και παράγεται ζεστός αέρας ή νερό.

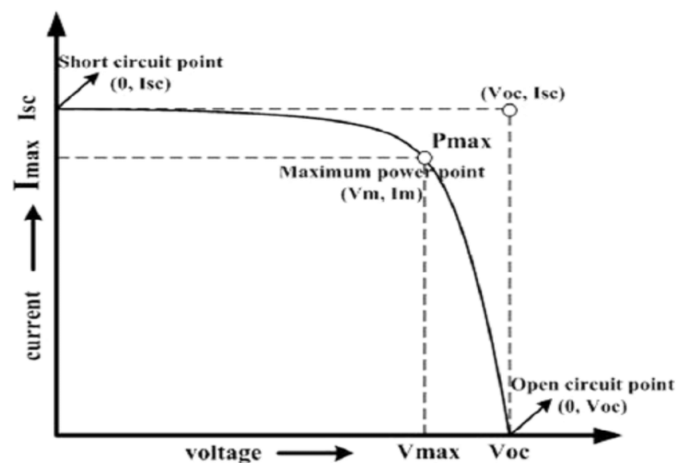
Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης n_m του φωτοβολταϊκού περιγράφεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m(W)$ προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ηλιακή ακτινοβολία $G \cdot S$.

$$n_m = \frac{P_m}{G \cdot S} \quad (3.1)$$

όπου $G(W/m^2)$ η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου και $S(m^2)$ το εμβαδόν του πλαισίου. Η απόδοση εξαρτάται από τις φυσικές

ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο έλεγχος της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού και ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών τμημάτων που σχετίζονται με αυτό, γίνεται μέσω του καθορισμού των σημείων της μέγιστης ισχύος, τα οποία απαιτούν διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Ιδανικά, το σημείο λειτουργίας του για κάθε κατάσταση πρέπει να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος (P_m) για τη δεδομένη κατάσταση. Είναι προφανής η αναγκαιότητα προσαρμογής του σημείου λειτουργίας του φωτοβολταϊκού με το σημείο όπου το σύστημα αποδίδει τη μέγιστη ισχύ. Για την επίτευξη της παραπάνω συνθήκης, δηλαδή τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας ανάλογα με τις συνθήκες που καθορίζουν την καμπύλη $I-V$, γίνεται χρήση ηλεκτρονικής διάταξης παρακολούθησης του σημείου λειτουργίας (maximum power point tracker). Ο προσδιορισμός του σημείου γίνεται πειραματικά αναπαριστώντας γραφικά την ηλεκτρική ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος ($P = I \cdot V$) με δεδομένη ένταση, μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση και τάση V στα άκρα της αντίστασης. Η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού βρίσκεται στην καμπή της καμπύλης $I-V$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 14 στο σημείο P_{max} .



Σχήμα 14: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V

https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-curve-of-a-PV-cell_fig2_313450163

Στο σημείο μέγιστης ισχύος, οι τιμές του ρεύματος και της τάσης αναπαρίστανται με I_m και V_m . Το φωτοβολταϊκό στοιχείο υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας E , μπορεί να προσδώσει μέγιστη δυνατή ισχύ σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (3.2)$$

Εάν η τιμή της τάσης ισούται με μηδέν τότε λαμβάνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και για I ίσο με το μηδέν λαμβάνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Ακόμη, ο λόγος FF ονομάζεται παράγοντας πληρότητας (Fill Factor) και δίνεται από:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.3)$$

Ο παράγοντας πληρότητας εξαρτάται από τις κατασκευαστικές ιδιότητες του φωτοβολταϊκού και τις συνθήκες λειτουργίας του, λαμβάνοντας μέγιστη τιμή $FF=1$. [27] Συνεπακόλουθα, η απόδοση των φωτοβολταϊκών μπορεί να υπολογιστεί και από την παρακάτω σχέση:

$$n_{el} = \frac{I_m \cdot V_m}{S \cdot G} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{S \cdot G} \quad (3.4)$$

Στην κατηγορία κρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών, η παραγωγή της πρώτης ύλης απαιτεί το 30% με 35% του συνολικού κόστους και η κατασκευή του φωτοβολταϊκού στοιχείου επίσης το ίδιο ποσοστό. Στην κατηγορία των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου το κόστος παρασκευής της πρώτης ύλης μειώνεται στο 18%. Τα υπόλοιπα στοιχεία του φωτοβολταϊκού απαιτούν το υπόλοιπο 30% με 40% του κόστους. Η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών συστημάτων ξεπερνά τα 30 έτη και οι συσσωρευτές αντικαθίστανται 4 με 5 φορές.

Παράγοντες που μεταβάλλουν το κόστος του συστήματος είναι το είδος της εφαρμογής και το αν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Για τα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο, το κόστος είναι χαμηλότερο καθώς δεν απαιτούν συσσωρευτές. Επιπρόσθετα, το κόστος ανά W_p ελαττώνεται με την αύξηση των διαστάσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σήμερα, το κόστος έχει υποστεί σημαντική πτώση με σκοπό η τιμή της φωτοβολταϊκής κιλοβατώρας δύναται να συγκριθεί με την τιμή της κιλοβατώρας από τα συμβατικά καύσιμα.

3.6. Κοινωνικές- τεχνολογικές- περιβαλλοντικές πτυχές

Η χρήση των φωτοβολταϊκών επιφέρει συνεχώς πλεονεκτήματα σε διάφορους τομείς της ζωής. Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον ενισχύει την οικολογική πτυχή τους. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών είναι περιβαλλοντικά αποδοτική καθώς έχουν οικολογική απόσβεση κοντά στα 4 χρόνια και επαναπροσλαμβάνουν την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για

την δημιουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται πραγματοποιείται χωρίς την εκπομπή βλαβερών ουσιών και ρύπων. Ακόμη, δεν προξενεί ηχορύπανση καθώς η λειτουργία τους είναι αθόρυβη και δεν επηρεάζει την πανίδα.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν υψηλή αντοχή στα καιρικά φαινόμενα και την ίδια στιγμή προσδίδουν θερμομόνωση και ηχομόνωση. Συνεπακόλουθα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία κτηρίων από καιρικά φαινόμενα τοποθετώντας τα στους τοίχους ή τη στέγη. Επειδή, η λειτουργία τους θεωρείται τεχνικά αξιόπιστη, χρησιμοποιούνται σε ένα εύρος ηλεκτρικών εφαρμογών (ηλιακά φανάρια, φάροι ναυσιπλοΐας και τροφοδοσία νησιωτικών συμπλεγμάτων).

Η παραγωγή και η εφαρμογή της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών επηρεάζει θετικά έναν ακόμη κοινωνικό τομέα. Δημιουργεί νέες θέσεις απασχόλησης και η χρήση τους μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε δυσπρόσιτη περιοχή καθώς δεν εξαρτώνται από την τροφοδοσία συμβατικών καυσίμων.

3.7.Δομή και τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών

Η διακριτοποίηση των φωτοβολταϊκών γίνεται ανάλογα με την δομή του βασικού υλικού κατασκευής τους. Οι τύποι των φωτοβολταϊκών είναι οι εξής :

Φωτοβολταϊκά πυριτίου

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Το υλικό διακρίνεται από το πάχος του. Τα εργαστηριακά φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν απόδοση κοντά στο 24% ενώ τα εμπορικά έχουν εύρος 13% έως 16%. Το χρώμα των κυττάρων τείνει προς το μαύρο.

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Σε αυτή την κατηγορία τα φωτοβολταϊκά παρασκευάζονται σε μεγάλες επιφάνειες με στοιχεία τετραγωνικής μορφής και λεπτά επιστρώματα. Η επιφάνεια της κυψελίδας φέρει μονοκρυσταλλικές περιοχές. Η απόδοση του έχει εύρος από 17% έως 20% για σε εργαστηριακό περιβάλλον και 12% έως 15% για εκείνα που προορίζονται για εμπορική χρήση. Η κατασκευή των πολυκρυσταλλικών έχει κόστος χαμηλότερο συγκριτικά με αυτό των μονοκρυσταλλικών.

- Φωτοβολταϊκά ταινίας (Ribbon Silicon)

Αποτελείται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση κοντά στο 13%. Επειδή η κατασκευή του απαιτεί υψηλό κόστος η βιομηχανική παραγωγή του είναι περιορισμένη.

Φωτοβολταϊκά λεπτού φίλμ

- Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά λεπτών επιστρώσεων έχουν χαμηλό κόστος λόγω της μικρής μάζας υλικού που απαιτείται για την παρασκευή τους. Η απόδοση τους ελαττώνεται στην αρχή λειτουργίας τους (6% έως 8%). Η τεχνολογία αυτή αξιοποιείται για την δημιουργία σύνθετων φωτοβολταϊκών με διαδοχικές ενώσεις στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα για την αύξηση της αξιοποίησης του ηλιακού φάσματος με απόδοση που φτάνει το 13% για τα εργαστηριακά κύτταρα. Τα φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου έχουν την δυνατότητα κατασκευής διαδοχικών στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες πλαισίων.

Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων

- Δισεληνοϊδούχος Χαλκός (CuInSe_2)

Αποτελείται από ένα λεπτό πολυκρυσταλλικό υλικό που έχει απόδοση (εργαστηριακή) σχεδόν 18%. Χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος κατασκευής, όμως σήμερα τα εμπορικά μοντέλα έχουν χαμηλή απόδοση (κοντά στο 10%).

- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Αποτελείται από ένα λεπτό πολυκρυσταλλικό υλικό που δημιουργείται με τη διαδικασία της ηλεκτροαπόθεσης. Έχει πολύ καλή εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος, όμως παρατηρείται δυσκολία στην δημιουργία μεταλλικών επαφών. Η απόδοση λαμβάνει εύρος από 7% έως 8%.

- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

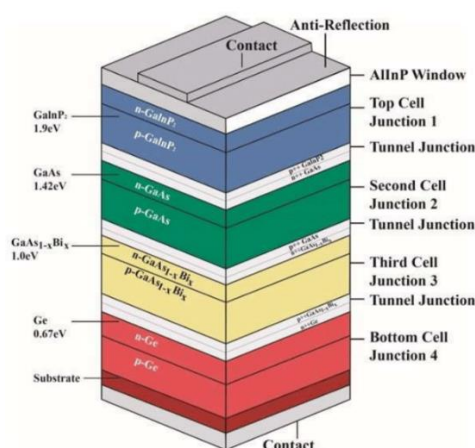
Αποτελείται από κρυσταλλική δομή όπως αυτής του πυριτίου όμως τα στοιχεία του είναι Γάλλιο και Αρσενικό. Αμφότερα η ενεργειακή του απόδοση (φτάνει το 17%) και το κόστος κατασκευής του είναι υψηλές.

Οργανικά φωτοβολταϊκά

Τα οργανικά-πολυμερή φωτοβολταϊκά εμφανίζονται με τη μορφή λεπτού φιλμ. Η πρωταρχική τους μορφή ήταν υγρή που στην συνέχεια έφτασε σε παχύρρευστη μορφή. Η ρευστότητα δίνει στα φωτοβολταϊκά την ιδιότητα της ευκαμψίας. Στο οργανικό διάλυμα από το οποίο παρασκευάζονται μπορούν να προστεθούν χρωστικές ουσίες και να παραχθούν πολύχρωμα φωτοβολταϊκά. Το κόστος παραγωγής τους είναι αρκετά χαμηλό εξαιτίας των φθηνών πρώτων υλών αλλά έχουν πολύ περιορισμένο χρόνο ζωής. Η απόδοσή τους είναι χαμηλή αλλά αναμένεται να φτάσει το 10% [28]. Το μειονέκτημα τους είναι η πρόωρη γήρανση τους.

Φωτοβολταϊκά πολλαπλών επιστρώσεων

Τα φωτοβολταϊκά πολλαπλών επιστρώσεων αποτελούν μια υπέρθεση διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών που διαθέτουν διαφορετικά ενεργειακά διακένα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 15 το ένα υλικό τοποθετείται πάνω στο άλλο και οι ημιαγωγοί με το υψηλότερο ενεργειακό διάκενο τοποθετούνται στα ανώτερα τμήματα της κυψελίδας. Με αυτήν την κατασκευή επιτυγχάνεται αξιοποίηση μεγαλύτερου μέρους του ηλιακού φάσματος και ως κατ' επέκταση υψηλότερη απόδοση και ανάπτυξη χαμηλότερων θερμοκρασιών (διότι μικρότερος αριθμός φωτονίων μετατρέπονται σε θερμότητα). Σε εργαστηριακές συνθήκες η απόδοσή φτάνει το 40,7%. [29]



Σχήμα 15: Φωτοβολταϊκή κυψελίδα αποτελούμενη από διαφορετικά υλικά [30]

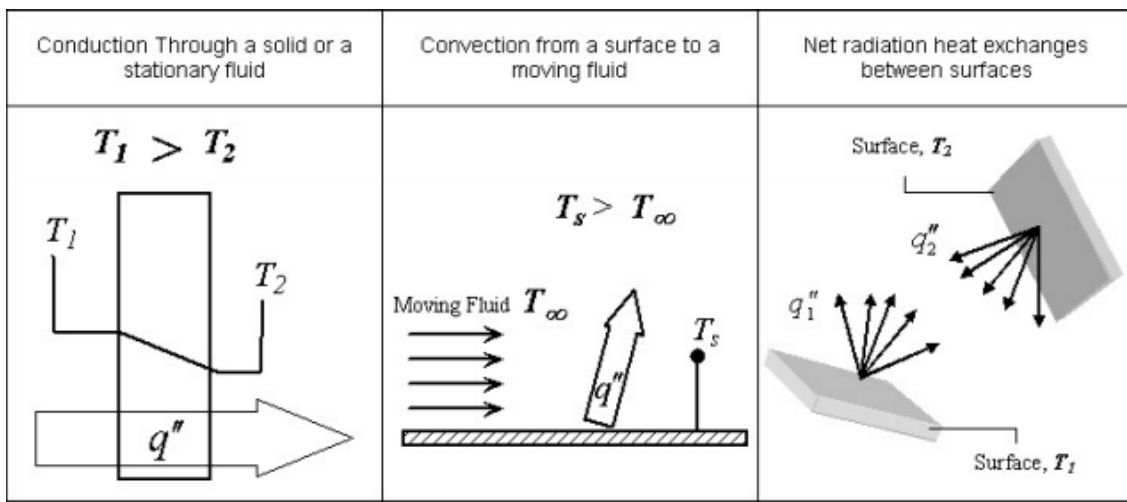
Φωτοβολταϊκά κβαντικής τελείας

Τα φωτοβολταϊκά κβαντικής τελείας διαφέρουν από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά διότι χρησιμοποιούν κβαντικές τελείες (quantum-dots) ως ενεργό φωτοβολταϊκό στοιχείο [31]. Θεωρητικές μελέτες δείχνουν ότι μπορούν να φτάσουν απόδοσης της τάξης του 60%. Μια ομάδα ερευνητών του University of Queensland κατάφεραν να συνθέσουν φωτοβολταϊκό κβαντικής τελείας με απόδοση 16.6%[32].

4.Θερμοδυναμική

4.1.Μετάδοση θερμότητας

Μετάδοση θερμότητας ονομάζεται η θερμική ενέργεια που μεταφέρεται λόγω χωρικής διαφοράς θερμοκρασίας. Η ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς σε ένα μέσο συνεπάγεται μετάδοση θερμότητας [33]. Η ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς σε ένα μέσο συνεπάγεται μετάδοση θερμότητας. Η μεταφορά θερμοκρασίας πραγματοποιείται με 3 διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 16 .



Σχήμα 16: Τρόποι μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία)
<http://www.pathways.cu.edu.ec/Text-PDF/Part%20A-3.pdf>

Όταν υπάρχει βάρθρωση θερμοκρασίας σε ένα σταθερό μέσο (στερεό ή υγρό) , ο όρος που χρησιμοποιείται για την μετάδοση θερμότητας είναι αγωγή (conduction). Ο όρος συναγωγή (convection) αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού που έχει διαφορετική θερμοκρασία. Ο τρίτος τρόπος μετάδοσης θερμότητας είναι η θερμική ακτινοβολία (thermal radiation). Οι επιφάνειες πεπερασμένης θερμοκρασίας εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

4.2.Αγωγή

Η αγωγή μπορεί να θεωρηθεί ως μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργητικά στα λιγότερο ενεργητικά σωματίδια μιας ουσίας εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Η εξήγηση του μηχανισμού της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μπορεί να δοθεί εξετάζοντας την θερμοδυναμική συμπεριφορά ενός αερίου. Θεωρώντας ένα αέριο στο οποίο υπάρχει βάρθρωση θερμοκρασίας και μπορεί να καταλάβει το χώρο μεταξύ δύο επιφανειών που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η ενέργεια των μορίων του αέρα σχετίζεται με τις τυχαίες κινήσεις, τις εσωτερικές περιστροφές και τις δονητικές κινήσεις των μορίων. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχουν υψηλότερες μοριακές ενέργειες και κατά τη σύγκρουση γειτονικών μορίων μεταφέρεται ενέργεια από τα πιο ενεργητικά στα λιγότερο ενεργητικά μόρια. Η μεταφορά ενέργειας στην περίπτωση της αγωγής πραγματοποιείται στην κατεύθυνση μείωσης της θερμοκρασίας.

Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση των ρευστών με τη διαφορά ότι οι αποστάσεις μεταξύ των μορίων είναι πολύ μικρότερες και οι μοριακές αλληλεπιδράσεις πολύ συχνότερες και ισχυρότερες. Η αγωγή σε ένα στερεό μπορεί να αποδοθεί σε ατομικό επίπεδο στις πλεγματικές δονήσεις. Στα μη αγώγιμα στερεά η μεταφορά ενέργειας γίνεται αποκλειστικά μέσω των πλεγματικών ταλαντώσεων ενώ στα αγώγιμα γίνεται και μέσω της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας μέσω εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ενέργειας που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου. Αυτή η εξίσωση ονομάζεται νόμος Fourier και δίνεται στην περίπτωση μονοδιάστατου επιπέδου από την σχέση:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

όπου q_x'' (W/m^2) είναι ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας στον άξονα x ανά μονάδα επιφάνειας κάθετη στην διεύθυνση μετάδοσης, k ($W/m \cdot K$) η θερμική αγωγιμότητα που εξαρτάται από το υλικό.

