

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**



Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη  
του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών  
συνθηκών

**Διπλωματική Εργασία**



**ΚΟΛΛΙΑΣ ΜΕΛΕΤΙΟΣ**

**Επιβλέπων: Σταυρουλάκης Γεώργιος**

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Απρίλιο του 2016 έως τον Οκτώβριο του 2017 στη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να αναλυθεί θερμομηχανικά ένα φωτοβολταϊκό πάνελ καθώς επίσης και να παρατηρηθεί το πως επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσής του βάση διαφόρων εξωτερικών παραγόντων. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Γ. Σταυρουλάκη, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη καθοδήγηση καθώς και πληροφορίες που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συμπαράσταση τους.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Κόλλιας Μελέτιος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Οδηγούμενοι από την ανάγκη για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> παγκοσμίως, τα συνολικά ενεργειακά αποθέματα έχουν αρχίσει να παράγονται σταδιακά όχι από ορυκτά καύσιμα αλλά από αλλά μέσω άλλων μεθόδων βιώσιμης ανάπτυξης. Τα φωτοβολταϊκά σήμερα αποτελούν ένα αναπόσπαστο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εξαιτίας λοιπόν της μόνιμης έκθεσης τους σε εξωτερικές συνθήκες, πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την λειτουργία τους και εν τέλει το βαθμό απόδοσής τους. Οπότε, ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η θερμομηχανική ανάλυση των φωτοβολταϊκών πάνελ καθώς και η παρατήρηση του πως επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών.

## ABSTRACT

---

Driven by the need of decreasing the emissions of CO<sub>2</sub> in a global level the total amount of energy reserves has been gradually produced not by fossil fuels but also through other means of sustainable development. The solar panels nowadays have been an integral part of renewable energy sources. Because of the permanent exposure to the external conditions, there are many factors that can affect the functionality and even so the performance level of solar panels. So, the main goal of this diploma thesis is to analyze at a thermomechanical level a solar panel and also to observe how the performance level is affected by the different weather conditions.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

Πρόλογος.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1°	
1.1 Τι είναι ενέργεια.....	7
1.2 Ενεργειακή ζήτηση.....	8
1.2.1 Ενεργειακό πρόβλημα και κλιματική αλλαγή.....	8
1.3 Μορφές Ενέργειας.....	9
1.3.1 Κινητική Ενέργεια.....	10
1.3.2 Δυναμική Ενέργεια.....	10
1.3.3 Πυρηνική Ενέργεια ή Ατομική Ενέργεια.....	11
1.3.4 Θερμική Ενέργεια.....	11
1.3.5 Ηλεκτρική Ενέργεια.....	11
1.3.6 Χημική Ενέργεια.....	11
1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μορφές τους.....	12
Κεφάλαιο 2°	
2.1 Ηλιακή ενέργεια και σημασία της.....	16
2.2 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.....	17
2.2.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα.....	18
2.2.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα.....	18
2.2.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	18
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας.....	20
Κεφάλαιο 3°	
3.1 Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	22

3.2 Η φυσική των φωτοβολταϊκών.....	23
3.2.1 Ημιαγωγός.....	23
3.2.2 Επαφή p-n.....	25
3.2.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	26
3.3 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες – Στοιχεία.....	27
3.3.1 Δομή φωτοβολταϊκών κυψελών.....	28
3.3.2 Είδη φωτοβολταϊκών κυψελών.....	29
3.3.3 Δομή φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	32
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup>	
4.1 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	34
4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης ( Derating Factors).....	34
4.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση ενός Φ.Β πλαισίου.....	38
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup>	
5.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	43
5.1.1 Η γεωμετρία του δομικού συστήματος .....	44
5.2 Η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	45
5.3 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics.....	47
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup>	
6.1 Εφαρμογή στο Comsol Multiphysics 4.3.....	50
6.2 Συμπεράσματα.....	62
Βιβλιογραφία.....	63

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

---

### 1.1 Τι είναι η ενέργεια

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παραγάγει έργο. Η έννοια της ενέργειας αποτελεί χρησιμότερο εργαλείο για την κατανόηση του φυσικού κόσμου, ενώ ταυτόχρονα ο βασικός κανόνας (ή νόμος), που διατυπώθηκε για να περιγράψει τον ρόλο της, είναι μία από τις πιο αφηρημένες ιδέες στη διαδικασία της κατανόησης. Οποιαδήποτε μορφή δράσης από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής στο εργοστάσιο προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Η ενέργεια δεν εμφανίζεται από το τίποτα ούτε εξαφανίζεται, αλλά αλλάζει διαρκώς μορφή και είναι πάντοτε έτοιμη να δράσει.

Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων (όπως οι εξισώσεις Λαγκράνζ ή οι εξισώσεις Χάμιλτον), καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο. Στην Κλασσική Μηχανική, η ενέργεια (**W**) ορίζεται ως το γινόμενο μίας σταθερής δύναμης (**F**) επί την μετακίνηση (**d**) του σημείου εφαρμογής της στην διεύθυνσή της, και δίνεται από τον τύπο:

$$W = F x d$$

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω τύπο η ενέργεια μετριέται σε **N(Newton) x m (meter)** ή σε **Joule**. Η μορφή του παραπάνω τύπου ισχύει, όταν η δύναμη που εφαρμόζεται δε σχηματίζει γωνία με την μετατόπιση του σώματος. Σε περίπτωση που η δύναμη σχηματίζει μια γωνία  $\theta$ , τότε ο τύπος της ενέργειας ορίζεται ως:

$$W = F x d x \cos\theta$$

Ο παραπάνω τύπος ουσιαστικά είναι ο γενικός τύπος της ενέργειας στην Κλασσική Μηχανική. Ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται η ενέργεια από ένα σώμα σε ορισμένο χρονικό διάστημα  $t$ , ορίζεται ως **ισχύς (Power)** και δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{W}{t}$$

Η ισχύς μετριέται σε **1 Joule/second** ή σε **1 Watt**.

## 1.2 Ενεργειακή ζήτηση

Η ενέργεια είναι συνυφασμένη με την ύπαρξη της ζωής στη Γη. Η πληθυσμιακή αύξηση σε συνδυασμό με την προσπάθεια του ανθρώπου να βελτιώσει το βιοτικό του επίπεδο έχει σαν αποτέλεσμα να καταναλώνονται με ταχείς ρυθμούς τεράστια αποθέματα ενέργειας για τη δημιουργία των οποίων απαιτήθηκε να περάσουν χιλιάδες χρόνια. Την αύξηση αυτήν είναι εύκολο να καταλάβουμε αν αναλογιστούμε το πλήθος των ηλεκτρικών συσκευών που έχουμε σήμερα στο σπίτι μας σε σχέση με τις συσκευές που είχαμε, ας πούμε, πριν 50 χρόνια, ή τον αριθμό των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν τώρα στους δρόμους σε σχέση με τότε. Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε αν παρατηρήσουμε τις ενεργοβόρες εγκαταστάσεις ενός σύγχρονου εργοστασίου και τις συγκρίνουμε με ένα ανάλογο που κατασκευάστηκε πριν μερικές δεκαετίες.

Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Τα μαζικά μέσα μεταφοράς, η τεράστια ανάπτυξη της βιομηχανιάς, η δυνατότητα τεχνητής θέρμανσης ή ψύξης των εσωτερικών χώρων ή ακόμα και ο φωτισμός των πόλεων δεν ήταν εφικτά στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Αντικείμενα όπως το αυτοκίνητο, ο υπολογιστής ή ακόμα και το τηλέφωνο που πριν αρκετά χρόνια θεωρούνταν ως είδη πολυτελείας, σήμερα ο καθένας μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτά. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα έχει φτάσει ακόμα και στις πιο δυσπρόσιτες περιοχές που μπορεί να συναντήσει κανείς.

Από τα παραπάνω είναι εύκολο να βγει το συμπέρασμα ότι η ζήτηση για ενέργεια θα αυξηθεί ραγδαία μέσα στα επόμενα χρόνια καθώς ολο και περισσότεροι άνθρωποι έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα και νέες τεχνολογίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της επακόλουθης ενεργειακής ζήτησης είναι οι λεγόμενες υποανάπτυκτες χώρες που βρίσκονται σε συνεχή οικονομική και βιομηχανική ανάπτυξη.

### 1.2.1 Ενεργειακό πρόβλημα και κλιματική αλλαγή

Μέχρι το 18ο αιώνα ο άνθρωπος κάλυπτε τις ενεργειακές ανάγκες του με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική (ανεμόμυλοι) ή η υδραυλική (νερόμυλοι). Στα μέσα του 18ου αιώνα κατασκευάζεται η πρώτη ατμομηχανή που σηματοδοτεί την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης και με ταχύτατους ρυθμούς περνώντας από διάφορα στάδια (εξηλεκτρισμός, ανάπτυξη των συγκοινωνιών, χρήση της πυρηνικής ενέργειας, κατάκτηση του διαστήματος) φτάσαμε στη σημερινή εποχή, την εποχή της πληροφορικής, της ψηφιακής τεχνολογίας, της παγκοσμιοποίησης και βέβαια του ενεργειακού προβλήματος, που εμφανίζεται οξύτερο από ποτέ. Με τη βιομηχανική επανάσταση, όμως, τα ορυκτά καύσιμα-φυσικοί πόροι της Γης (πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο) έγιναν οι κύριες μορφές ενέργειας για την ανθρώπινη κοινωνία και την οικονομία. Η ανεξέλεγκτη χρήση τους, όμως, δημιούργησε στις μέρες μας το αποκαλούμενο «ενεργειακό πρόβλημα», ένα πρόβλημα πολύ σημαντικό για το μέλλον της ανθρώπινης διαβίωσης και του ίδιου του πλανήτη.

Τι όμως είναι το ενεργειακό πρόβλημα; Μπορούμε να πούμε ότι η ουσία του ενεργειακού προβλήματος βρίσκεται στη συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται. Σήμερα το 75% της παγκοσμίας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία καταναλώνονται εκατό χιλιάδες φορές ταχύτερα από τον χρόνο που απαιτείται για να ξαναδημιουργηθούν. Άρα τα ενεργειακά αποθέματα είναι πεπερασμένα. Δεν είναι γνωστό πότε θα εξαντληθούν -ο χρονικός ορίζοντας μετακινείται συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων τεχνικών και οικονομικών- η εξάντληση όμως είναι βέβαιη. Αυτός ο ορυκτός πλούτος δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμος σε κάθε χώρα, αλλά σε μια μειοψηφία χωρών, ενώ οι υπόλοιπες πρέπει να κάνουν εισαγωγή. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων και οδηγεί στην οικονομική και πολιτική εξάρτηση από τις προμηθεύτριες χώρες των χωρών που εισάγουν καύσιμα. Είναι αξιοσημείωτο ότι οι πλούσιες χώρες (δηλ. το 20% του πληθυσμού της Γης) καταναλώνουν το 60% των ενεργειακών αποθεμάτων, ενώ οι υπόλοιπες χώρες (το 80% του πληθυσμού της Γης) καταναλώνουν μόνο το 40% των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη.

Όλα αυτά έχουν όμως και ένα τίμημα και αυτό είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος. Η ρύπανση του περιβάλλοντος εξ' αιτίας της καύσης των ορυκτών πόρων στη βιομηχανία, στα αυτοκίνητα, στα σπίτια κ.λ.π έχει φτάσει σε επικίνδυνα όρια. Με την καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα επικίνδυνοι ρύποι και σε συνδυασμό με τα λεγόμενα “αέρια του θερμοκηπιού” οδηγούμαστε σταθερά προς την κλιματική αλλαγή του πλανήτη μας. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι δεν μπορούμε να καταναλώνουμε και να παράγουμε ενέργεια με τον τρόπο που έχουμε συνηθίσει ως τώρα. Το περιβάλλον καταστρέφεται, ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται, ο ορυκτός πλούτος μειώνεται και η διαχείρισή του συνδέεται με οικονομικά και πολιτικά συμφέροντα, που οδηγούν καταναλωτές και κράτη σε προβληματικές καταστάσεις. Καταβροχθίζουμε τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη υπονομεύοντας το μέλλον των επόμενων γενιών.

### 1.3 Μορφές Ενέργειας

Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας. Οι κυριότερες μορφές ενέργειας είναι οι εξής :

1. Μηχανική ενέργεια, που συνδυάζει την *κινητική* και τη *δυναμική*
2. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που συνδυάζει την *ηλεκτρική* και τη *φωτεινή* (ή ενέργεια ακτινοβολίας)
3. Πυρηνική ενέργεια ή ατομική ενέργεια
4. Θερμική ενέργεια
5. Χημική ενέργεια

Γενικά, η παρουσία της ενέργειας ανιχνεύεται από έναν παρατηρητή κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή στις ιδιότητες ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος. Η κυριότερη ιδιότητά της είναι ότι η συνολική ενέργεια ενός απομονωμένου (κλειστού) συστήματος είναι σταθερή, πρόταση που έχει αποδειχθεί από πλήθος πειραμάτων και χαρακτηρίζεται ως μία από τις πλέον θεμελιώδεις αρχές διατήρησης της φυσικής.

### 1.3.1 Κινητική ενέργεια

Κινητική ενέργεια, είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο και εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητα του.

### 1.3.2 Δυναμική ενέργεια

Ως δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσεως ή της κατάστασής του, είναι δηλαδή η δυνατότητα του σώματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε ενέργεια θέσεως (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) και ενέργεια μορφής η αλλιώς παραμόρφωσης, που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το παραμορφωμένο ελατήριο ή λάστιχο). Στην περίπτωση αυτή, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.

Στην περίπτωση ενός ομογενούς δυναμικού πεδίου, δηλαδή ενός πεδίου όπου η δύναμη είναι σταθερή σε όλη την έκτασή του, η δυναμική ενέργεια ενός σώματος ορίζεται ως το γινόμενο της δύναμης που ασκείται επάνω του επί την απόστασή του από την περιοχή του πεδίου, όπου θεωρούμε συμβατικά ότι η δυναμική ενέργεια έχει μηδενική τιμή:

$$E_{\text{δυν}} = Fh$$

όπου  $F$  = δύναμη του πεδίου που ασκείται στο σώμα,  $h$  = απόσταση από το σημείο με μηδενική δυναμική ενέργεια. Εάν το πεδίο δεν είναι ομογενές, δηλαδή η δύναμη μεταβάλλεται κατά μέτρο και φορά από σημείο σε σημείο, ο παραπάνω ορισμός ισχύει μόνο τοπικά, δηλαδή μας δίνει τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας για μια απειροστή μετακίνηση μέσα στο πεδίο, κατά την οποία η δύναμη είναι περίπου σταθερή. Η συνολική μεταβολή της δυναμικής ενέργειας δίνεται από το άθροισμα τέτοιων απειροστών μετατοπίσεων (ολοκλήρωμα) μεταξύ δύο θέσεων (από τις οποίες η μία μπορεί να είναι το σημείο όπου ορίσαμε μηδενική τη δυναμική ενέργεια). Για να έχει νόημα η δυναμική ενέργεια, πρέπει ο παραπάνω υπολογισμός να μην εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθήσαμε μεταξύ των δύο σημείων. Ένα δυναμικό πεδίο με την ιδιότητα αυτή ονομάζεται συντηρητικό ή διατηρητικό.

### 1.3.3 Πυρηνική ενέργεια ή Ατομική ενέργεια

Ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

### 1.3.4 Θερμική ενέργεια

Η θερμική ενέργεια είναι το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους. Με τον όρο θερμότητα εννοούμε ειδικά την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του. Η θερμική ενέργεια μπορεί να είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας.

### 1.3.5 Ηλεκτρική ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια, προέρχεται από την κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού.

### 1.3.6 Χημική ενέργεια

Η χημική ενέργεια είναι το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών από διάφορα άτομα, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η χημική ενέργεια αποδίδεται συνήθως ως θερμική ή ηλεκτρική, όταν τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική, με βιολογικούς μηχανισμούς, και ονομάζεται ζωική ενέργεια.

## 1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μορφές τους

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική, ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων. Τελευταία, από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και από πολλά μεμονωμένα κράτη, υιοθετούνται νέες πολιτικές για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που προάγουν τέτοιες εσωτερικές πολιτικές και για τα κράτη μέλη. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση του μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της πράσινης οικονομίας και κεντρικό σημείο εστίασης της σχολής των οικολογικών οικονομικών, η οποία έχει κάποια επιρροή στο οικολογικό κίνημα.

Παρακάτω θα αναλύσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σχέση με τις συμβατικές:

### Πλεονεκτήματα

1. Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
2. Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.

3. Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
4. Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
5. Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής.
6. Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

### **Μειονεκτήματα**

1. Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
2. Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
3. Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
4. Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
5. Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα ήδη των ήπιων μορφών ενέργειας μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες :

- Αιολική ενέργεια

Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. την άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.

- **Ηλιακή ενέργεια**

Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

- **Υδραυλική ενέργεια**

Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

- **Βιομάζα**

Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, που θα χρησιμοποιηθεί πολύ στο μέλλον.

- **Γεωθερμική ενέργεια**

Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

- **Ενέργεια από τη θάλασσα**

- **Ενέργεια από παλίρροιες.**

Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.

- Ενέργεια από κύματα.

Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.

- Ενέργεια από τους ωκεανούς.

Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

- Ωσμωτική ενέργεια.

Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

---

### 2.1 Ηλιακή ενέργεια και η σημασία της

Ο ήλιος είναι η βασική πηγή ενέργειας του πλανήτη μας καθώς δίνει ζωή σε κάθε οργανισμό της βιόσφαιρας, δημιουργεί τους ανέμους, παράγει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ξύλα και ορυκτά καύσιμα, και επομένως είναι η πηγή όλης σχεδόν της ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Ο ήλιος είναι απλανής αστέρας μέσου μεγέθους όπου, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που επικρατούν (μερικών εκατομμυρίων °C), τα μόρια και άτομα των στοιχείων που τον συνθέτουν βρίσκονται σε κατάσταση νέφους θετικών και αρνητικών ιόντων ή κατάσταση πλάσματος, όπως ονομάστηκε. Σε αυτές τις θερμοκρασίες οι ταχύτατα κινούμενοι πυρήνες υδρογόνου συσσωματώνονται, υπερνικώντας τις μεταξύ τους απωστικές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και δημιουργούν πυρήνες του στοιχείου ηλίου. Η πυρηνική αυτή σύντηξη είναι ισχυρά εξώθερμη και οι παραγόμενες τεράστιες ποσότητες ενέργειας ακτινοβολούνται προς όλες τις κατευθύνσεις στο διάστημα. Η γη συλλαμβάνει το ένα δισεκατομμυριοστό της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, που όμως αντιστοιχεί σε τεράστια ενεργειακή ποσότητα.

Γενικότερα, η ηλιακή ενέργεια έχει ζωτική σημασία για την διατήρηση της ζωής στη Γη και αποτελεί τη βάση για όλες σχεδόν τις άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιομάζα ή, υπό κατάλληλες συνθήκες, να οδηγήσουν στη δημιουργία πετρελαίου μετά από εκατομμύρια χρόνια. Η θερμότητα του ήλιου δημιουργεί θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ περιοχών και ανάπτυξη ανέμων η ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, ποσότητες νερού εξατμίζονται λόγω της θερμότητας του ήλιου, πέφτουν ως βροχή σε υψόμετρα και κατηφορίζουν προς τη θάλασσα, με δυνατότητα εκμετάλλευσης της δυναμικής τους ενέργειας σε υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Ωστόσο, με τον όρο “ηλιακή ενέργεια” αναφερόμαστε συνήθως στην ενέργεια του ήλιου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την παραγωγή κυρίως θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης είναι πραγματικά τεράστιο. Όλη η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στα παγκόσμια κοιτάσματα άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε ποσότητα ενέργειας που προκύπτει από μόλις 20 ημέρες ηλιοφάνειας. Πέρα από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ενέργεια του ήλιου είναι περίπου 1,3kW/τ.μ. Περίπου ένα τρίτο (1/3) αυτής της ενέργειας ανακλάται πίσω στο διάστημα και μία ποσότητα της απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Όταν η ηλιακή ενέργεια φτάσει στην ατμόσφαιρα, η ισχύς της μειώνεται σε περίπου 1kW/τ.μ. κατά τις μεσημβρινές ώρες σε καθαρό ουρανό. Κατά μέσο όρο, λαμβάνοντας υπόψη όλη την επιφάνεια του πλανήτη, κάθε τ.μ. δέχεται περίπου 4,2kWh την ημέρα. Τα ποσοστά ενέργειας είναι υψηλότερα σε επιφάνειες όπως έρημοι όπου μπορούν να ξεπεράσουν τις 6kWh/τ.μ. την ημέρα.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέλθει στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της σκεδάζεται (από μόρια αέρα, νερού και σκόνης) και ένα μέρος απορροφάται (από  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ). Μόνο, λοιπόν, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτει στο έδαφος χωρίς να έχει υποστεί κάποια επίδραση. Αυτή η συνιστώσα ακτινοβολία ονομάζεται ακτινική ή άμεση ακτινοβολία. Ένα μέρος της σκεδασμένης ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στο διάστημα, όμως το υπόλοιπο μέρος της σκεδασμένης ηλιακής ακτινοβολίας καταφέρνει να φτάσει στο έδαφος. Η ηλιακή αυτή ακτινοβολία, της οποίας η κατεύθυνση έχει αλλάξει λόγω της σκέδασης στην ατμόσφαιρα, ονομάζεται διάχυτη ακτινοβολία. Η ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο είναι το άθροισμα της ακτινικής και της διάχυτης ακτινοβολίας:

$$I = I_b + I_d$$

όπου:

- $I$  είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- $I_b$  είναι η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο
- $I_d$  είναι η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Εάν η υπό εξέταση επιφάνεια είναι κεκλιμένη, τότε στον προηγούμενο ορισμό πρέπει να προστεθεί η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από το έδαφος (ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία).

$$I_T = I_{b,T} + I_{d,T} + I_{refl,T}$$

όπου:

- $I_T$  είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης
- $I_{b,T}$  είναι η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο
- $I_{d,T}$  είναι η διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο
- $I_{refl,T}$  είναι η ανακλώμενη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

## 2.2 Τρόποι εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας

Αν μπορούσαμε παγκοσμίως να εκμεταλλευτούμε ένα μικρό έστω μέρος της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στη γη θα είχαμε ουσιαστικά λύσει το ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη. Γενικά προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια τη μετατρέπουμε αρχικά σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας ώστε να μπορέσουμε στη συνέχεια να την αποθηκεύσουμε. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει είτε άμεσα είτε έμμεσα. Υπάρχουν δυο τρόποι αποθήκευσης της :

**1.** Υπό τη μορφή θερμότητας(άμεσα). Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα χρησιμοποιούνται δυο ειδών συστήματα:

- i) Τα παθητικά ηλιακά συστήματα
- ii) Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα

**2. Υπό τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας (έμμεσα).** Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική έγινε μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

### **2.2.1 Παθητικά ηλιακά συστήματα**

Τα παθητικά συστήματα, αποσκοπούν κυρίως στην θέρμανση ή στον δροσισμό ενός κτηρίου. Χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα δομικά υλικά ώστε να πετύχουμε μια καλή θερμομόνωση του κτηρίου μπορούμε να μειώσουμε τις ανάγκες του κτηρίου για θέρμανση τον χειμώνα εκμεταλλευόμενοι το «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Επίσης με κατάλληλη χρήση των σκιάστρων μπορούμε να μειώσουμε και τις ανάγκες ψύξης το καλοκαίρι, προστατεύοντας το σπίτι από τον ήλιο και διευκολύνοντας την φυσική κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του κτηρίου. Τέλος με σωστή τοποθέτηση φωταγωγών και ανοιγμάτων μπορούμε να μειώσουμε τις ανάγκες τεχνητού φωτισμού του κτηρίου τη διάρκεια της μέρας.

### **2.2.2 Ενεργητικά ηλιακά συστήματα**

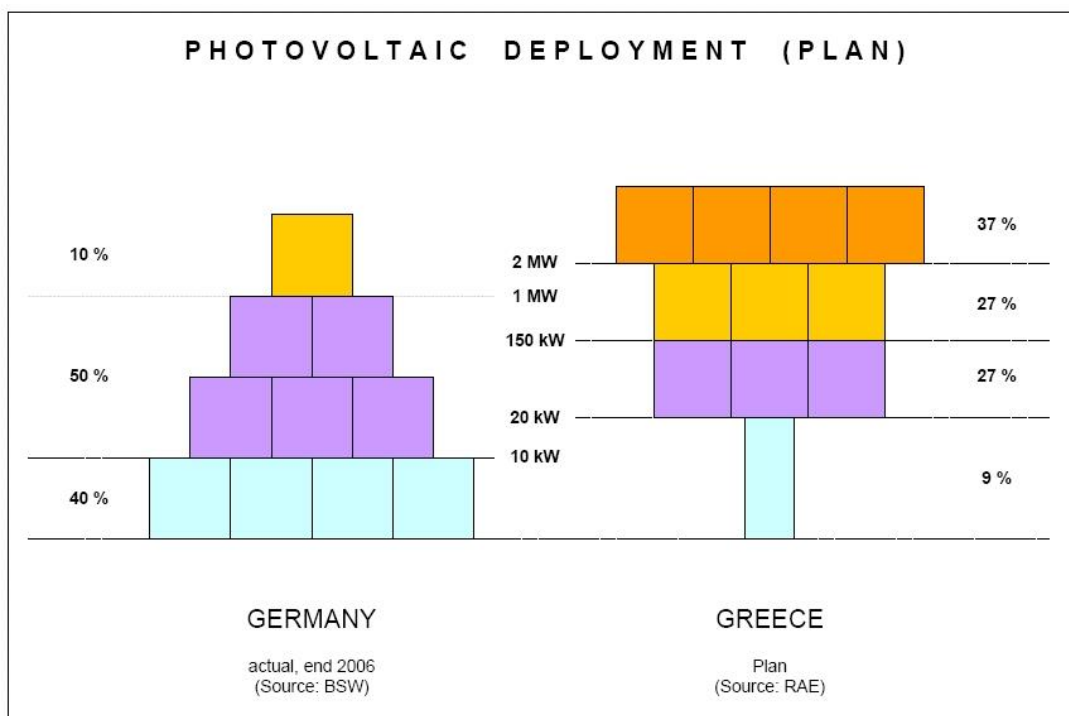
Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, έχουν ως βασική αρχή την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός “ηλιακού συλλέκτη”. Ο συλλέκτης αυτός περιλαμβάνει μια μαύρη, συνήθως επίπεδη μεταλλική επιφάνεια, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα (συνήθως από γυαλί ή πλαστικό) που παγιδεύει τη θερμότητα (φαινόμενο θερμοκηπίου). Σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια τοποθετούνται λεπτοί σωλήνες μέσα στους οποίους διοχετεύεται κάποιο υγρό, που απάγει την θερμότητα και τη μεταφέρει, με τη βοήθεια μικρών αντλιών (κυκλοφορητές), σε μια μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης. Η ηλιακή ακτινοβολία αφού συλλεχθεί από τον συλλέκτη χρησιμοποιείται στην θέρμανση κάποιου υγρού (συνήθως νερού), το οποίο με την σειρά του μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την θέρμανση εσωτερικών χώρων είτε και απευθείας από τον άνθρωπο. Το πιο απλό και διαδεδομένο σήμερα ενεργητικό ηλιακό σύστημα θέρμανσης νερού είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας.

### **2.2.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα**

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών ηλιακών συστημάτων στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Μερικά υλικά, όπως το πυρίτιο με πρόσμιξη άλλων στοιχείων, γίνονται ημιαγωγοί (άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα προς μια μόνο διεύθυνση). Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν φωτίζονται και κατά συνέπεια να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Συνδέοντας μεταξύ τους πολλά μικρά κομμάτια τέτοιων υλικών (φωτοβολταϊκές κυψέλες ή στοιχεία), τοποθετώντας τα σε μία επίπεδη επιφάνεια (φωτοβολταϊκό πλαίσιο) και στρέφοντάς τα προς τον ήλιο, γίνεται δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο της για το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως προς την ηλιοθερμική ενέργεια η Ελλάδα ήταν πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες, που συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Τώρα μένει να γίνει το ίδιο και ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προϋποθέσεις μάλιστα για τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ακόμα καλύτερες, αφού τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν την μέγιστη παραγωγή ακριβώς εκείνες τις ώρες της ημέρας που και η κατανάλωση (ζήτηση) φτάνει στο μέγιστο και η ΔΕΗ ζητά από όλους τους καταναλωτές να περιορίσουν την ζήτηση ή αναγκάζεται να κάνει περικοπές (ελεγχόμενη συσκότιση). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα επιδοτούνται από το Ελληνικό κράτος μέσω του νέου επενδυτικού νόμου Ν. 3522/06 και του αναπτυξιακού νόμου Ν. 3299/04 για επενδυτές μεσαίας και μεγάλης κλίμακας (επιδότηση αγοράς εξοπλισμού έως και 40% ανάλογα με την περιοχή της εγκατάστασης και τα επιχειρηματικά κριτήρια που ικανοποιούνται). Στη συνέχεια, με βάση το νόμο Ν. 3468/06 για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ο επενδυτής συνάπτει δεκαετές συμβόλαιο – με μονομερή δυνατότητα ανανέωσης της σύμβασης από την πλευρά του επενδυτή για ακόμη δέκα χρόνια – για την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει στον ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) για τις διασυνδεδεμένες περιοχές, ή απευθείας στη ΔΕΗ για τις μη-διασυνδεδεμένες περιοχές. Η τιμή πώλησης κυμαίνεται από 0,40 έως 0,50 Ευρώ ανά κιλοβατώρα (kWh) ανάλογα με το μέγεθος και την περιοχή της εγκατάστασης. Όμως, και ο ιδιώτης μπορεί να επωφεληθεί του νόμου 3468, πουλώνοντας την πλεονάζουσα ενέργεια της εγκατάστασης ιδιόχρησης που διαθέτει στις ίδιες ανταγωνιστικές τιμές, με επιπλέον όφελος φοροελάφρυνση έως και 700 Ευρώ.

Τα κίνητρα αυτά έχουν ήδη δείξει τα πρώτα αποτελέσματα, και πλέον βλέπουμε τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πάρκων σε πολλές περιοχές της χώρας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καινούργια ή και παλιότερα σπίτια. Με την τρέχουσα νομοθεσία η Ελληνική πολιτεία στοχεύει στην δημιουργία μεγάλων ως πολύ μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, σε αντίθεση με άλλες χώρες, που όπως η Γερμανία στοχεύουν στην ανάπτυξη πολλών μικρών συστημάτων. Μία σχετική σύγκριση φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Τα στοιχεία του διαγράμματος προέρχονται από τον σύνδεσμο εταιρειών ηλιακής ενέργειας της Γερμανίας (BSW) και από την Ελληνική Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).



Σχήμα 1: Σύγκριση μεταξύ Ελλάδας και Γερμανίας

Με τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα ασχοληθούμε πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

## 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας

### Πλεονεκτήματα :

- Είναι άφθονη. Όπως αναλύσαμε και πριν η ηλιακή ενέργεια φτάνει στη Γη σε πάρα πολύ μεγάλες ποσότητες.
- Είναι ανανεώσιμη. Όπως αναφέραμε και πριν, η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, δηλαδή δεν θα εξαντληθεί ποτέ.
- Είναι φιλική στο περιβάλλον και δεν προκαλεί ρύπους.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη σε ολόκληρη τη Γη, όχι μόνο σε χώρες κοντά στον ισημερινό.
- Έχει πολλές εφαρμογές. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς διαφορετικούς σκοπούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές χωρίς πρόσβαση σε δίκτυο, για την απόσταξη νερού στην Αφρική ή ακόμα και σε δορυφόρους στο διάστημα.

- Χάρη στο σχήμα του συλλέκτη και του φωτοβολταϊκά πάνελ, μπορούν να τοποθετηθούν σε πολλά μέρη τα οποία δεν έχουν κάποια χρήση (όπως ταράτσες και αυλές σπιτιών).
- Δεν υπάρχουν καθόλου κινητά μέρη στις περισσότερες εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, πράγμα που την κάνει αθόρυβη.
- Έχει χαμηλό κόστος συντήρησης. Η πλειοψηφία των ηλιακών συστημάτων δεν χρειάζεται πολλή συντήρηση. Οι οικιακοί συλλέκτες χρειάζονται μόνο καθαρισμό 1-2 φορές τον χρόνο ενώ οι σοβαροί κατασκευαστές προσφέρουν 20-25 χρόνια συντήρηση.

## Μειονεκτήματα

- Είναι ακριβή. Το κόστος κατασκευής ενός πάνελ με υψηλή απόδοση είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διάφορα υλικά είναι σπάνια στην φύση και κατά συνέπεια ακριβά. Ειδικά τα ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης από Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe) ή χαλκό – ίνδιο/γάλλιο δισεληνιούχο (CIGS) είναι αρκετά ακριβά.
- Ακόμα και σε καλές καιρικές συνθήκες, ηλιακή ενέργεια έχουμε μόνο κατά τη διάρκεια της μέρας. Επίσης, επειδή είναι δύσκολο να προβλέψουμε τις καιρικές συνθήκες, η ηλιακή ενέργεια δεν είναι αρκετά αξιόπιστη.
- Είναι αρκετά δαπανυρή κατά την αποθήκευσή της. Λόγω του προηγούμενου, καθίσταται απαραίτητη η αποθήκευση ενέργειας σε αυτόνομα δίκτυα. Τα μέσα που έχουμε στην διάθεσή μας για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες) δεν είναι αποδοτικά, έχουν μικρή διάρκεια ζωής και η αντικατάστασή τους είναι ακριβή. Επίσης τα χημικά που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες μολύνουν το περιβάλλον.
- Η ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στην Γη έχει μικρή πυκνότητα. Η μέση πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 2.250 W/m<sup>2</sup>. Δεδομένου και του χαμηλού συντελεστή απόδοσης που έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα, για να καλύψουμε τις ενεργειακές μας ανάγκες χρειαζόμαστε μια πολύ μεγάλη επιφάνεια.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

---

### 3.1 Ιστορική αναδρομή φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών απεικονίζει ένα μέλλον βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συσκευές στερεάς κατάστασης που μετατρέπουν το φως του ήλιου, την πιο άφθονη ενεργειακή πηγή, σε ηλεκτρισμό. Απαιτούν ελάχιστη συντήρηση, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και κατά τη λειτουργία τους δεν εκπέμπουν ρύπους.

