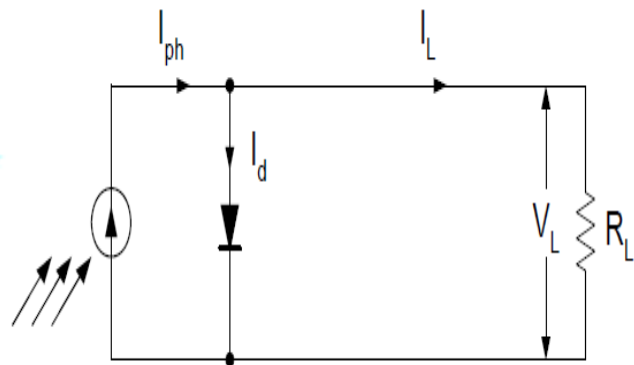




ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Μελέτη και κατασκευή διάταξης φωτοβολταϊκής
γεννήτριας για εργαστηριακή προσωμοίωση”



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΩΛΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

Σπουδαστές:

Καρδαράς Δημήτριος

A.M 33651

Πετρουλάκης Γεώργιος

A.M 33888

ΑΘΗΝΑ
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2014

“Study and construction of a photovoltaic array generator for lab simulation”

Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, κλείνει ο κύκλος σπουδών στο Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά κατά τη διάρκεια του οποίου αποκομίσαμε γνώσεις, κάναμε φίλιες και αποκτήσαμε εμπειρίες οι οποίες θα μας συνοδεύουν για το υπόλοιπο της ζωής μας. Για όλα αυτά τα χρόνια ως σπουδαστές του τμήματος Ηλεκτρολογίας του Ιδρύματος οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για τη στήριξη και την υπομονή τους, τους φίλους και συμφοιτητές μας για τις ατέλειωτες ώρες μαθημάτων, εξεταστικών και μελέτης που μοιραστήκαμε αλλά και τους καθηγητές μας, οι οποίοι ήταν πάντα πρόθυμοι να μας επιλύσουν απορίες, ακόμα και τελευταίας στιγμής στις κατά καιρούς εξεταστικές περιόδους.

Η εργασία που ακολουθεί, δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή και πολύτιμη βοήθεια του εισηγητή του θέματος, του καθηγητή κ. Τσιώλη Σπύρου, ο οποίος ήταν δίπλα μας σε όλη τη διάρκεια της πτυχιακής και μας παρείχε πολύτιμες πληροφορίες και υλικό σχετικά με το θέμα. Επίσης οφείλουμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον καθηγητή κ. Ιωαννίδη Γεώργιο, του οποίου η βοήθεια ήταν κάτι παραπάνω από πολύτιμη στην παραμετροποίηση της γεννήτριας ρεύματος, αλλά και στον καθορισμό των χαρακτηριστικών του συστήματος ψύξης του συστήματος. Τέλος επιβάλλεται να ευχαριστήσουμε τον συμφοιτητή, αλλά και συνάδελφο πλέον Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Τ.Ε. Σιμιτσή Παναγιώτη ο οποίος με τις άριστες γνώσεις του στην σχεδίαση και κατασκευή τυπωμένων κυκλωμάτων PCB έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η σχεδίαση και κατασκευή μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας, χρησιμοποιώντας απλά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, ούτως ώστε να μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος στο ελεγχόμενο περιβάλλον του εργαστηρίου.

Στα πρώτα 3 κεφάλαια θα κάνουμε μια αναδρομή στο ενεργειακό πρόβλημα και στις λύσεις που προσπάθησε να δώσει ο άνθρωπος ανά τα χρόνια, χρησιμοποιώντας διάφορες πηγές ενέργειας. Θα αναφέρουμε συνοπτικά τις σημαντικότερες από αυτές - είτε είναι συμβατικές, είτε ανανεώσιμες – και θα αναφέρουμε ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας.

Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στην εκμετάλλευση της απεριόριστης ηλιακής ενέργειας με τη χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Θα αναλύσουμε λεπτομερώς το τι συμβαίνει όταν σε έναν ημιαγωγό όπως π.χ. το πυρίτιο, προσπίπτει υπεριώδης ακτινοβολία και πως αυτό οδηγεί στην παραγωγή εκμεταλλεύσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Θα παραθέσουμε συνοπτικά διάφορα είδη ηλιακών κυττάρων βάσει βαθμού απόδοσης, ευκολία κατασκευής και το πόσο διαδεδομένα είναι.

Έπειτα, θα εξετάσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος, δημιουργώντας ένα πρότυπο βασισμένο σε γνωστά και απλά ηλεκτρονικά στοιχεία, με σκοπό να δημιουργήσουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο εκφράζει με επαρκή ακρίβεια τη καμπύλη $I - V$ ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Τέλος αυτό θα μας βοηθήσει να καθορίσουμε τα υλικά και τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιήσουμε για το κατασκευαστικό μέρος της εργασίας, δηλαδή τη προσομοίωση αυτή καθ' αυτή. Θα παραθέσουμε βήμα-βήμα το στάδιο της κατασκευής, από τη σχεδίαση των πλακετών, μέχρι το ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Ολοκληρώνοντας, θα πραγματοποιήσουμε μια σειρά μετρήσεων για να παρατηρήσουμε τη μεταβολή της καμπύλης $I - V$ ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και θα καταγράψουμε τα αποτελέσματά μας.

Λέξεις κλειδιά: Προσομοίωση φωτοβολταϊκού, ηλιακή ενέργεια, καμπύλη $I-V$ φωτοβολταϊκού.

SUMMARY

The purpose of this thesis is to design and construct a photovoltaic generator, using simple electronic parts in order to be able to study the behavior of a similar system, in the controlled environment of a laboratory.

On the 3 first chapters we are doing a recursion to the energy crisis and the solutions mankind has tried to give throughout the years, using various energy sources. We will briefly mention the most important of them - conventional and renewable - with some of their advantages and disadvantages.

Next we are focusing on the exploitation of the infinite solar energy with the use of the photovoltaic phenomenon. We are particularly analyzing the reaction of a semiconductor like silicon to ultraviolet radiation and how that gives us exploitable electric power. We will mention some kinds of solar cells based on their efficiency, ease of manufacture and how widespread they are.

Then we are examining the electric behavior of a photovoltaic system, by creating a model based on known electronic parts, focusing to create an equivalent circuit which expresses with sufficient accuracy the $I - V$ curve of a solar panel. This will help us define the materials and circuits that we need during the construction part of this project, namely the simulator itself. We are following the construction stage step-by-step, from the design of the boards until the integrated circuit.

Finally, we are conducting a series of measurements to observe the alteration of the $I - V$ curve based on the solar radiation intensity and we are writing down our results.

Keywords: Photovoltaic simulator, solar radiation, photovoltaic I-V curve.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ3

ΕΙΣΑΓΩΓΗ4

SUMMARY5

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

.....6

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....8

ΛΙΣΤΑ

ΠΙΝΑΚΩΝ

.....9

1. Ενέργεια10

1.1. Το ενεργειακό πρόβλημα11

1.2. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου12

2. Οι συμβατικές πηγές ενέργειας σήμερα

.....14

2.1. Ο γαιάνθρακας (κάρβουνο)

.....14

2.2. Το πετρέλαιο15

2.3. Η πυρηνική ενέργεια

.....16

2.4. Φυσικό Αέριο17

3. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

.....18

3.1. Υδατόπτωση20

3.2. Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων
ρευμάτων21

3.3. Βιομάζα22

3.4. Γεωθερμική ενέργεια23

3.5. Αιολική ενέργεια

.....24

3.6. Ηλιακή ενέργεια

.....26

3.6.1.	Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας	26
4.	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	28
4.1.	Η φωτοβολταϊκή ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα	30
4.2.	Οι ημιαγωγοί	32
4.3.	Ημιαγωγοί πρόσμιξης	33
4.4.	Η $p - n$ επαφή	37
4.5.	Το φράγμα δυναμικού	38
4.6.	Η δίοδος $p - n$	40
4.7.	Είδη ηλιακών κυττάρων	43
4.7.1.	Κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου	44
4.7.2.	Κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου	45
4.7.3.	Κύτταρα λεπτής μεμβράνης	45
4.7.3.1.	Κύτταρα καδμίου – Τελλουρίου (CdTe)	46
4.7.3.2.	Κύτταρα Χαλκού – Ινδίου / Γάλλιου - Διηλεκτρονίου	46
4.7.3.3.	Κύτταρα αρσενιδίου του Γαλλίου (GaAs)	46
4.7.3.4.	Οργανικά / Πολυμερή κύτταρα	46
5.	Μοντελοποίηση ηλιακών κυττάρων	48

5.1.	1 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		48		
5.2.	2 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		50		
5.3.	3 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		51		
5.4.	4 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		53		
5.5.	5 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		55		
5.6.	6 ^ο	Ισοδύναμο	ηλεκτρικό	κύκλωμα
.....		56		
5.7.	H	καμπύλη	I	- V
.....				59
5.7.1.	Παράγοντες που επηρεάζουν τη καμπύλη I - V			
.....				60
5.7.1.1.	H ένταση G της ηλιακής ακτινοβολίας			
.....				60
5.7.1.2.	H θερμοκρασία T του φωτοβολταϊκού στοιχείου			
.....				61
5.7.1.3.	O συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A			
.....				62
5.7.1.4.	H	αντίσταση	σειράς	Rs
.....				63
5.7.1.5.	H	παράλληλη	αντίσταση	Rsh
.....				65
5.7.1.6.	Ανάστροφο		ρεύμα	κόρου
.....				66
6.	Σχεδίαση και κατασκευή προσομοίωσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας			
.....				68
6.1.	Σχεδίαση		ηλεκτρικού	κυκλώματος
.....				69
6.1.1.	Γεννήτρια		ρεύματος	
.....				69

6.1.2.	Κύκλωμα	φωτοβολταϊκού	πλαisiού
.....	70		
6.1.3.	Τροφοδοτικό	συστήματος	ψύξης
.....	71		
6.2.	Εξομοίωση	στο	LiveWire
.....	72		
6.3.	Υπολογισμός ψήκτρας		74
6.4.	Συναρμολόγηση προσομοίωσης		76
6.4.1.	Σχεδίαση και αποτύπωση	κυκλωμάτων	
.....	76		
6.4.2.	Συνδεσμολογία προσομοίωσης		81
7.	Πειραματικό	μέρος	– μετρήσεις
.....	83		
Βιβλιογραφία			87