4.3.Συναγωγή

Η μετάδοση θερμότητας μέσω συναγωγής αποτελείται από δύο μηχανισμούς. Εκτός από μεταφορά ενέργειας λόγω της τυχαίας κίνησης των μορίων η ενέργεια μεταφέρεται από την κίνηση του ρευστού. Η κίνηση του ρευστού συνεπάγεται με συλλογική κίνηση μεγάλου πλήθους μορίων. Μια τέτοια κίνηση σε συνδυασμό με την βάρθρωση θερμοκρασίας συμβάλλει στην μετάδοση θερμότητας. Η συνολική μετάδοση θερμότητας οφείλεται σε μια υπέρθεση μεταφορά ενέργειας από την τυχαία κίνηση των μορίων και από τη μαζική κίνηση του ρευστού.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μετάδοση θερμότητας που λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός εν κινήσει ρευστού και μιας επιφάνειας που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του υγρού και της επιφάνειας έχει ως

αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας περιοχής στο υγρό, στην οποία η τιμή της ταχύτητας ροής κυμαίνεται από μηδέν στην επιφάνεια έως μια πεπερασμένη τιμή. Η θερμοκρασία του υγρού θα ποικίλει μέσα σε αυτή τη περιοχή. Και ονομάζεται θερμικό οριακό στρώμα.

Η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται τόσο από την τυχαία κίνηση των μορίων όσο και από τη μαζική κίνηση του ρευστού εντός του οριακού στρώματος. Η συνεισφορά λόγω της τυχαίας κίνησης των μορίων κυριαρχεί στη επιφάνεια όπου η ταχύτητα είναι χαμηλή. Στη διεπαφή μεταξύ της επιφάνειας και του υγρού η ταχύτητα του ρευστού είναι μηδέν (συνθήκη μη ολίσθησης) η θερμότητα μεταφέρεται μόνο με αυτόν τον μηχανισμό. Η συνεισφορά λόγω της μαζικής κίνησης του υγρού προέρχεται από το γεγονός ότι το οριακό στρώμα μεγαλώνει όσο εξελίσσεται η ροή.

Ανάλογα με την φύση της ροής στη μετάδοση θερμότητας μπορεί να είναι ελεύθερη ή εξαναγκασμένη ροή. Εξαναγκασμένη ροή δημιουργείται όταν η ροή προκαλείται από εξωτερικά μέσα όπως ένας ανεμιστήρας που ψύχει εξαναγκασμένα ηλεκτρικά εξαρτήματα. Αντίθετα, στην ελεύθερη ροή η μεταφορά προκαλείται από τη διαφορά πυκνότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας στον όγκο του ρευστού. Στη μετάδοση θερμότητας η ενέργεια που μεταφέρεται είναι η εσωτερική ενέργεια του υγρού, όμως υπάρχει και λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας.

Η λανθάνουσα ανταλλαγή θερμότητας σχετίζεται με αλλαγή φάσης μεταξύ των καταστάσεων υγρού και ατμών. Ανεξάρτητα από τη φύση της μετάδοσης θερμότητας κατά τη συναγωγή ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας (νόμος μεταφοράς του Νεύτωνα) δίνεται από την σχέση:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4.2)$$

όπου h ($W/m^2 \cdot K$) ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας (heat transfer coefficient), T_s ($^{\circ}C$) η θερμοκρασία επιφάνειας του σώματος και T_∞ ($^{\circ}C$) η θερμοκρασία περιβάλλοντος γύρω από το σώμα.

4.4.Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ενέργεια που εκπέμπεται από ύλη που βρίσκεται σε μη μηδενική θερμοκρασία. Η ύλη που εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μπορεί να είναι στερεή, υγρή ή αέρια. Ανεξαρτήτως της κατάστασης της ύλης, η εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας οφείλεται σε αλλαγές της διάταξης των ηλεκτρονίων

των ατόμων ή των μορίων. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (φωτόνια) και δεν χρειάζεται μέσο διάδοσης όπως στις περιπτώσεις της αγωγής και της συναγωγής και μεταδίδεται και στο κενό. Η μέγιστη θερμική ισχύς που ένα σώμα ακτινοβολεί ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τον νόμο των Stefan-Boltzman:

$$E = \sigma T_s^4 \quad (4.3)$$

όπου σ η σταθερά Stefan-Boltzman T_s η απόλυτη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του σώματος. Ένα τέτοιο σώμα καλείται μέλαν σώμα.

Η εκπεμπόμενη ενέργεια, εξαιτίας θερμικής ακτινοβολίας, από μια επιφάνεια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4.4)$$

όπου ε ο συντελεστής εκπομπής (emissivity). Η τιμή του συντελεστή εκπομπής κυμαίνεται στο εύρος από 0 έως 1 και λαμβάνει την τιμή 1 στην περίπτωση του μέλανος σώματος. Μέρος της θερμικής ακτινοβολίας μπορεί να απορροφηθεί από μια επιφάνεια (όταν είναι μέλαν σώμα η επιφάνεια μπορεί να απορροφηθεί όλη).

Η ακτινοβολία μπορεί να προέρχεται από μια πηγή όπως ο ήλιος ή από άλλες επιφάνειες στις οποίες εκτίθεται η επιφάνεια που αποτελεί αντικείμενο μελέτης. Ανεξάρτητα από τη πηγή ο ρυθμός με τον οποίο απορροφάται ακτινοβολία σε μια μονάδα επιφάνειας συμβολίζεται με G . Μέρος της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφηθεί από μια επιφάνεια αυξάνοντας την θερμική ενέργεια του υλικού. Ο ρυθμός απορρόφησης της ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται απορροφητικότητα και συμβολίζεται με a . Ισχύει:

$$G_{abs} = a \cdot G \quad (4.5)$$

όπου το a κυμαίνεται στο εύρος 0 έως 1. Όταν $a < 1$ η επιφάνεια είναι αδιαφανής και μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται. Όταν η επιφάνεια είναι ημιδιαφανής μέρος την ακτινοβολίας μεταδίδεται.

5. Μαθηματικό μοντέλο CFX

5.1. Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

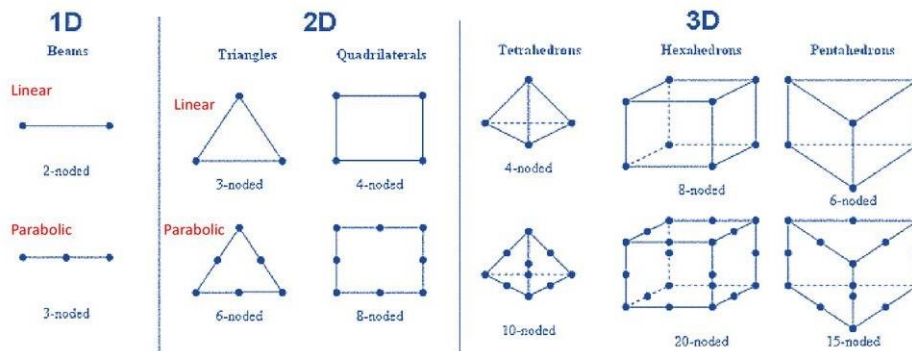
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο αριθμητικής ανάλυσης. Το σημαντικότερο προτέρημα της μεθόδου είναι η ικανότητα εφαρμογής της σε ακανόνιστα σχήματα διαφορετικών υλικών και διαστάσεων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει φυσικές αρχές και διαφορικές εξισώσεις σε ένα σύστημα εξισώσεων πινάκων που λύνονται προσεγγιστικά. Όταν τα προβλήματα είναι γραμμικά, οι λύσεις υπολογίζονται με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια. Μετά την προσεγγιστική λύση, είναι δυνατή η επιπλέον επεξεργασία. Με την επεξεργασία (post-processing) ο χρήστης μπορεί να απεικονίσει με χρωματική διαβάθμιση μεγέθη όπως η ταχύτητα, η θερμοκρασία, η πίεση κ.α. αλλά και γραφήματα. Ακόμα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το επίπεδο ακρίβειας που επιθυμεί για την μείωση των σφαλμάτων.

Η λογική πίσω από την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων έγκειται στην αντικατάσταση οποιασδήποτε περίπλοκης γεωμετρίας σε ένα άθροισμα πολύ πιο απλών σχημάτων. Τα μικρότερα σχήματα που προκύπτουν ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις που ορίζουν το σχήμα μπορεί να υπολογιστεί το εμβαδόν της επιφάνειας.

$$A = \sum_{e=1}^n A^e = \sum_{e=1}^n \int_{A^e} dA \quad (5.1)$$

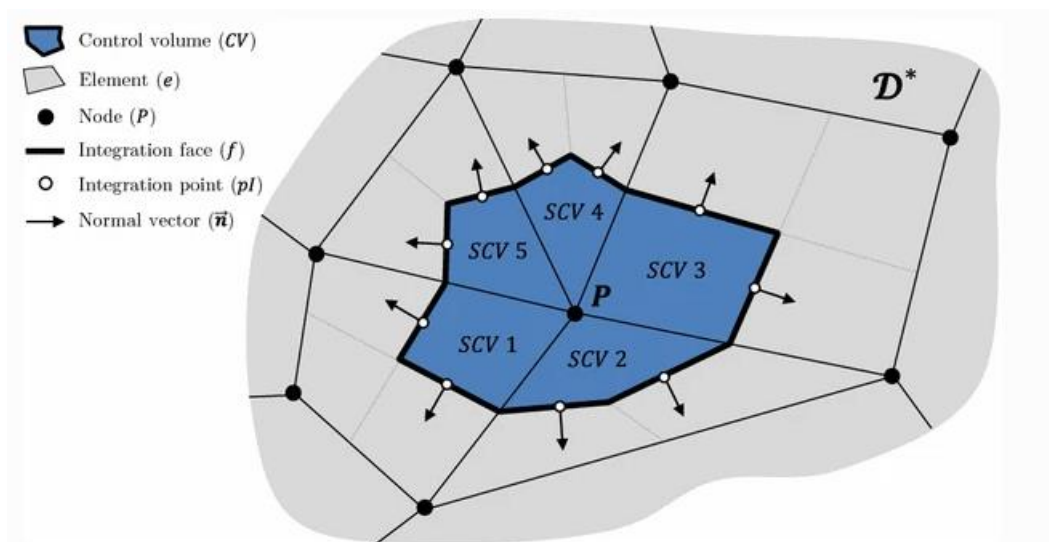
Όσο περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία οριστούν στην επιφάνεια τόσο καλύτερη προσέγγιση και μικρότερα γεωμετρικά σφάλματα παρουσιάζονται. Ωστόσο, αυτή η αύξηση των πεπερασμένων στοιχείων έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων μέσω μιας ισοδύναμης θεμελιώδους ολοκληρωτικής μορφής που ολοκληρώνεται σε ένα πλέγμα που είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια και στον όγκο του υπό μελέτη αντικειμένου.

Finite Element Shapes



Σχήμα 17: Δυνατοί τύποι στοιχείων
<https://slideplayer.com/slide/14018182/>

Το πλέγμα αποτελείται από τα στοιχεία (elements) που είναι συνδεδεμένα στους κόμβους (nodes) [34]. Στο πλέγμα δημιουργούνται πεπερασμένοι όγκοι στους οποίους επιλύονται οι εξισώσεις διατήρησης ποσοτήτων (μάζα, ορμή και ενέργεια). Οι μεταβλητές της λύσης και οι ιδιότητες των ρευστών αποθηκεύονται στους κόμβους. Στις θερμικές αναλύσεις, η άγνωστη μεταβλητή σε κάθε κόμβο είναι η θερμοκρασία και υπάρχει ταυτόχρονη εξίσωση για τον προσδιορισμό της. Γύρω από κάθε κόμβο δημιουργείται ένας όγκος ελέγχου, ο οποίος σχηματίζεται από τις ευθείες που ενώνουν τα μέσα των ακμών που συνδέουν τον κόμβο με τα κέντρα των στοιχείων γύρω του.



Σχήμα 18: Όγκος ελέγχου [35]

Εξισώσεις διατήρησης μάζας, ορμής και ενός βαθμωτού μεγέθους φ επιλύονται σε Καρτεσιανές συντεταγμένες κατά τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων [36]. Οι εξισώσεις είναι :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_{eff} (\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})) \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\varphi \quad (5.4)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται σε όλους τους όγκους ελέγχου της γεωμετρίας και με τη χρήση του θεωρήματος απόκλισης Gauss μετατρέπονται τα ολοκληρώματα όγκου, που εμφανίζουν τελεστές διαφοράς και κλίσης, σε επιφανειακά ολοκληρώματα. Αν οι όγκοι ελέγχου δεν παραμορφώνονται στο χρόνο, τότε η παράγωγος του χρόνου μπορεί να βγει από το ολοκλήρωμα και οι εξισώσεις γίνονται:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{d}{dx} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = - \int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} dV \quad (5.6)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_S \rho U_j \varphi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\varphi dV \quad (5.7)$$

όπου S η επιφάνεια και V ο όγκος ολοκλήρωσης και dn_j είναι οι διαφορικές Καρτεσιανές συνιστώσες του προς τα έξω κάθετου διανύσματος της επιφάνειας.

5.2.Βασικές εξισώσεις και μεγέθη

Οι βασικές εξισώσεις που επιλύονται στο ANSYS CFX είναι:

Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier-Stokes είναι ένα σύνολο εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν την κίνηση των ρευστών, οι οποίες προκύπτουν από την εφαρμογή του 2ου νόμου του Νεύτωνα σε στοιχειώδη τμήματα του ρευστού [37],[38]. Οι εξισώσεις αυτές φανερώνουν πως οι μεταβολές στην ορμή ενός απειροστού όγκου του ρευστού είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων του ιξώδους, της βαρύτητας, των μεταβολών πίεσης και

άλλων δυνάμεων που ασκούνται στο εσωτερικό των ρευστών. Για Νευτωνικά ρευστά σταθερής πυκνότητας και σταθερού ιξώδους οι εξισώσεις κίνησης είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (5.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (5.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (5.9)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, u, v, w οι συνιστώσες της ταχύτητας, μ το ιξώδες, p η πίεση και g το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας.

Η εξίσωση Navier- Stokes για ασυμπίεστη ροή γράφεται:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (5.10)$$

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (5.11)$$

Εξίσωση διατήρησης ορμής

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (5.12)$$

όπου τ ο τανυστής τάσης, S_M η πηγή της ορμής, U η ταχύτητα του ρευστού.

Εξίσωση διατήρησης ενέργειας

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (5.13)$$

όπου k η θερμική αγωγιμότητα, h_{tot} η ολική ενθαλπία και S_E η πηγή ενέργειας. Ο όρος $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ αναπαριστά το έργο λόγω ιξώδους. Η ολική ενθαλπία υπολογίζεται από :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (5.14)$$

Το ANSYS CFX παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας στερεών περιοχών, στις οποίες λύνονται οι εξισώσεις μετάδοσης ενέργειας χωρίς ροή. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει σύζευξη μεταφοράς θερμότητας (conjugate heat transfer) και οι στερεές περιοχές ονομάζονται στερεά σώματα (solid domains). Στο εσωτερικό των στερεών σωμάτων η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας γίνεται:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_s h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (5.15)$$

όπου U_s η ταχύτητα του στερεού σώματος. Ο όρος της μεταφορικής κίνησης του στερεού είναι προαιρετικός και εισάγεται μόνο όταν το στερεό βρίσκεται σε κίνηση.

Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εκφράζει το ποσό της θερμότητας που διαχέεται στη μάζα ενός υλικού επιφάνειας 1m^2 και πάχους 1m , όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δύο επιφανειών του σώματος είναι 1°C . Ο συντελεστής αγωγιμότητας παρουσιάζει την ικανότητα του υλικού στη διάχυση θερμότητας. Διαφέρει σε κάθε υλικό, συμβολίζεται είτε με κ είτε με λ και έχει μονάδες W/mK ή $\text{W/m}^\circ\text{C}$. Υπάρχουν διακυμάνσεις των τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λόγω της μικροσκοπικής δομής των υλικών αυτών. Στο σχήμα 19 φαίνονται κάποιες τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για διάφορα υλικά και μεταβάλλεται αρκετά με την αγωγιμότητα του υλικού.

Υλικό	λ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
<i>Μεγάλης αγωγιμότητας</i>	
Χαλκός	390
Αλουμίνιο	201
Ορείχαλκος	110
Σίδηρος	67
<i>Μέσης αγωγιμότητας</i>	
Μάρμαρο	3,4
Πυρίμαχο υλικό	1,7
Γυαλί	0,8
<i>Μονωτές</i>	
Αμιάντος	0,17
Φελλός	0,04
Μαλλί	0,02

Σχήμα 19: Θερμική αγωγιμότητα διάφορων υλικών[39]

Συντελεστής θερμικής διάχυσης

Ο συντελεστής θερμικής διάχυσης (thermal diffusivity) ορίζεται ως το πηλίκο της θερμικής αγωγιμότητας προς την αποθήκευση θερμότητας ενός υλικού [11]. Συμβολίζεται με α και έχει μονάδες m^2/s και υπολογίζεται από:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho C_p} \quad (5.16)$$

όπου C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού. Το πηλίκο ρC_p έχει μονάδες J/m^3K και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Υλικά με υψηλή τιμή πυκνότητας έχουν συνήθως χαμηλές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας και είναι ιδανικά για αποθήκευση ενέργειας.