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών πάει πίσω στον 19ο αιώνα. Το 1839, ο Γάλλος φυσικός Edmund Becquerel ανακάλυψε ότι ορισμένα υλικά μπορούσαν να παράγουν σπινθήρες ηλεκτρισμού όταν υποβάλλονταν σε ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό και ως φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, χρησιμοποιήθηκε σε «πρωτόγονα» ηλιακά κελιά από σελήνιο στα τέλη του 18ου αιώνα. Το 1873 ο Smith ανακάλυψε τη φωτοαγωγιμότητα του στερεού Σεληνίου (Se). Το πρώτο λειτουργικό και σκόπιμα κατασκευασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο επιτεύχθηκε από τον Fritts το 1883. Έλιωσε μια λεπτή στρώση Se πάνω σε ένα μεταλλικό υπόστρωμα και συμπίεσε πάνω σε αυτή ένα λεπτό φύλλο χρυσού (Au). Η σύγχρονη εποχή των φωτοβολταϊκών ξεκίνησε το 1954 όταν ερευνητές στα Bell Labs των Η.Π.Α. τυχαία ανακάλυψαν ότι οι δίοδοι επαφών p-n παρήγαγαν μια τάση όταν τα φώτα του δωματίου ήταν ανοιχτά. Ένα χρόνο αργότερα κατασκεύασαν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου (Si) με απόδοση 6%.

Έως τη δεκαετία του '70 υπήρξε σημαντική έρευνα στο πεδίο των φωτοβολταϊκών και τα παραγόμενα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνταν σε διαστημικές εφαρμογές, για να δώσουν ενέργεια σε δορυφόρους. Μάλιστα ο χρόνος ζωής τους ξεπέρασε κατά πολύ τις προσδοκίες των επιστημόνων.

Τη δεκαετία του '80 η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών άρχισε να ωριμάζει, καθώς έμφαση δόθηκε στις τεχνικές κατασκευής και στο κόστος. Εγκαταστάσεις παραγωγής φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη, στις Η.Π.Α. και την Ιαπωνία και νέες τεχνολογίες αναπτύχθηκαν μέσα από πανεπιστημιακά και βιομηχανικά εργαστήρια. Ωστόσο ήταν σαφές ότι η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών ήταν πολύ πιο περίπλοκη από ότι είχαν προβλέψει οι εταιρίες ενέργειας και πολλές από αυτές εγκατέλειψαν τα ερευνητικά προγράμματα πάνω στην κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων, ιδιαίτερα στις Η.Π.Α.

Την ίδια δεκαετία κατασκευάστηκαν φωτοβολταϊκά πάρκα της τάξης των MW στις ανεπτυγμένες χώρες για να ερευνηθεί και να αξιολογηθεί η δυναμική τέτοιων εφαρμογών. Πολύ αργότερα στα τέλη της δεκαετίας του '90 φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματώθηκαν σε κτίρια, ιδιαίτερα σε χώρες όπου το παραγόμενο με αυτό τον τρόπο ρεύμα αγοράζόταν από το δημόσιο δίκτυο σε πολύ υψηλή τιμή. Η επιδότηση αυτή των φωτοβολταϊκών στα κτίρια έδωσε μεγάλη ώθηση στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών ακόμα και πολύ αργότερα όταν οι επιδοτήσεις στις περισσότερες χώρες μειώθηκαν αρκετά, το ενδιαφέρον στα συστήματα αυτά συνέχισε να αυξάνεται.

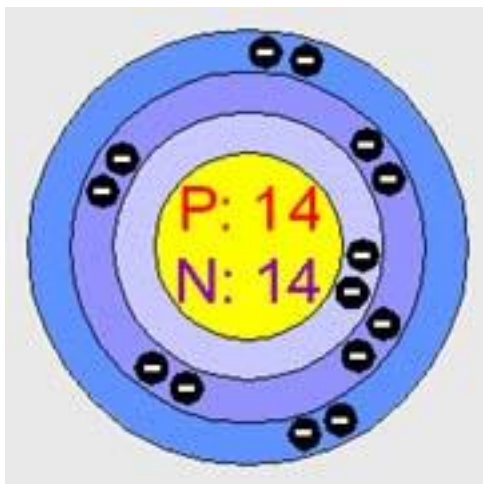
## 3.2 Η φυσική των φωτοβολταϊκών

### 3.2.1 Ημιαγωγός

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού γίνεται κύρια με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β), που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά, το συνηθέστερο των οποίων είναι το πυρίτιο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία υπερνικούν το έργο εξόδου και πλέον μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Για να αυξηθεί η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων προστίθενται στο καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο προσμίξεις, όπως ο φώσφορος και το βόριο.

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου (σχήμα 2).

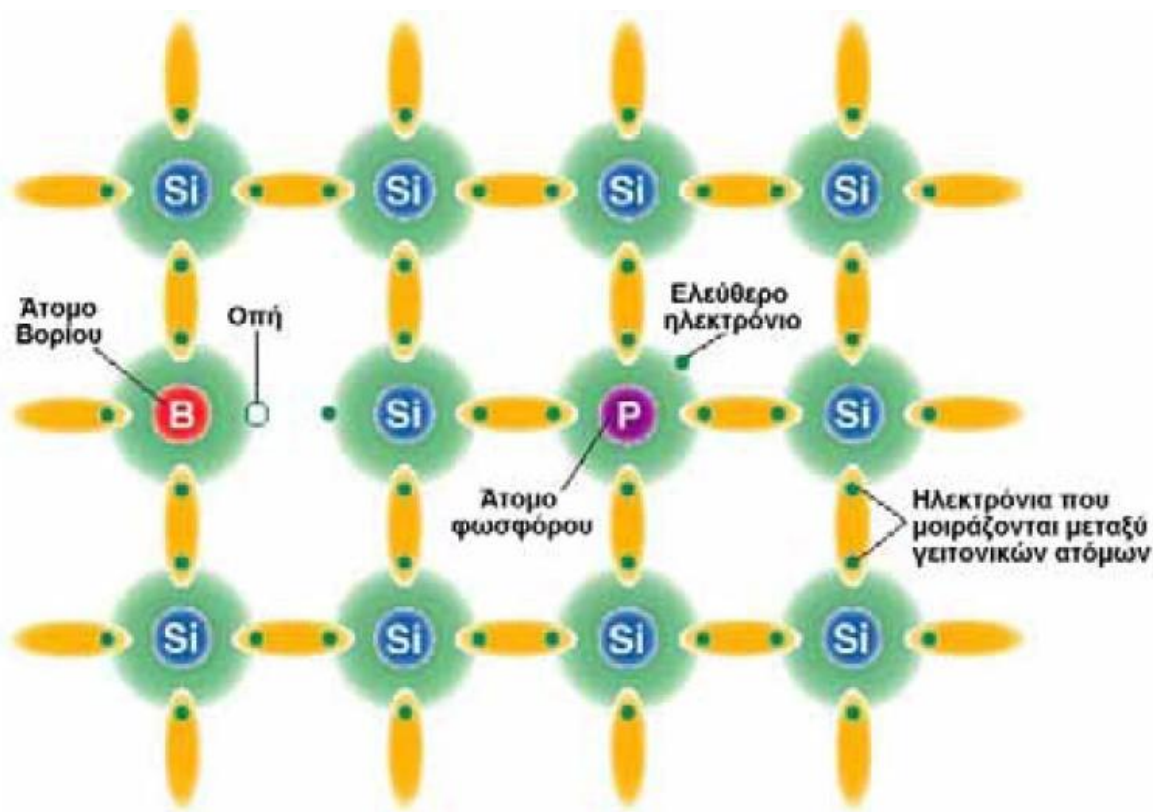


Σχήμα 2: Άτομο πυριτίου

Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού καθώς δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως στην περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι σημαντικά περιορισμένος για να χρησιμεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Για το λόγο αυτό εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. φωσφόρου. Η

εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί **ημιαγωγό τύπου n**.

Όταν προστίθεται στο κρυσταλλικό πυρίτιο βόριο προκύπτουν **ημιαγωγοί τύπου p**. Το βόριο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 3 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με άτομα πυριτίου. Επειδή σε κάθε άτομο απαιτούνται 8 ηλεκτρόνια για τη συμπλήρωση της εξωτερικής τους στοιβάδας, στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν διαθέσιμες 2 ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων, δημιουργώντας έτσι δυο οπές στη δομή του υλικού, οι οποίες μπορούν να καταληφθούν από άλλα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Σημαντικό είναι να επισημάνουμε ότι οι ημιαγωγοί τύπου p και n παρά την περήσεια ηλεκτρονίων και οπών είναι ηλεκτρικά ουδέτεροι. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα αποτελέσματα των προσμίξεων φωσφόρου (P) και βορίου (B) στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου (Si):

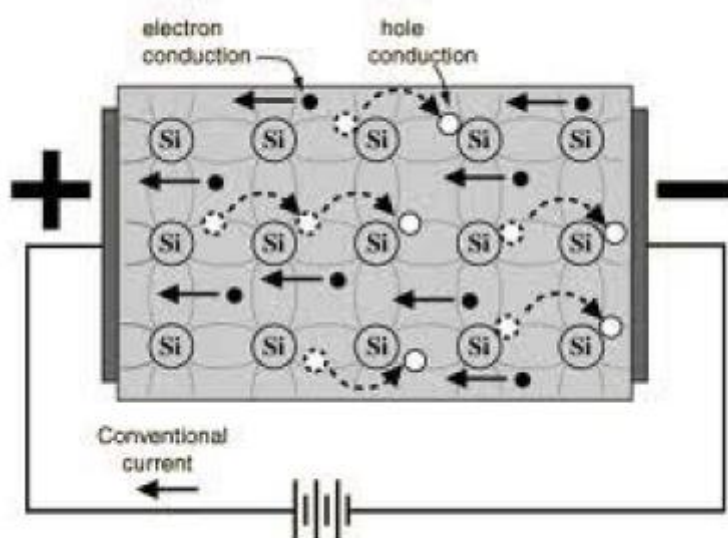


Σχήμα 3: Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου

### 3.2.2 Επαφή p-n

Κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός, για να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p).

Λόγω της ασυμμετρίας που έχουν οι δύο περιοχές στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών ενεργοποιείται στην περιοχή της επαφής τους το φαινόμενο της διάχυσης και έτσι ηλεκτρόνια από την περιοχή n (περίσσεια) μεταφέρονται προς την περιοχή p αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργείται στον ημιαγωγό n μια περιοχή κοντά στην διεπαφή p-n όπου είναι αυξημένο το θετικό φορτίο. Αντιστρόφως οπές από την περιοχή p (περίσσεια) μεταφέρονται στην περιοχή n. Συνέπεια τούτου είναι σε ένα τμήμα του ημιαγωγού p κοντά στην διεπαφή p-n να επικρατεί αρνητικό φορτίο. Όλη αυτή η δυναμική ισορροπία συγκέντρωσης φορτίων ηλεκτρονίων και οπών περί την διεπαφή p-n αναπτύσσεται χωρίς την επίδραση φωτός. Ακόμα και αν οι δύο ημιαγωγοί n και p συνδεθούν με έναν αγωγό δεν θα εμφανισθεί ρεύμα.

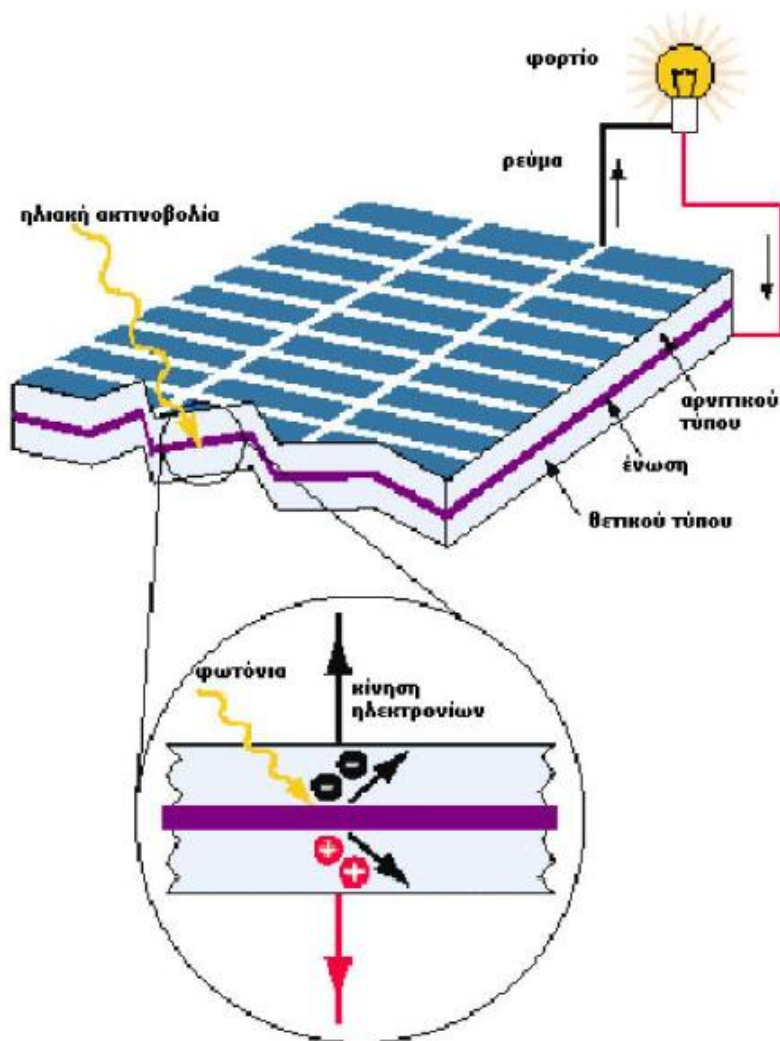


Σχήμα 4: Επαφή p – n

Συνέπεια του παραπάνω φαινομένου είναι η ανάπτυξη στην περιοχή της διεπαφής p-n ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με κατεύθυνση από την περιοχή n προς την περιοχή p. Λόγω της ανάπτυξης του παραπάνω ηλεκτρικού πεδίου το φαινόμενο της διάχυσης δεν δύναται να συνεχιστεί αφού όπως είναι γνωστό από την φυσική τα ηλεκτρόνια κινούνται αντίθετα από τη φορά του πεδίου ενώ τα θετικά φορτία σύμφωνα με την κατεύθυνση του πεδίου. Και με αυτό τον τρόπο επέρχεται κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος.

### 3.2.3 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς τύπου  $n$  και  $p$  σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου  $n$  κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου  $p$  για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο  $p$  στο  $n$  αλλά όχι αντίστροφα. Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση  $p$ - $n$  ημιαγωγών, το πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό  $n$  και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο  $p$ . Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγωγίμη οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η ροή αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.

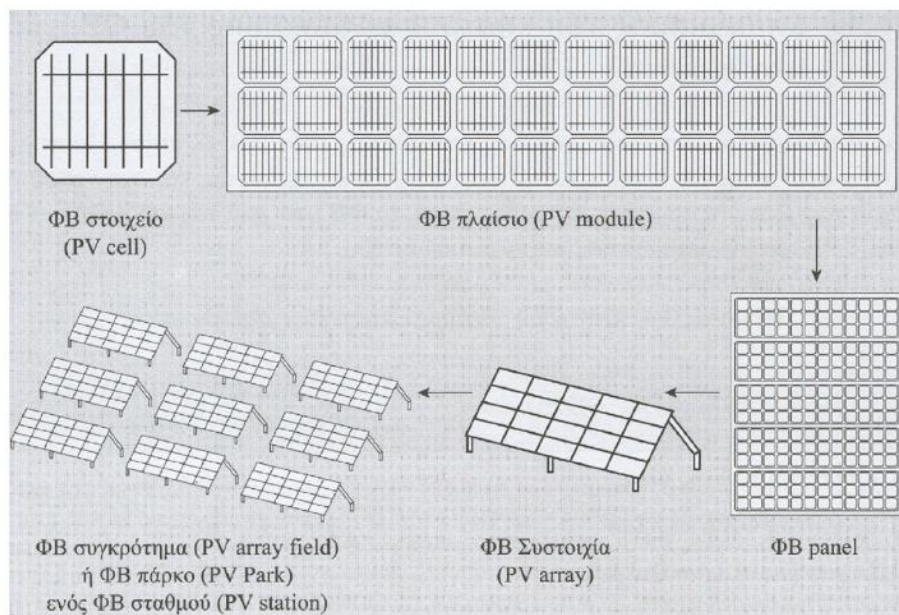


Σχήμα 5: Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το μέγιστο θεωρητικό ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου το 25% της ενέργειας που δέχεται, αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%. Καθώς η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αποτελείται από φάσμα διαφορετικών μηκών κυμάτων, άρα και από φωτόνια διαφορετικών επιπέδων ενέργειας. Τα φωτόνια χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου δεν μπορούν να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και απλώς διέρχονται μέσα από το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Μόνο τα φωτόνια που μεταφέρουν μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από ένα συγκεκριμένο ποσό που εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο (ενεργειακό διάκενο) μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Η τεχνολογία των ημιαγωγικών υλικών επέτρεψε την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς ενδεχόμενη χρήση αγωγικών υλικών, όπως τα μέταλλα, θα οδηγούσε μεν σε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά θα παρουσίαζε πολύ χαμηλή τάση πεδίου.