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1 :	Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκής γεννήτριας	27
.....		
Σχήμα 4.1 :	Το φαινόμενο της διάχυσης	37
Σχήμα 4.2 :	Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας επαφής P-N διόδου	42
Σχήμα 5.1 :	1 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	49
Σχήμα 5.2 :	2 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	50
Σχήμα 5.3 :	3 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	52
Σχήμα 5.4 :	4 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	54
Σχήμα 5.5 :	5 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	55
Σχήμα 5.6 :	6 ^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα	57
Σχήμα 6.1 :	Το κύκλωμα της γεννήτριας ρεύματος	70
Σχήμα 6.2 :	Το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαisiού	71
Σχήμα 6.3 :	Το κύκλωμα τροφοδοσίας του συστήματος ψύξης	72

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 : Ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Α.Π.Ε	19
Πίνακας 3.2 : Απαιτούμενα στρέμματα ανά μορφή ενέργειας	20
Πίνακας 5.1 : Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της R_s	64
Πίνακας 6.1 : Υλικά γεννήτριας ρεύματος	70
Πίνακας 6.2 : Υλικά φωτοβολταϊκού πλαισίου	71
Πίνακας 6.3 : Υλικά τροφοδοτικού συστήματος ψύξης	72
Πίνακας 6.4 : Υλικά θήκης	82
Πίνακας 7.1 : Μετρήσεις για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 1000 W/m^2	84

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΝΕΡΓΕΙΑ”

Ο άνθρωπος συνδέθηκε με την έννοια ενέργεια από την πρώτη στιγμή της ύπαρξής του πάνω στη Γη. Αρχικά όπως και οι άλλοι ζωντανοί οργανισμοί μέσω της τροφής ο πρωτόγονος άνθρωπος συσώρευε στις κατάλληλες αποθήκες του σώματός του ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούσε για να κινηθεί, να κυνηγήσει, να αντιμετωπίσει τους εχθρούς του.

Πολύ αργότερα άρχισε να χρησιμοποιεί την ενέργεια άλλων ζωντανών οργανισμών (μυϊκή δύναμη των ζώων) αυξάνοντας σημαντικά τις δυνατότητές του και ενισχύοντας τη θέση του στο όχι και τόσο φιλικό περιβάλλον στο οποίο έπρεπε να επιβιώσει.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας που υπήρχε άφθονη και σε διάφορες μορφές στο φυσικό περιβάλλον (ενέργεια καυσίμων, αιολική, υδραυλική ενέργεια) ήταν το όχημα που μαζί με την ανάπτυξη των ιδιαίτερων ψυχοπνευματικών του ικανοτήτων, του έδωσαν τη δυνατότητα να ακολουθήσει την μεγαλειώδη εξελικτική του πορεία φτάνοντας στο σημερινό τεχνολογικό θαύμα. Τα ίδια αυτά στοιχεία θα καθορίσουν την πορεία και την τεχνολογική εξέλιξή του και στο μέλλον, μόνο που οι πρώτες ανησυχίες τόσο για τις επιπτώσεις στον ίδιο και στο περιβάλλον, όσο και για την τελική κατάληξη αυτής της πορείας, πολλαπλασιάζονται και ενισχύονται με ανάλογους ρυθμούς.

Ποιοι όμως είναι οι κυριότεροι σταθμοί της πορείας του ανθρώπου στη προσπάθεια του να εκμεταλλευτεί τις διάφορες πηγές ενέργειας;

- Στο τέλος της λίθινης εποχής αρχίζει η χρησιμοποίηση της μυϊκής δύναμης των ζώων στις μεταφορές και την καλλιέργεια της γης.

- Το 3000 πχ αρχίζει η λειτουργία του μεταλλείου ασημιού στο Θορικό Λαυρίου.

- Το 2500 πχ κατασκευάζονται στην Αρκαδία μεταλλευτικοί κλίβανοι, αρχίζει η επεξεργασία μετάλλων.

- Το 1500 πχ κατασκευάζονται στη Θήρα Ιστιοφόρα πλοία

- Το 1400 πχ κατασκευάζονται αρδευτικά έργα στην Κωπαΐδα

- Το 580 πχ κατασκευάζεται η πρώτη πρέσα λαδιού

- Το 350 πχ κατασκευάζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι και λίγο αργότερα οι πρώτοι υδραυλικοί τροχοί

Γύρω στο 100 πχ Ο΄Ηρων ο Αλεξανδρεύς κατασκευάζει την πρώτη θερμική μηχανή.

- Στα μέσα του 18^{ου} 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.**

1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

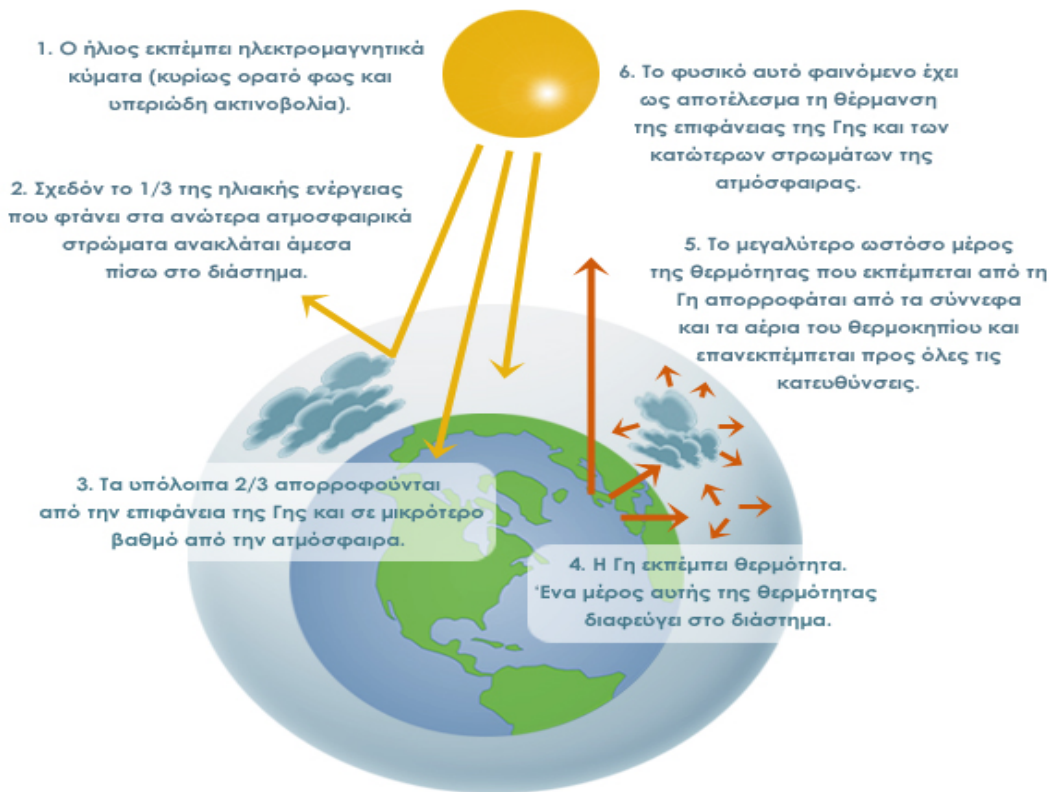
Όπως είπαμε, το ενεργειακό πρόβλημα στις μέρες μας εμφανίζεται οξύτερο από ποτέ. Τι όμως είναι το ενεργειακό πρόβλημα; Μπορούμε να πούμε ότι η ουσία του ενεργειακού προβλήματος βρίσκεται στην συσχέτιση των ενεργειακών αποθεμάτων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται.

Είναι αρκετά εύκολο να κατανοήσουμε τι σημαίνει αύξηση της ενέργειας που καταναλώνεται 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 κτιρίου (πχ νοσοκομείου με κεντρική εγκατάσταση κλιματισμού, δίκτυο υπολογιστών, ιατρικό εξοπλισμό) και τις συγκρίνουμε με ένα ανάλογο κτίριο που κατασκευάστηκε πριν μερικές δεκαετίες.

Υπολογίζεται ότι ο πρωτόγονος άνθρωπος χρησιμοποιούσε για τις ανάγκες του ενέργεια ίση με 6,3 MJ την ημέρα που έπαιρνε μέσω της τροφής του. Ο σημερινός άνθρωπος χρησιμοποιεί περίπου 1000 MJ, δηλαδή 150 φορές περισσότερη

1.2 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Από τα στοιχεία που αναφέραμε παραπάνω ότι συνθέτουν το περιβαλλοντικό πρόβλημα ασφαλώς το σημαντικότερο είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Εικόνα 1.1). Το φαινόμενο αυτό συνίσταται στο εγκλωβισμό της θερμικής ενέργειας στην γήινη ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής θερμοκρασίας του πλανήτη με ανυπολόγιστες συνέπειες για τους ζωντανούς οργανισμούς. Οι συνέπειες αυτές μπορεί να είναι **άμεσες** (εμφάνιση ακραίων θερμοκρασιών, ερημοποίηση «πράσινων» περιοχών) ή **μελλοντικές** (συνολική αλλαγή του κλίματος, λιώσιμο των πάγων, άνοδος του επιπέδου της θάλασσας, καταποντισμός παράκτιων περιοχών)(Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.1 : Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι ότι:

- Έχει οικουμενικό χαρακτήρα, δηλαδή, παρά το ότι δημιουργείται από ρύπους που παράγονται κυρίως σε συγκεκριμένες περιοχές (αστικά κέντρα, βιομηχανικές ζώνες) , οι επιπτώσεις του διαχέονται σε κάθε γωνία του πλανήτη, (π.χ. λιώσιμο των πάγων στους πόλους).
- Τα αποτελέσματά του εμφανίζονται με χρονική υστέρηση, επομένως σε κάποιο βαθμό είναι δύσκολο να γίνει πρόβλεψη για το πραγματικό μέγεθος του προβλήματος.
- Η ανάπτυξη του φαινομένου είναι ανάλογη της βιομηχανικής ανάπτυξης και της αύξησης του βιοτικού επιπέδου, και για το λόγο αυτό συνεχής τις τελευταίες δεκαετίες. Με τα σημερινά δεδομένα η ανάσχεση του φαινομένου μπορεί να πραγματοποιηθεί περισσότερο με τη χρήση αντιρρυπαντικών τεχνολογιών (φίλτρα, καλύτερης ποιότητας κινητήρες), παρά με την αναδιάρθρωση του συνδυασμού των χρησιμοποιούμενων πηγών ενέργειας.

Το αέριο που ευθύνεται κυρίως για τη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).