Ο συντελεστής της θερμικής διάχυσης είναι διαφορετικός για κάθε υλικό και δείχνει την ικανότητα του υλικού να άγει τη θερμική ενέργεια συγκριτικά με την ικανότητα του να την αποθηκεύει [40]. Υλικά με υψηλή τιμή α ανταποκρίνονται γρήγορα στις θερμικές αλλαγές ενώ τα υλικά με μικρή τιμή α χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φτάσουν σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

5.3.Μοντέλο k-epsilon

Η δημιουργία τύρβης προκαλείται από αστάθεια της ροής οφειλόμενη είτε στις συνθήκες ροής είτε σε διαταραχές και παρουσιάζεται σε περιοχές δυνάμεων συνεκτικότητας όπως οι περιοχές με μεγάλη βάρθρωση της ταχύτητας ή ασυνεχειών της. Χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής είναι: η έντονη μίξη γειτονικών στρώσεων ρευστού (οι κατανομές των ιδιοτήτων του ρευστού είναι πιο ομοιόμορφες σε σχέση με της στρωτής ροής), η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων λόγω της μεταφοράς ρευστού από την κίνηση των γειτονικών στρώσεων, αυξημένη απώλεια ενέργειας σε θερμότητα (εξαιτίας της δράσης δυνάμεων μοριακής συνεκτικότητας που δημιουργούνται μέσα στους στροβίλους της τύρβης) και τέλος, η ταχύτητα και η πίεση μεταβάλλονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου [41][42].

Ως κ συμβολίζεται η κινητική ενέργεια τύρβης και ορίζεται ως η μεταβολή στις διακυμάνσεις της ταχύτητας. Η εξίσωσης διατήρησης της ορμής σε αυτήν την περίπτωση γίνεται:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_{eff} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (5.17)$$

όπου το μ_{eff} είναι το σύνθετο ιξώδες και p' είναι η τροποποιημένη πίεση και ισούνται:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (5.18)$$

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho\kappa + \frac{2}{3}\mu_{eff} \frac{\partial U_\kappa}{\partial x_\kappa} \quad (5.19)$$

όπου μ_t το ιξώδες λόγω τύρβης και είναι ίσο με:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (5.20)$$

Στην τυρβώδη ροή υπάρχει αύξηση των εσωτερικών τάσεων. Τα σωματίδια των ρευστών που μεταφέρονται από μια περιοχή σε μια άλλη εξαιτίας της τύρβης με διαφορετική μέση ταχύτητα, ασκούν επιβραδυντική ή επιταχυντική δύναμη στην περιοχή μετάβασης τους. Η απόσβεση ε της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (turbulence eddy dissipation) υπολογίζεται:

$$\varepsilon = \frac{\kappa^3}{L} \quad (5.21)$$

όπου L η κλίμακα μήκους τύρβης και κ η τυρβώδης κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Οι τιμές της απόσβεσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \kappa) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_K - \rho\varepsilon + P_{kb} \quad (5.22)$$

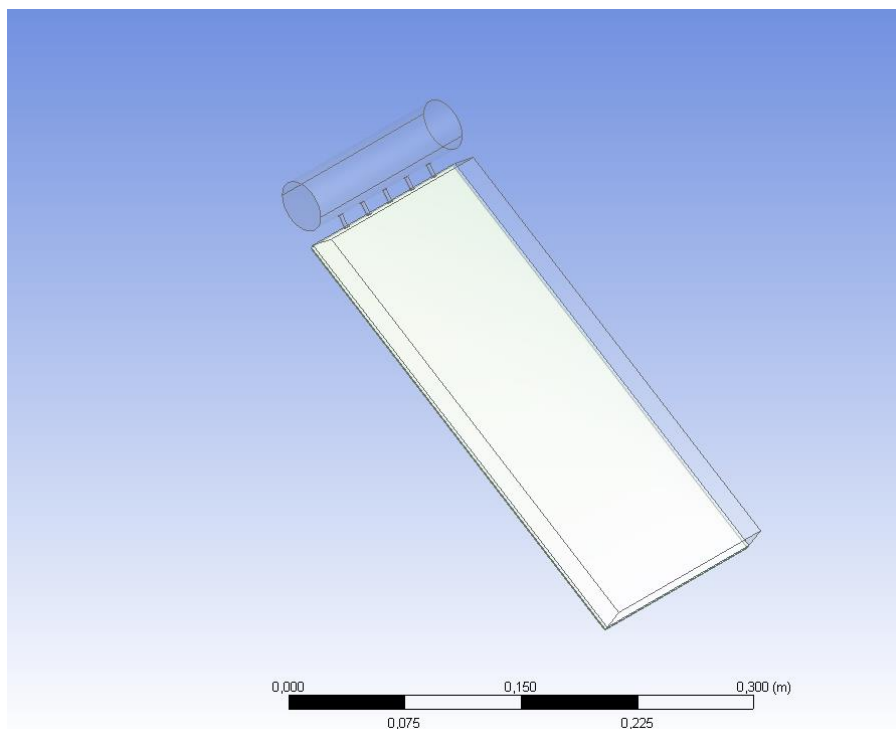
$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\kappa\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1} P_K - C_{\varepsilon 2} \rho\varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{kb}) \quad (5.23)$$

όπου C_μ , $C_{\varepsilon 1}$ και $C_{\varepsilon 2}$ είναι σταθερές και στο μοντέλο k-epsilon είναι ίσα με 0,09, 1,44 και 1,92 αντίστοιχα.

6.Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου CFX

6.1.Σχεδιασμός γεωμετρίας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού των επιμέρους τμημάτων του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε στο ANSYS Geometry όπου ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει το σύστημα που επιθυμεί να μελετήσει. Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 20. Η γεωμετρία αποτελείται από τμήμα του φωτοβολταϊκού σε κλίση 32° , το εσωτερικό των σωλήνων νερού και τον όγκο ελέγχου που υπάρχει το νερό που εξέρχεται από τα σωληνάκια και τον αέρα.



Σχήμα 20: Γεωμετρία τμήματος φωτοβολταϊκού

Τμήμα	Διαστάσεις
Μήκος τμήματος φωτοβολταϊκού	0,30m
Πλάτος τμήματος φωτοβολταϊκού	0,130m
Αριθμός μπεκ	5
Διάμετρος μπεκ	0,004m
Ύψος όγκου ελέγχου	0,020m

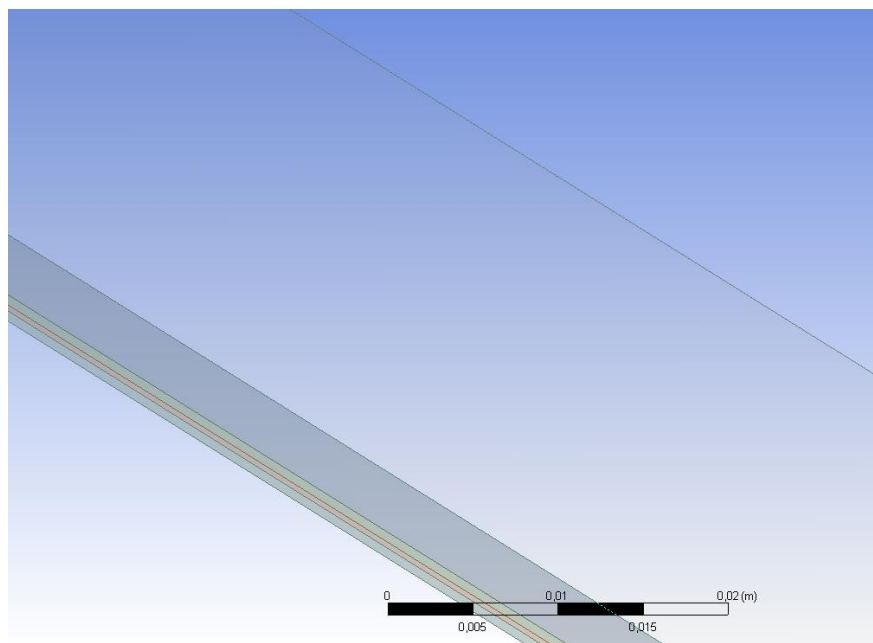
Πίνακας 1:Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Το εσωτερικό του φωτοβολταϊκού αποτελείται από στρώσεις υλικών που φαίνονται στον Πίνακα 2 [43][44]. Το μεταλλικό τμήμα και οι συγκολλήσεις των στρώσεων αγνοούνται καθώς θεωρούνται αμελητέα για τη μετάδοση ακτινοβολίας.

Υλικό	Πυκνότητα (Kg/m ³)	Θερμική αγωγιμότητα (W/mK)	Ειδική θερμοχωρητικότητα (J.KgK)	Πάχος(mm)
Γυαλί	2450	2	500	3
EVA	950	0,311	2090	0,5
Πυρίτιο	2330	130	677	0,3
Tedlar	1200	0,15	1250	0,5

Πίνακας 2: Πίνακας στρώσεων

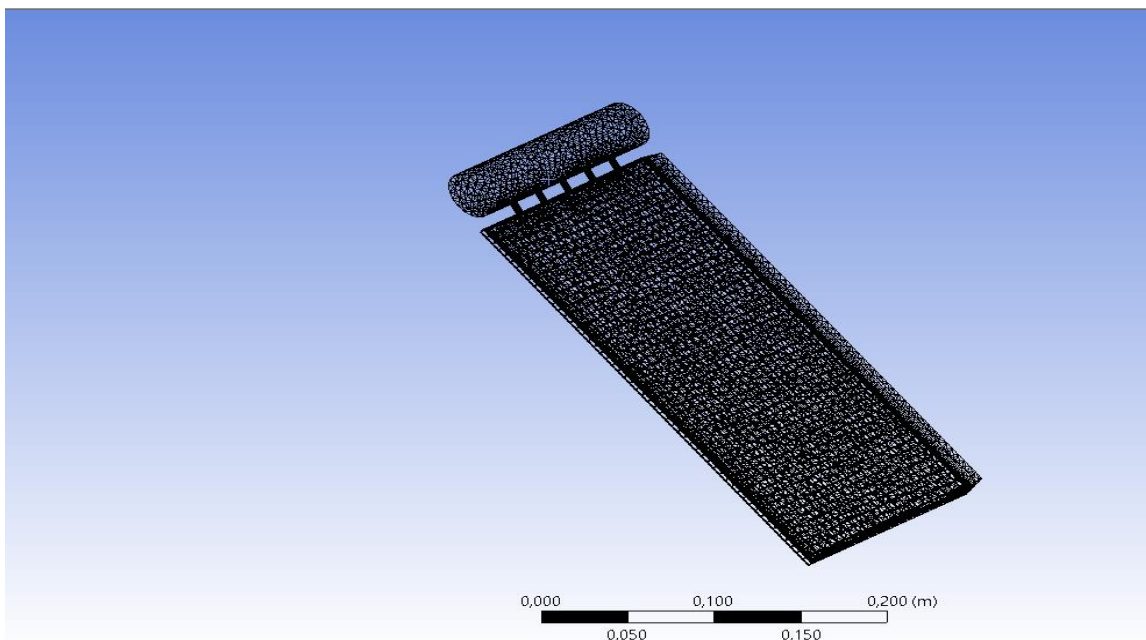
Το Συμπολυμερές Αιθυλενίου-οξικού βινυλίου που σε συντομογραφία συμβολίζεται EVA (Ethylene-vinyl acetate) είναι ένα υλικό ελαστομερούς τύπου[45]. Βασικά χαρακτηριστικά του που το κάνουν ιδανικό για την ενθυλάκωση φωτοβολταϊκού πάνελ είναι η μεγάλη διαφάνεια, η ελαστικότητα και η καλή διαπερατότητα. Το Tedlar είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που ονομάζεται Πολυβινυλοχλωρίδιο και έχει υψηλή αντοχή. Και τα 4 υλικά δηλώθηκαν ως ένα κοινό σώμα για να μην συμπληρωθεί η διεπιφάνεια τους με αέρα.



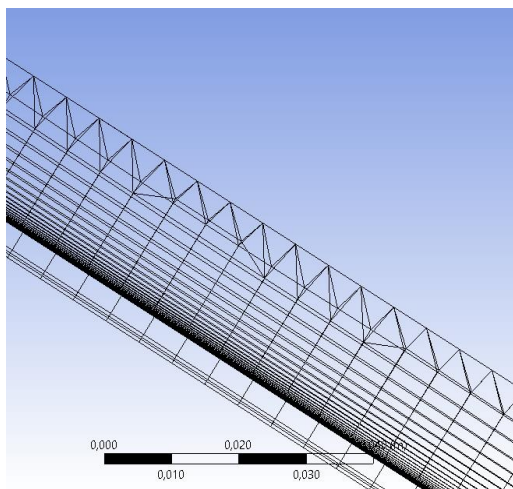
Σχήμα 21: Γεωμετρία σε μεγέθυνση

6.2.Πλεγματοποίηση (Meshing)

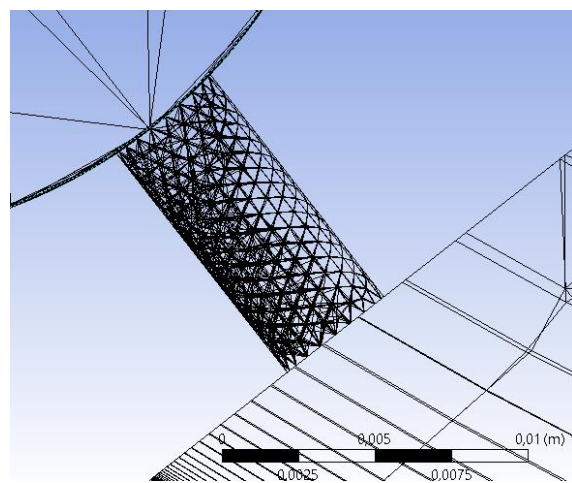
Μετά την ολοκληρωμένη τρισδιάστατη σχεδίαση του τμήματος του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να δημιουργηθεί το πλέγμα επίλυσης. Η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου έγινε στο ANSYS MESH, με σκοπό να κατασκευαστεί όσο το δυνατόν πιο δομημένο πλέγμα. Έγινε τοπική πύκνωση (inflation) στη διεπιφάνεια μεταξύ του στρώματος του νερού και της γυάλινης πλάκας όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 22. Ο συνολικός αριθμός κόμβων και στοιχείων είναι 71.036 και 183.011 για όλη τη γεωμετρία, αντίστοιχα. Έχουν δημιουργηθεί 100.434 πρίσματα, 82.141 τετράεδρα και 436 πυραμίδες.



Σχήμα 22: Κατασκευή πλέγματος



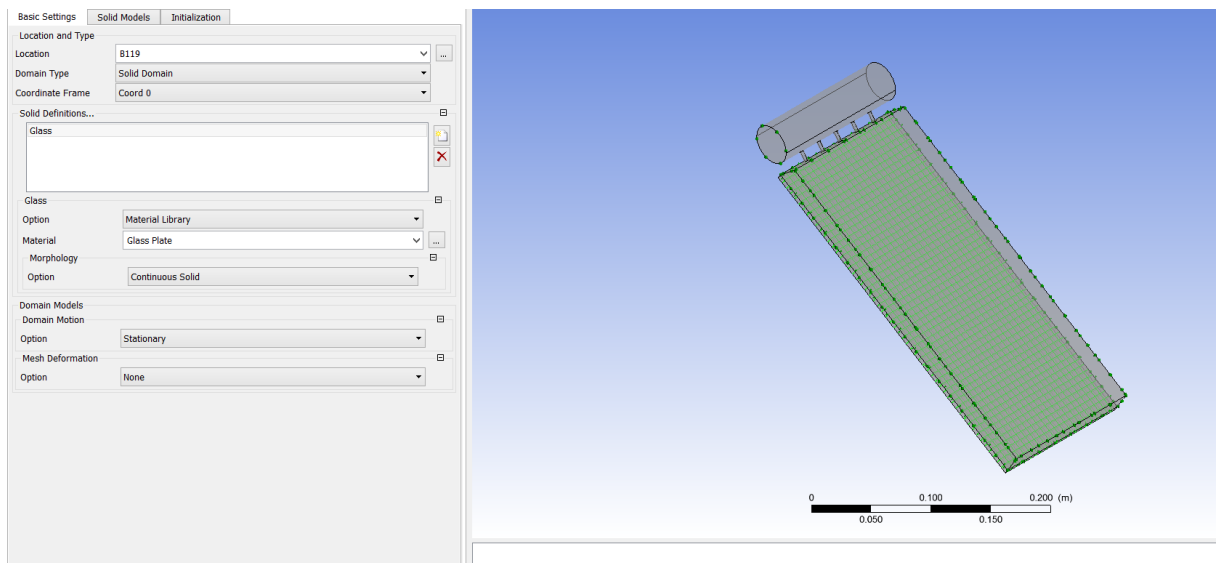
Σχήμα 23: Πύκνωση πλέγματος στη διεπαφή



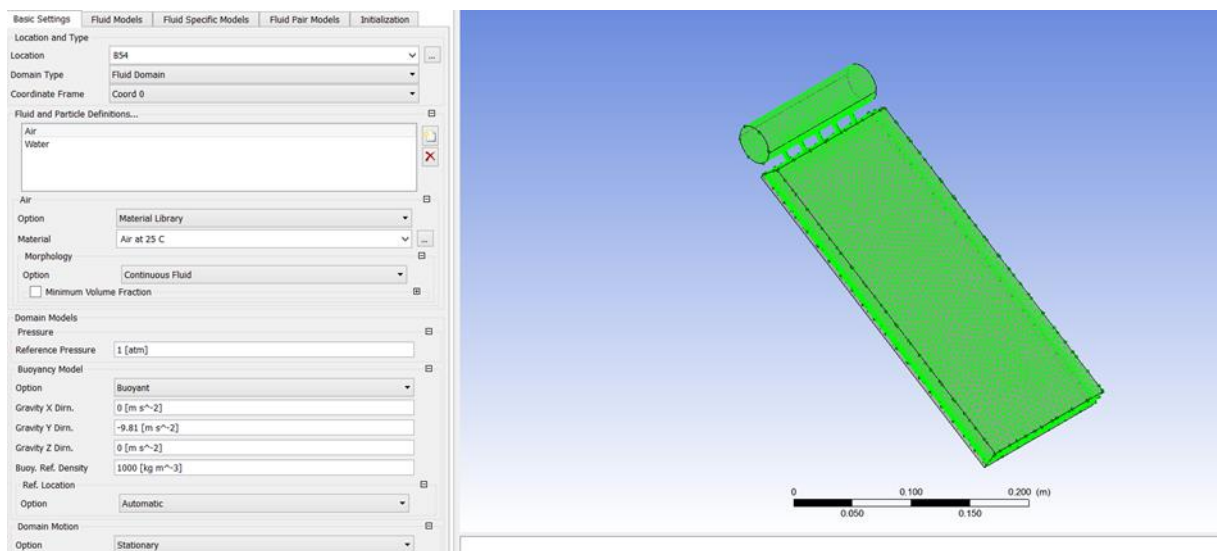
Σχήμα 24: Πλέγμα στο μπεκ

6.3.Επιλογή οριακών συνθηκών

Η κατακεραματισμένη πλέον γεωμετρία εισάγεται στο πακέτο Fluid Flow (CFX). Επιλέγοντας το Setup ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις οριακές συνθήκες του προβλήματος που θα επιλύσει το πρόγραμμα. Αρχικά είναι απαραίτητο να οριστούν τα τμήματα (Domain) που είναι στερεά (γυάλινη πλάκα, EVA, Πυρίτιο, Tedlar) και τα τμήματα που είναι ρευστά (εσωτερικό σωλήνα, εσωτερικό μπεκ και ο όγκος ελέγχου νερού-αέρα)[46][47].