### 3.3 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες – Στοιχεία

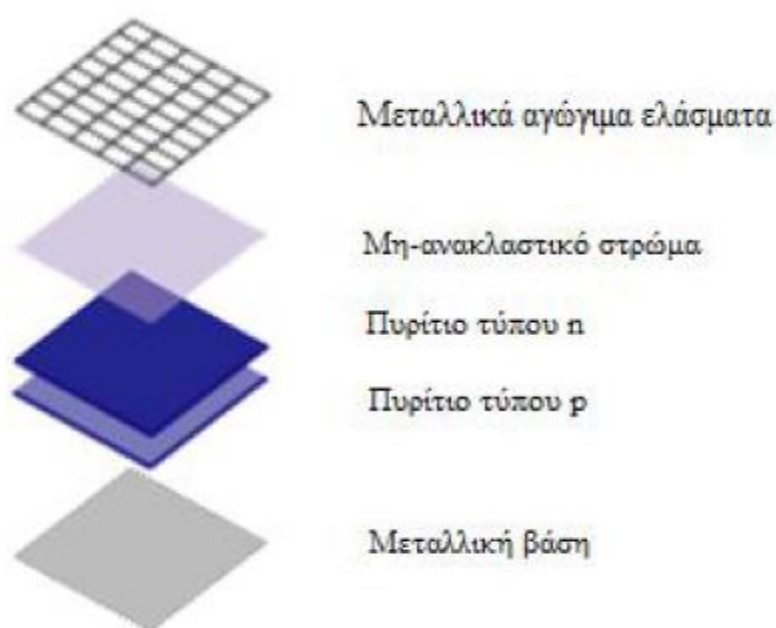
Μέχρι τώρα αναλύσαμε τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου. Ένα κύτταρο όμως παράγει πολύ μικρή ισχύ από μόνο του (της τάξης του 1W). Επομένως για να παραχθεί μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να συνδεθούν πολλές ηλιακές κυψέλες μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις, στις οποίες γίνεται παραγωγή μέσης ή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, στο διαθέσιμο χώρο, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των διαφορετικών σειρών των πλαισίων.



Σχήμα 6: Τρόποι σύνθεσης φωτοβολταϊκών κυψελών και πλαισίων

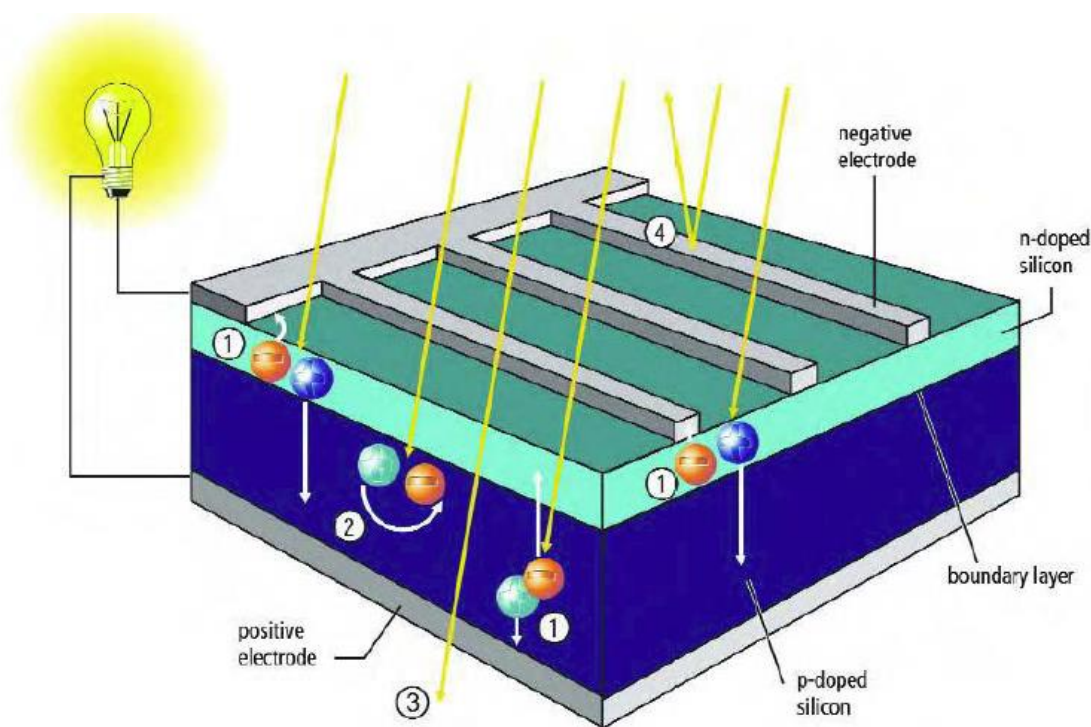
### 3.3.1 Δομή Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Κατασκευαστικά για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, οι φωτοβολταϊκά κυψέλες έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμά τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου, και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούνται από μια μεταλλική βάση, δυο στρώσεις πυριτίου (η μία τύπου  $n$  και η άλλη τύπου  $p$ ), ένα μη ανακλαστικό στρώμα και μεταλλικά αγωγίμα ελάσματα στην επιφάνεια της κυψέλης.



Σχημα 7: Δομή ηλιακής κυψέλης

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούνται από πολλά λεπτά οριζόντια και κάθετα ελάσματα. Τα οριζόντια είναι περισσότερα από τα κάθετα και είναι αυτά τα στοιχεία που μαζεύουν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται και αποτελούν το ρεύμα. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται στα κάθετα παχιά ελάσματα, που ονομάζονται διαφορετικά ζυγοί (busbars). Οι ζυγοί των στοιχείων ενώνονται μεταξύ τους και έτσι έχουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους τα οποία και αποτελούν το πλαίσιο. Κάθε πλαίσιο έχει δύο ακροδέκτες τον θετικό και τον αρνητικό πόλο.



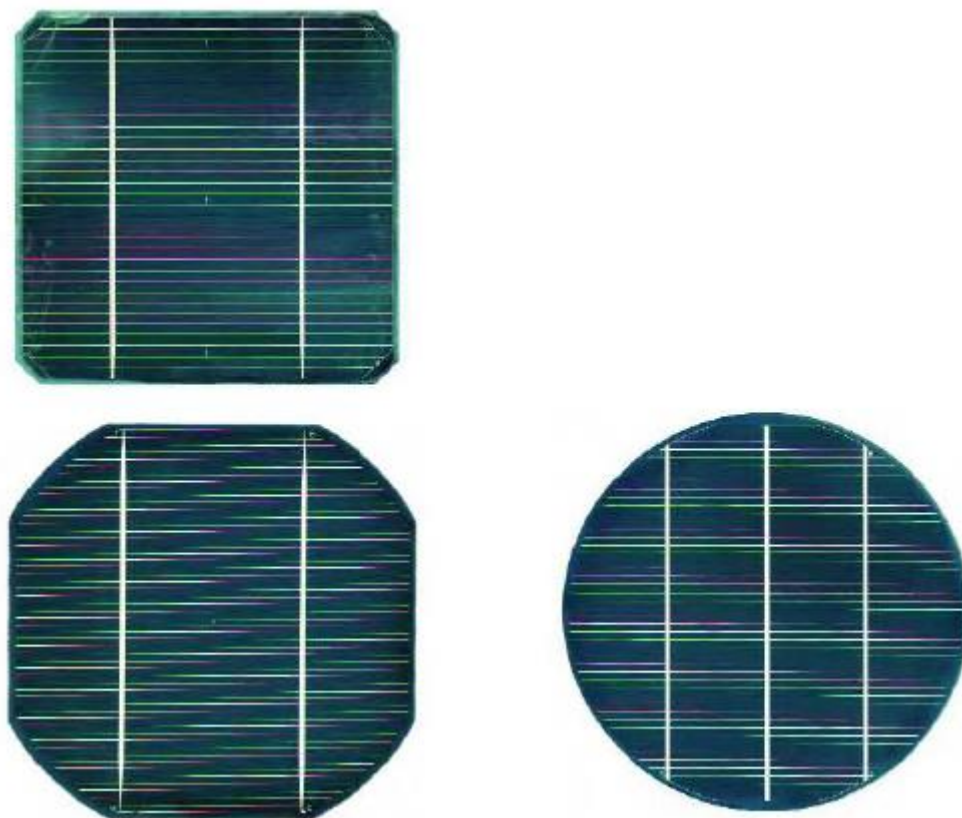
Σχήμα 8: Τμήμα Φ/Β κυψέλης

### 3.3.2 Είδη Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Οι κυριότεροι τύποι ηλιακών κυψελών είναι οι παρακάτω:

#### A) Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

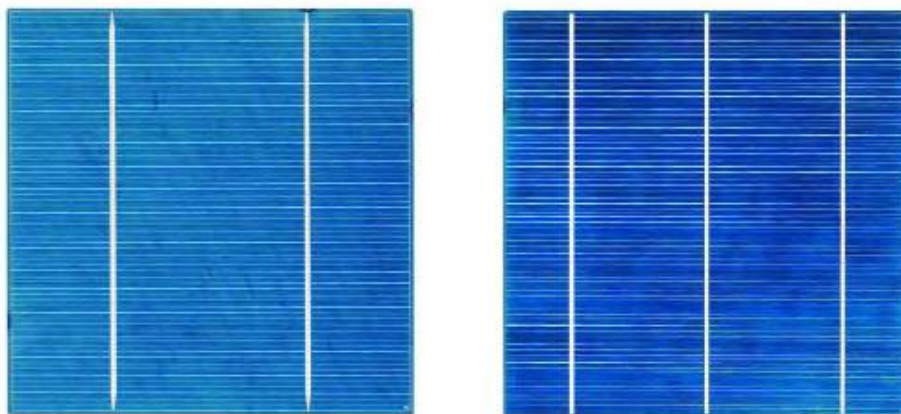
Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Τα κελιά αυτά κατασκευάζονται με μία διαδικασία γνωστή ως διαδικασία “Czochralski”. Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18% αλλά και υψηλότερο κόστος. Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά ηλιακά κελιά είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία καλή προοπτική για ενσωμάτωση σε κτίρια όταν απαιτείται μερική διαπερατότητα στο φως. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 9: Μορφές μονοκρυσταλλικών κελιών πυριτίου

## **B) Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο**

Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερα από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού κελιού απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντίανακλαστική επίστρωση).



Σχήμα 10: Μορφές πολυκρυσταλλικών κελιών πυριτίου

### Γ) Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film)

Αρκετή έρευνα έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια για την τελειοποίηση μεθόδων κατασκευής ηλιακών κελιών με ημιαγωγούς πάχους μόλις μερικών μικρομέτρων, με στόχο την επίτευξη μίας εύλογης απόδοσης με τη χρήση μικρής ποσότητας πυριτίου. Τα κελιά αυτά έχουν μικρότερη απόδοση από τα κελιά κρυσταλλικού πυριτίου (της τάξης του 5-7%) αλλά με αρκετά χαμηλότερο κόστος, ώστε να τα καθιστά ανταγωνιστικά. Συνήθως χαρακτηρίζονται από το έντονα σκούρο (σχεδόν μαύρο) χρώμα τους. Κυριότεροι αντιπρόσωποι της κατηγορίας αυτής αποτελούν τα παρακάτω:

#### Ι) Κελιά άμορφου πυριτίου (amorphous-Si) :

Αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (π.χ. υπολογιστές τσέπης). Το άμορφο πυρίτιο, η μη κρυσταλλική μορφή του πυριτίου, μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγωγίμο υπόστρωμα σε ένα στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Επιπλέον, τα κελιά άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ.



Σχήμα 11: Φωτοβολταϊκά πάνελ από άμορφο πυρίτιο

## II) Κελιά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)

Η κρυσταλλική ένωση καδμίου-τελλουρίου (CdTe) είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κελιών. Για τη δημιουργία μίας ένωσης p-n σε ένα ηλιακό κελί, ένα στρώμα σουλφιδίου του καδμίου προστίθεται στο CdTe. Λόγω της αποτελεσματικότητας ένα κελί CdTe χρησιμοποιεί περίπου το 1% του ημιαγωγού υλικού σε σχέση με ένα κρυσταλλικό κελί. Μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το πέρας της ζωής τους.

## III) Κελιά χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου- δισεληνιούχου και χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου (κελιά CIGS). Τα κελιά αυτά έχουν επιδείξει αποδόσεις της τάξης του 19,9%, που αποτελεί την υψηλότερη για κελιά λεπτού υμενίου.

## Δ) Άλλοι τύποι κελιών

Εκτός των παραπάνω συναντά κανείς και τους παρακάτω τύπους κελιών σε μικρό βαθμό ή σε εργαστηριακό επίπεδο:

- **Κελιά Γαλλίου-Αρσενικούχου (GaAs):** Αποτελούν κελιά υψηλής απόδοσης (έως και 36%), ωστόσο ιδιαίτερα ακριβά.
- **Οργανικά/πολυμερή κελιά:** Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά κελιά λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες: αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά κελιά χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης-κλίμακας, χαμηλής-θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών κελιών σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι σήμερα της τάξης του 5-6%, ωστόσο η αύξηση της πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλιακών κελιών.

### 3.3.3 Δομή Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

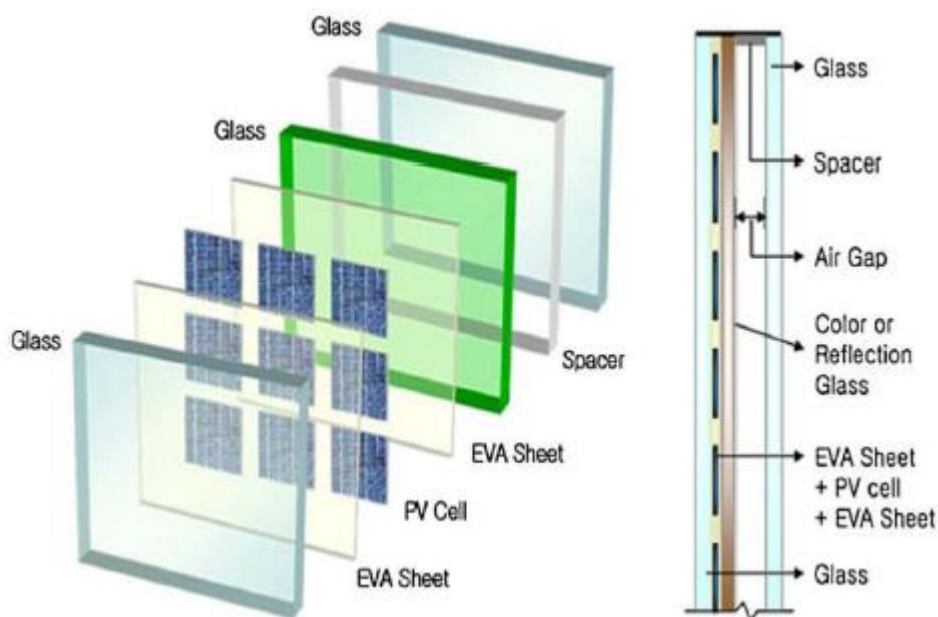
Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών κυψελών. Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι ηλιακές κυψέλες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ λεπτές και άρα επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη ηλιακών κυψελών ή για τις ποικίλες εφαρμογές

τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο υλικό (Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Sheet) για την ενθυλάκωση των κυψέλων
- Ηλιακές κυψέλες
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Οι ηλιακές κυψέλες προστατεύονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικό, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό είναι συνήθως EVA, υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 12: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένες προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να όμοιες, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως και η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

---

### 4.1 Βαθμός απόδοσης Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mmp}$  προς το γινόμενο της επιφάνειας  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της έντασης ακτινοβολίας  $G$  μας δίνει το βαθμό απόδοσης.

$$\eta = \frac{P_{mmp}}{AG} = \frac{I_{mpp} V_{mmp}}{AG} = \frac{FFI_{sc} V_{oc}}{AG}$$

Η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική απόδοση  $\eta_{max,th}$ , που δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{max,th} = \frac{\phi(E_g) V_m}{\phi E_\mu}$$

όπου  $\phi(E_g)$  είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού,  $\phi$  είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και  $E_\mu$  είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (1,1eV). Επίσης, η  $V_m$  των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της  $E_\mu$  της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η μέγιστη θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου :

$$\eta = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\%$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

### 4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης ( Derating Factors)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να είναι είτε εσωτερικοί είτε εξωτερικοί. Εσωτερικοί είναι τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

του φωτοβολταϊκού στοιχείου, οι οπτικές απώλειες, η γήρανση, η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η δίοδος αντεπιστροφής ενώ εξωτερικοί είναι η ακτινοβολία, η σκίαση, η θερμοκρασία, ο άνεμος, η ρύπανση και οι ηλεκτρικές απώλειες.

- **Η αντίσταση  $R_s$  :**

Η αντίσταση  $R_s$  είναι ένας σημαντικός παράγοντας που παίζει ρόλο στο βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης p-n τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίσταση άρα και οι απώλειες ισχύος. Οπότε για να έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση  $R_s$ .

- **Η γήρανση :**

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των υπόλοιπων μερών που απαρτίζουν το φωτοβολταϊκό σύστημα αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος.

- **Οι οπτικές απώλειες**

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανakλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών στοιχείων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC (Standard Testing Conditions). Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60ο.