Εικόνα 1.2 : Οι συνέπειες του φαινομένου του θερμοκηπίου

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΟΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΗΜΕΡΑ”

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (Ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλασσίων ρευμάτων. Απορροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

2.1 Ο γαιάνθρακας (κάρβουνο)

Ο Άνθρακας (γαιάνθρακας, κάρβουνο - coal) αποτελεί οργανικό ορυκτό με κύρια συστατικά τον άνθρακα και το υδρογόνο. Άλλα συστατικά που βρίσκονται στον άνθρακα, σε μικρές σχετικά ποσότητες, είναι το οξυγόνο, το θείο, το άζωτο, καθώς και ορισμένες ανόργανες ουσίες. Ο όρος άνθρακας είναι γενικός και χρησιμοποιείται για υλικά με πολύ διαφορετικές ιδιότητες.

Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που προσπαθούν να προσομοιάσουν το πολύπλοκο «μόριο» του άνθρακα. Είναι προφανές ότι αφού ακόμα και άνθρακες του ίδιου τύπου διαφέρουν σημαντικά, τα μοντέλα αυτά έχουν μόνο θεωρητική σημασία. Η μοριακή δομή είναι αρκετά περίπλοκη, αλλά από τη στοιχειακή ανάλυση μπορούν να γραφούν εμπειρικοί τύποι, όπως $C_{137}H_{97}O_9NS$ για τον πισσούχο άνθρακα και $C_{240}H_{90}O_4NS$ για τον καλής ποιότητας ανθρακίτη.

Ο άνθρακας έχει χρησιμοποιηθεί σε οικιακές χρήσεις (θέρμανση, μαγείρεμα) από τους Κινέζους τουλάχιστον από το 500 π.Χ. Υπάρχουν ενδείξεις επίσης ότι οι Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν άνθρακα στην Γαλατία και τη Βρετανία. Στην Αγγλία ήταν διαδεδομένη η χρήση του από τον 12^ο αιώνα, ενώ το 1275 μ.Χ. αναφέρεται η πρώτη νομοθεσία για έλεγχο της χρήσης του λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την καύση του

2.2 Το πετρέλαιο

Ήταν γνωστό από την αρχαιότητα, στους Εβραίους και τους Αιγυπτίους. Στη Δύση, γινόταν περιορισμένη χρήση του σε φωτισμό και την ιατρική, μέχρι το τέλος του 15^{ου} αιώνα, οπότε άρχισε η βιομηχανική του εκμετάλλευση. Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20^{ου}, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πετρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) και τη διαπίστωση ορατών πλέον επιπτώσεων στο περιβάλλον μας, συνειδητοποιούμε την ανάγκη αλλαγής του τρόπου ζωής μας και αναζήτησης λύσεων από το χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, αποκτά ιδιαίτερο νόημα η εφαρμογή αυστηρότερης πολιτικής στον τομέα της ορθολογικής χρήσης και εξοικονόμησης ενέργειας.

Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυσσόμενες χώρες και το 55%, στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες, το ποσοστό χρήσης πετρελαίου, ως ενεργειακής πηγής, συνεχίζει να αυξάνει, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες παρατηρείται τάση μείωσής του, με σταδιακή διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του δίδει, ως άμεσα προϊόντα, το CO₂, τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν πια μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

2.3 Η πυρηνική ενέργεια

Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Η Γαλλία είναι από τις χώρες που έδωσαν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη της, χρησιμοποιώντας, κατά την περίοδο της δεκαετίας του 70, το μη πειστικό πια επιχείρημα της παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς των πυρηνικών όπλων ή της διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για τα ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά, εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβάνιας

(ΗΠΑ), τον Απρίλιο του 1979 και εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Ρωσίας, τον Απρίλιο του 1986, τρομοκράτησαν όλο τον κόσμο, ο οποίος συνειδητοποίησε με φρίκη την ανικανότητά του να αντιμετωπίσει ένα ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα τον απειλεί με αφανισμό.

Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού βάσης, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής ισχύος χωρίς δυνατότητα κάλυψης των διακυμάνσεων ζήτησης. Καλύπτει το 6,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 17% της παγκοσμίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε πυρηνικά εργοστάσια ανέρχεται σε ~375 GW (2011). Στην Ευρώπη ξεπερνά τα 195 GW, με τη Γαλλία στα 63,5 GW. Τι περιορισμένο των κοιτασμάτων του βασικού υλικού (Ουράνιο 235), τα πυρηνικά απόβλητα και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του κόσμου μας, είτε από τη υποτιθέμενη υπό έλεγχο πυρηνική αντίδραση, είτε από την ανεξέλεγκτη διασπορά των πυρηνικών όπλων, βάζουν φρένο στη χρήση της.

Όλες οι μεγάλης πυκνότητας ισχύος συμβατικές πηγές ενέργειας, εκτός από την αδιαμφισβήτητη προσφορά τους στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης και τη μεγάλη συμβολή τους στη βελτίωση της διαβίωσης του ανθρώπου, συνδέονται δυστυχώς με πολύ σοβαρές και εμφανώς αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Έτσι, ενισχύεται διεθνώς η άποψη για μερική, σε πρώτη φάση, αντικατάστασή τους με άλλες πηγές ενέργειας, που να μη ρυπαίνουν και να ενσωματώνονται φιλικά στο περιβάλλον, τις λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

2.4 Φυσικό Αέριο

Εξ ορισμού το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων (και μη καύσιμων αερίων) σε αέρια κατάσταση, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Συνήθως βρίσκεται σε ξεχωριστούς ταμιευτήρες στο φλοιό της γης ή εν διαλύσει στο πετρέλαιο. Η σύσταση του φυσικού αερίου στην έξοδο της γεώτρησης ποικίλλει σημαντικά τόσο ως προς τα συστατικά, όσο και ως προς τη συγκέντρωση αυτών των συστατικών και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε ταμιευτήρα.

Το φυσικό αέριο ήταν γνωστό από την αρχαιότητα και αρκετοί αρχαίοι ναοί, κυρίως στη Μέση Ανατολή, κτίστηκαν κοντά σε εκροές φυσικού αερίου. Ακόμη και για τους Δελφούς έχει διατυπωθεί η θεωρία ότι από την Κασταλία πηγή αναδυόταν

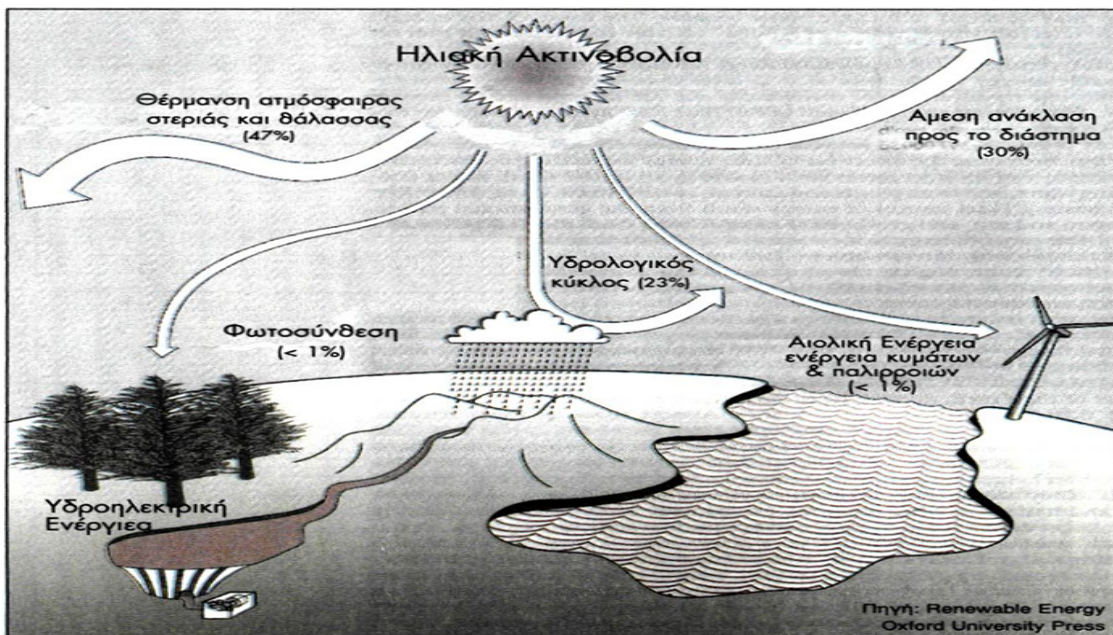
μεθάνιο. Είναι πιθανόν ότι οι αναφορές του Πλούταρχου (100-125 μΧ) στις «αιώνιες φωτιές» στην περιοχή του σύγχρονου Ιράκ να αφορούν στη φυσική διαρροή από το έδαφος και καύση φυσικού αερίου. Αναφέρεται ακόμη ότι ο Ιούλιος Καίσαρας είδε από κοντά την «καιόμενη πηγή» κοντά στη Γκρενόμπλ της Γαλλίας. Υποτυπώδεις γεωτρήσεις φυσικού αερίου είχαν ανορυχθεί στην Ιαπωνία πριν από το 615 μ.Χ., ενώ το 900 μ.Χ. οι Κινέζοι μετέφεραν φυσικό αέριο με σωλήνες από μπαμπού σε μικρές αποστάσεις για να το χρησιμοποιήσουν στην εξάτμιση αλατούχου νερού. Πρακτικά, η σύγχρονη χρήση του φυσικού αερίου ξεκίνησε το 1821 στη Fredonia της Νέας Υόρκης, όπου ανοίχθηκε η πρώτη γεώτρηση φυσικού αερίου, το οποίο χρησιμοποιούνταν για το φωτισμό παρακείμενων οικιών. Η πρώτη βιομηχανική χρήση του φυσικού αερίου έγινε σε χαλυβουργεία και υαλουργεία στο Πίτσμπουργκ των Η.Π.Α. το 1883. Το 1885 ο Robert Bunsen εφηύρε ένα σύστημα όπου αναμιγνυόταν φυσικό αέριο και αέρας. Ο «λύχνος Bunsen» κατέδειξε πως μπορεί να παραχθεί αποδοτικά θερμότητα από το φυσικό αέριο.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”

Συχνά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Εικόνα 3.1) βρίσκονται με τις ονομασίες εναλλακτικές πηγές ενέργειας (alternative energy sources), από το γεγονός ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές ενέργειας), ήπιες (benign), επειδή έχουν σχετικά μικρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ή μικρότερες από τις επιπτώσεις των συμβατικών πηγών ενέργειας, και πρόσθετες (additive), επειδή με το τωρινό επίπεδο τεχνολογίας μόνο συμπληρωματικά μπορούν να συνυπάρχουν

με τις συμβατικές μορφές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η βασική έννοια της ανανεωσιμότητας των ΑΠΕ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την έννοια της αειφόρου ανάπτυξης και την προσπάθεια της μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Όλο και περισσότερο οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στις τρεις κύριες συνιστώσες της αειφόρου ανάπτυξης: στην οικονομία, το περιβάλλον και στην κοινωνική ευημερία. Θα πρέπει, βεβαίως, να τονιστεί ότι καμία μορφή ενέργειας, όσο ανανεώσιμη και «καθαρή» και αν είναι, δεν έχει μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.