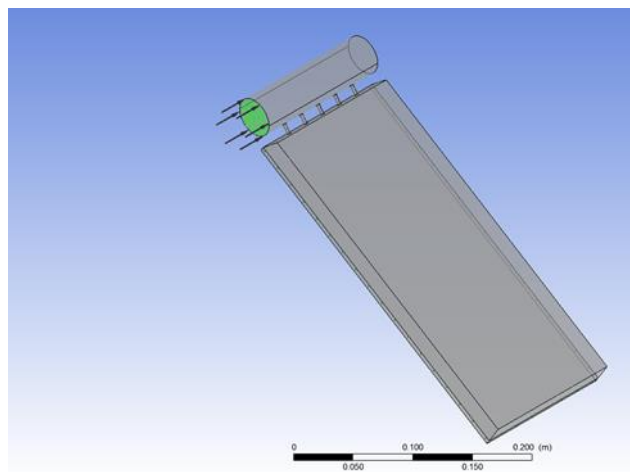


Σχήμα 25: Ρυθμίσεις στερεών τμημάτων



Σχήμα 26: Ρυθμίσεις ρευστών τμημάτων

Ακόμα ο χρήστης μπορεί να εισάγει νέα υλικά στα δεδομένα του προγράμματος γνωρίζοντας τις ιδιότητες του. Σε κάθε Domain επιλέχθηκε το υλικό που αντιστοιχεί σε κάθε στρώση του φωτοβολταϊκού. Στις ρυθμίσεις δίνεται η δυνατότητα να επιλεγθούν μοντέλα που να περιγράφουν καλύτερα τη φύση του προβλήματος και τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται. Στα ρευστά επιλέχθηκε το Multiphase καθώς υπάρχουν δύο ρευστά, το Thermal Energy στο Heat Transfer και το μοντέλο επίλυσης k-Epsilon. Για το ζευγάρι των ρευστών ορίστηκε η επιφανειακή τάση 0.072N/m[48]. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή ορίων(Boundary) στη γεωμετρία. Όπως φαίνεται στο σχήμα 27 επιλέχθηκε το ένα άκρο του σωλήνα για είσοδο νερού.

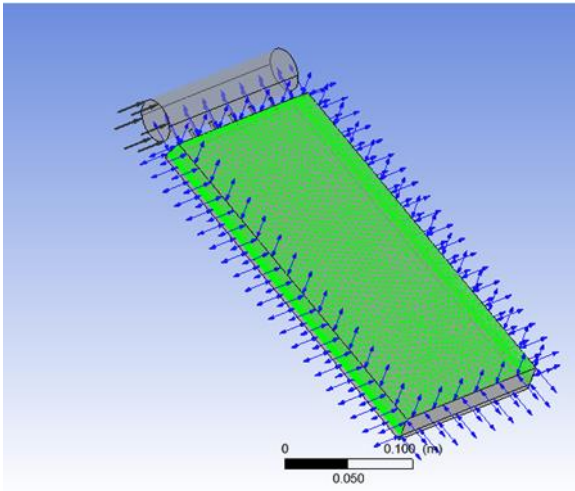


Σχήμα 27: Είσοδος νερού

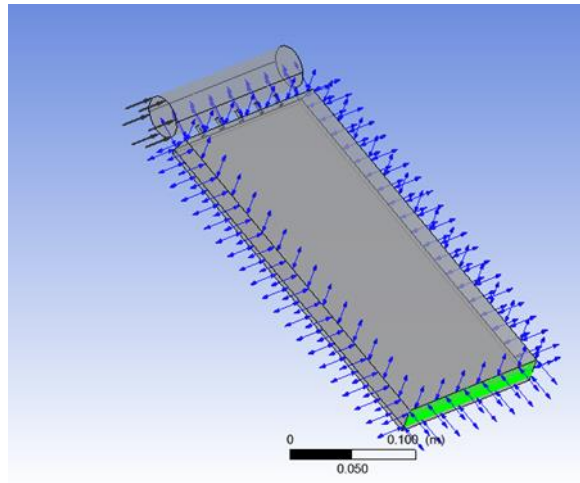
Η ταχύτητα του νερού υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$Q = u \cdot A \quad (6.1)$$

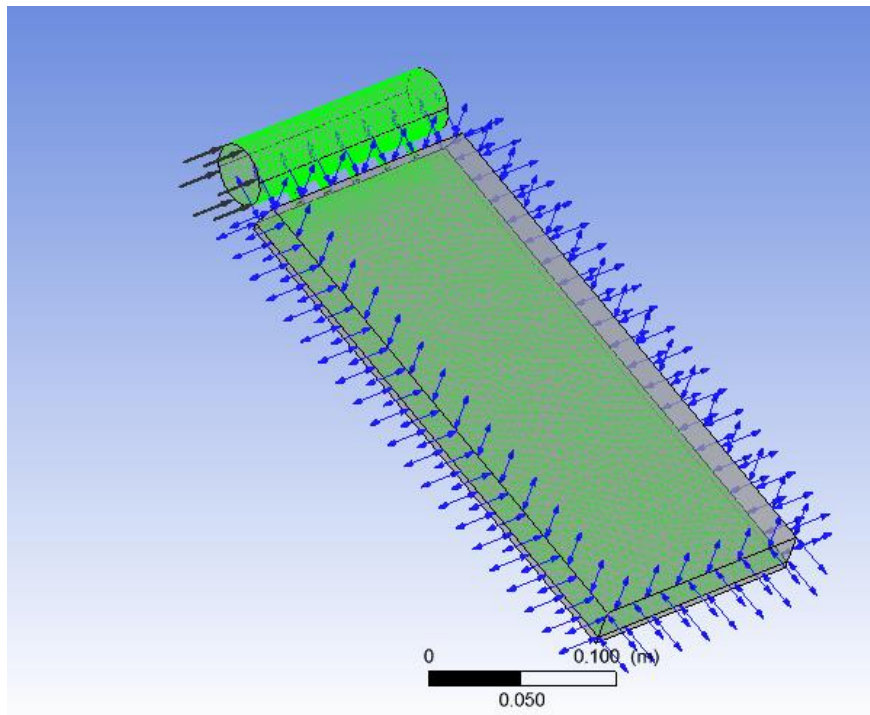
όπου Q η παροχή, u η ταχύτητα ρευστού και A το εμβαδόν διατομής. Για παροχή 5000lt/h(από αντλία), η ταχύτητα υπολογίζεται 1,44m/s. Στις οριακές συνθήκες της προσομοίωσης επιλέχθηκε σταθερή ταχύτητα νερού 1,44m/s με σταθερή θερμοκρασία 22°C, 5% ένταση τύρβης, ογκομετρικό κλάσμα νερού και αέρα 1 και 0 αντίστοιχα. Επιπλέον, επιλέχθηκε το όριο του αέρα όπως φαίνεται στο σχήμα 28α. Ο τύπος ορίου είναι άνοιγμα (opening) στο οποίο ο χρήστης μπορεί να ορίσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σε αυτήν την περίπτωση το ογκομετρικό κλάσμα νερού και αέρα είναι 0 και 1. Ακόμα πρέπει να οριστεί και η έξοδος των ρευστών (outlet) το οποίο είναι το πράσινο τμήμα του σχήματος 28β. Το κάτω μέρος του όγκου ελέγχου, το εξωτερικό του σωλήνα και των μπεκ θεωρούνται τοίχοι (wall).



Σχήμα 28α: Άνοιγμα (αέρας)



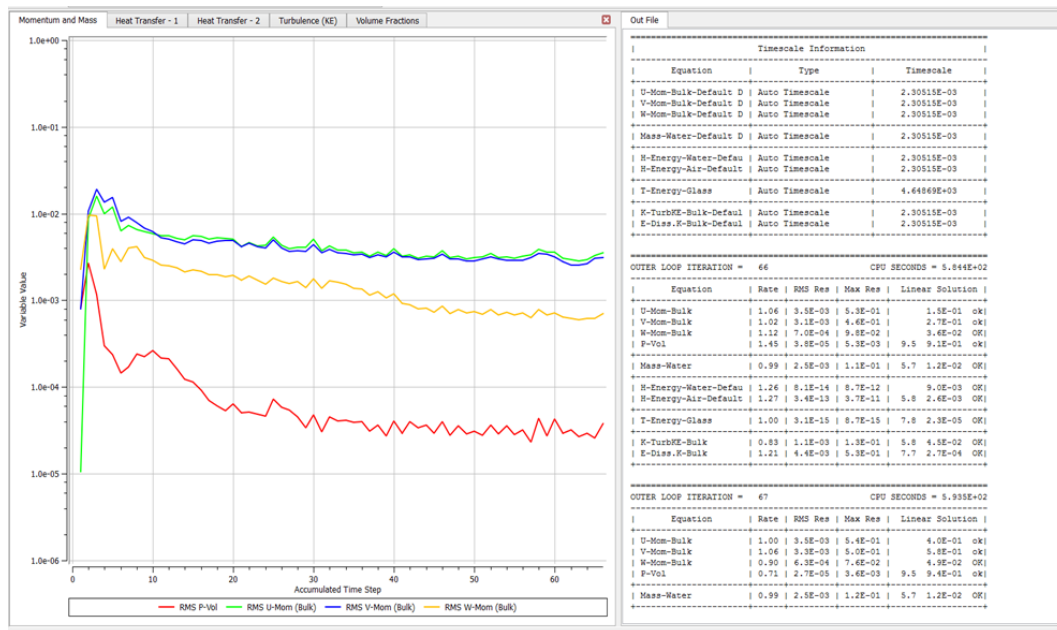
Σχήμα 28β: Έξοδος ρευστών



Σχήμα 29: Τοίχοι του συστήματος

6.4.Επίλυση

Τελευταίο βήμα του Setup είναι η επιλογή του κριτηρίου σύγκλισης (ανώτατη τιμή του μέσου τετραγώνου του σφάλματος), ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Στις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε $RMS \leq 10^{-6}$. Στην οθόνη του Solver παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS (Root Mean Square) των μεγεθών που σχετίζονται με τη μάζα, την ορμή, τη μεταφορά θερμότητας, την τύρβη και τα κλάσματα του όγκου (Mass, Momentum, Heat transfer, Turbulence, Volume fractions).



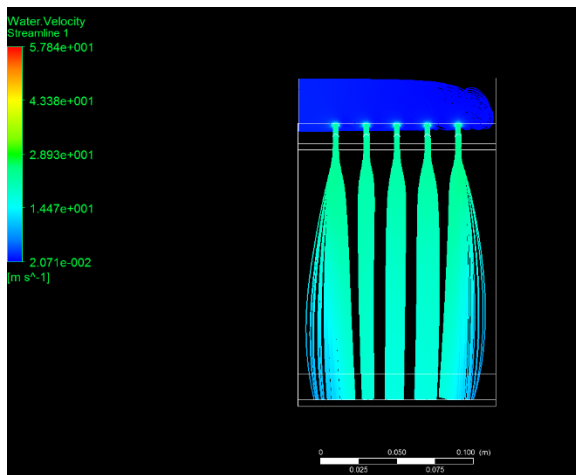
Σχήμα 30:Εξέλιξη RMS στο Solver

Στο Σχήμα 30 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων των ταχυτήτων u, v, w (ταχύτητες στις 3 διευθύνσεις) και της ορμής. Ακόμα, απεικονίζει την εξέλιξη του RMS της μάζας του νερού, της απόσβεσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της κινητικής ενέργειας τύρβης.

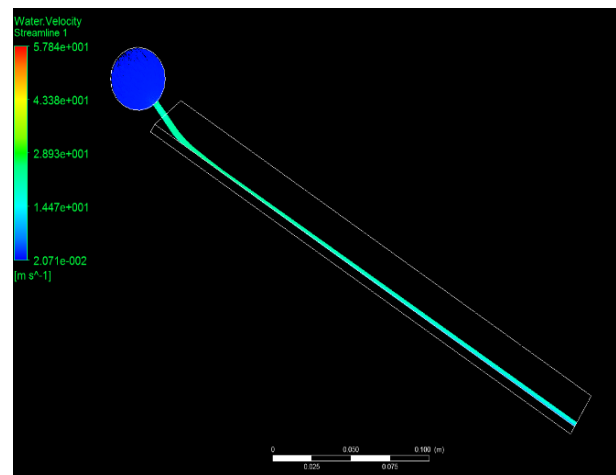
7.Αποτελέσματα (CFX- Post)

7.1.Συμπεριφορά ρευστών

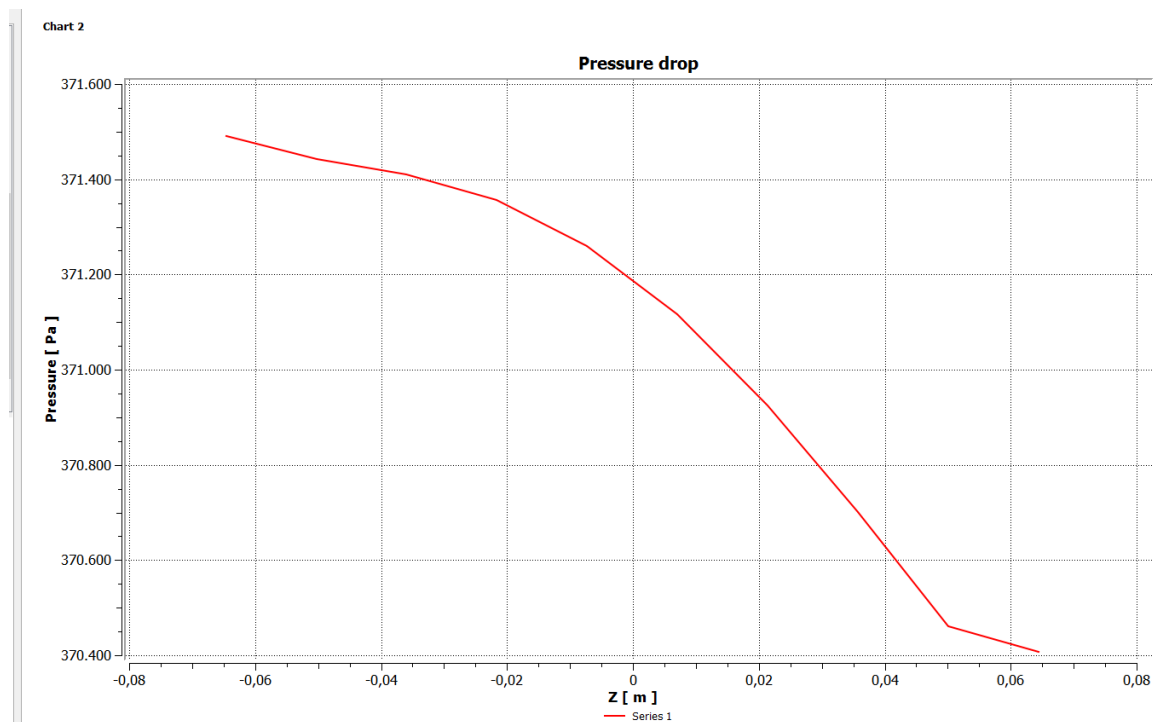
Αφού ολοκληρωθεί η επίλυση της προσομοίωσης, ο χρήστης μπορεί να λάβει πληροφορίες για την ταχύτητα του ρευστού και το ποσοστό όγκου νερού ή αέρα όπως φαίνονται παρακάτω. Στα Σχήματα 31α και 31β φαίνεται η ταχύτητα του νερού στην πρόσοψη και στην πλάγια όψη. Η υψηλότερη τιμή της ταχύτητας συναντάται στο εσωτερικό των μπεκ, όπου η διατομή είναι πολύ μικρότερη από τον κεντρικό σωλήνα.