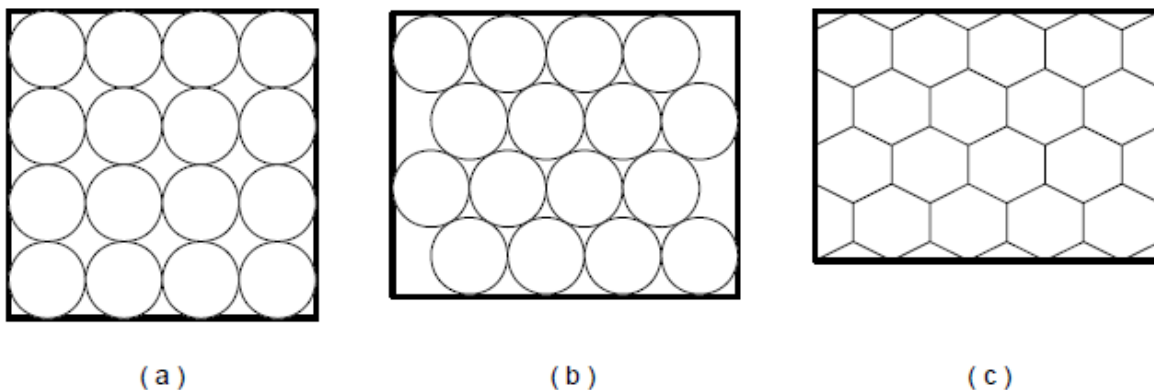
Επίσης, οπτικές απώλειες έχουμε και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Καθώς το  $A.M( Air Mass) = 1.5$  ηλιακό φάσμα που καθορίζεται από τις STC, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος γιατί οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Αυτά όσον αφορά φωτοβολταϊκά ευρείας φασματικής περιοχής. Για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικότερες.

Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%. Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού στοιχείου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m<sup>2</sup>. Οι 63 οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται σχετικά σημαντικές και γενικά υπολογίζονται σε 3%, κατά μέσο όρο στο έτος.

- **Η χωροταξική τοποθέτηση**

Η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταξύ τους έχει σημασία αφού όσο πιο πυκνά είναι τοποθετημένα μεταξύ τους τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής κάλυψης  $\sigma_k$  του πλαισίου, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η τιμή του κυμαίνεται από 0,78 για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλα στοιχισμένες σειρές (εικόνα a ), 0,88 για κυκλικά στοιχεία συγχωνευμένα μεταξύ τους (εικόνα b ) και φτάνει μέχρι 0,98 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (εικόνα c ).



Σχήμα 13: Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα πλαίσια

- **Η ακτινοβολία**

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης εφόσον δεν χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

- **Η σκίαση**

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Ένα σκιασμένο στοιχείο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή διόδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή φωτοβολταϊκά στοιχεία μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου αριθμού, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της. Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση “θερμής κηλίδας”).

Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (διόδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί.

- **Ο άνεμος**

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντίθετα συμβαίνει για θερμούς ανέμους.

- **Η ρύπανση**

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90ο (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45ο για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την

ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι εντελώς καθαρή. Η τιμή του  $s_r$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ.

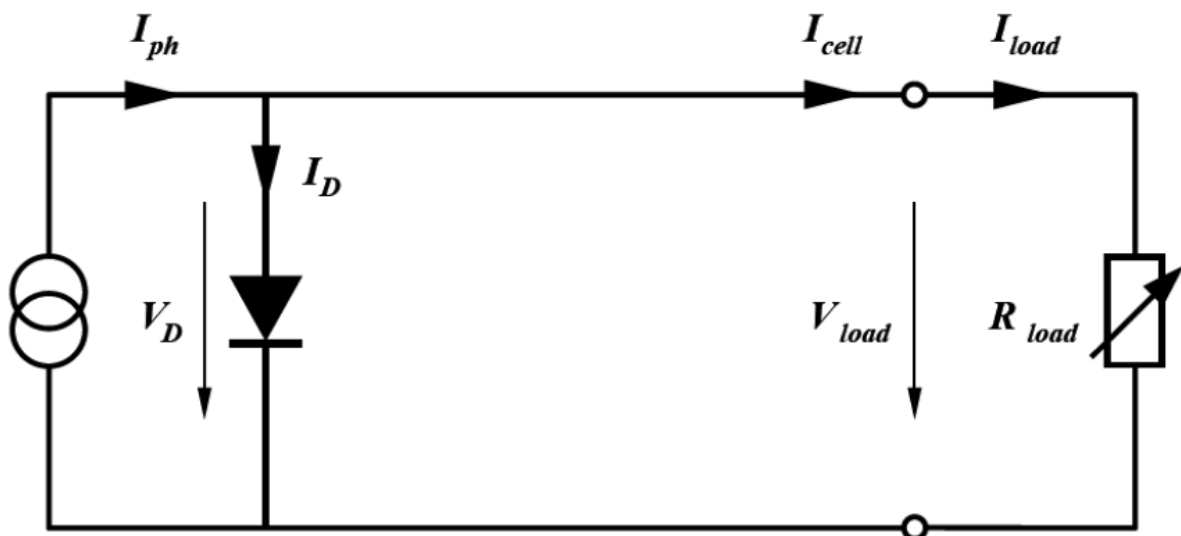
- **Οι ηλεκτρικές απώλειες**

Πέρα από τους παραπάνω παράγοντες, πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να προνοήσουμε για τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο.

### 4.3 Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση ενός Φ.Β Πλαισίου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^{\circ}\text{C}$ . Οι υψηλές θερμοκρασίες της κυψέλης έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να δούμε πως μοντελοποιείται ένα ηλιακό κελί για να κατανοήσουμε καλύτερα την επίδραση της θερμοκρασίας στον βαθμό απόδοσής του. Το απλούστερο μοντέλο ηλιακού κελιού παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα : Απλό μοντέλο ηλιακού κελιού

Στο μοντέλο αυτό το ρεύμα κελιού προκύπτει από το συνδυασμό του φωτορεύματος  $I_{ph}$ , δηλαδή του ρεύματος που παράγεται από την έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία και είναι ανάλογο αυτής και του ρεύματος της διόδου που δημιουργείται λόγω της ύπαρξης της επαφής p-n. Έτσι ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left( e^{qV/kT} - 1 \right)$$

όπου :

$I_{cell}$  : ρεύμα κελιού

$I_{ph}$  : φωτόρευμα, ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

$I_D$  : ρεύμα διόδου

$I_0$  : ρεύμα διαρροής της διόδου

$q$  : φορτίο ηλεκτρονίου

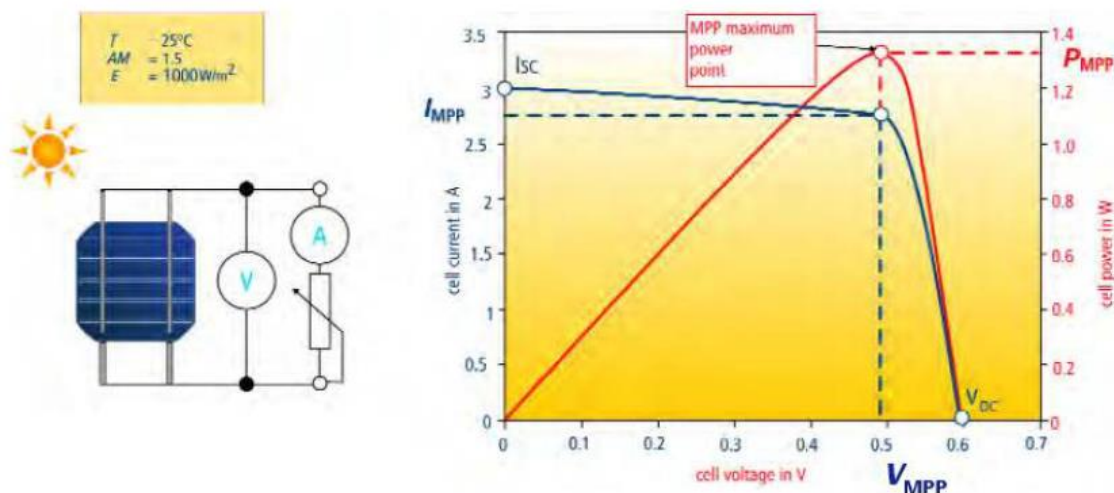
$V$  : τάση στα άκρα της διόδου

$k$  : σταθερά Boltzmann

$T$  : θερμοκρασία (K)

Από την παραπάνω εξίσωση γίνεται φανερό ότι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ρεύματος σε ένα ηλιακό κελί είναι η ένταση της ακτινοβολίας και η θερμοκρασία.

Μακροσκοπικά, ένα ηλιακό κελί μοντελοποιείται με την βοήθεια της χαρακτηριστικής του καμπύλης έντασης-τάσης I-V (I-V curve) ή ισχύος-τάσης P-V (P-V curve). Τυπικές καμπύλες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 15: Καμπύλες I-V και P-V ενός ηλιακού κελιού

Χαρακτηριστικά μεγέθη αποτελούν:

- Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ : είναι η τάση που επικρατεί στην έξοδο ενός ηλιακού κελιού όταν τα δύο άκρα του είναι ανοικτά
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης:  $I_{sc}$ : είναι το ρεύμα που διαρρέει το ηλιακό κελί όταν τα δύο άκρα του βραχυκυκλωθούν.
- Η μέγιστη ισχύς του κελιού  $P_{mpp}$  (maximum power point): είναι η μέγιστη ισχύς του ηλιακού κελιού που αντιστοιχεί σε τάση  $V_{mpp}$  και ένταση  $I_{mpp}$ .

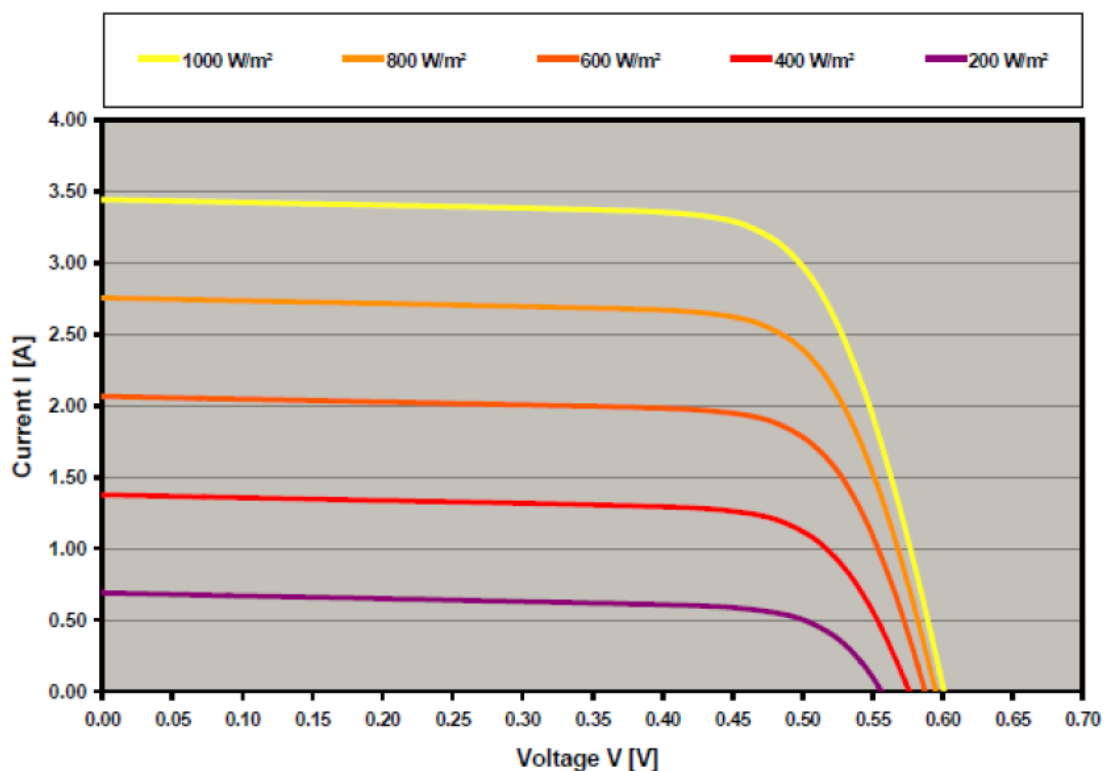
Με στόχο τη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών κελιών ή και πάνελ υπό κοινές συνθήκες, έχουν οριστεί οι λεγόμενες Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου, περισσότερο γνωστές ως STC συνθήκες από τα αρχικά των λέξεων Standard Test Conditions. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε :

- Ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ίσης προς  $1000\text{W/m}^2$ .
- Θερμοκρασία κελιού ίση προς  $25^\circ\text{C}$ .
- Μάζα αέρα (air mass) ίση προς 1.5. Η μάζα αέρα είναι μία παράμετρος που πρακτικά σχετίζεται με τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν ο ήλιος βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια της γης, η ηλιακή ακτινοβολία περνάει μόνο μία φορά διαμέσου του ατμοσφαιρικού αέρα, γεγονός που δηλώνεται ως  $AM=1$ . Ο παράγων  $AM=1.5$ , που χρησιμοποιείται ως πρότυπη συνθήκη για τον χαρακτηρισμό των ηλιακών κελιών αντιστοιχεί σε γωνία του ήλιου ίση προς  $41.8^\circ$  ως προς τον ορίζοντα.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στον παράγοντα της θερμοκρασίας κελιού, η οποία είναι συνήθως κατά  $25\text{-}30^\circ\text{C}$  υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν και τα δεδομένα ισχύος στις λεγόμενες NOCT συνθήκες (Normal

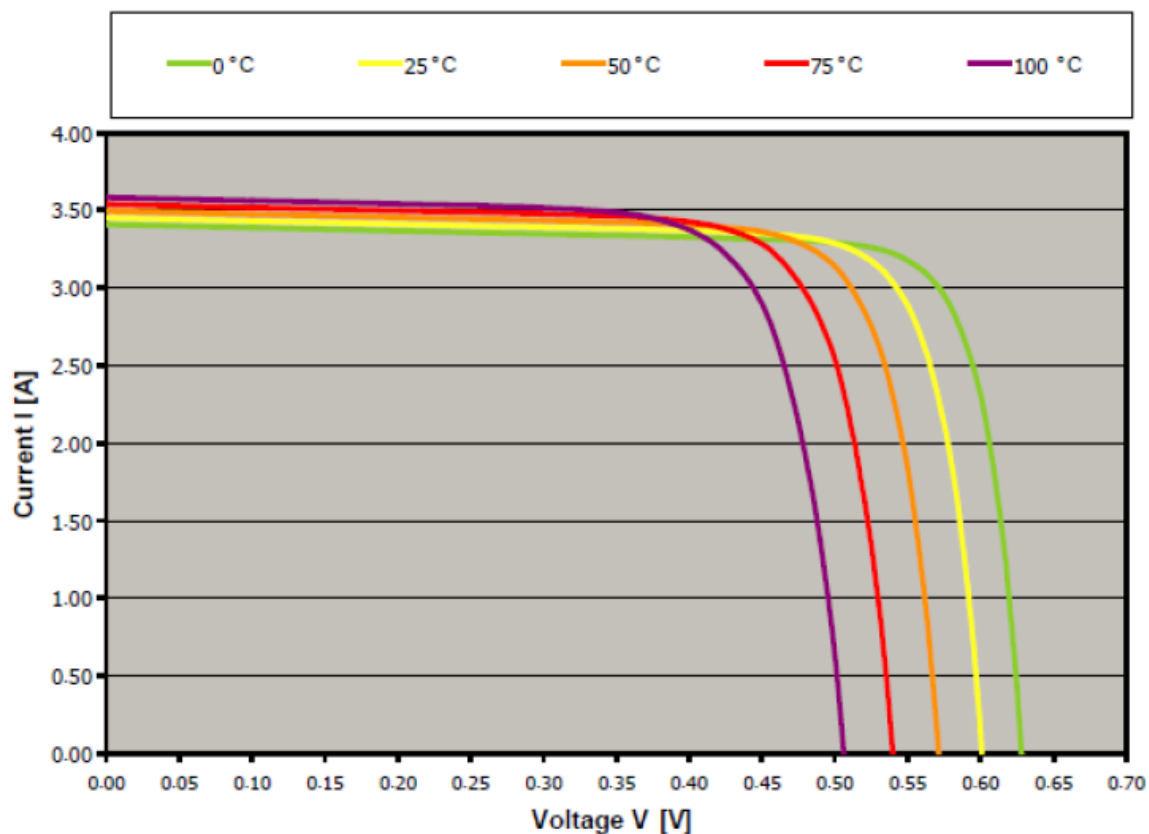
Operating Cell Temperature), οι οποίες αντιστοιχούν σε θερμοκρασία κελιού περί τους 45-48°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ένταση ακτινοβολίας 800W/m<sup>2</sup> AM=1.5 και ταχύτητα ανέμου 1m/sec. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν μία περισσότερο ρεαλιστική εικόνα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά κελιά, αναφορικά με τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Έτσι λοιπόν, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία αποτελούν τους δύο κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας από ένα ηλιακό κελί. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει τη μεταβολή της I-V χαρακτηριστικής ενός ηλιακού κελιού με μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας:



Σχήμα 16: Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας στην καμπύλη I-V ενός ηλιακού κελιού

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 16, η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά (σχεδόν ανάλογα) στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του κελιού ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της έντασης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η σχεδόν αναλογική σχέση ανάμεσα στην ισχύ του κελιού και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για σταθερές φυσικά θερμοκρασίες κελιού. Το επόμενο Σχήμα παρουσιάζει την επίδραση της θερμοκρασίας κελιού στην I-V χαρακτηριστική του κελιού:



Σχήμα 17: Επίδραση της θερμοκρασίας στην I-V χαρακτηριστική ενός ηλιακού κελιού

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 17, η θερμοκρασία επιδρά κυρίως στην τάση του ηλιακού κελιού. Ειδικότερα, η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται σημαντικά με μείωση της θερμοκρασίας, γεγονός που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται ελαφρά. Συνολικά, η ισχύς του ηλιακού κελιού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

---

### 5.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

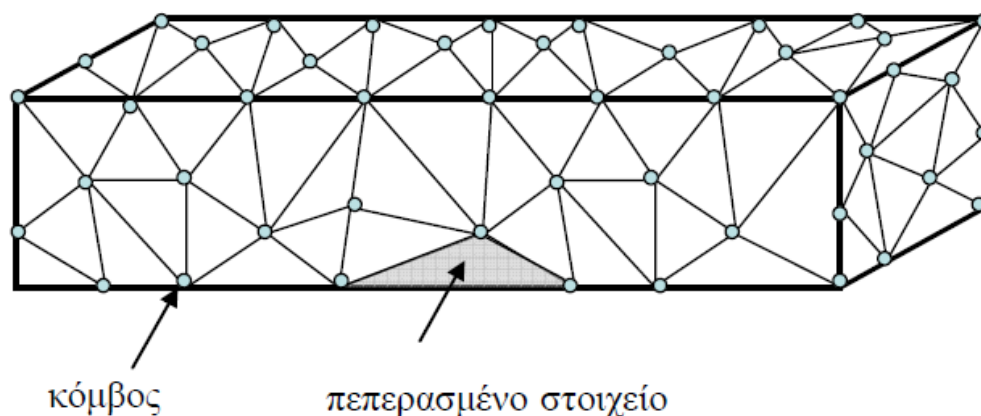
Στον τομέα της εφαρμοσμένης μηχανικής αντί για την χρήση των αναλυτικών μεθόδων, έχει αναπτυχθεί με την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Modeling) μια εναλλακτική λύση η οποία μπορεί να εκτελέσει την αριθμητική ανάλυση των περίπλοκων κατασκευών χρησιμοποιώντας διακριτοποίηση μικρών στοιχείων. Η θεωρία της FEM έχει κερδίσει ευρεία αποδοχή για την ευκολία στη χρήση της καθώς και στην διαμόρφωση περίπλοκων κατασκευών. Στην αγορά υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα πακέτα λογισμικών για σχεδιασμό και ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το Comsol Multiphysics.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, ΜΠΣ, (Finite Element Modeling – FEM) αποτελεί σήμερα ίσως την σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η ανάπτυξη της προήλθε από την συμβολή τριών βασικών επιστημονικών περιοχών, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής, της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών, αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η βασική αρχή της ΜΠΣ έγκειται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος αυτή είναι μια αριθμητική προσεγγιστική μέθοδος για την επίλυση των προβλημάτων της μηχανικής. Η αρχική διατύπωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην εργασία των Argyris και Kelsey το 1960. Από τότε μέχρι και σήμερα αναπτύσσεται και επεκτείνεται συνεχώς λόγω της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης και της διάδοσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό εξηγείται γιατί η συγκεκριμένη μέθοδος καταλήγει σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ μας παρέχει συνεχώς μεγαλύτερες δυνατότητες για την διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και σε συνδυασμό με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών υπολογισμών κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν από μερικά χρόνια. Η ΜΠΣ αν και αρχικά επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για την στατιστική ανάλυση φορέων, έχει γενικότερη εφαρμογή σε μια ευρεία γκάμα προβλημάτων των μηχανικών όπως είναι για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μετάδοση θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό κ.λ.π.

Η αξία της συγκεκριμένης μεθόδου έγκειται στην δυνατότητα της να αποτελεί μια ενιαία τεχνική για τη στατιστική και δυναμική γραμμική και μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ως προσεγγιστική μέθοδος επιδέχεται βελτιώσεις και προσφέρεται για διαρκή έρευνα με σκοπό τη βελτίωση και εξέλιξή της.

### 5.1.1 Η γεωμετρία του δομικού συστήματος

Στη μέθοδο ΠΣ θεωρείται ότι ο φορέας αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών πεπερασμένων στοιχείων τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται μεταξύ τους με διακριτά σημεία που ονομάζονται κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο των στοιχείων αυτών ονομάζονται δίκτυο ή πλέγμα και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των ΠΣ διακριτοποίησης του φορέα. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας αριθμός δυνατών μετακινήσεων του συγκεκριμένου σημείου που ονομάζονται βαθμοί ελευθερίας. Βασική παράμετρος της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση κατά την οποία η κατασκευή υποδιαιρείται σε μικρότερα στοιχεία. Η εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία βασίζεται στην επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου που περιλαμβάνει τον αριθμό, το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των στοιχείων, το οποίο θα πρέπει να αντιπροσωπεύει την κατασκευή με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Για την τελική επιλογή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι απαραίτητος ο έλεγχος αξιοπιστίας του που σχετίζεται με τη μορφή και τις διαστάσεις των στοιχείων που χρησιμοποιούνται ώστε να αποφεύγονται λάθη αριθμητικής ακρίβειας.



Σχήμα 18: Διακριτοποίηση δομικού συστήματος με τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία

Η βασική αρχή που διέπει την επιλογή της γεωμετρικής μορφής και του μεγέθους του κάθε πεπερασμένου στοιχείου είναι το κατά πόσο απότομα μεταβάλλεται η κατανομή των ζητούμενων μεταβλητών σε κάθε περιοχή του δομικού συστήματος. Στις περιοχές που υπάρχει έντονη αλλαγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών ή αναμένεται απότομη μεταβολή των τάσεων ή υψηλή συγκέντρωση τάσεων, η διακριτοποίηση θα πρέπει να είναι πιο λεπτομερής και κατά συνέπεια το μέγεθος των στοιχείων να μειωθεί. Το φαινόμενο αυτό είναι δυνατό να εμφανιστεί σε περιοχές που υπάρχει απότομη μεταβολή της γεωμετρίας του σώματος όπως γωνίες, κοιλότητες, ρωγμές και ασυνέχειες.

Η μείωση του μεγέθους των στοιχείων καθώς και η μεταβολή της γεωμετρίας τους κοντά στην περιοχή μεταβολής της γεωμετρίας του πεδίου, έχει ως στόχο την αύξηση της ακρίβειας

των υπολογισμών στις περιοχές αυτές. Επειδή οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων συνδέονται με τις μετατοπίσεις που εμφανίζονται στους κόμβους τους με χρήση συναρτήσεων παρεμβολής, η ακριβεία των τιμών που υπολογίζονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος αυτού. Γενικά θα μπορούσε να αναφερθεί, ότι όσο πιο μικρό είναι ένα στοιχείο και όσο πιο κανονικό γεωμετρικά είναι το σχήμα του, τόσο αυξάνεται η αξιοπιστία των συναρτήσεων παρεμβολής.

Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (Solid modeling).

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (δύο κόμβοι)
- Σύρμα-σχοινί
- Δοκός (δύο κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μembrάνη
- Κέλυφος
- Ορθοτροπικό-πολυστρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

## 5.2 Η διαδικασία αναπτυξης ενός μοντέλου Πεπερασμενων Στοιχειων

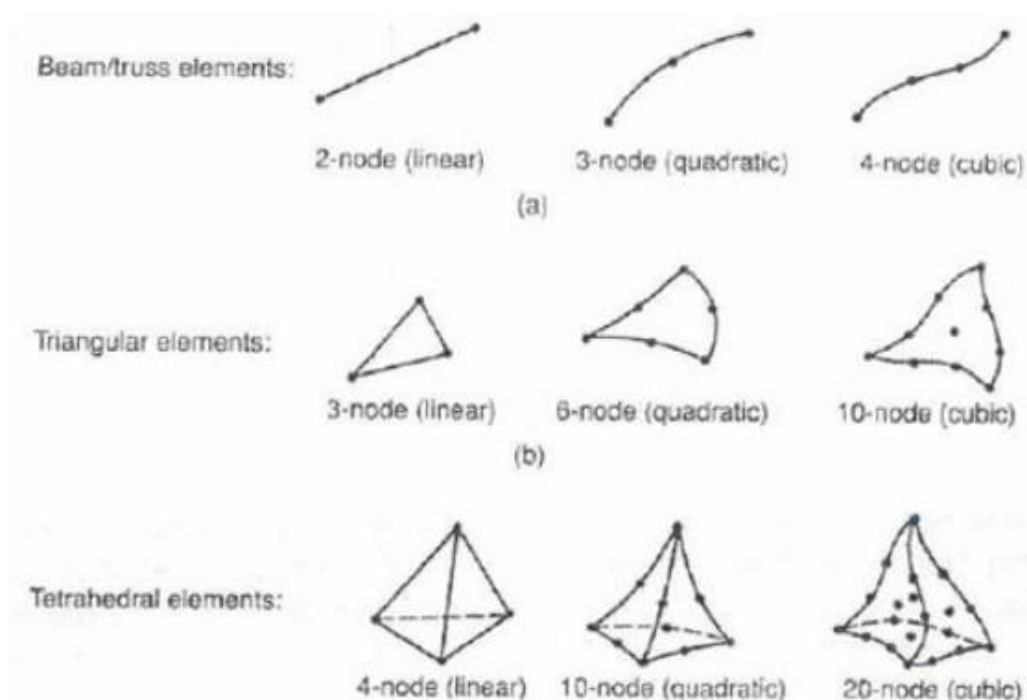
Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης, αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (FINITE ELEMENT MODELING), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προεπεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

Ο προεπεξεργαστής (Pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες, ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD, είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD, ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος,

διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για την ανάλυση.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο.

Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (Element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες.



Σχημα 19: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονοδιάστατα, (β) δισδιάστατα και (γ) τρισδιάστατα προβλήματα

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης. Επίσης, οι άγνωστοι, ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας, συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι

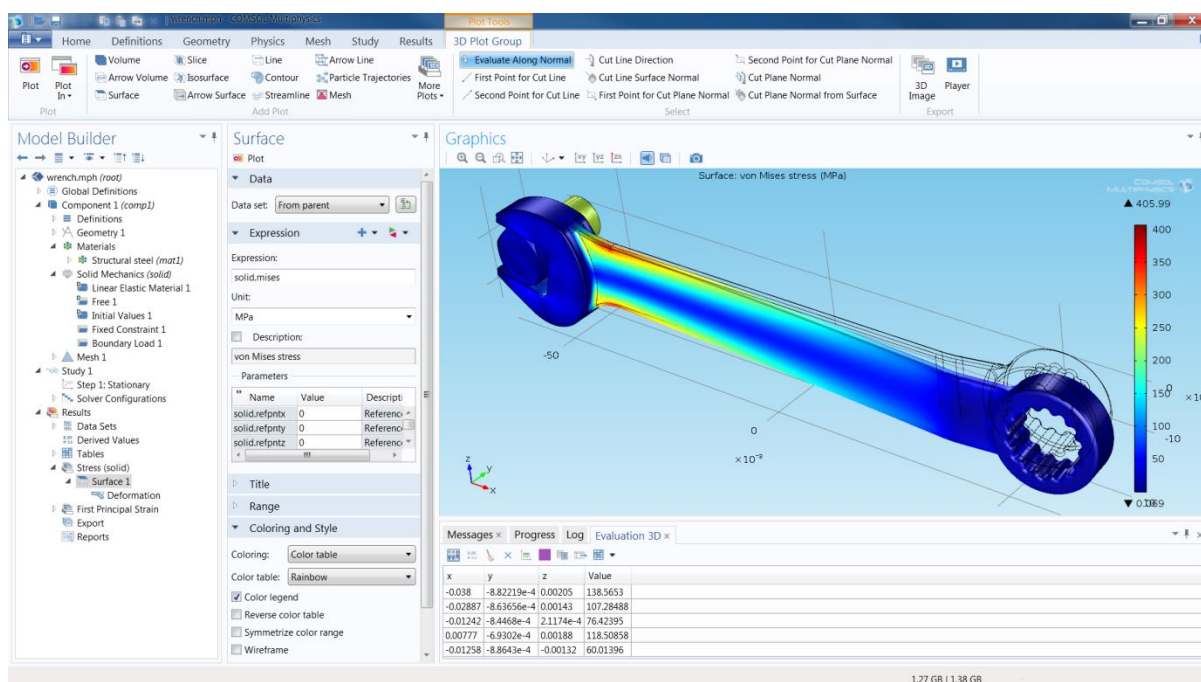
περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν, καθορίζονται οι οριακές συνθήκες οι οποίες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young ( $E$ ), και ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ), για ελαστικές κατασκευές. Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (Post-Processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους κατηγοριοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών ισοτασικών επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας.

### 5.3 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις αποτελούν τη βάση για πολλούς από τους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση ευρέος φάσματος φαινομένων στις επιστήμες της φυσικής και της μηχανικής. Κατά την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, το COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί την ιδιαίτερα επιτυχημένη και διαδεδομένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Σημαντικό πλεονέκτημα του COMSOL είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασής του με το MATLAB πράγμα που μας διευκολύνει πάρα πολύ, καθώς είναι εφικτή η αποθήκευση ενός υπολογιστικού μοντέλου σε μορφή κώδικα, στον οποίο μπορεί εύκολα να γίνουν αλλαγές και τροποποιήσεις.

## Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών



Σχήμα 19: Χαρακτηριστικό παραδειγμα του προγράμματος COMSOL Multiphysics

Εν γένει, η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου τα προβλήματα είναι πάρα πολύ απλής μορφής. Όμως, η ανάγκη επίλυσης προβλημάτων πιο σύνθετης μορφής οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων προσεγγιστικών μεθόδων, μία εκ των οποίων είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι προσεγγιστική αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και να εφαρμοστεί σε πολύ μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων, ανεξαρτήτως γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Το μόνο μειονέκτημα που έχει είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα προβλήματα, κάτι το οποίο έχει μειωθεί στο ελάχιστο λόγω της αξιοσημείωτης ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τα ακόλουθα στάδια:

- Εισάγεται η γεωμετρία της υπό μελέτη κατασκευής σε ένα πρόγραμμα, όπως π.χ. το COMSOL Multiphysics και δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο αυτής.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργείται το πλέγμα, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται.
- Όταν είναι έτοιμα τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται στο πρόγραμμα που θα επιλύσει το πρόβλημα.
- Μετά το πέρας της επίλυσης του προβλήματος, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα ώστε να είναι δυνατή η απεικόνιση των αποτελεσμάτων και η ανάγνωσή τους από τον μελετητή.

Το COMSOL διαθέτει μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένους τομείς και είναι διαθέσιμα στην περιοχή Add-on modules:

- Ενότητα AC/DC
- Ακουστική Ενότητα
- Ενότητα Χημικών Μηχανικών
- Ενότητα Επιστημών της Γης
- Ενότητα Μετάδοσης Θερμότητας
- Ενότητα MEMS
- Ενότητα RF
- Ενότητα Μηχανικής Κατασκευών

Αυτά τα έτοιμα προς εκτέλεση μοντέλα καλύπτουν πολλά κλασικά προβλήματα. Τα μοντέλα Multiphysics περιλαμβάνουν τη σύζευξη πολλών εξαρτημένων μεταβλητών διαφορετικής φύσης στο ίδιο μοντέλο.

Για την επιτυχή δημιουργία ενός μοντέλου θα πρέπει να γίνουν με τη σειρά με την οποία παρουσιάζονται, οι παρακάτω διαδικασίες:

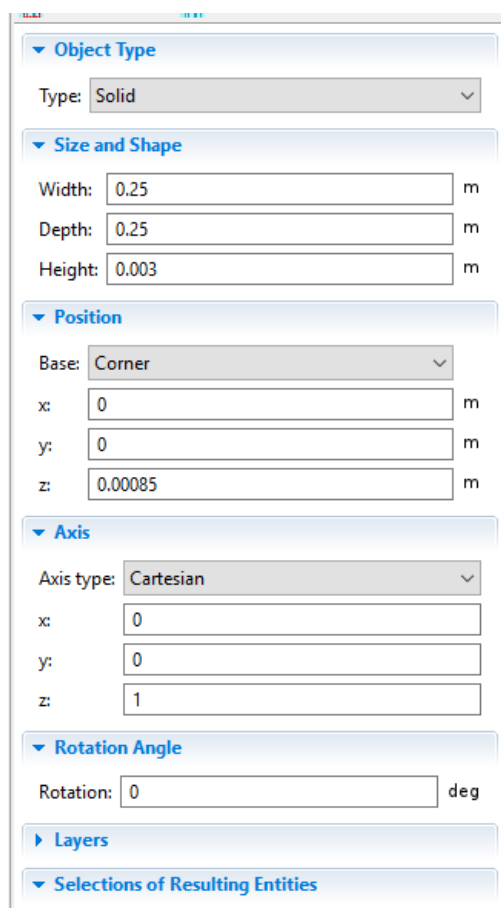
1. Κατασκευή της γεωμετρίας
2. Προσδιορισμός της φυσικής του προβλήματος-οριακές συνθήκες
3. Δημιουργία του πλέγματος (Meshing)
4. Επίλυση του προβλήματος (Solving)
5. Μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων (Post-Processing).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### Εφαρμογή στο COMSOL Multiphysics 4.3

Για τη μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιήθηκε η γεωμετρία της έρευνας των Ruiz-Reina και Sidrach-de-Cardona (2009). Η γεωμετρία αυτή αποτελείται από πέντε μέρη:

1. Το γυάλινο κάλυμμα. Πλάτος 250mm, πάχος 3mm και μήκος 250mm. Στο σύστημα αξόνων (x,y,z) τοποθετήθηκε στη θέση (0,0,0.00085) (σε μέτρα).