Εικόνα 3.1 : Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας. Η παγκόσμια κατανάλωση σε ενέργεια ανέρχεται σε 13 TW (Boyle, 1995).

Πολλά είναι τα τεχνικά προβλήματα που θα πρέπει να λυθούν για να μπορέσουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να καλύψουν σημαντικό μέρος των αναγκών μας. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα είναι η αποθήκευσή τους, είτε όπως έχουν ή με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν το 8% της ενέργειας που καταναλώνει η Αμερική, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση το αντίστοιχο ποσοστό ανέρχεται στο 6%.

Πίνακας 3.1 : Ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Α.Π.Ε.

ΑΠΕ	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ηλιακή ενέργεια	<ul style="list-style-type: none"> - Τεράστιο δυναμικό - Πάντοτε παρούσα - Δεν ρυπαίνει 	<ul style="list-style-type: none"> - Μικρή απόδοση - Υψηλό αρχικό κόστος - Πρόβλημα αποθήκευσης - Υψηλό κόστος στον

		καταναλωτή - Διαφέρει με την ώρα και τη θέση
Υδροενέργεια	- Υψηλή απόδοση (>80%) - Ελάχιστη απορριπτόμενη θερμότητα - Το μικρότερο κόστος ανά kWh - Ρυθμίζεται εύκολα - Δυνατότητα μερικής αποθήκευσης	- Αποθέσεις/ ιζήματα - Αποτυχία φραγμάτων - Μεταβολή τοπικού κλίματος - Ορισμένα είδη ψαριών σε κίνδυνο
Αιολική	- Ευέλικτη, ακόμη και σε μεμονωμένα σπίτια - Ιδιαίτερη συνεισφορά σε «ανεμοδαρμένες περιοχές»	- Μεταβλητή λειτουργία - Μικρή απόδοση (30%) - Οπτική ρύπανση
Γεωθερμική	- Υψηλή απόδοση - Όχι τόσο μεγάλο πάγιο κόστος - Συνεχής παραγωγή ενέργειας	- Μερικώς ανανεώσιμη - Τοπικός πόρος – τοπική ανάπτυξη - Κάποιες μορφές ρύπανσης
Θερμική ενέργεια ωκεανών	- Μεγάλο δυναμικό - Αξιοποίηση μεγάλης κλίμακας	- Τεχνολογικά προβλήματα - Τεράστιο κόστος - Περιβαλλοντολογικό κόστος
Παλιρροϊκή	- Σταθερή πηγή - Μπορούν να αξιοποιηθούν πολλά συστήματα εκβολών ποταμών	- Κύκλος μικρού καθήκοντος - Αλλαγή της ακτογραμμής - Υψηλό κόστος
Καύση βιομάζας	- Φυσικό προϊόν - Και για συμπαραγωγή και για μεμονωμένη χρήση	- Σωματιδιακή ρύπανση - Περιορισμός στη μεταφορά - Μεγάλη κλίμακα

Σήμερα, βασικός περιορισμός για την αξιοποίηση και περαιτέρω διεύρυνση όλων σχεδόν των ΑΠΕ αποτελεί το υψηλό αρχικό κόστος, το οποίο σχετίζεται ασφαλώς με το επίπεδο της τεχνολογίας. Βεβαίως, τα τελευταία 10-15 χρόνια το κόστος της ανανεώσιμης ενέργειας μειώθηκε σημαντικά και πολλές ανανεώσιμες τεχνολογίες είναι ανταγωνιστικές ως προς τα ορυκτά καύσιμα, ιδιαίτερα όταν ληφθούν υπόψη και ορισμένες «κρυφές» παράμετροι (περιβάλλον, ασφάλεια, ενεργειακή απεξάρτηση κ.ά.). Οι παράμετροι αυτοί τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να εκτιμηθούν και να ποσοτικοποιηθούν επακριβώς. Για παράδειγμα, πως μπορεί να αποτιμηθεί η συμβολή των συμβατικών καυσίμων στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή;

Σήμερα, δεν υπάρχει ΑΠΕ που να μπορεί να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες σε μεγάλη κλίμακα, με εξαίρεση βέβαια την υδροηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, σύνηθες χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η δέσμευση μεγάλων εκτάσεων. Στον Πίνακα 3.2. παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αναγκαίες εκτάσεις για την παραγωγή ενέργειας από ορισμένες ΑΠΕ.

Πίνακας 3.2. Απαιτούμενα στρέμματα ανά μορφή ενέργειας

Μορφή ενέργειας	Απαιτούμενα στρέμματα ανά έτος και άτομο
Βιομάζα	70
Υδροισχύς	23
Αιολική	4
Φωτοβολταϊκά	1

3.1. Υδατόπτωση

Αποτελεί έναν από τους πιο ουσιαστικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος, οικολογικά καθαρής, ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Εκμεταλλευόμαστε την ύπαρξη φυσικών λεκανών συλλογής ομβρίων υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, με κατάλληλη εδαφική



Εικόνα 3.2 Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του Λάδωνα, στην Αρκαδία

διαμόρφωση, κατασκευάζοντας φράγματα. Η υδατόπτωση κινεί υδροστρόβιλους, που

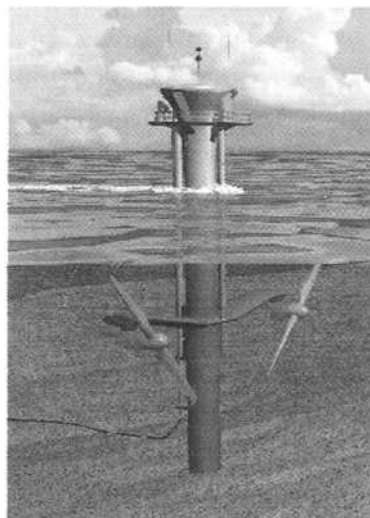
με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος, παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια, μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω της κατάκλισης με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

3.2. Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλάσσιων ρευμάτων

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλασσίων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στη Βρετάνη της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW. Εντυπωσιακό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμό είναι η διάταξη με το όνομα Pelamis (είδος θαλάσσιου φιδιού). Η διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 3.3, αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με δυνατότητα αρθρωτής κίνησης μεταξύ τους, σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα άνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους. Έχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 750 kW. Σε προχωρημένο πειραματικό στάδιο βρίσκεται επίσης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες, όπως φαίνεται στη σχηματική παράσταση της εικόνας 3.4.



Εικόνα 3.3 : Το Pelamis σε λειτουργία. Το πρωτότυπο είναι τοποθετημένο στο European Marine Energy Center, στο Orkney της Σκωτίας



Εικόνα 3.4 : Σχηματική παράσταση υποθαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας

Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλάσσιων ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής ταχύτητας των ανέμων. Η εφαρμογή τους, πάντως, πρόκειται να είναι περιορισμένη, σε θέσεις που υπάρχουν ισχυρά θαλάσσια ρεύματα (Εικόνα 3.4.). Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα που μελετάται, αφορά στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων σε ειδικές κατασκευές, στις οποίες ενσωματώνεται ανεμογεννήτρια και μέρος των οποίων είναι βυθισμένο στη θάλασσα. Κατά τον κυμάτισμά, ο εισερχόμενος όγκος νερού συμπιέζει τον περιεχόμενο αέρα, ο οποίος, ρέοντας μέσω της κεντρικής χοάνης, θέτει σε περιστροφή τη φτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η διάταξη των βαλβίδων εισόδου-εξόδου του αέρα, είναι τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά, ανεξάρτητα από τη φάση συμπίεσης ή εκτόνωσης του εσωτερικού αέρα, κατά τον κυμάτισμά.

3.3. Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα εννοούμε όλα τα υλικά (στερεά, υγρά ή αέρια) που περιέχουν άνθρακα και τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια (βιοενέργεια). Τα υλικά αυτά μπορούν απευθείας να καούν για παραγωγή θερμότητας ή ισχύος ή να μετατραπούν σε βιοκαύσιμα (π.χ. ξυλάνθρακας, βιοντίζελ). Η βιομάζα μπορεί να προέρχεται είτε άμεσα από πρωτογενή πηγή (φυτά), είτε έμμεσα από τα αστικά, βιομηχανικά ή αγροτικά απόβλητα. Έτσι οι επιστήμονες θεωρούν ως βιομάζα την ξυλεία, τα υπολείμματα της ξυλείας (κλαδιά, πριονίδια κτλ.) και της επεξεργασίας φυτικών καρπών (ελαιών, καφέ, καλαμποκιού, άχυρου κτλ.), τα λύματα των πόλεων, τα απορρίμματα και τα στερεά απόβλητα των κτηνοτροφικών μονάδων. Ο κλασικός ορισμός της βιομάζας είναι: η πρόσφατη οργανική ύλη που προέρχεται από τα φυτά ως αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής μετατροπής. Η ξυλεία και τα υπολείμματα δασοπονικών και αγροτικών δραστηριοτήτων αποτελούν το μεγαλύτερο και καλύτερα αξιοποιήσιμο μέρος της βιομάζας. Τα δάση και οι θαμνώνες αποτελούν το 92% της παραγόμενης βιομάζας. Η παραγόμενη ετησίως βιομάζα ανέρχεται περίπου σε $1,4 \times 10^{10}$ ΤΙΠ.

Γενικά, μόνο το 5% της συνολικής βιομάζας ενός φυτού κατάλληλο για τροφή. Υπάρχουν οι εξής εναλλακτικές λύσεις για το υπόλοιπο 95%: η καύση του για

παραγωγή θερμότητας και η μετατροπή του σε στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα ή άλλα χρήσιμα υλικά.

Δεν υπάρχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για τη συμμετοχή της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και συχνά η βιομάζα δεν εμφανίζεται στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας μιας χώρας. Είναι γεγονός πάντως αδιαμφισβήτητο ότι σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες η βιομάζα καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών (π.χ. Νεπάλ, Αιθιοπία, Κένυα). Ακόμη και στις ανεπτυγμένες χώρες, η κατανάλωση βιοενέργειας δεν είναι αμελητέα και υπερβαίνει στο 3% της ενεργειακής κατανάλωσης. Ιδιαίτερα σε χώρες όπως η Σουηδία, η Αυστρία και οι Η.Π.Α., που χρησιμοποιούν εκτεταμένα την ξυλεία, το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερο.