Σχήμα 31α: Πρόσοψη Streamline

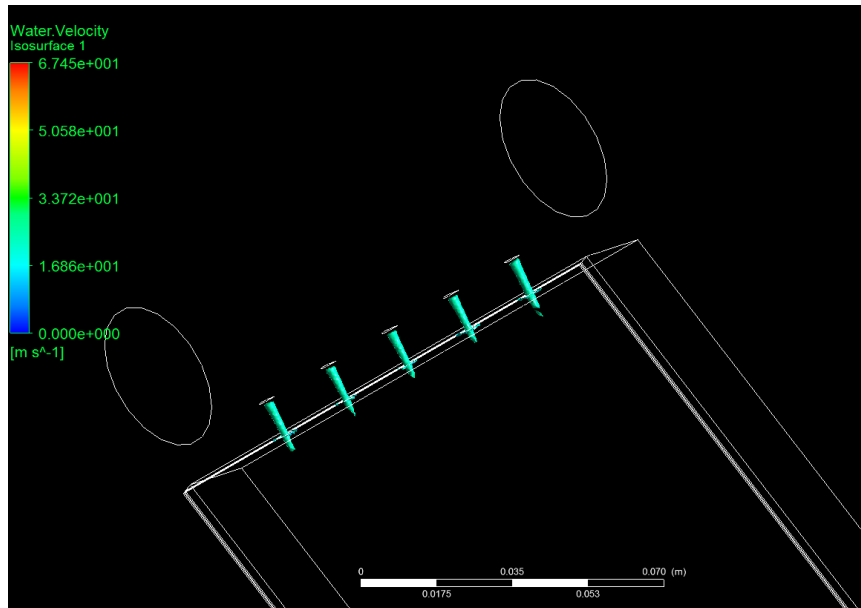


Σχήμα 31β: Κάτοψη Streamline

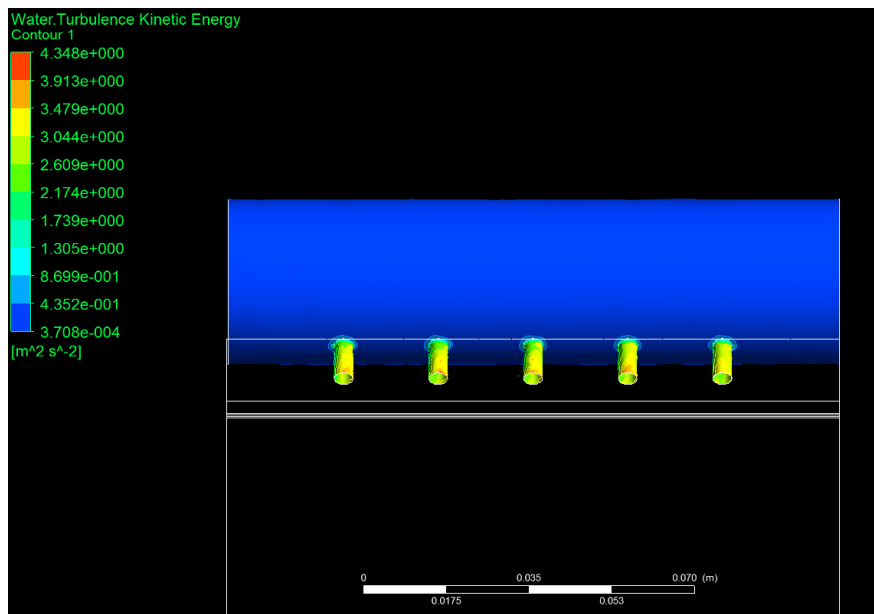


Σχήμα 32: Διάγραμμα πίεσης συναρτήσεως του Z άξονα στο εσωτερικό του σωλήνα

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 32 η πίεση του νερού έχει υψηλότερη τιμή στην είσοδο της στο σωλήνα. Ακόμα ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια ισοεπιφάνεια και να επιλέξει μια τιμή ενός μεγέθους (πίεση, θερμοκρασία νερού, αέρα) και μέσω του προγράμματος να σχηματιστεί μια επιφάνεια στη γεωμετρία που του έχει εισάγει με αυτήν την τιμή. Επιλέγοντάς ταχύτητα νερού 25m/s προκύπτει η ισοεπιφάνεια του Σχήματος 33. Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται η κινητική ενέργεια τύρβης που και αυτή λαμβάνει την μέγιστη τιμή της στο εσωτερικό των μπεκ.

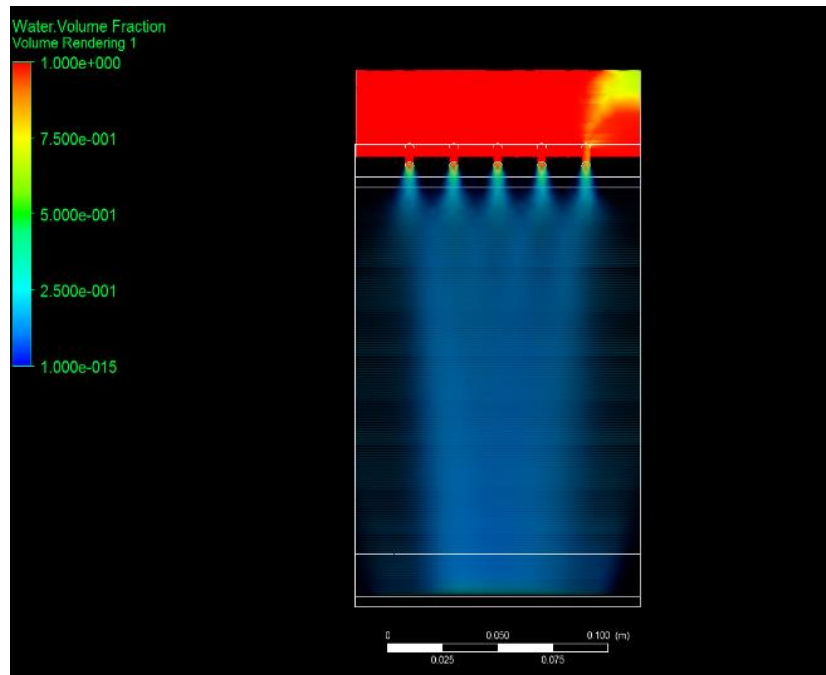


Σχήμα 33: Ισοεπιφάνεια με ταχύτητα νερού 25m/s

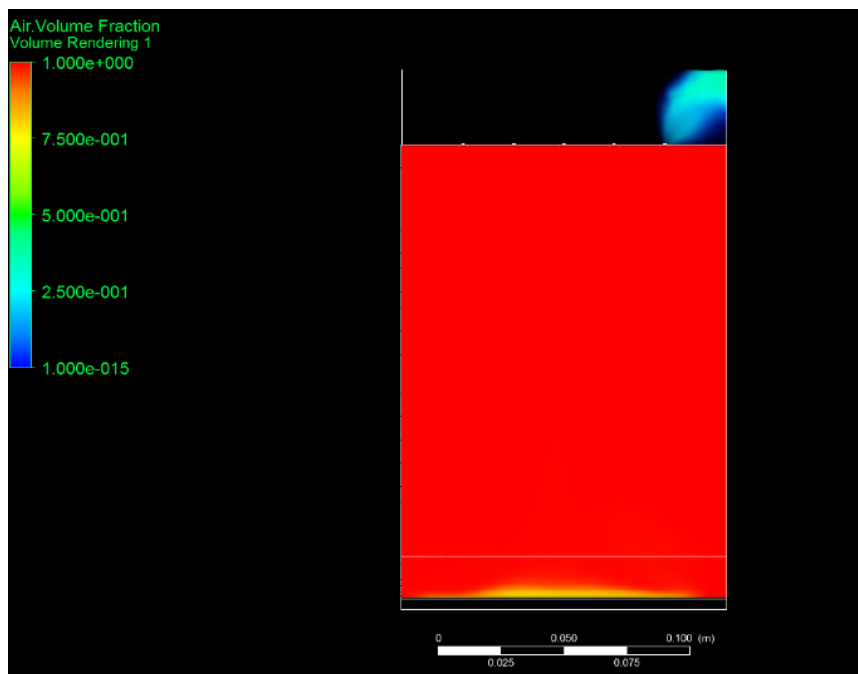


Σχήμα 34: Κατανομή κινητικής ενέργειας τύρβης

Επιπλέον στα Σχήματα 35α και 35β παρουσιάζονται τα ποσοστά όγκου του νερού και του αέρα. Η τιμή 1 αντιστοιχεί σε πλήρη κατάληψη του σημείου αυτού με την μεταβλητή που εξετάζεται.



Σχήμα 35α: Volume rendering (water volume fraction)



Σχήμα 35β: Volume rendering (air volume fraction)

7.2.Περιπτώσεις

Το μοντέλο που επιλέχθηκε στην προσομοίωση ήταν αυτό με σταθερή ροή θερμότητας στα στερεά, σε ένα εύρος ροών θερμότητας (Heat Flux) από 600 W/m^2 έως 1000 W/m^2 με εξωτερικές θερμοκρασίες από 22°C έως 42°C και σταθερή θερμοκρασία νερού 22°C .

Heat Flux 600 W/m^2

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22°C	22°C	32°C	32°C	42°C	42°C
<i>Τμήμα</i>	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}
<i>Γυαλί</i>	22,11	26,59	22,16	28,26	22,21	29,69
<i>EVA</i>	23,37	26,51	23,41	27,69	23,44	28,61
<i>Πυρίτιο</i>	24,24	26,02	24,27	26,74	24,30	27,83
<i>Tedlar</i>	24,24	28,69	24,27	29,40	24,30	30,47

Πίνακας 3: Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 600 W/m^2

Heat Flux 800 W/m^2

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22°C	22°C	32°C	32°C	42°C	42°C
<i>Τμήμα</i>	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}
<i>Γυαλί</i>	22,15	28,14	22,20	29,72	22,25	31,53
<i>EVA</i>	23,82	28,03	23,86	29,12	23,90	30,44
<i>Πυρίτιο</i>	24,99	27,38	25,02	28,03	25,04	29,43
<i>Tedlar</i>	24,99	30,09	25,02	31,58	25,05	32,94

Πίνακας 4: Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 800 W/m^2

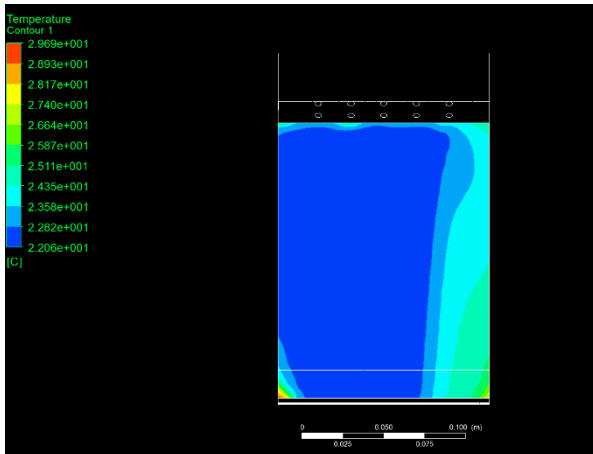
Heat Flux 1000 W/m^2

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22°C	22°C	32°C	32°C	42°C	42°C
<i>Τμήμα</i>	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}	T_{\min}	T_{\max}
<i>Γυαλί</i>	22,18	29,62	22,24	31,37	22,29	33,02
<i>EVA</i>	24,28	29,49	24,32	30,75	24,35	31,90
<i>Πυρίτιο</i>	25,74	28,68	25,76	29,48	25,79	30,43
<i>Tedlar</i>	25,74	33,13	25,77	33,91	25,79	34,83

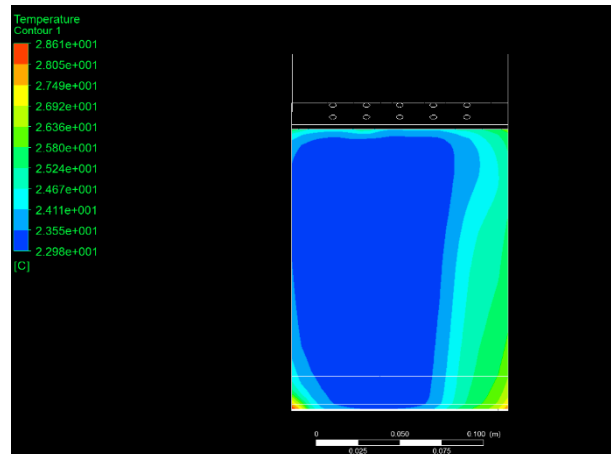
Πίνακας 5: Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 1000 W/m^2

Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή, τότε και η θερμοκρασία των επιμέρους στρώσεων του φωτοβολταϊκού διατηρείται χαμηλή. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος 42°C παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν την κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα για κάθε Heat Flux.

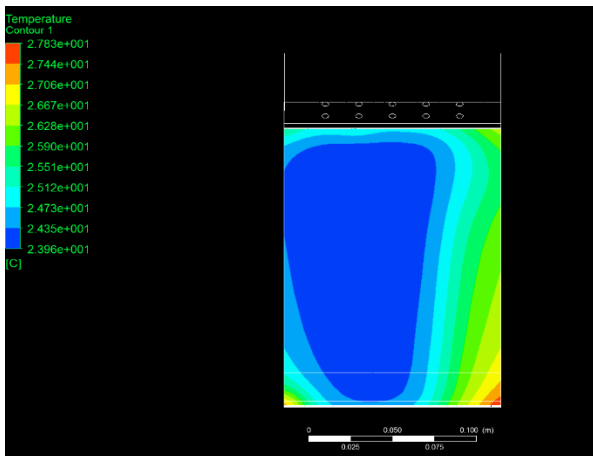
Heat Flux 600 W/m²



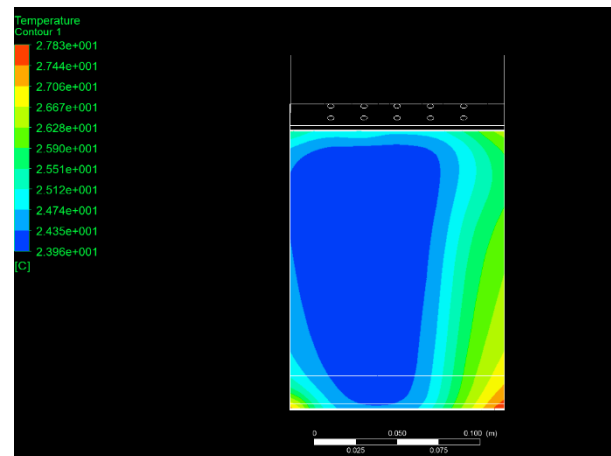
Σχήμα 36α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



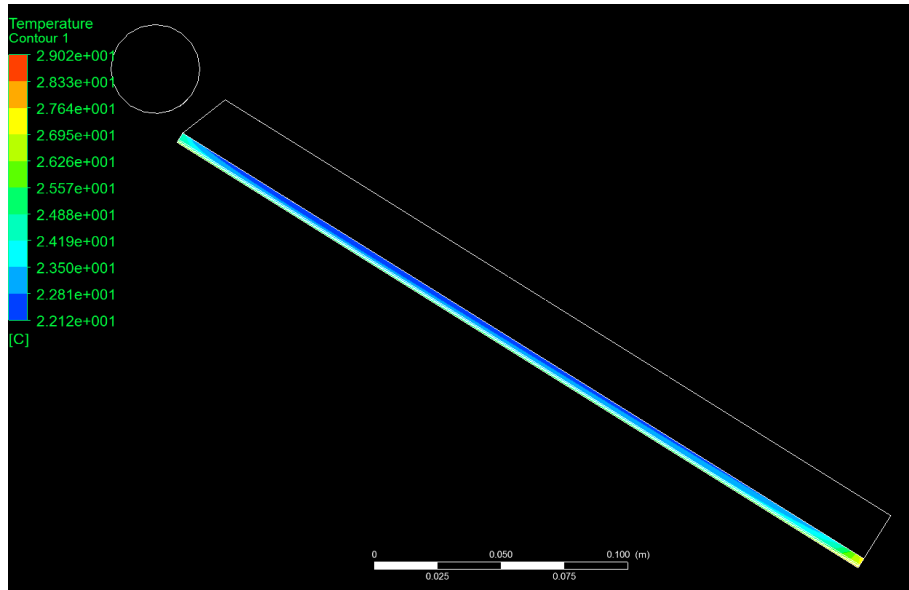
Σχήμα 36β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 36γ: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

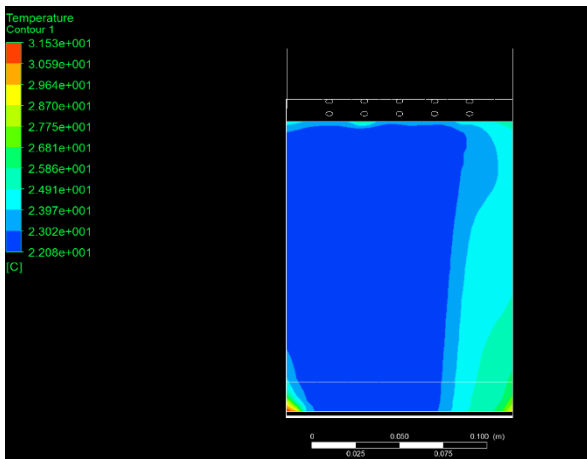


Σχήμα 36δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar

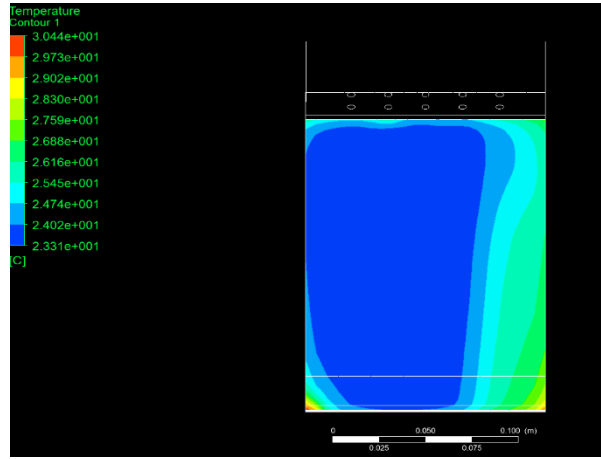


Σχήμα 37: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

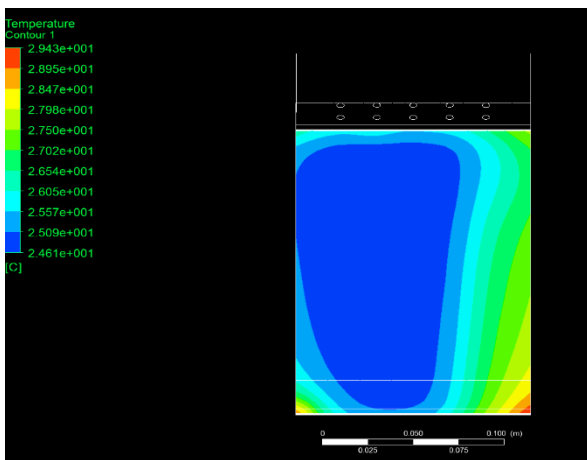
Heat Flux 800 W



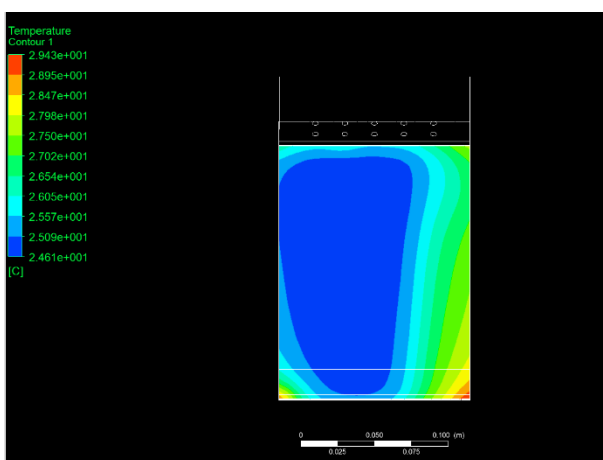
Σχήμα 38α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