Σχήμα 20 : Χαρακτηριστικά γεωμετρίας γυάλινου καλύμματος

2. Το κελί πυριτίου. Πλάτος 125mm, πάχος 0.4mm, μήκος 125mm. Τοποθετήθηκε στο (0.0625, 0.0625, 0.00045)

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών

The image shows a software interface for defining a solid object. It is organized into several sections:

- Object Type:** A dropdown menu set to "Solid".
- Size and Shape:** Three input fields for dimensions in meters (m):
  - Width: 0.125
  - Depth: 0.125
  - Height: 0.0004
- Position:** A dropdown menu set to "Corner", followed by three input fields for coordinates in meters (m):
  - x: 0.0625
  - y: 0.0625
  - z: 0.00045
- Axis:** A dropdown menu set to "Cartesian", followed by three input fields for axis values:
  - x: 0
  - y: 0
  - z: 1
- Rotation Angle:** An input field for "Rotation" set to 0, with a unit of "deg".
- Layers:** A section with a right-pointing arrow.
- Selections of Resulting Entities:** A section with a downward-pointing arrow.

Σχήμα 21 : Χαρακτηριστικά γεωμετρίας πυριτίου

3. Το φιλμ EVA (ethylene vinyl acetate). Πλάτος 250mm, πάχος 0.8mm, μήκος 250mm. Τοποθετήθηκε στο (0,0,0.00005).

▼ Object Type

Type: Solid

▼ Size and Shape

Width: 0.25 m

Depth: 0.25 m

Height: 0.0008 m

▼ Position

Base: Corner

x: 0 m

y: 0 m

z: 0.00005 m

▼ Axis

Axis type: Cartesian

x: 0

y: 0

z: 1

▼ Rotation Angle

Rotation: 0 deg

► Layers

▼ Selections of Resulting Entities

Σχήμα 22 : Χαρακτηριστικά γεωμετρίας φιλμ EVA

4. Το φιλμ Tedlar που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πάνελ. Πλάτος 250mm, πάχος 0.05mm και ύψος 250mm. Τοποθετήθηκε στο (0,0,0).

▼ Object Type

Type: Solid ▼

▼ Size and Shape

Width: 0.25 m

Depth: 0.25 m

Height: 0.00005 m

▼ Position

Base: Corner ▼

x: 0 m

y: 0 m

z: 0 m

▼ Axis

Axis type: Cartesian ▼

x: 0

y: 0

z: 1

▼ Rotation Angle

Rotation: 0 deg

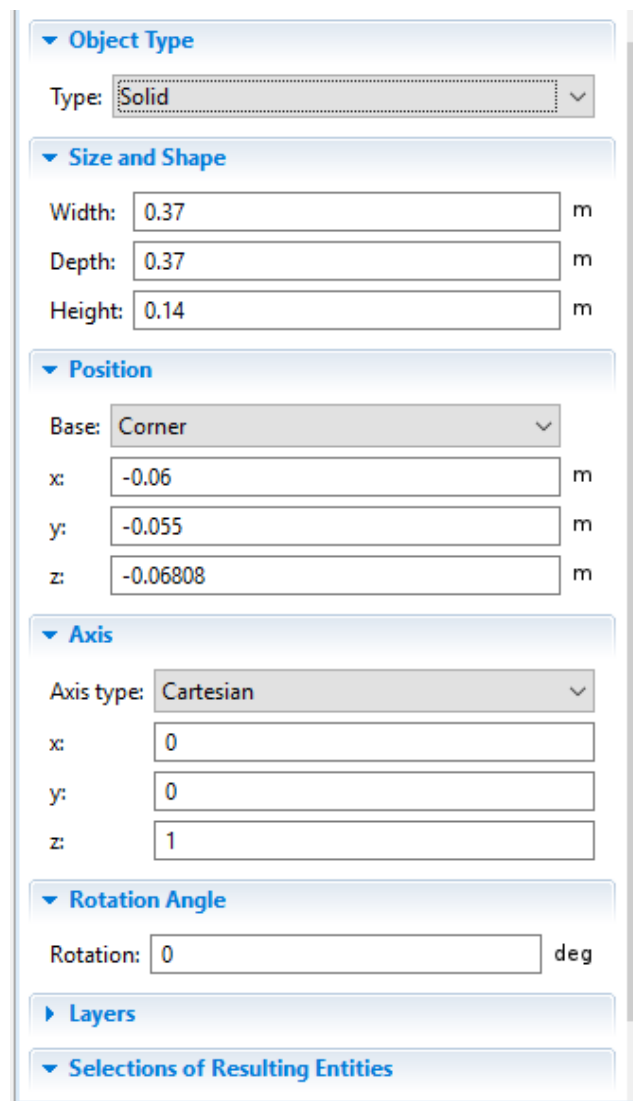
► Layers

▼ Selections of Resulting Entities

Σχήμα 23 : Χαρακτηριστικά φιλμ Tedlar

5. Ο αέρας που περιβάλλει το πάνελ. Πλάτος 37cm, ύψος 14cm και μήκος 37cm. Τοποθετήθηκε στο (-0.06,-0.055,-0.06808).

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών



▼ Object Type

Type: Solid ▼

▼ Size and Shape

Width: 0.37 m

Depth: 0.37 m

Height: 0.14 m

▼ Position

Base: Corner ▼

x: -0.06 m

y: -0.055 m

z: -0.06808 m

▼ Axis

Axis type: Cartesian ▼

x: 0

y: 0

z: 1

▼ Rotation Angle

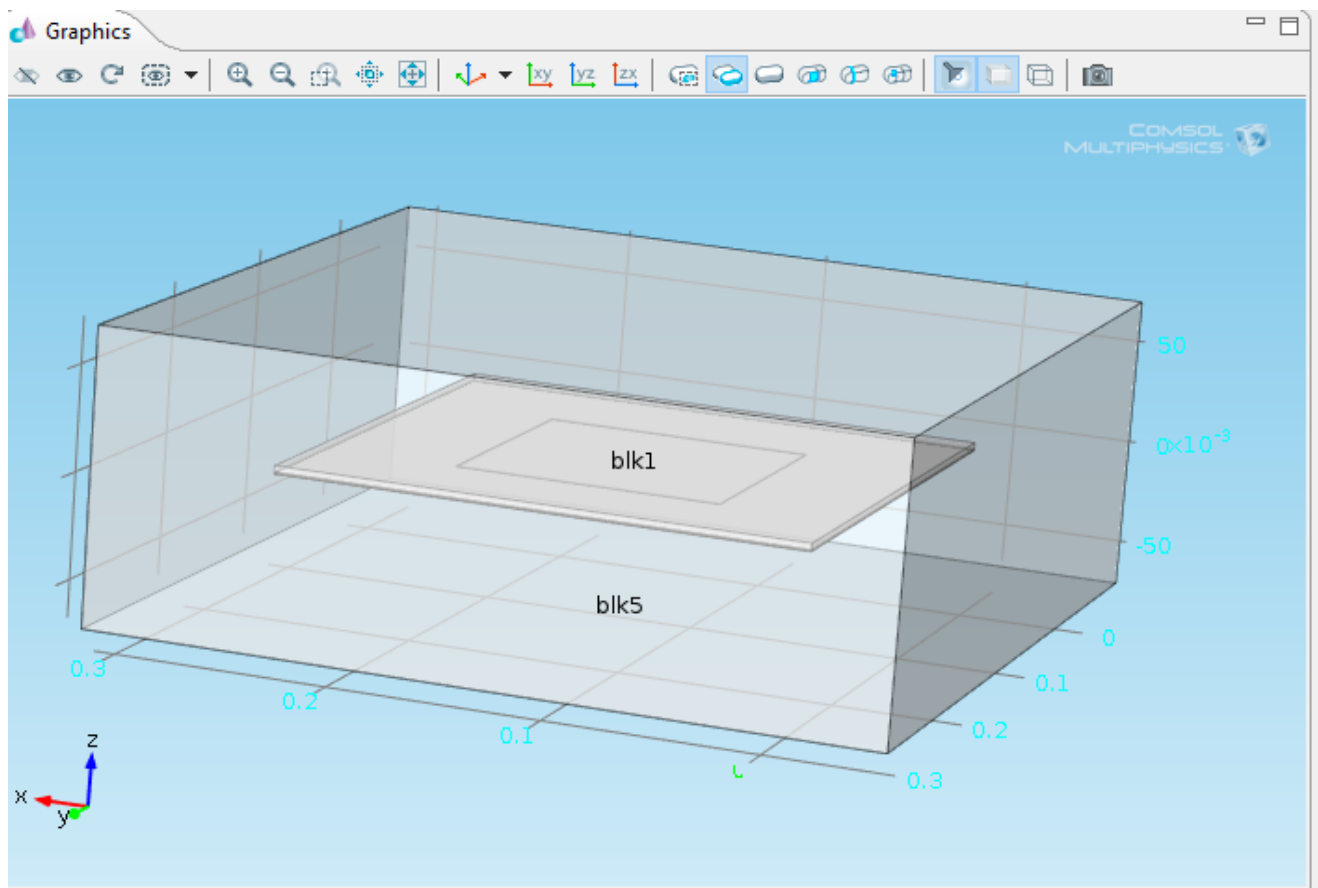
Rotation: 0 deg

► Layers

▼ Selections of Resulting Entities

Σχήμα 24 : Χαρακτηριστικά αέρα

Το αποτέλεσμα της γεωμετρίας είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 25 : Γεωμετρία πρώτου μοντέλου

Στην μπάρα του παραθύρου Graphics έχει επιλεγεί η επιλογή Transparency για να είναι ορατό το πάνελ μέσα στο πεδίο του αέρα.

Στη συνέχεια εισήγαμε τα υλικά του μοντέλου. Το COMSOL διαθέτει βιβλιοθήκες με πολλά έτοιμα υλικά, χρειάστηκε όμως η προσθήκη κάποιων τιμών απαραίτητων για την μελέτη. Τα χαρακτηριστικά και οι αντίστοιχες τιμές τους αντλήθηκαν από τους Nyanor et al. (2015). Ακολουθούν οι ιδιότητες των υλικών και οι τιμές τους.

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Density	rho	2200[kg/m...	kg/m <sup>3</sup>	Basic
✓	Thermal conductivity	k	1.1[W/(m*...	W/(m*K)	Basic
✓	Heat capacity at constant pressure	Cp	480[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
✓	Coefficient of thermal expansion	alpha	10e-6	1/K	Basic
✓	Young's modulus	E	74e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
✓	Poisson's ratio	nu	0.3	1	Young's modulus and Poisson's ratio
	Relative permeability	mur	1	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma	1e-14[S/m]	S/m	Basic
	Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	4.2	1	Basic
	Refractive index	n	1.5	1	Refractive index

Σχήμα 26 : Ιδιότητες γυαλιού

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Coefficient of thermal expansion	alpha	2.6e-6[1/K]	1/K	Basic
✓	Heat capacity at constant pressure	Cp	710[J/(kg*K)]	J/(kg*K)	Basic
✓	Density	rho	2329[kg/m...	kg/m <sup>3</sup>	Basic
✓	Thermal conductivity	k	148[W/(m*...	W/(m*K)	Basic
✓	Young's modulus	E	170e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
✓	Poisson's ratio	nu	0.28	1	Young's modulus and Poisson's ratio
	Relative permeability	mur	1	1	Basic
	Electrical conductivity	sigma	1e-12[S/m]	S/m	Basic
	Relative permittivity	epsilon <sub>r</sub>	11.7	1	Basic
	Refractive index	n	3.48	1	Refractive index

Σχήμα 27 : Ιδιότητες πυριτίου

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Density	rho	935[kg/m <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	Basic
✓	Thermal conductivity	k	0.34	W/(m*K)	Basic
✓	Heat capacity at constant pressure	Cp	480	J/(kg*K)	Basic
✓	Coefficient of thermal expansion	alpha	180e-6	1/K	Basic
✓	Poisson's ratio	nu	0.38	1	Basic
✓	Young's modulus	E	2e9	Pa	Basic
	mu	mu	mu(T[1/K])...	Pa	Basic
	Refractive index	n	1.5	1	Refractive index
	Refractive index, imaginary part	ki	0	1	Refractive index

Σχήμα 28 : Ιδιότητες EVA

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών

	Property	Name	Value	Unit	Property group
✓	Coefficient of thermal expansion	alpha	7.0e-5[1/K]	1/K	Basic
✓	Heat capacity at constant pressure	Cp	1090[J/(kg*...]	J/(kg*K)	Basic
✓	Density	rho	1190[kg/m...]	kg/m^3	Basic
✓	Thermal conductivity	k	0.16[W/(m*...]	W/(m*K)	Basic
✓	Young's modulus	E	3.2e9[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio
✓	Poisson's ratio	nu	0.35	1	Young's modulus and Poisson's ratio

Σχήμα 29 : Ιδιότητες Tedlar

Στη συνέχεια οι Ruiz-Reina και Sidrach-de-Cardona (2009) χρησιμοποιούν το «General Heat Transfer application mode», το οποίο δεν υπάρχει στο πρόγραμμα. Αντ' αυτού, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ζητούμενη μελέτη, δοκιμάσαμε 4 διαφορετικά μοντέλα φυσικής.

Αρχικά, από την κατηγορία Heat Transfer στις φυσικές του COMSOL, εισήγαμε το Heat Transfer in Solids. Σε αυτό, καθορίσαμε σαν initial value την θερμοκρασία σε 30[degC] (βαθμοί Κελσίου). Προσθέσαμε το module “Heat Flux” ώστε να μετρήσουμε την ροή θερμότητας στο πάνελ. Σαν domains επιλέχθηκαν τα 7-12 (που αντιστοιχούν στο πάνελ), και στο πεδίο Heat Flux επιλέξαμε General Inward Heat Flux με  $q_0=1005 \text{ W/m}^2$ .

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών

**Boundary Selection**

Selection: **Manual**

7  
8  
9  
10  
11  
**12**

► **Override and Contribution**

► **Equation**

▼ **Heat Flux**

☒ General inward heat flux

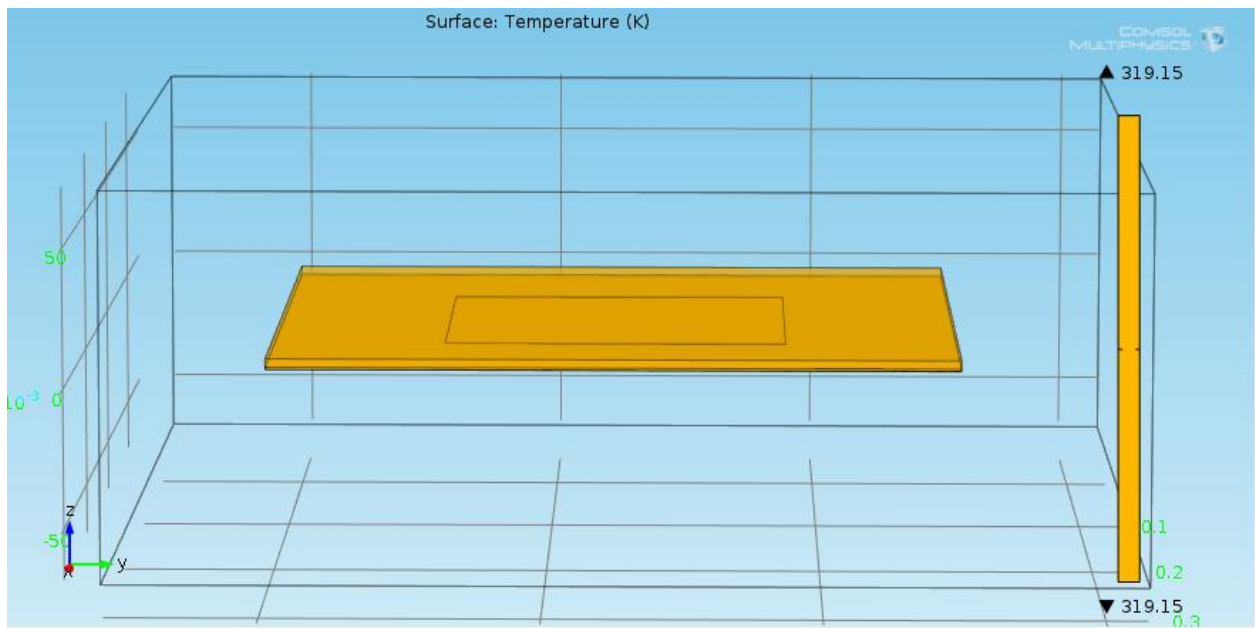
$q_0$    $\text{W/m}^2$

☐ Inward heat flux  
 $q_0 = h \cdot (T_{\text{ext}} - T)$

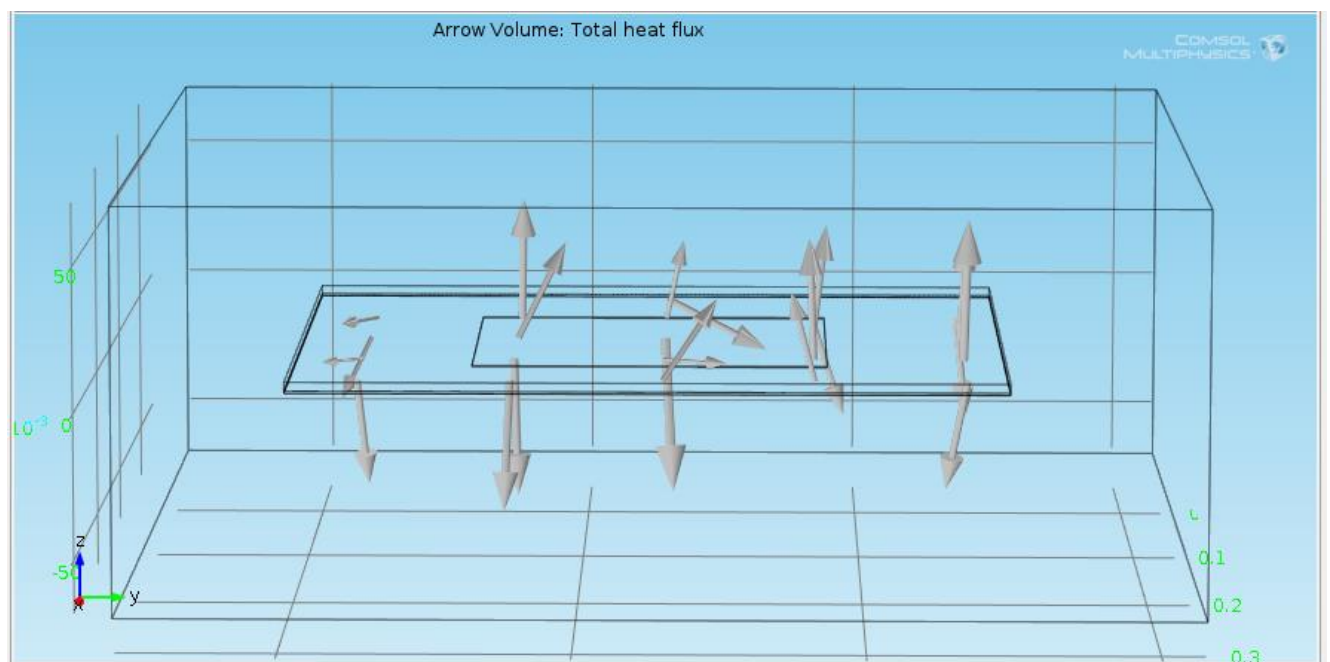
☐ Total heat flux

Το αποτέλεσμα του module της θερμοκρασίας δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες πληροφορίες καθώς δε φαίνεται μεταβολή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλαισίου.