3.4. Γεωθερμική ενέργεια

Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, η θέρμανση των γεωθερμικών ρευστών αποδίδεται κυρίως, στην εκλυόμενη ενέργεια κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων στο στερεό φλοιό της γης. Όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλή, η ενέργειά τους χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μονάδων, ιχθυοκαλλιεργειών, κ.α., ενώ στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία των ατμών είναι υψηλή (>150 3C), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανερχόταν παγκοσμίως σε ~11 GW (2010). Στη χώρα μας, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως σε θερμοκηπιακές μονάδες, σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του Βορειοανατολικού και Κεντρικού Αιγαίου.

3.5. Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια άρχισε να χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα, αν και ώθηση στη χρήση της έδωσε η πετρελαϊκή κρίση του 1973. Τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια αποτελεί μία «ώριμη» ενεργειακή πηγή, με χαμηλό σχετικά κόστος, η οποία μπορεί να παράσχει

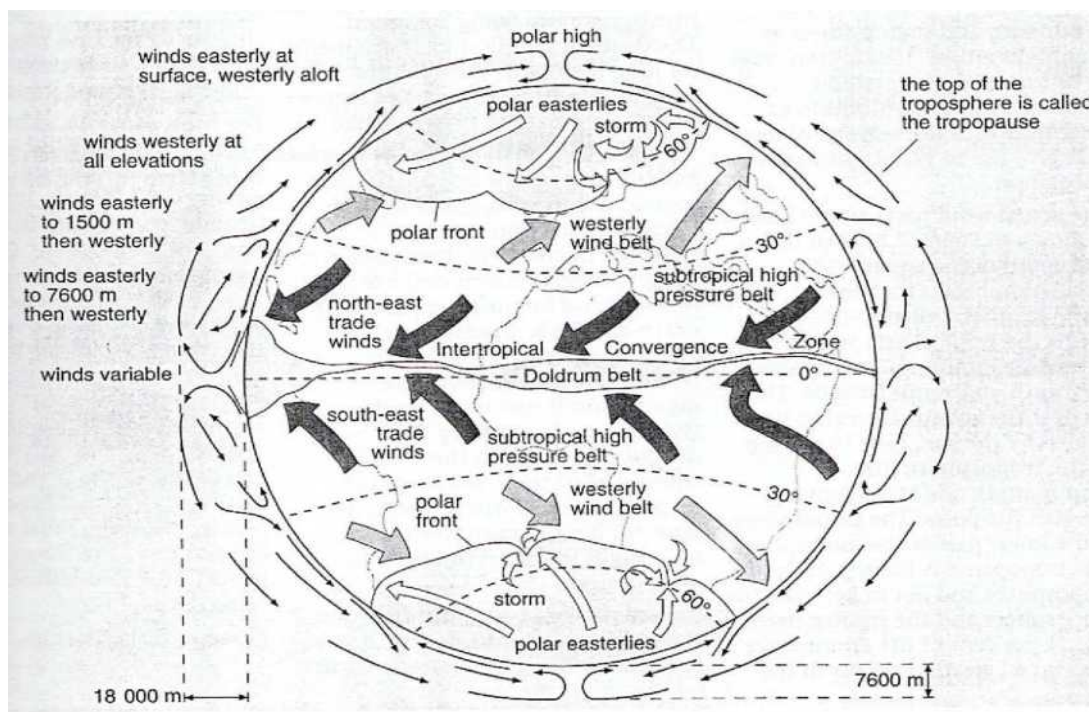
σημαντικές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Την αιολική ενέργεια όμως την αξιοποιούμε εδώ και χιλιάδες χρόνια στα ιστιοφόρα πλοία, για άλεση δημητριακών και για πολλές εφαρμογές μηχανικής ενέργειας. Μόνο στο Άμστερνταμ το 1700 υπήρχαν 700 μεγάλοι ανεμόμυλοι που κινούσαν τη βιομηχανία της Ολλανδίας, το τέλος του 19ου αιώνα βρήκε την Ευρώπη με 100.000 αιολικά συστήματα. Σήμερα υπάρχουν περισσότεροι από ένα εκατομμύριο ανεμόμυλοι για την άντληση νερού, αλλά και για φόρτιση μπαταριών. Οι σύγχρονοι «ανεμόμυλοι» που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται ανεμογεννήτριες ή ανεμοκινητήρες (wind generators, wind turbines) ή καλύτερα συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας (wind energy conversion systems). Το κόστος των ανεμογεννητριών μειώνεται συνεχώς από το 1980.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών συστημάτων σε όλο τον κόσμο στις αρχές του 2006 έφτανε τα 513.700 MW εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή 10 φορές περισσότερο ισχύ από ότι πριν από 10 χρόνια! Τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα είναι εγκατεστημένα στην Γερμανία, την Δανία (η οποία καλύπτει περίπου το 20% των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο!), την Ισπανία και στην Καλιφόρνια. Το 70% της αιολικής ηλεκτροπαραγωγής γίνεται σήμερα στην Ε.Ε. και το 18% στην Βόρεια Αμερική. Εκτιμάται για την Ελλάδα ότι η αιολική ενέργεια μπορεί να καλύψει ποσοστό 15% των αναγκών της χώρας μας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο τέλος του 2005 υπήρχαν εγκατεστημένα περισσότερα από 570 MW σε αιολικά πάρκα, κυρίως στα νησιά του Αιγαίου (Σύρος, Άνδρος, Κάρπαθος, Κύθνος, Σαμοθράκη, Χίος κ.ά.), την Εύβοια, τη Θράκη και την Κρήτη.

Ο άνεμος είναι μια πηγή ενέργειας που προέρχεται βασικά από τις διαφοροποιήσεις στην ατμοσφαιρική πίεση, οι οποίες από τη μεριά της οφείλονται στην άνιση θέρμανση της επιφάνειας της γης και της θάλασσας από τον ήλιο. Επομένως, η αιολική ενέργεια είναι έμμεση μορφή της ηλιακής ενέργειας και περίπου 1-2% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετατρέπεται σε άνεμο. Καθώς ο αέρας θερμαίνεται στις τροπικές ζώνες αρχικά ανυψώνεται στην ατμόσφαιρα και κατόπιν οδεύει χοντρικά προς τους πόλους. Η κίνηση αυτή της ατμόσφαιρας επηρεάζεται σημαντικά από την περιστροφή της γης, η επίδραση της οποίας είναι μεγαλύτερο στον ισημερινό και μηδενική στους πόλους, από την αναλογία της επιφάνειας της ξηράς προς την αντίστοιχη της θάλασσας, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της ξηράς (βουνά, πεδιάδες) και από εποχές του

χρόνου. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω δημιουργούνται συγκεκριμένα «πρότυπα» της κίνησης των ανέμων στη γη που αποτυπώνονται στην εικόνα 3.5.

Άνεμοι δημιουργούνται και σε τοπική κλίμακα με διάφορους μηχανισμούς, όπως η δημιουργία θαλάσσιας ή απόγειας αύρας και τα καθοδικά ρεύματα προς τις κοιλάδες από τα βουνά. Οι ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν με το ανάγλυφο μιας περιοχής και ποικίλλουν σημαντικά με την εποχή και την ημέρα. Για να θεωρηθεί μια περιοχή κατάλληλη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (μετρούμενη 10 m από το έδαφος της γης) να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s.



Εικόνα 3.5 : Η ροή των ανέμων στον πλανήτη

3.6. Ηλιακή ενέργεια

Βρισκόμαστε στη γειτονιά ενός αντιδραστήρα σύντηξης, στον Ήλιο μας, όπου σε μια κόλαση φωτιάς, πυρήνες υδρογόνου μετατρέπονται σε πυρήνες ηλίου. Εξαιτίας της παραπάνω πυρηνικής αντίδρασης ο ήλιος μας χάνει 4,5 εκατομμύρια τόνους από τη μάζα του σε κάθε δευτερόλεπτο(!) και τη μετατέπει σε ισοδύναμη ενέργεια, σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας μάζας – ενέργειας της Θεωρίας της Σχετικότητας.

Είναι γνωστό ότι ο ήλιος είναι ένας τεράστιος πυρηνικός αντιδραστήρας. Η θερμοκρασία των 15.000.000 °C που επικρατεί στο εσωτερικό του δημιουργεί τις

κατάλληλες συνθήκες για το φαινόμενο της πυρηνικής σύντηξης. Αποτέλεσμα της αυξημένης (λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών) κινητικότητας των ηλεκτρονίων μεταξύ των ενεργειακών στοιβάδων είναι η εκπομπή τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών. Η ισχύς που ακτινοβολεί ο Ήλιος προς όλες τις κατευθύνσεις είναι ίση με 4×10^{26} W. Φυσικά η περισσότερη διασκορπίζεται στο αχανές σύμπαν και μόνο ένα πολύ μικρό μέρος φτάνει στη Γη. Συγκεκριμένα, σε κάθε τετραγωνικό μέτρο του πλανήτη μας προσπίπτει ισχύς μόνο 1kW. Παρόλο το μικρό μέγεθος της ισχύος αυτής, η ενέργεια που δέχεται η Γη σε όλη της την επιφάνεια είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που ξοδεύει όλη η ανθρωπότητα για τις ανάγκες της με οποιαδήποτε μορφή. Αν τη συγκρίνουμε με τα συνολικά αποθέματα των καύσιμων απολιθωμάτων της Γης, παρατηρούμε ότι αυτά ισοδυναμούν με την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στη Γη σε διάστημα 15 ημερών.