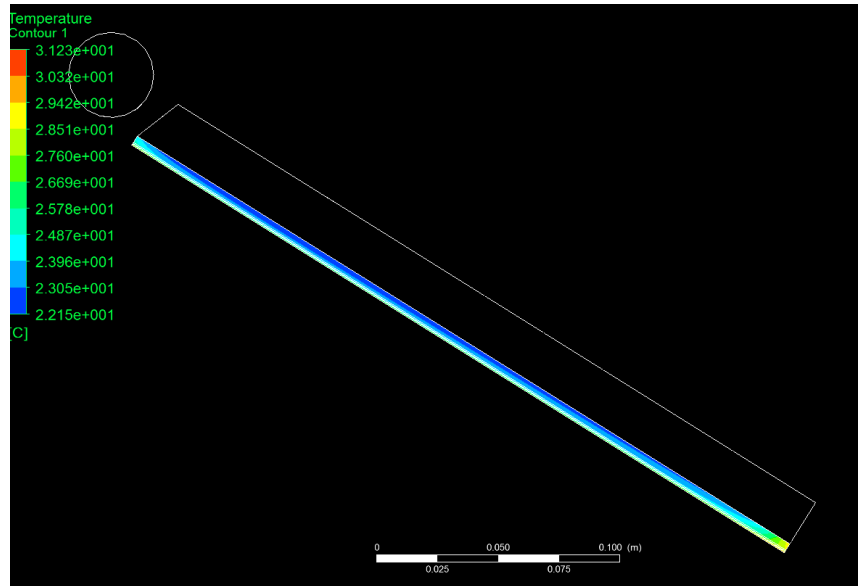
Σχήμα 38β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 38γ: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

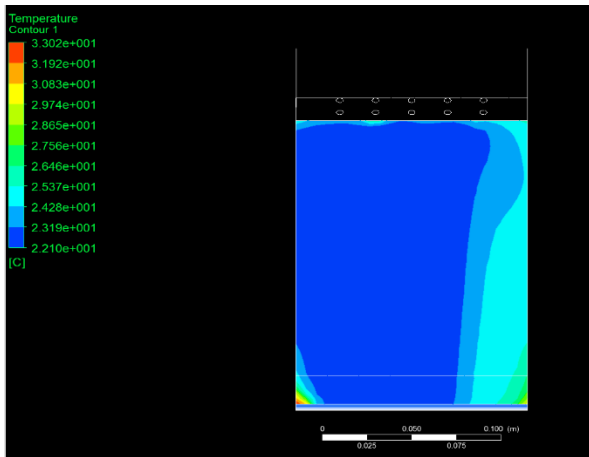


Σχήμα 38δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar

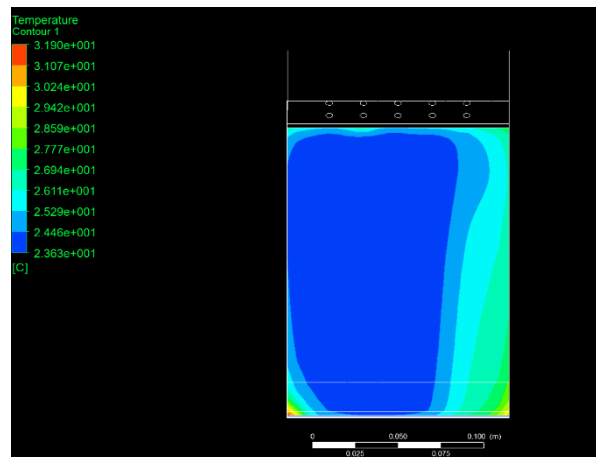


Σχήμα 39: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

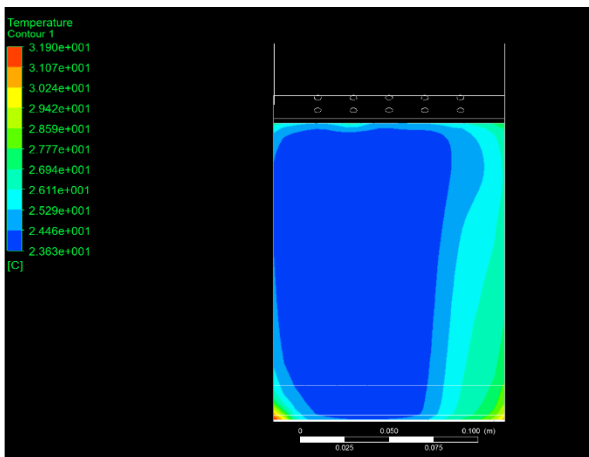
Heat Flux 1000 W/m²



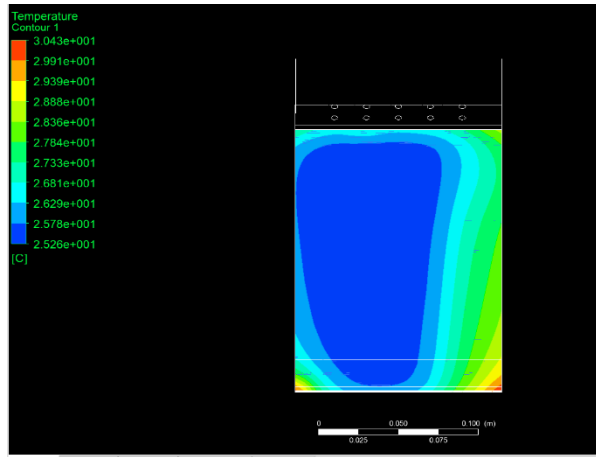
Σχήμα 40α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



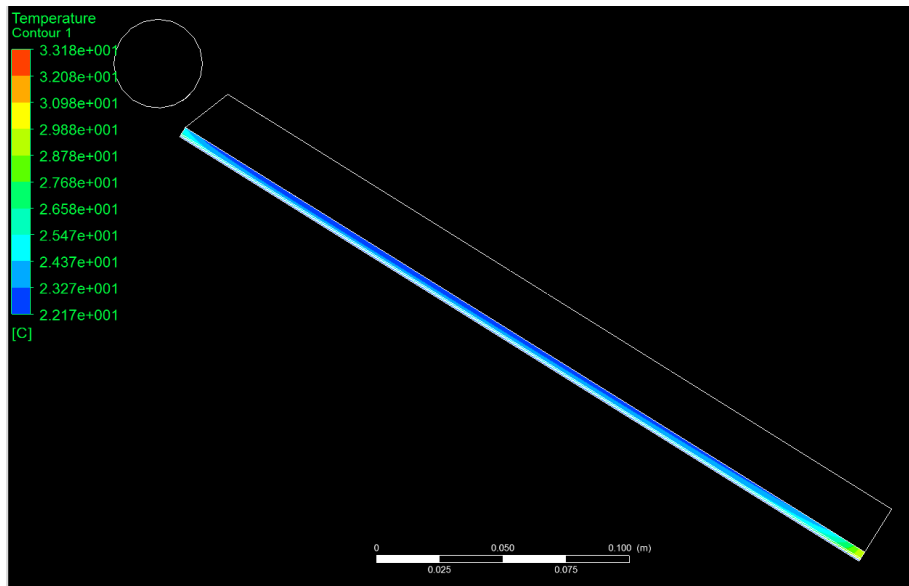
Σχήμα 40β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 40γ: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

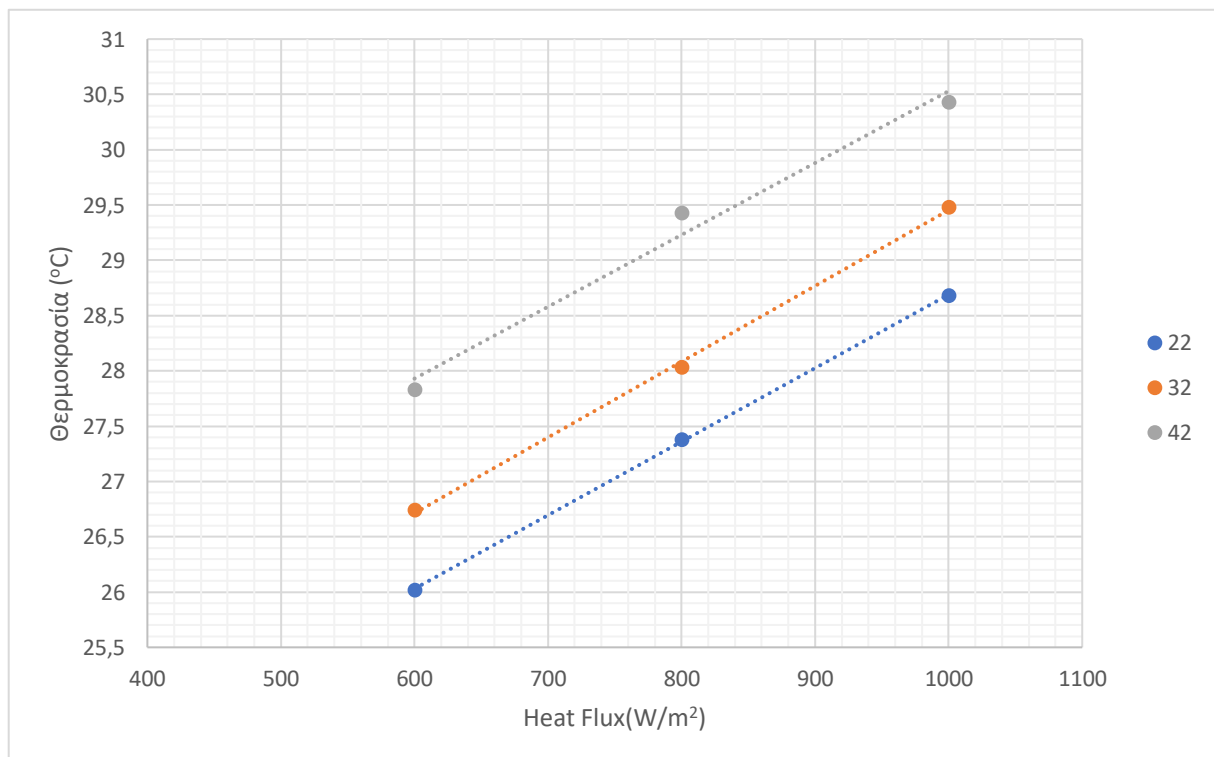


Σχήμα 40δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar



Σχήμα 41: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

Παρατηρείται ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο εσωτερικό του σωλήνα η πίεση δεν είναι ίση σε όλα τα σημεία και έχει σαν αποτέλεσμα στην δεξιά πλευρά του φωτοβολταϊκού να υπάρχει λιγότερη παροχή νερού και συνεπώς μικρότερη απαγωγή θερμότητας.



Σχήμα 42: Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει Heat Flux

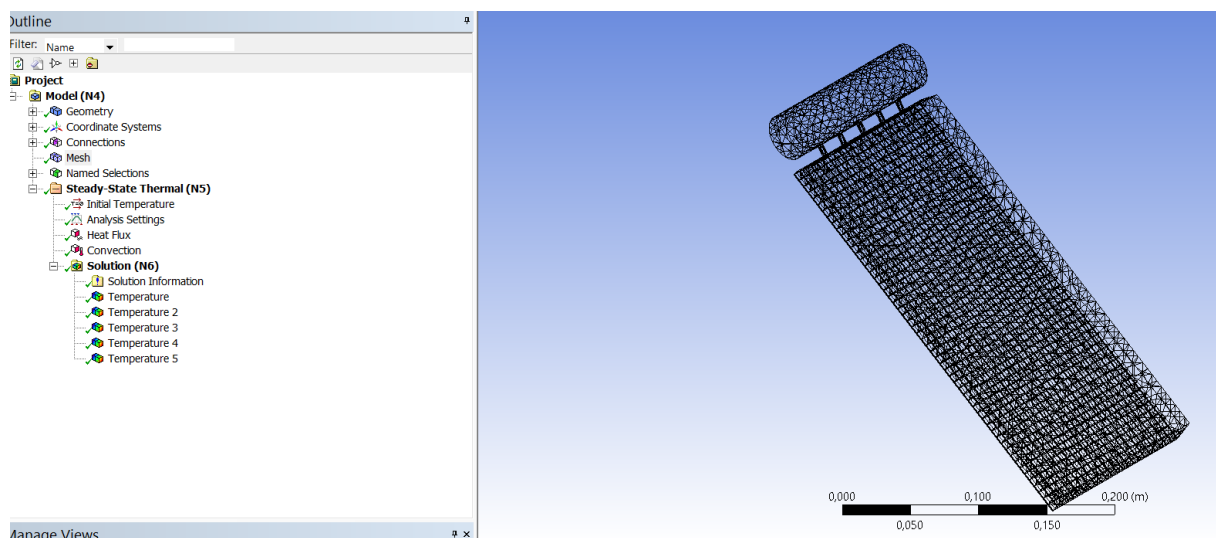
Το υλικό που έχει μεγαλύτερη σημασία να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία είναι το Πυρίτιο. Διατηρώντας χαμηλή θερμοκρασία πυριτίου αυξάνεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάνελ. Στο σχήμα 42 φαίνεται πως μεταβάλλεται η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας που λαμβάνει το Πυρίτιο για εξωτερική θερμοκρασία 22°C, 32°C και 42°C.

8. Σύγκριση με Steady-State Thermal

8.1. Χρήση Steady-State Thermal

Το Steady-State Thermal αποτελεί ακόμα ένα υπολογιστικό πακέτο του ANSYS. Χρησιμοποιώντας την ίδια γεωμετρία, ορίστηκαν τα υλικά και το Mesh με παρόμοιο τρόπο με το CFX, με την διαφορά ότι σε αυτή τη περίπτωση ο όγκος ελέγχου αποτελείται μόνο από αέρα. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει εκτίμηση για τον αν το σύστημα ψύξης λειτουργεί ρίχνοντας την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και κυρίως του Πυριτίου.

Στο Setup του Steady-State Thermal, ο χρήστης μπορεί να εισάγει ακτινοβολία, μετάδοση θερμότητας ή να ορίσει σταθερή θερμοκρασία σε κάποια επιφάνεια. Σε αυτή την περίπτωση ορίστηκε ότι τα σώματα μεταξύ τους είναι σε αγωγή θερμότητας, και όπως και στο CFX επιλέχθηκε ένα εύρος ροών θερμότητας (Heat Flux) από $600 W/m^2$ έως $1000 W/m^2$. Για κάθε διαφορετική τιμή ροής θερμότητας έγινε επίλυση σε εξωτερικές θερμοκρασίες από $22^{\circ}C$ έως $42^{\circ}C$.



Σχήμα 43: Περιβάλλον του Steady-State Thermal

Οι θερμοκρασίες φαίνονται στους παρακάτω πίνακες

Heat Flux 600 W/m²

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22 °C	22 °C	32 °C	32 °C	42 °C	42 °C
Τμήμα	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}
Γυαλί	34,12	35,69	44,12	45,70	54,12	55,70
EVA	34,10	34,72	44,10	44,72	54,10	54,72
Πυρίτιο	34,12	34,72	44,12	44,71	54,20	54,72
Tedlar	33,77	34,72	43,72	44,72	53,77	54,72

Πίνακας 6: Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 600 W/m²

Heat Flux 800 W/m²

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22 °C	22 °C	32 °C	32 °C	42 °C	42 °C
Τμήμα	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}
Γυαλί	38,16	40,26	48,15	50,26	58,16	60,26
EVA	38,13	38,96	48,14	48,96	58,13	58,96
Πυρίτιο	38,16	38,96	48,16	48,96	58,12	58,96
Tedlar	37,96	38,96	47,69	48,97	57,69	58,96

Πίνακας 7: Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 800 W/m²

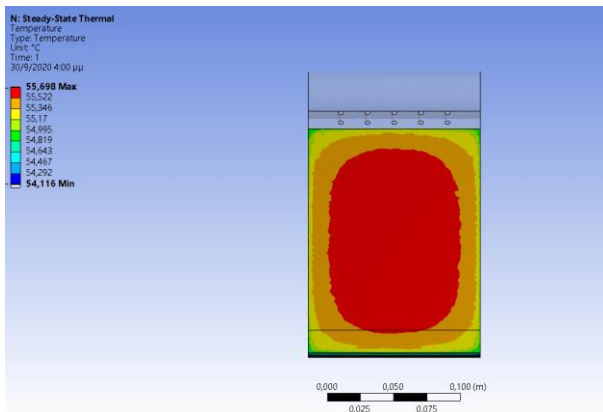
Heat Flux 1000 W/m²

Εξωτερικές θερμοκρασίες	22 °C	22 °C	32 °C	32 °C	42 °C	42 °C
Τμήμα	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}	T _{min}	T _{max}
Γυαλί	42,19	44,83	52,20	54,82	62,19	64,83
EVA	42,17	43,20	52,17	53,20	62,17	63,20
Πυρίτιο	42,20	43,20	52,19	53,19	62,20	63,2
Tedlar	41,62	43,20	51,61	53,20	61,62	63,20

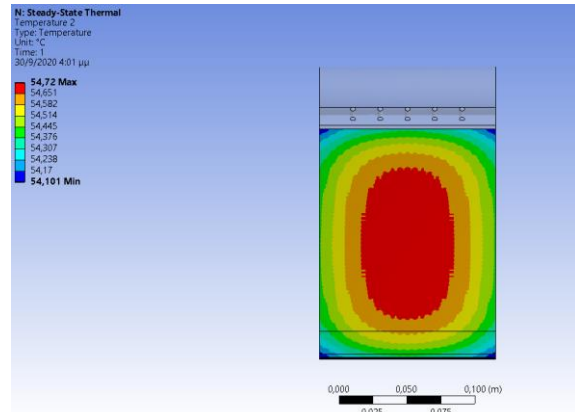
Πίνακας 8: : Θερμοκρασίες που αναπτύσσονται για Heat Flux 1000 W/m²

Στην περίπτωση που η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 42°C, όλα τα τμήματα του φωτοβολταϊκού παρουσιάζουν υψηλή θερμοκρασία. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν την κατανομή της θερμοκρασίας σε κάθε στρώμα για κάθε Heat Flux.