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών



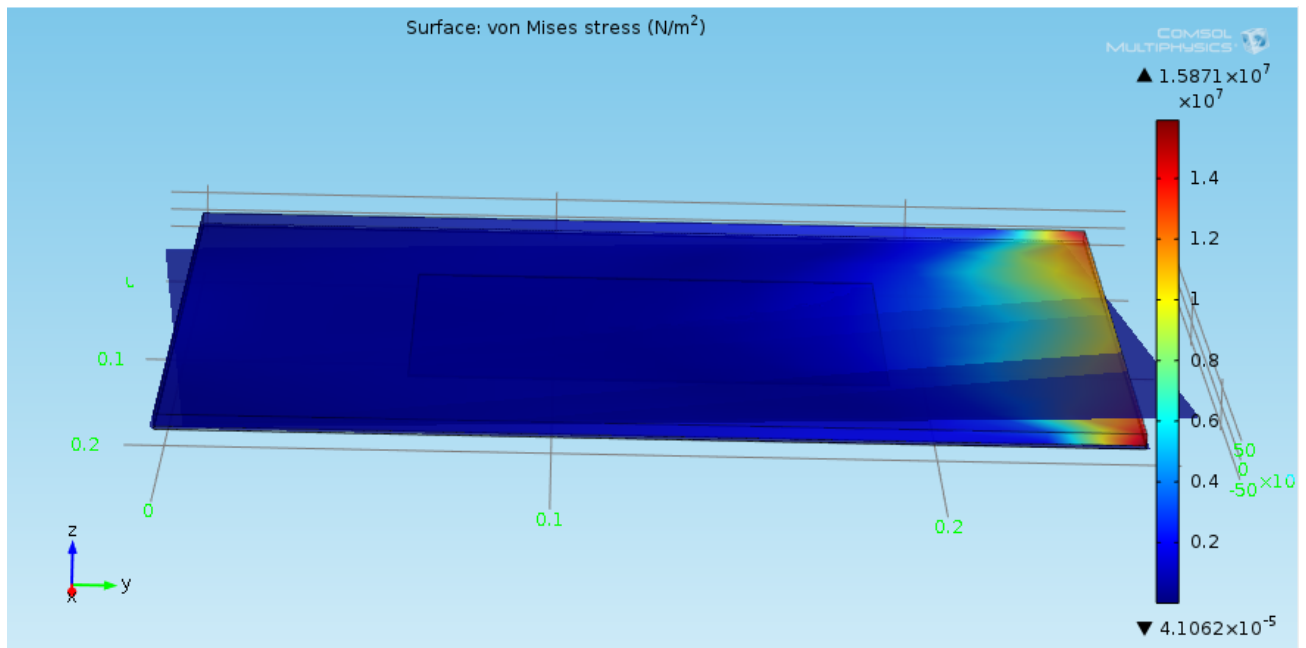
Το διάγραμμα των ισοθερμικών καμπύλων είναι το εξής:



Το δεύτερο φυσικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το thermal stress για να εξεταστεί η πίεση που ασκείται στο πάνελ λόγω της θερμότητας που εφαρμόζεται. Στα initial values ορίστηκε 30[degC] η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και το boundary 23 ως fixed constraint.

Η εκτέλεση της μελέτης χωρίς κάποια πηγή θερμότητας, σε προσπάθεια να απεικονιστεί η επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα, δεν απέφερε κανένα αποτέλεσμα.

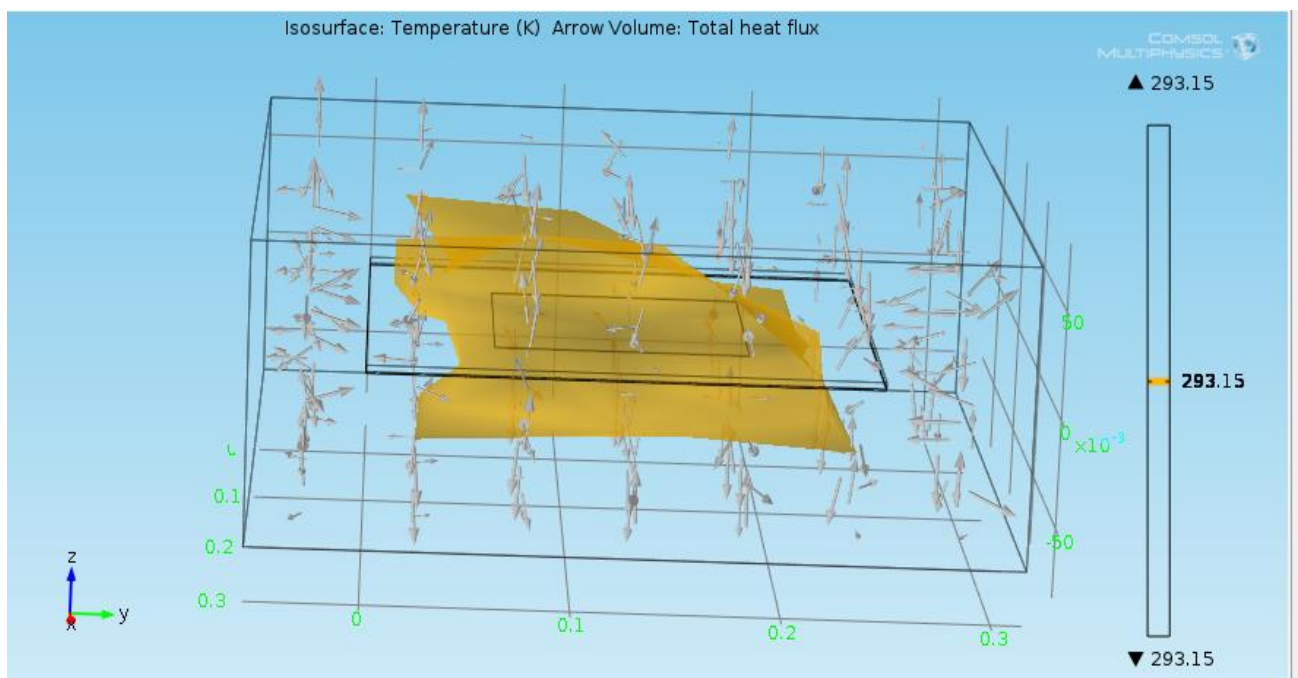
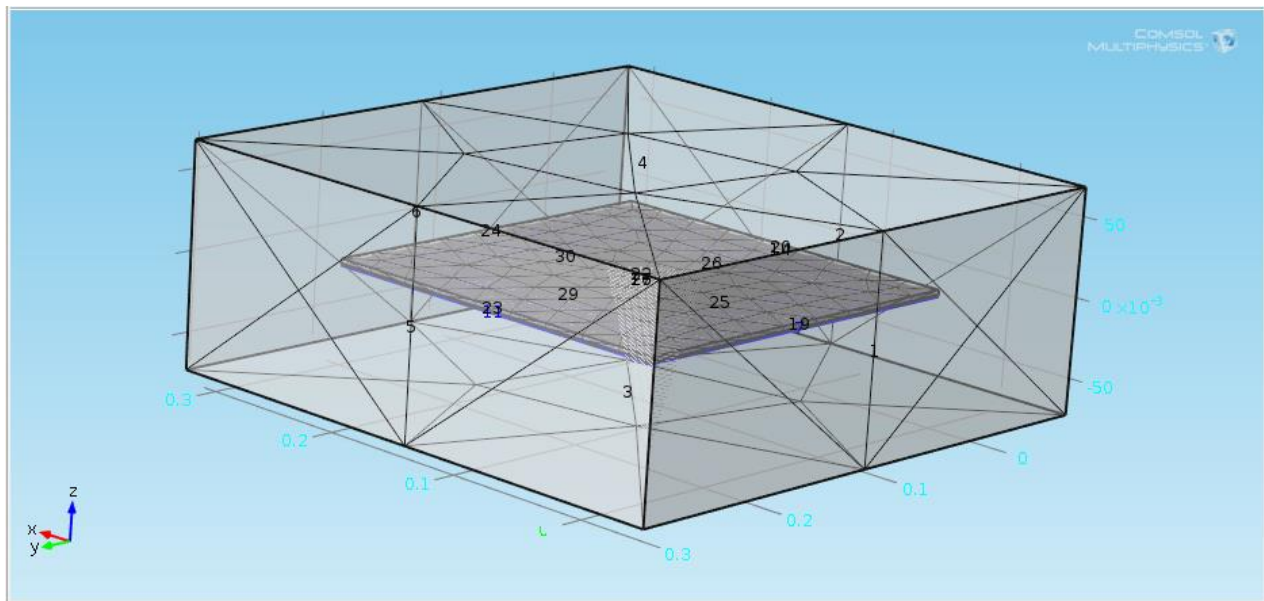
Θεωρήσαμε λοιπόν σαν πηγή θερμότητας το boundary 22, το οποίο ορίστηκε στους 50[degC]. Επίσης ορίστηκε το module Heat Flux σε όλα τα boundaries για να εξεταστεί η ροή θερμότητας. Για να δούμε αν μπορούμε να πάρουμε μεταβολή θερμοκρασίας στον όγκο του πλαισίου, ορίσαμε μια πλευρά του πλαισίου ως πηγή θερμότητας και μετρήσαμε το ροή σε όλες τις πλευρές του πλαισίου.



Από τη παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι η θερμοκρασία σε μια επιφάνεια του πλαισίου επιβάλλει πίεση στο πλαίσιο το οποίο μάλιστα παραμορφώνεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας και των διαφορετικών υλικών. Αυτό σημαίνει ότι αν αναγκάζαμε το πλαίσιο να παραμείνει σταθερό ( όπως γίνεται στις πραγματικές εγκαταστάσεις) τότε τα υλικά θα στρεσάρονταν και μπορεί να παρουσίαζαν βλάβες και σπασίματα. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να φανεί εδώ γιατί (λόγω υπολογιστικών πόρων) είναι αδύνατο να κάνουμε πιο περίπλοκο μοντέλο (δηλαδή να προσομοιώσουμε και τις βάσεις στήριξης).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται το Mesh της γεωμετρίας, σε ρύθμιση extra coarse. Δεν είναι δυνατή η παραγωγή λεπτομερέστερου mesh λόγω μη ρεαλιστικών απαιτήσεων του προγράμματος σε υπολογιστικούς πόρους. Το αποτέλεσμα του mesh είναι το ακόλουθο:

Θερμομηχανική ανάλυση φωτοβολταϊκών πάνελ και μελέτη του βαθμού απόδοσης τους βάσει διαφορετικών καιρικών συνθηκών



Εδώ ξανά βλέπουμε τη ροή απο το πλαίσιο προς το περιβάλλον αλλά με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε κάθε τμήμα του mesh. Το πλαίσιο έχει την ίδια θερμοκρασία σε όλη την επιφάνεια του και αυτό που βλέπουμε είναι να απάγεται θερμότητα από το πλαίσιο προς το περιβάλλον

## Συμπεράσματα

---

Κατά τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης εργασίας δοκιμάστηκαν διάφορα μοντέλα φωτοβολταϊκών πάνελ. Μόνο το συγκεκριμένο, το οποίο παρουσιάζεται παραπάνω, κατάφερε να επιφέρει αποτελέσματα. Αυτό που φαίνεται να προκύπτει σαν τελικό συμπέρασμα είναι ότι η θερμοκρασία σε μια επιφάνεια του πλαισίου επιβάλλει πίεση στο πλαίσιο το οποίο μάλιστα παραμορφώνεται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας και των διαφορετικών υλικών. Η παραμόρφωση αυτή συνεπάγεται μετατόπιση της μίας άκρης του πλαισίου της τάξης των 438 mm. Αυτό σημαίνει ότι αν αναγκάζαμε το πλαίσιο να παραμείνει σταθερό (όπως γίνεται στις πραγματικές εγκαταστάσεις) τότε τα υλικά θα στρεσσάρωνταν και μπορεί να παρουσίαζαν βλάβες και σπασίματα. Γενικά υπήρξαν προβλήματα με την έλλειψη σχετικής βιβλιογραφίας πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης, όμως το σημαντικότερο πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε ήταν οι μεγάλες απαιτήσεις του προγράμματος Cosmol Multiphysics σε υπολογιστική ισχύ. Μας προβλημάτησε τόσο, ώστε να αναρωτηθούμε αν είναι δυνατή πλέον η λειτουργία του προγράμματος σε συμβατικό υπολογιστή. Ακόμα και σε δοκιμές με απλούστερα μοντέλα οι μελέτες δεν μπορούσαν να τρέξουν, τα αποτελέσματα δεν αποθηκεύονταν πουθενά και ο χρόνος ολοκλήρωσης της εκτέλεσης ήταν υπέρογκος σε σχέση με την απλότητα των μοντέλων.

Ακόμα έγιναν εκ νέου προσπάθειες να διεξαχθεί έρευνα, βασισμένη πάνω στο μοντέλο που παρουσιάστηκε προηγουμένως, υπό συνθήκες μερικής σκίασης αλλά δεν μπόρεσε επ' ουδενί να ανταποκριθεί το σύστημα ώστε να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα. Ακόμα και η κανονική κατάσταση (χωρίς σκίαση) που εξετάσαμε δεν μπόρεσε να τρέξει με την απαιτούμενη λεπτομέρεια.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [ 1 ] Κωνσταντίνος Α. Μπαλάρας, Αθανάσιος Α. Αργυρίου, Φώτης Ε. Καραγιάννης. Συμβατικές και ήπιες μορφές ενέργειας. Αθήνα: Τεκδοτική 2006.
- [ 2 ] Photovoltaic Module Reliability Workshop 2010 February 18–19, 2010. Technical Report NREL/TP-5200-60171 November 2013.
- [ 3 ] Jochen Wirth, Steffen Jack, Michael Köhl and Karl-Anders Weiß. Durability Analysis on Solar Energy Converters containing Polymeric Materials.
- [ 4 ] Ulrich Eitner. Thermomechanics of photovoltaic modules.
- [ 5 ] Jay Johnson, Ward Bower, Michael Quintana. Electrical and Thermal Finite Element Modeling of Arc Faults in Photovoltaic Bypass Diodes.
- [ 6 ] E. Ruiz-Reina, M. Sidrach-de-Cardona. Simulation of the Convective Heat Transfer and Working Temperature Field of a Photovoltaic Module using COMSOL Multiphysics.
- [ 7 ] Μωυσής Δαμιανίδης, Γεώργιος Κατσαρός, Ματθαίος Τόλης, Φώτιος Στεργιόπουλος. Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2011
- [ 8 ] Μαρία – Στυλιανή Βουτέκη. Εντοπισμός και επιδιόρθωση βλάβης σε δομικά στοιχεία με τη χρήση « Ευφών Υλικών». Διδακτορική διατριβή. 2009
- [ 9 ] ΚΟΥΤΣΟΥΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ. ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ a-Si/μc-Si ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΑΛΛΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ. Ειδική ερευνητική εργασία.
- [ 10 ] ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ε. ΤΕΤΕΛΕΝΗΣ. Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων. Διπλωματική εργασία. 2011
- [ 11 ] Μπινώλη Μαρία. Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του. Διπλωματική εργασία. 2010

Χρήσιμα Site

<https://www.comsol.com>