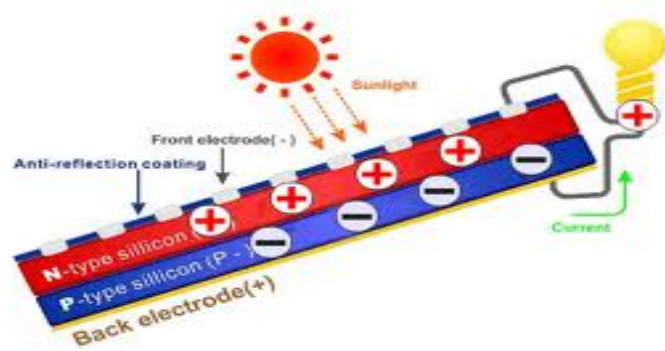
Ένα τόσο μεγάλο ποσό ενέργειας είναι κρίμα να πάει χαμένο, για δύο βασικούς λόγους:

- Παρέχεται δωρεάν
- Δεν μολύνει το περιβάλλον

3.6.1. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας

Μέχρι σήμερα εκμεταλλευόμαστε κατά ένα πολύ μικρό μέρος την ηλιακή ενέργεια μόνο ως θερμότητα. Χαρακτηριστική συσκευή είναι αυτή του ηλιακού θερμοσίφωνα. Δεν έχουμε, όμως, ανάγκη μόνο από ζεστό νερό. Το ζεστό νερό δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ενεργειακές ανάγκες μας. Χρειαζόμαστε την ηλεκτρική ενέργεια όσο τίποτε άλλο. Για τον λόγο αυτό η επιστήμη αναζήτησε μεθόδους μετατροπής της ηλιακής ενέργειας κατευθείαν σε ηλεκτρική. Ήδη από τον προηγούμενο αιώνα, περίπου από το 1840, διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι δυνατό με τη βοήθεια των ημιαγωγών.

Το φαινόμενο της μετατροπής αυτής ονομάστηκε φωτοβολταϊκό και οι αντίστοιχες συσκευές φωτοβολταϊκές γεννήτριες (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 : Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκής γεννήτριας

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ”

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (photovoltaic cell) είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου η και το άλλο τύπου ρ. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου.

Όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται προκαλείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα (φωτόρευμα), ανάλογο της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Η αναπτυσσόμενη σε ένα τυπικό ΦΒ στοιχείο, συνεχής ηλεκτρική τάση ανοικτού κυκλώματος, βρίσκεται στην περιοχή 0,5 - 0,7 V, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των 10 - 40 mA/cm², για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m².

Η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, παρ' ότι το ΦΒ φαινόμενο είχε παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα από τον Becquerel, το 1839. Το 1954 ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Πυριτίου Si, με σχηματισμό επαφής ρ-η, με διάχυση και με απόδοση 6%, από τους Fuller, Pearson και Charin. Οι αρχικές εμπορικές κατασκευές, πολύ υψηλού κόστους (1000 \$/Wp το 1956), με σχετικά μικρή απόδοση 5-10 %, παρασκευάστηκαν από κρυσταλλικά υλικά, κυρίως από κρυσταλλικό Πυρίτιο (c-Si).

Σήμερα οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων από κρυσταλλικό Πυρίτιο, βρίσκονται περί το 22%, για ΦΒ πλαίσια διαστημικών κατασκευών και στο διάστημα 14-18% για βιομηχανική-οικιακή χρήση, το δε κόστος των τελευταίων κυμαίνεται περί τα 1,5 - 2,5 €/Wp (peak Watt, η έννοια αυτή ορίζεται στην § 3.4.3), για εγκαταστάσεις μικρών συστημάτων, μεγέθους μέχρι μερικά kWp. Στις εγκαταστάσεις σχετικά μεγάλης ισχύος αιχμής, το κόστος αγοράς ΦΒ πλαισίων, ανά W, μειώνεται σε συνάρτηση με το μέγεθος του συστήματος. Σε μεγάλα συστήματα, άνω του MWp, το κόστος αυτό μειώνεται σχεδόν στο ήμισυ του αντίστοιχου των εγκαταστάσεων μικρής ισχύος.

Κατά τη δεκαετία του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων

μεθόδων παρασκευής του βασικού φωτοαγωγίμου υλικού. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένα επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού (άμορφο Πυρίτιο, a-Si). Βασίζονται στη μεταφορά και εναπόθεση του υλικού, με τη μορφή ατόμων είτε από στερεό στόχο, με κρούσεις επαρκώς επιταχυνθέντων ιόντων πλάσματος (Sputtering), είτε από λιωμένο υλικό σε συνθήκες υψηλού κενού (Εξαέρωση) είτε κατά τη διάρκεια εκκένωσης αερίου ενώσεως του αποτιθέμενου στοιχείου (Glow Discharge, GD), είτε με καταλυτική θερμική διάσπαση υδρογονούχων ενώσεων Πυριτίου (Σιλάνιο).

Οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ στοιχείου οδήγησαν, τελικά, σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα. Π.χ. με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, παρασκευάστηκαν ΦΒ στοιχεία, με εργαστηριακή απόδοση —15%. Η επιφάνειά τους εμφανίζει μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύκρυσταλλικό. Το πο- >.u-κρυσταλλικό Πυρίτιο (mc-Si), χρησιμοποιείται για την παρασκευή ΦΒ στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική απόδοση ΦΒ πλαίσιο) 12-13%, πολύ κοντά στη βιομηχανική απόδοση των ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου. Οι προηγούμενες τιμές απόδοσης είναι ενδεικτικές, εξαρτώμενες από το βασικό υλικό και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διάταξης.

Πολλά ΦΒ στοιχεία (33×36) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (*Open circuit*) 17η-22V. Το πλήθος των ΦΒ στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου - θεικού οξέως (Pb/H_2SO_4), ονομαστικής τάσης 12V.

Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται *φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module)*, αποτελεί δε τη βασική μονάδα σύνθεσης μεγαλύτερων συστημάτων, που ονομάζονται *συστοιχίες*. Χρησιμοποιείται επίσης, σπανιότερα, η ορολογία, *φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator)*, όταν αναφερόμαστε στο κύριο τμήμα του ΦΒ σταθμού, το οποίο παράγει τη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια. Η εμπρός επιφάνεια του πλαισίου προστατεύεται από γυάλινη πλάκα, ενώ η πίσω πλευρά καλύπτεται από υδρομονωτική ουσία, υψηλής αντοχής στο χρόνο.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ένα ΦΒ πλαίσιο, κάτω από δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή, όταν συνδεθεί στα

άκρα του καταναλωτής κατάλληλης αντίστασης. Η μέγιστη ισχύς σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου (πρότυπες συνθήκες), αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται *ισχύς αιχμής*. Στο εμπόριο διατίθενται ΦΒ πλαίσια κρυσταλλικού Πυριτίου σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές ΦΒ στοιχείων, μερικών W_p , χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως λ.χ. οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ, ΦΒ συστημάτων, χρησιμοποιούνται, συνήθως, ΦΒ πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως $-300 W_p$.

4.1 Η Φωτοβολταϊκή ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα

Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ συστημάτων, από 313,5 MWp το 1991, έφτασε τα 22 GWp, στο τέλος του 2009. Απ' αυτά, περίπου 16 GWp αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, -1,7 GWp στις ΗΠΑ και -2,7 GWp στην Ιαπωνία. Όπως προκύπτει από το σχήμα Ε7, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά τη χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε στο 47% το 2009. Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν εγκατασταθεί ή εγκαθίστανται: στην Ισπανία (Puerto- Ilano 47 MWp, Olmedilla 60 MWp), Γερμανία (Waldpolenz, 40 MWp, Fisterwalde, 70 MWp), Πορτογαλία (Septra 11 MWp), Ιταλία (Montalto di Castro, 84,2 MWp), Καναδάς (Sanria, 97 MWp).

Στην Ελλάδα, η εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, με στοιχεία του 2009, ανερχόταν σε 55 MWp, με στόχο τα 790 MWp στο τέλος του 2010 (Εκκρεμούν αιτήσεις αδειοδότησης για $-3700 MWp$). Στο νησιωτικό χώρο. εξελίσσεται σχέδιο εγκατάστασης 200 MWp, εκ των οποίων 52,5MWp στην Κρήτη . Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς ΦΒ σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύθνο (100 kWp), στη νήσο Γαύδο (30 kWp) καθώς και ΦΒ αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας. Αρχές του 2011, ανακοινώθηκε η δημιουργία φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στην Κοζάνη, ονομαστικής ισχύος 200 MW.

Ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελούν τα ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kWp). Μέχρι το 1991, οπότε

άρχισε η σταδιακή απόσυρση των εγκαταστάσεών του, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρουμέλη, κοντά στα Σφακιά (Νοτιοδυτική Κρήτη), ο πρώτος στην Ευρώπη (1982), πιλοτικός ΦΒ σταθμός με ισχύ 50 kW_p, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ.

Η ερευνητική δραστηριότητα διεξάγεται, κυρίως, στα Πανεπιστήμια, ΤΕΙ, ΙΤΕ, Κέντρο Ερευνών Δημόκριτος κ.ά. Στο ΤΕΙ Κρήτης λειτουργεί από το 1992 ένα εξειδικευμένο εργαστήριο, με το συμβολικό όνομα «Φωτοβολταϊκό πάρκο», που δημιουργήθηκε με κοινή πρόταση του ΤΕΙ Κρήτης και του Πανεπιστημίου Κρήτης. Περιλαμβάνει πλήρεις εργαστηριακές εγκαταστάσεις και ΦΒ πεδίο με ισχύ, περίπου, 7 kW_p και έχει ως κύριους στόχους την εκπαίδευση, την έρευνα και την ανάπτυξη στον τομέα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και των εφαρμογών της.



Εικόνα 4.1 Κατασκευή φωτοβολταϊκού πάρκου 100 kW_p στο Κουλούριο Λάρισσας

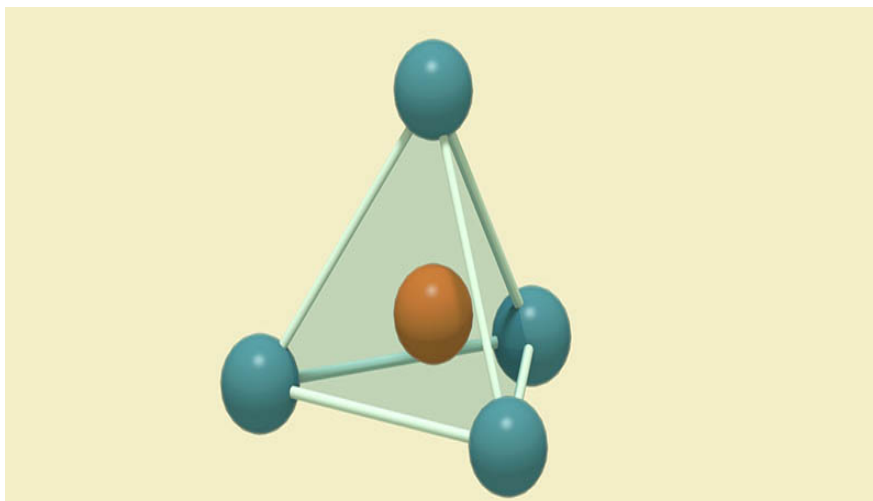
4.2 Οι ημιαγωγοί

Από τα στοιχεία τα κυριότερα ημιαγωγιμα υλικά είναι το Γερμάνιο (Ge) , το Πυρίτιο (Si) και το Σελήνιο (Se). Από αυτά το πιο σημαντικό είναι το πυρίτιο, γιατί βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση (25%) μετά το Οξυγόνο (50%). Γι αυτό θα αναφερθούμε στο πυρίτιο και θα περιγράψουμε μερικές ιδιότητες του.