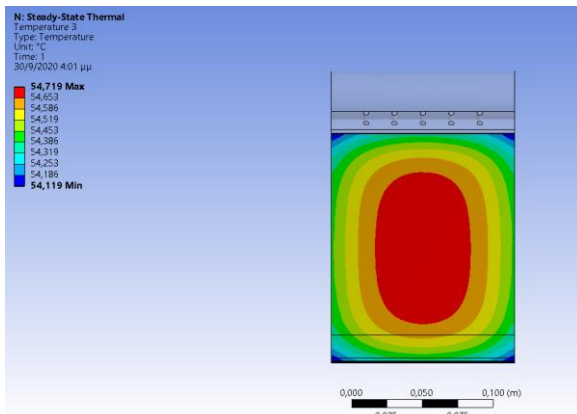
Heat Flux 600 W/m²



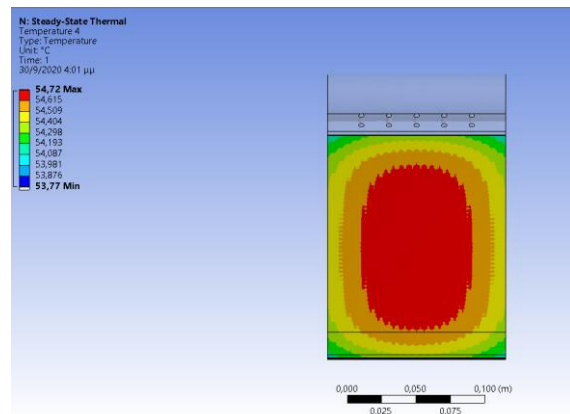
Σχήμα 44α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



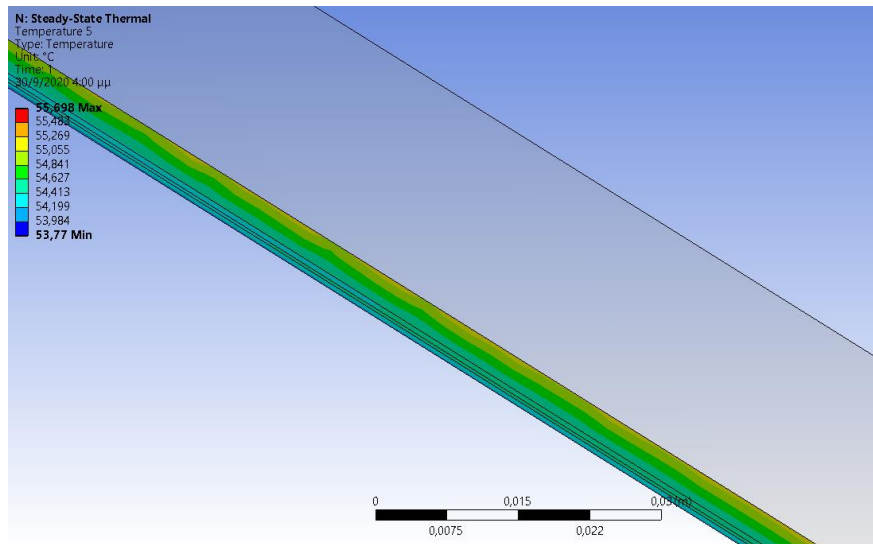
Σχήμα 44β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 44γ: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

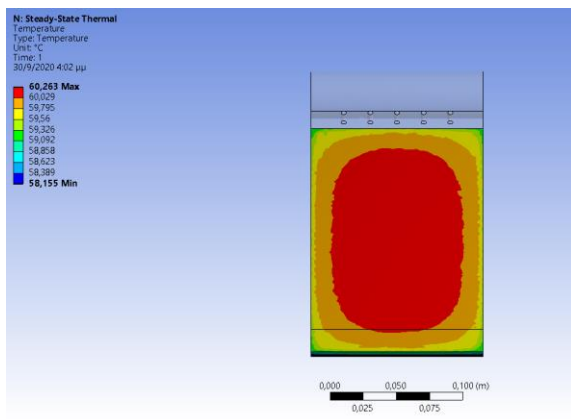


Σχήμα 44δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar

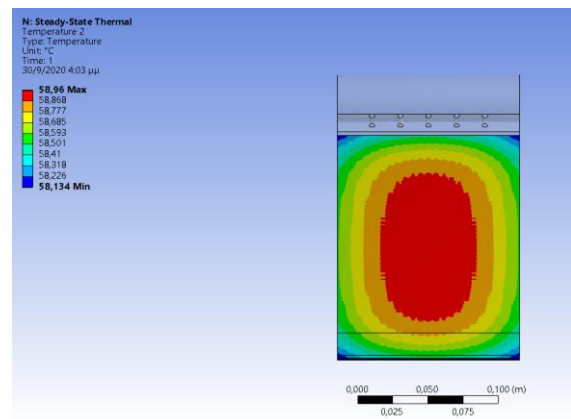


Σχήμα 45: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

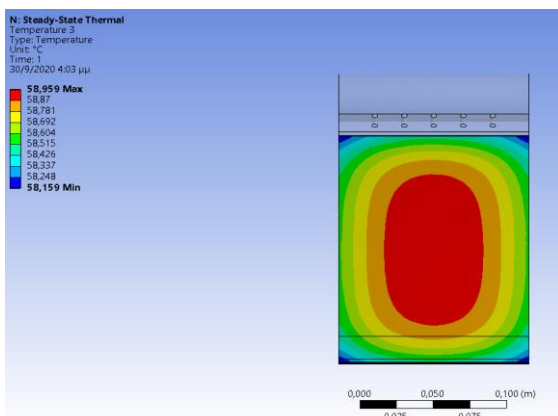
Heat Flux 800 W/m²



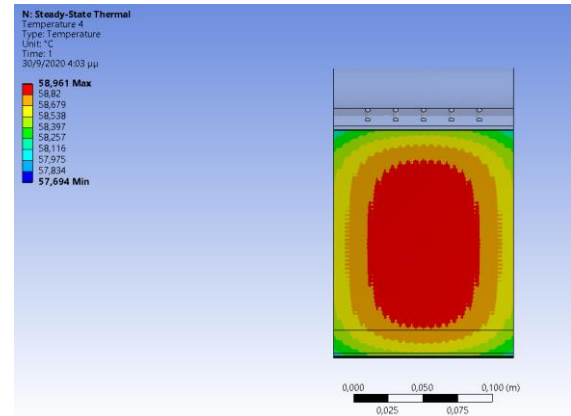
Σχήμα 46α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



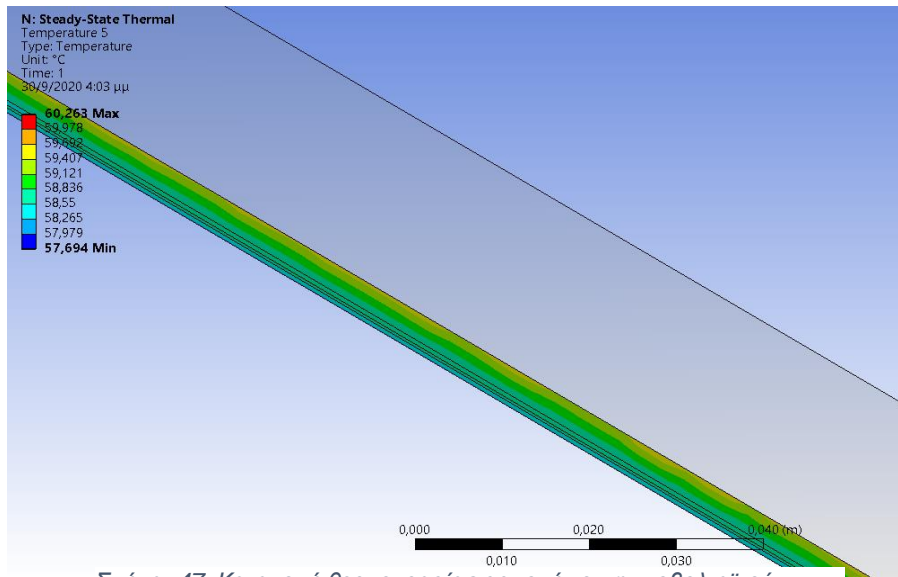
Σχήμα 46β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 46α: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

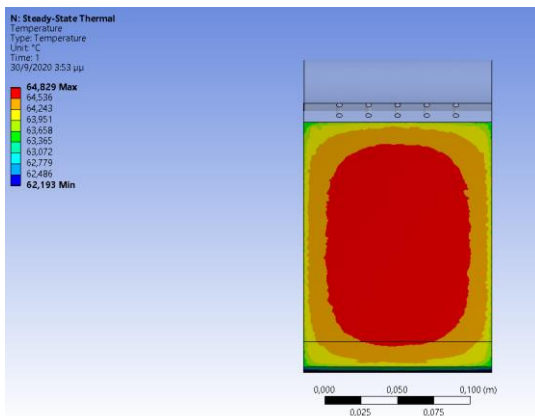


Σχήμα 46δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar

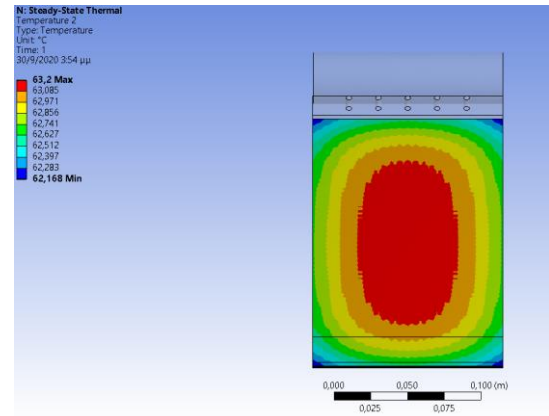


Σχήμα 47: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

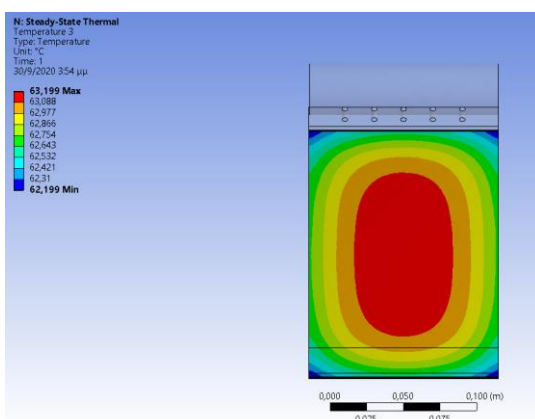
Heat Flux 1000 W/m²



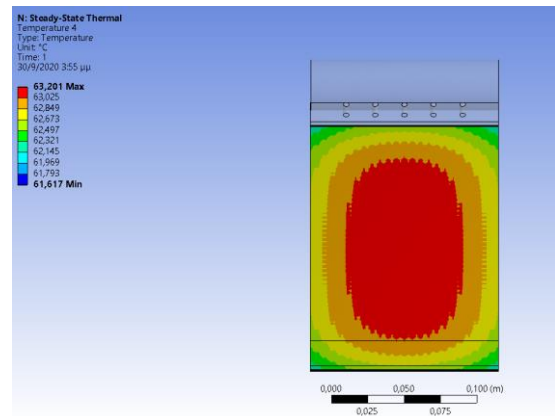
Σχήμα 48α: Κατανομή θερμοκρασίας γυαλιού



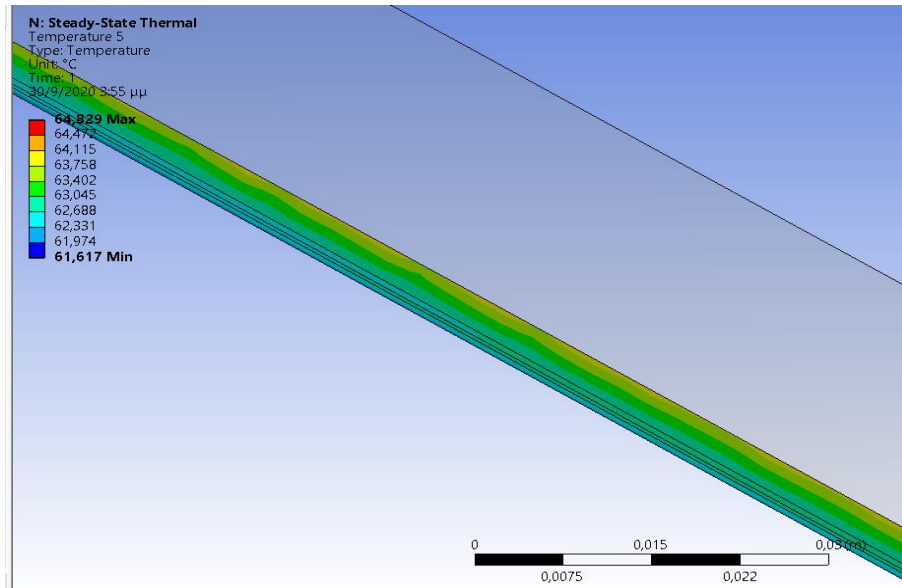
Σχήμα 48β: Κατανομή θερμοκρασίας EVA



Σχήμα 48γ: Κατανομή θερμοκρασίας Πυριτίου

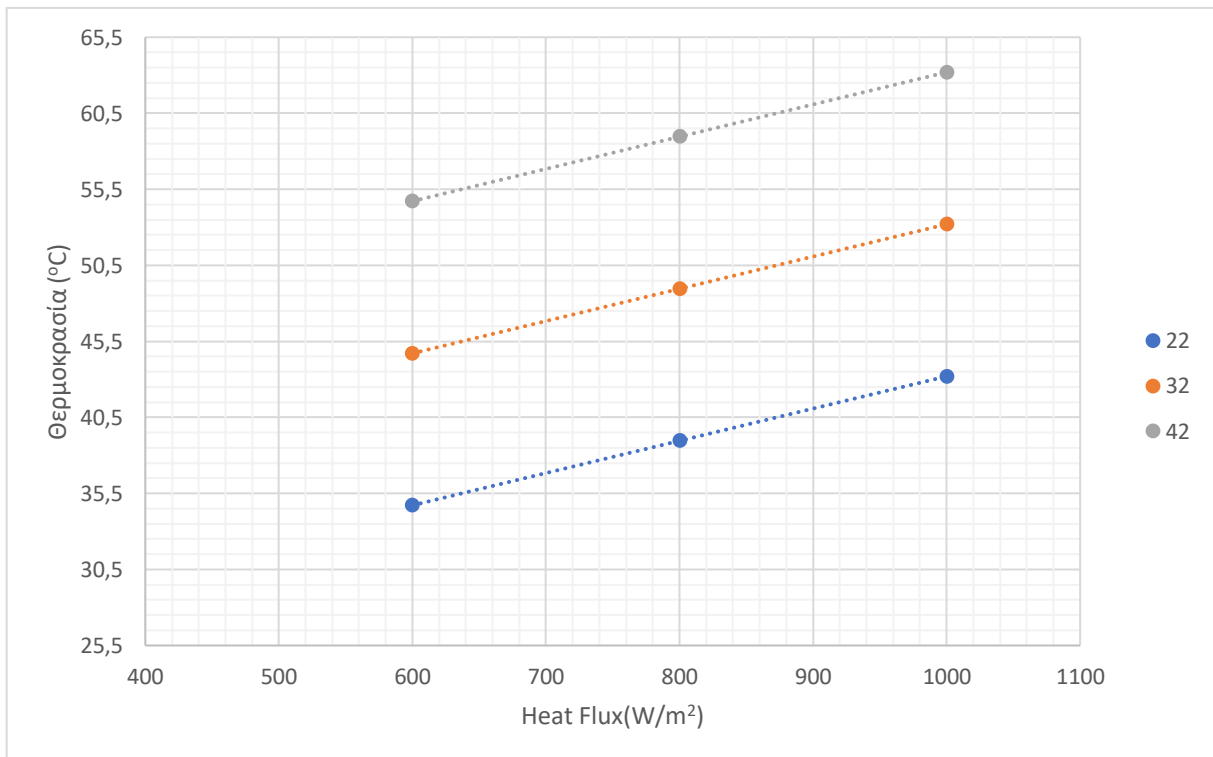


Σχήμα 48δ: Κατανομή θερμοκρασίας Tedlar



Σχήμα 49: Κατανομή θερμοκρασίας σε τομή του φωτοβολταϊκού

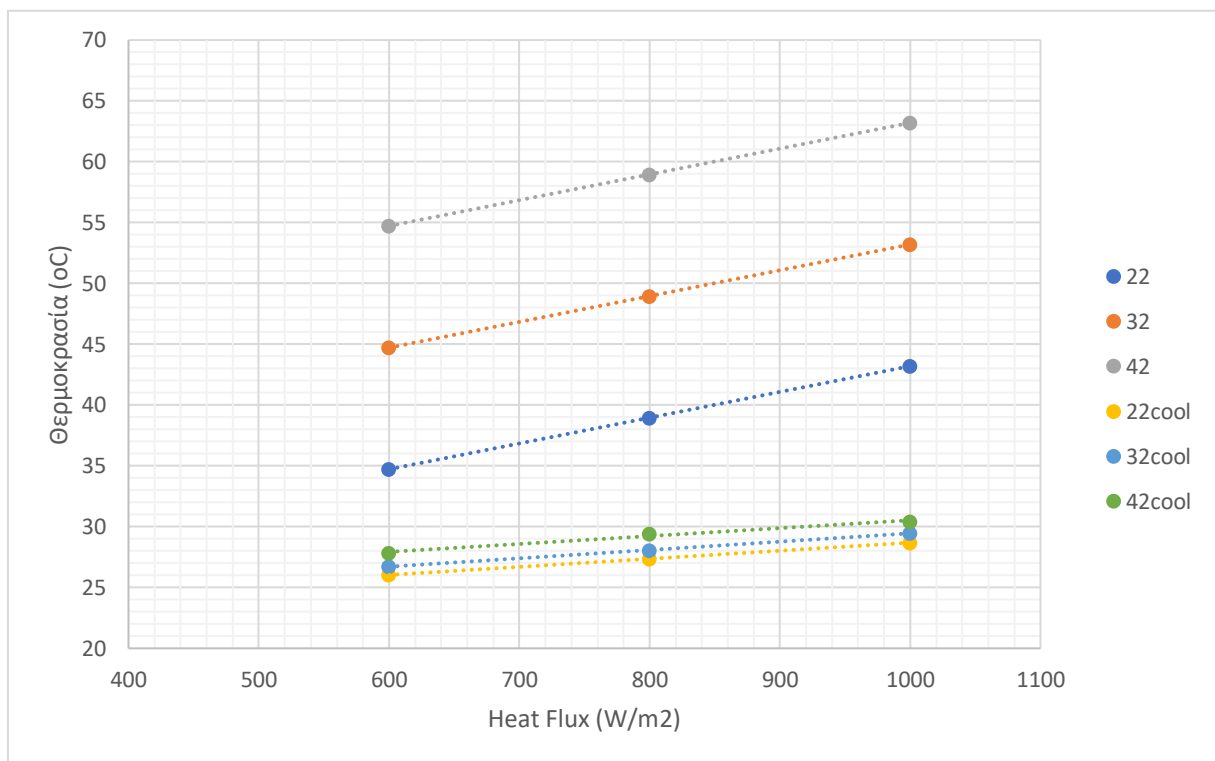
Όπως στην προηγούμενη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψιν της μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο Πυρίτιο, προκύπτει η γραφική παράσταση για θερμοκρασίες περιβάλλοντος 22°C, 32°C και 42°C. Είναι αναμενόμενο στους 42 °C το πυρίτιο να αναπτύσσει τη μέγιστη θερμοκρασία.