Από ηλεκτρικής απόψεως τα διάφορα σώματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τους αγωγούς, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί σε κατάλληλες συνθήκες εκδηλώνουν τις ιδιότητες των άλλων δύο κατηγοριών και μπορούν να λειτουργήσουν ως αγωγοί ή ως μονωτές.

Όπως ξέρουμε, η ύλη αποτελείται από άτομα. Κάθε άτομο, με τη σειρά του, αποτελείται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, τοποθετημένα πάνω σε στοιβάδες. Από τα ηλεκτρόνια τα πιο απομακρυσμένα από τον πυρήνα, αυτά της εξωτερικής στοιβάδας, λέγονται ηλεκτρόνια σθένους και η αντίστοιχη στοιβάδα σθένους. Κάθε άτομο επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα με 8 ηλεκτρόνια.

Το άτομο του πυριτίου στην στοιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στις κορυφές μιας κανονικής τριγωνικής πυραμίδας (Εικόνα 4.1), στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ο πυρήνας, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 4.2 : Το άτομο του πυριτίου

Για να συμπληρώσει τη στοιβάδα σθένους του με 8 ηλεκτρόνια, κάθε άτομο πυριτίου συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου.

Στους αγωγούς του ηλεκτρισμού τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ευκίνητα και σ'αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγώγιμες ιδιότητες του υλικού. Αντίθετα στους μονωτές τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και εδώ οφείλονται οι μονωτικές τους ιδιότητες. Στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια σθένους συνδέονται σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα, χωρίς να έχουν την

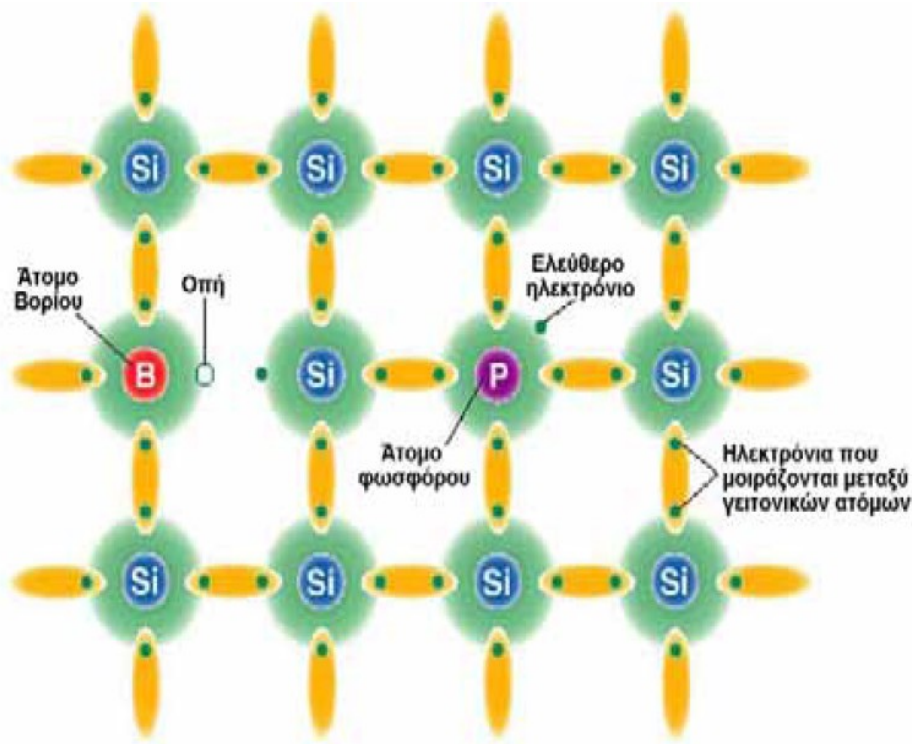
ευκινησία των ηλεκτρονίων των αγωγών. Αν όμως, ένα ηλεκτρόνιο πάρει με κάποιον τρόπο πρόσθετη ενέργεια, τότε μπορεί να σπάσει τους δεσμούς του με τον πυρήνα και να φύγει απ' αυτόν. Η θέση από την οποία φεύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται οπή. Την πρόσθετη ενέργεια που πρέπει να πάρουν τα ηλεκτρόνια, για να φύγουν από το άτομο, μπορούμε να την προσφέρουμε με θερμότητα ή με φωτισμό.

Το φώς αποτελείται από μικρά σωματίδια, που λέγονται φωτόνια και τα οποία μεταφέρουν ενέργεια. Φωτίζοντας τον ημιαγωγό, κάποια από τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια σθένους και μεταβιβάζουν σ'αυτά όλη τους την ενέργεια. Αν λοιπόν φωτίσουμε έναν κρύσταλλο πυριτίου, στο εσωτερικό του θα "δούμε" κάποια ηλεκτρόνια να εγκαταλείπουν τα αντίστοιχα άτομα και να προσκολλώνται σε άλλα. Στον κρύσταλλο θα υπάρχουν άτομα με 9 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι αρνητικά φορτισμένα, και άτομα με 7 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ή, ισοδύναμη πρόταση, με μια οπή στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι θετικά φορτισμένα. Στο μεταξύ ελευθερώνονται κι άλλα ηλεκτρόνια που προσκολλώνται σε άτομα ή καταλαμβάνουν τη θέση μιας οπής που χάνεται. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών, η οποία όμως δεν ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η κατευθυνόμενη και προς συγκεκριμένη φορά μετακίνηση ηλεκτρονίων ή οπών. Την κατευθυνόμενη κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών την επιτυγχάνουμε με τους ημιαγωγούς πρόσμιξης.

4.3 Ημιαγωγοί πρόσμιξης

Ένας χημικά καθαρός ημιαγωγός δεν μπορεί να λειτουργήσει ως φωτοβολταϊκή γεννήτρια, εξαιτίας της άτακτης κίνησης των ηλεκτρονίων και των οπών στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ας πάρουμε έναν κρύσταλλο πυριτίου (Si) και ας τον νοθεύσουμε με Φώσφορο (P) από τη δεξιά και με Βόριο (B) από την αριστερή πλευρά του. Ο φώσφορος και το βόριο έχουν στην εξωτερική στοιβάδα 5 και 3 ηλεκτρόνια αντίστοιχα. Το ποσοστό της νοθείας ανέρχεται σε 10^{14} ως 10^{17} άτομα P ή B ανά κυβικό εκατοστό κρυστάλλου Si. Ας δούμε τα επακόλουθα της νοθείας, παρατηρώντας και το ακόλουθο σχήμα.





Εικόνα 4.3 : Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη ατόμων βορίου και φωσφόρου

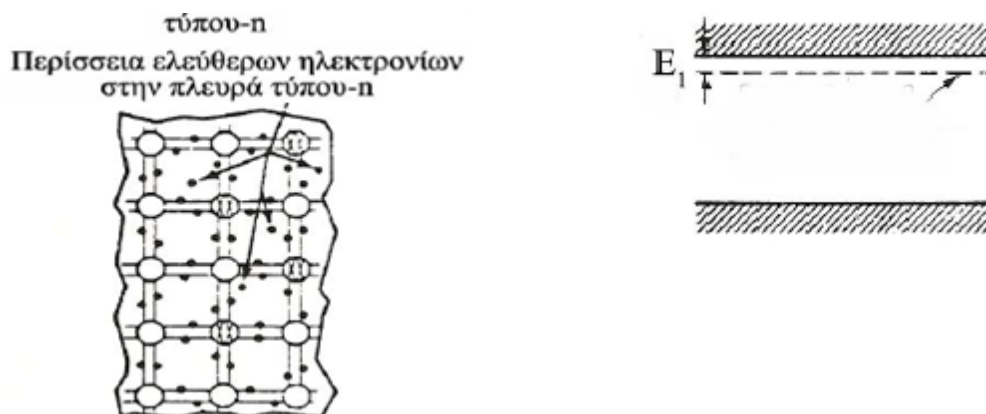
Με την πρόσμιξη στο κρυσταλλικό πλέγμα κάποια άτομα Si αντικαθίστανται από άτομα P και B. Έτσι κάποια άτομα Si έχουν στη στοιβάδα σθένους 9 ηλεκτρόνια από τη πλευρά που νοθεύσαμε με P και 7 ηλεκτρόνια από την πλευρά που νοθεύσαμε με B. Με άλλα λόγια, από τη πλευρά του P έχουμε πλεονάζοντα ηλεκτρόνια στις στοιβάδες σθένους, ενώ από την πλευρά του B έχουμε ηλεκτρονικά ελλείματα, δηλαδή οπές. Όλος ο κρύσταλλος όμως είναι ηλεκτρικά ουδέτερος.

Αν φωτίσουμε τον νοθευμένο κρύσταλλο, από την πλευρά του P θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια, τα πλεονάζοντα, τα οποία με άλματα θα κινηθούν προς την πλευρά του B, για να καταλάβουν τα ηλεκτρονικά κενά (οπές). Με αυτόν το τρόπο θα διαπιστώσουμε στην περιοχή του B συσσώρευση ηλεκτρονίων, δηλαδή αρνητικών φορτίων και στην περιοχή του P συσσώρευση οπών, δηλαδή θετικών φορτίων.

Έτσι πια μεταξύ των δύο νοθευμένων επιφανειών θα εκδηλωθεί ηλεκτρική τάση. Ο νοθευμένος κρύσταλλος του Si λειτουργεί ως ηλεκτρική πηγή με το θετικό πόλο από τη πλευρά του P και αρνητικό από την πλευρά του B. Η σύνδεση των ακροδεκτών μιας λάμπας με τις δύο νοθευμένες περιοχές του κρυσταλλικού

πυριτίου, θα συνοδεύεται από μετακίνηση ηλεκτρονίων, δηλαδή από ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων ημιαγωγών: **τύπου n** και **τύπου p**.