Σχήμα 50: Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει Heat Flux

8.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το υπολογιστικό πακέτο του CFX και του Steady-State Thermal είναι απαραίτητο να γίνει σύγκριση τους προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης. Με τη χάραξη μιας κοινής γραφικής παράστασης μπορεί να γίνει αυτή η αξιολόγηση. Στην παρακάτω γραφική επιλέχθηκαν όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό στρώμα του Πυριτίου. Οι τιμές που έχουν ληφθεί από την ψύξη του φωτοβολταϊκού πάνελ έχουν ονομαστεί ως cool, ενώ οι τιμές χωρίς το σύστημα ψύξης έχουν απλά το όνομα της εξωτερικής θερμοκρασίας.



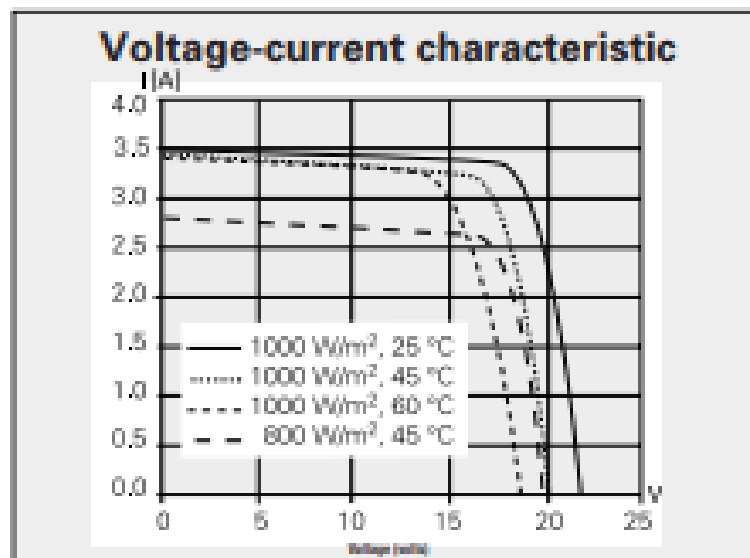
Σχήμα 51: Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει Heat Flux

Παρατηρείται μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά όταν υπάρχει και όταν δεν υπάρχει το σύστημα ψύξης και ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 42°C. Στη συνέχεια κατασκευάζεται πίνακας με τις διαφορές των μέγιστων θερμοκρασιών του Πυριτίου με σύστημα και χωρίς σύστημα ψύξης.

Εξωτερικές			
Θερμοκρασίες(°C)	22	32	42
Heat Flux(W/m ²)	Διαφορά Θερμοκρασίας (°C)		
600	8,7	17,97	26,89
800	11,58	20,93	29,53
1000	14,53	23,72	32,77

Πίνακας 9: Διαφορά θερμοκρασιών με ψύξη και χωρίς

Τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά με εκείνα που έχουν προκύψει από προσομοιώσεις που έχουν γίνει σε διαφορετικά πακέτα (Multiphysics LS-DYNA)[49] Η ιδανική συνθήκη λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ είναι 25 °C και με Heat Flux 1000 W/m² [50] όπως φαίνεται στο Σχήμα 52. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και μήκος που βρίσκεται διότι υπάρχει μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του από τις εξωτερικές συνθήκες[51][52]. Η απόδοση του μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του και σε χώρες όπως η Ελλάδα, που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες και υπάρχει υψηλό Heat Flux είναι μεγάλο πρόβλημα.



Σχήμα 52: Βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκού πάνελ
<http://www.solarquest.com/microsolar/suppliers/siemens/sm55.pdf>

9. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η δημιουργία, σε περιβάλλον ANSYS, συστήματος ψύξης φωτοβολταϊκού πάνελ. Η τρισδιάστατη σχεδίαση σε συνδυασμό με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσέγγιση της ροϊκής και της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος ψύξης φωτοβολταϊκού πάνελ. Αρχικά, ορίστηκαν τα βασικά υλικά από τα οποία αποτελείται ένα φωτοβολταϊκό και στη συνέχεια έγινε κατακερματισμός της γεωμετρίας σε στοιχειώδεις όγκους, στο εσωτερικό των οποίων γίνεται επίλυση βασικών εξισώσεων. Με την προσομοίωση αυτή παρέχεται η δυνατότητα αλλαγής των περιβαλλοντικών συνθηκών και παρακολούθηση των επιπτώσεων στην θερμοκρασία των επιμέρους στρώσεων του φωτοβολταϊκού.

Το βασικότερο συμπέρασμα που προκύπτει από τη διερεύνηση της ψύξης φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι παρουσιάζεται μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας του συστήματος. Το υλικό στο οποίο δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα είναι το Πυρίτιο καθώς από την θερμοκρασία του εξαρτάται και η απόδοση του πάνελ. Ακόμα και όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι 42°C και υπάρχει μεγάλη τιμή Heat Flux, η θερμοκρασία του Πυριτίου δεν ξεπερνά τους $30,43^{\circ}\text{C}$. Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι φανερό και λογικό ότι οι πιο χαμηλές θερμοκρασίες του πάνελ προκύπτουν όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ροή θερμότητας είναι χαμηλές.

Από τη σύγκριση των θερμοκρασιών του Πυριτίου με ψύξη και χωρίς προκύπτει ότι η θερμοκρασία ελαττώνεται αρκετούς βαθμούς. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας ($32,77^{\circ}\text{C}$) προκύπτει όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 42°C και το Heat Flux $1000\text{W}/\text{m}^2$. Μια τέτοια πτώση θερμοκρασία συμβάλει σημαντικά στην απόδοση του φωτοβολταϊκού.

Έχοντας «χαρτογραφήσει» τη συμπεριφορά του πάνελ για διάφορες μεταβλητές όταν αυτό ψύχεται, οι συνθήκες είναι πλέον ώριμες για τα επόμενα βήματα. Συγκεκριμένα, θα τοποθετηθεί σε πάνελ τύπου Siemens SM55 το σύστημα ψύξης που περιγράφεται στην εργασία και θα καταγραφούν οι θερμοκρασίες που προκύπτουν κατά την ψύξη. Σε πιθανές αποκλίσεις από τις προσομοιώσεις, θα γίνει επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Βιβλιογραφία

[1] J. Twidell, and W. Tony, "Renewable energy resources". Routledge, 2015.

[2] Κ. Τσακαλάκης, & Ι.Ε. Ιωακείμ, "Παραγωγή ενέργειας από συμβατικά ορυκτά καύσιμα και εναλλακτικές πηγές ενέργειας", Σημειώσεις, Αναπλ. Καθηγητής, Σχολή Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ.

[3] IMO 2019, <http://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>

[4] D. Cook, B. Davíðsdóttir, & D. M. Kristófersson, "An ecosystem services perspective for classifying and valuing the environmental impacts of geothermal power projects.", Energy for Sustainable Development, vol. 40, pp.126-138, 2017

[5] Π. Γιαννούλης, "Νέες πηγές ενέργειας", Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011

[6] G.M.J. Herbert, I. S. Iniyar, E. Sreevalsan, and S. Rajapandian, "A review of wind energy technologies.", Renewable and sustainable energy Reviews, vol. 11, no. 6, pp.1117-1145, 2007

[7] E. Barbier, "Geothermal energy technology and current status: an overview.", Renewable and sustainable energy reviews, vol. 6, no. 1-2, pp. 3-65, Jan 2002

[8] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.", Bioresource technology, vol 83, pp.37-46, 2002

[9] H.Bhowmik, A.Ruhul, "Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector." , Energy Reports ,vol. 3 ,pp.119-123, 2017

[10] J.Palmer, "Optical Measurements" in The measurement of transmission, absorption, emission, and reflection: Handbook of optics, vol 2 ,Ed. M. Bass,1995

[11] Ι.Τρυπαναγνωστόπουλος, "Συστήματα ηλιακής ενέργειας", Πανεπιστήμιο Πατρών, 2016

[12] F.A. Tiano, G. Rizzo, M. Marino, and A. Monetti, "Evaluation of the potential of solar photovoltaic panels installed on vehicle body including temperature effect on efficiency.", eTransportation, vol. 5, pp.100067, 2020

[13] H.Y. Cheng, Y. Chih-Chang, H. Kuo-Chang, C. Chi-Chang, T. Mei-Hui, and L. Chih-Lung, "Estimating Solar Irradiance on Tilted Surface with Arbitrary Orientations and Tilt Angles." Energies, vol.12, no. 8, pp. 1427, 2019

- [14] <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/constants.html>
- [15] Χ.Βάρβογλης, Γ. Χ. Σειραδάκης, “Εισαγωγή στη σύγχρονη αστρονομία”, Εκδόσεις Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη, 1994
- [16] Γ.Δ Πρίφτης, Α.Α. Βραδής, Δ.Λ. Αναστασόπουλος, “Εισαγωγή στη φυσική στερεάς κατάστασης”, Πάτρα, 2012
- [17] S.O. Kasap, “Principles of electronic materials and devices.”, Tata McGraw-Hill, 2006
- [18] Κ.Θ. Δέρβος, “Εισαγωγή στα ημιαγωγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις.”, Ε.Μ.Π, Αθήνα ,2010
- [19] R. C. Jaeger and T. N. Blalock, Eds., “Microelectronic circuit design.”, 4th ed, New York: McGraw-Hill, 1997.
- [20] Λ. Γ. Ζαφείρης, “Διαλέξεις Χημείας Ημιαγωγών”, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2014
- [21] A. E. Becquerel, “Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques”, vol 9, pp. 145, 1839
- [22] L. M. Fraas, “History of solar cell development.”, In Low-Cost Solar Electric Power, Springer, pp. 1-12, 2014.
- [23] A.Goetzberger, J.Luther and G. Willeke, “Solar cells: past, present, future.”, Solar energy materials and solar cells, vol 74, pp.1-11., 2002
- [24] A. Luque and S. Hegedus, “Handbook of photovoltaic science and engineering.”, John Wiley & Sons,2011
- [25] R. Stevenson, “Slimmer solar cells,” Ingenia, vol. 53, pp. 33–37, 2014
- [26] V.J. Fesharaki, M. Dehghani, J.J Fesharaki, and H. Tavasoli, “The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency.”, In Proceedings of the 1stInternational Conference on Emerging Trends in Energy Conservation–ETEC, Tehran, pp. 20-21, 2011
- [27] H. Yu, Y. Ge, S. Shi, “Improving power conversion efficiency of polymer solar cells by doping copper phthalocyanine.”, Electrochimica Acta, vol. 180, pp. 645 – 650, 2015

- [28] H.Ibrahim, and N.Anani, "Variations of PV module parameters with irradiance and temperature", Energy Procedia, 134, pp.276-285, 2017
- [29] A.Kowsar & S.F.U.Farhad, "High Efficiency Four Junction III-V Bismide Concentrator Solar Cell: Design, Theory, and Simulation.", International Journal of Renewable Energy Research, vol. 8, pp. 1762-1769, 2018
- [30] R. R King, D. C. Law, K. M. Edmondson, C. M. Fetzer, G. S. Kinsey, H. Yoon, R. A. Sherif, and N. H. Karam, "40% efficient metamorphic GaInP/ GaInAs/ Ge multijunction solar cells.", Applied physics letters, vol. 90, no. 18, pp. 183516, 2007
- [31] A.J. Nozik, "Quantum dot solar cells.", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, vol.14, pp.115-120, 2002
- [32] <https://www.pv-magazine.com/2020/02/19/a-quantum-dot-solar-cell-with-16-6-efficiency/>
- [33] A. Luque and S. Hegedus, Eds., "Handbook of photovoltaic science and engineering", John Wiley & Sons, 2011.
- [34] Kalra, Shifali & Nabi, Mashuq. (2016). Study of coronary stent deformation using finite element method., pp. 404-407, 2016
- [35] F.J.Profitto, M.Giacopini, D.C.Zachariadis, et al., "A General Finite Volume Method for the Solution of the Reynolds Lubrication Equation with a Mass-Conserving Cavitation Model.", Tribol Lett, vol. 60, no. 18 , 2015.
- [36] ANSYS: ANSYS CFX – Solver Theory Guide, Nov 2011.
- [37] R.Temam, "Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis.", American Mathematical Soc., vol. 343, 2001
- [38] D.F.Young, B.R.Munson, T.H.Okiishi, and W.W.Huebsch,"A Brief Introduction to Fluid Mechanics", Wiley, 6thEd., 2007
- [39] http://147.102.192.206/ergasthria/askhseis_ergasthrion/askhsh_30.pdf
- [40] J. V.Sengers, and M. Klein, "The Technical Importance of Accurate Thermophysical Property Information.", National Bureau of Standards Technical Note, No. 590, 1980.

- [41] G.H.Yoon, "Topology optimization method with finite elements based on the k- ϵ turbulence model", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol.361, pp. 112784, 2020
- [42] S.Grossmann and D. Lohse, "Prandtl and Rayleigh number dependence of the Reynolds number in turbulent thermal convection.", *Physical review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, vol. 66, pp. 016305, 2002
- [43] R.Senthil Kumar, N.Puja Priyadharshini and E.Natarajan, "Experimental and Numerical Analysis of Photovoltaic Solar Panel using Thermoelectric Cooling.", *Indian Journal of Science and Technology*, pp. 8, 2015
- [44] R.Senthil Kumar, N.Puja Priyadharshini and E.Natarajan, "Experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) Study of Glazed Three Dimensional PV/T Solar Panel with Air Cooling.", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 787, pp. 102-106, 2015
- [45] A.W.Czanderna, and F.J.Pern, "Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review.", *Solar energy materials and solar cells*, vol 43, pp.101-181, 1996
- [46] ANSYS: ANSYS CFX – ANSYS CFX Reference Guide, Release 14.0, November 2011
- [47] ANSYS-CFX tutorials, ANSYS-CFX Release 11.0, Tutorial 7: Free Surface Flow Over a Bump, pp 139-154, 2006
- [48] A.F.Stalder, T.Melchior, M. Müller, D. Sage, T. Blu, and M.Unser, "Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops.", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 364, pp.72-81, 2010
- [49] J.Zhou, Q.Yi, Y. Wang, and Z.Ye, "Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation.", *Solar Energy*, vol. 111, pp.97-103. 2015
- [50] E.P.J.A. Skoplaki, and J.A.Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations.", *Renewable energy*, vol 34, pp.23-29. 2009.

[51] S.Dubey, N.S. Jatin, and S.Bharath, "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review.", *Energy Procedia* ,vol. 33, pp.311-321,2013

ΕΙΚΟΝΕΣ

Σχήμα 1: <https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/685>

Σχήμα 2: [13]

Σχήμα 3:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CF%85%CF%81%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%B3%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B5%CF%82

Σχήμα 4: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/semiconductor-materials>

Σχήμα 5: https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/113104005/lecture2/2_8.htm

Σχήμα 6:

http://lampx.tugraz.at/~hadley/ss1/bands/bandstructures/GaAs/gaas_bands.html

Σχήμα 7: <https://slideplayer.gr/slide/12211721/>

Σχήμα 8:

https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi_basic.html

Σχήμα 9: http://users.auth.gr/~paloura/sterea_MA8HMA%205.pdf

Σχήμα 10: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-2/the-p-n-junction/>

Σχήμα 11:[25]

Σχήμα 12:[26]

Σχήμα 13: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/pv-cells-101-primer-solar-photovoltaic-cell>

Σχήμα 14: https://www.researchgate.net/figure/I-V-characteristics-curve-of-a-PV-cell_fig2_313450163

Σχήμα 15:[27]

Σχήμα 16: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/Text-PDF/Part%20A-3.pdf>

Σχήμα 17: <https://slideplayer.com/slide/14018182/>

Σχήμα 18:[35]

Σχήμα 19:[39]

Σχήμα 20- Σχήμα 48 : Εικόνες που λήφθηκαν από το ANSYS

Σχήμα 49: <http://www.solarquest.com/microsolar/suppliers/siemens/sm55.pdf>