Ο **ημιαγωγός τύπου n**, προκύπτει από τον αντίστοιχο ενδογενή ημιαγωγό αν αντικατασταθούν μερικά από τα άτομα του, με άτομα άλλου υλικού, με μεγαλύτερο σθένος. Παραδείγματος χάριν, αν μερικά άτομα του κρυσταλλικού πυριτίου Si, τα οποία χαρακτηρίζονται από σθένος 4, αντικατασταθούν, με άτομα Αρσενικού, με σθένος 5, δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Η αντικατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μένει ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης, μη συμμετέχον σε δεσμό και το οποίο στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, εγκαταλείπει το άτομο του As και γίνεται ελεύθερο. Έτσι, ο ημιαγωγός τύπου n, περιέχει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε σχέση με τον ενδογενή. Τα άτομα της 5σθενούς πρόσμειξης ονομάζονται **δότες**.



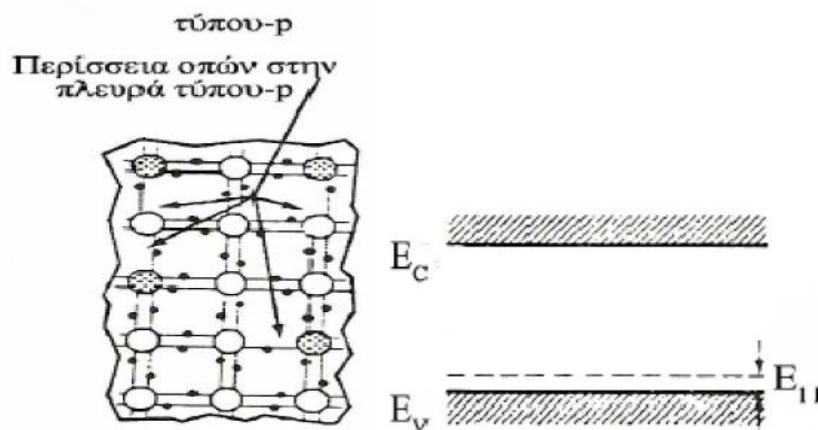
Εικόνα 4.4 : Αριστερά: Άτομα φωσφόρου έχουν αντικαταστήσει άτομα πυριτίου. Δεξιά: Επιτρεπόμενες στάθμες στο ενεργειακό χάσμα μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας για πρόσμειξη φωσφόρου.

Οι ηλεκτρονικές στάθμες των ατόμων των δοτών βρίσκονται λίγο κάτω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, κατά το ποσό των $\sim 50meV$, αφού με αυτό το ποσό ενέργειας, τα ηλεκτρόνια των σταθμών αυτών γίνονται «ελεύθερα» στο εσωτερικό του υλικού. Παριστάνονται με μικρές διακριτικές γραμμές, για να τονιστεί ότι πρόκειται για μεμονωμένα άτομα μέσα στο σύνολο των ατόμων του κυρίως υλικού, σ'όλη την έκταση του ημιαγωγού αυτού.

Αντίστοιχα, ο **ημιαγωγός τύπου p** δημιουργείται αν μερικά από τα άτομα του κύριου υλικού αντικατασταθούν με άτομα μικρότερου σθένους (π.χ. Βόριου B, Αλουμινίου Al, Γαλλίου Ga ή Ινδίου In). Π.χ. με αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου

Si, με ένα άτομο βορίου B, το οποίο έχει σθένος 3, δημιουργείται υλικό, στο οποίο υπάρχουν άτομα που μπορούν να δεχθούν ένα ηλεκτρόνιο, προκειμένου να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι δημιουργείται μια **οπή**.

Από τα γειτονικά άτομα Si, στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, αποσπάται κάποιο απ'τα ηλεκτρόνια σθένους και αποδίδοντας, όπως στην περίπτωση των δοτών, αντίστοιχα μικρή ενέργεια, η κάλυψη του δημιουργούμενου κενού δεσμού του ατόμου Si, γίνεται με μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου «σθένους» από άλλο άτομο Si. Άρα, η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, θέτει μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους σε κίνηση, η οποία ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, είναι πιο βολικό, αντί να αναφερόμαστε στην κίνηση των ηλεκτρονίων σθένους, από άτομο σε άτομο, να χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη και πολύ πιο πρακτική εικόνα της οπής.



Εικόνα 4.5 : Αριστερά: Άτομα βορίου έχουν αντικαταστήσει άτομα πυριτίου. Δεξιά: Επιτρεπόμενες στάθμες για πρόσμιξη βορίου.

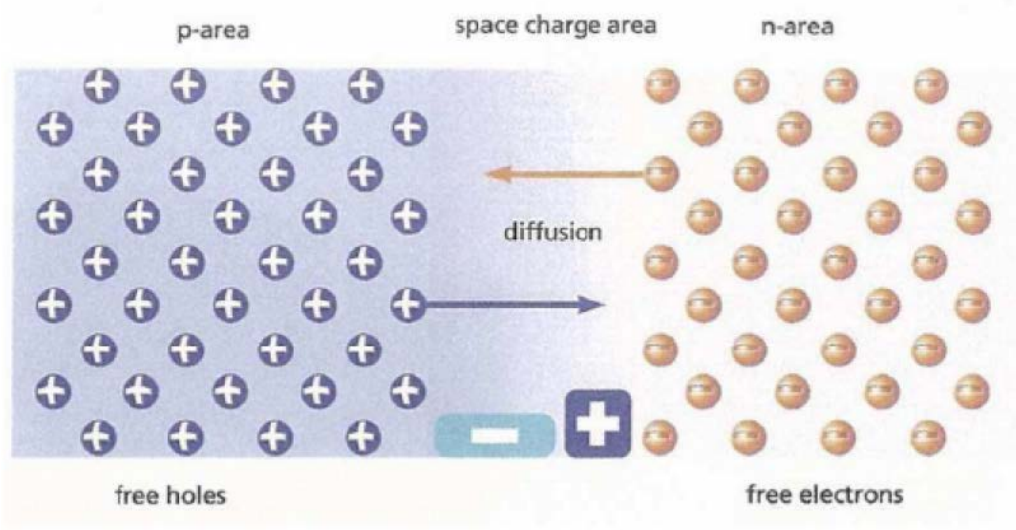
Τα άτομα των προσμίξεων αυτών ονομάζονται αποδέκτες (Acceptors). Οι ηλεκτρονικές στάθμες των αποδεκτών βρίσκονται αμέσως πάνω από την ζώνη σθένους.

Τυπικές τιμές συγκεντρώσεων προσμίξεων, σε αντιστοιχία με τους ημιαγωγούς τύπου n και p, είναι $(1-5) \cdot 10^6$ άτομα πρόσμιξης/cm³ υλικού. Δηλαδή ένα άτομο πρόσμιξης σε, περίπου, 1.000.000 άτομα καθαρού υλικού (τυπική πυκνότητα καθαρού υλικού π.χ. Si: $5 \cdot 10^{22}$ /cm³).

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, λοιπόν, οι ηλεκτρονικοί φορείς ενός ημιαγωγού, που μπορούν να συμβάλουν σε ρεύμα είναι: τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και οι οπές της ζώνης σθένους.

4.4 Η p-n επαφή

Αν φέρουμε σε επαφή ένα υλικό τύπου-n και ένα υλικό τύπου-p, η διαχωριστική γραμμή που καλείται επαφή (JUNCTION) αποτελεί την εστία δημιουργίας του φράγματος δυναμικού, που όπως είδαμε αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για την λειτουργία του ηλιακού κυττάρου.



Σχήμα 4.1 : Το φαινόμενο της διάχυσης

Όταν λοιπόν τα δυο υλικά έλθουν σε επαφή, ελεύθερα ηλεκτρόνια από το υλικό τύπου-n μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) μέσω της επαφής στο υλικό τύπου-p και συνδέονται με αντίστοιχες οπές, αφού το υλικό αυτό διαθέτει μεγάλο αριθμό οπών(σχήμα 2.5). Αν n είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων, dn/dx είναι η μονοδιάστατη βάρθρωση της συγκέντρωσης ηλεκτρονίων. Είναι προφανές ότι η ροή των ηλεκτρονίων είναι ανάλογη προς την αρνητική βάρθρωση της συγκέντρωσης. Επειδή το ρεύμα είναι ανάλογο προς τη ροή φορτισμένων σωματιδίων, το παραπάνω φαινόμενο συνίσταται σε ένα ρεύμα διάχυσης που η πυκνότητά του δίνεται από τη σχέση:

$$J_e = qDe \frac{dn}{dx}$$

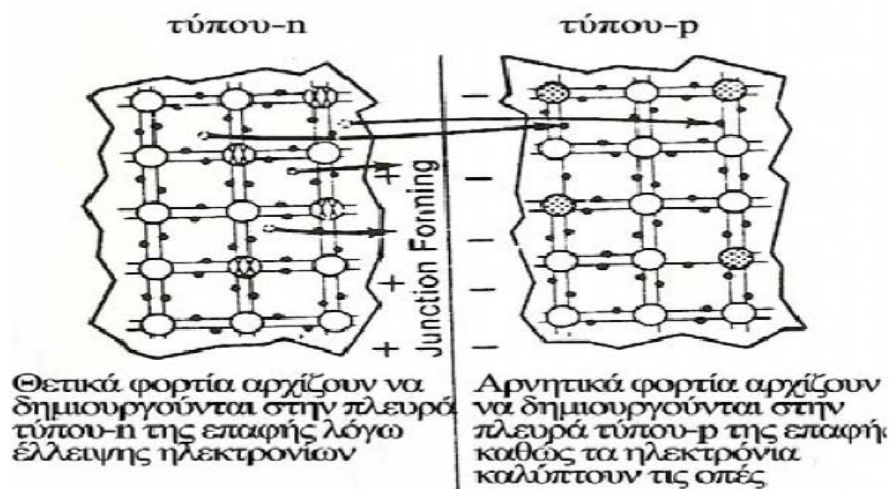
Όπου $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{Cb}$ (Electronic Charge), De : σταθερά διάχυσης ηλεκτρονίων

Από την άλλη μεριά, σπές από το υλικό τύπου-p μεταπηδούν (με τη διαδικασία της διάχυσης) στο υλικό τύπου-n (στην ουσία ηλεκτρόνια σθένους από το υλικό τύπου-n μεταπηδούν στο υλικό τύπου-p και συνδέονται με σπές) που συνιστούν ένα ρεύμα διάχυσης, η πυκνότητα του οποίου δίνεται από τη σχέση:

$$Jh = -qDh \frac{dP}{dx}$$

Όπου Dh : σταθερά διάχυσης σπών, P : πυκνότητα σπών

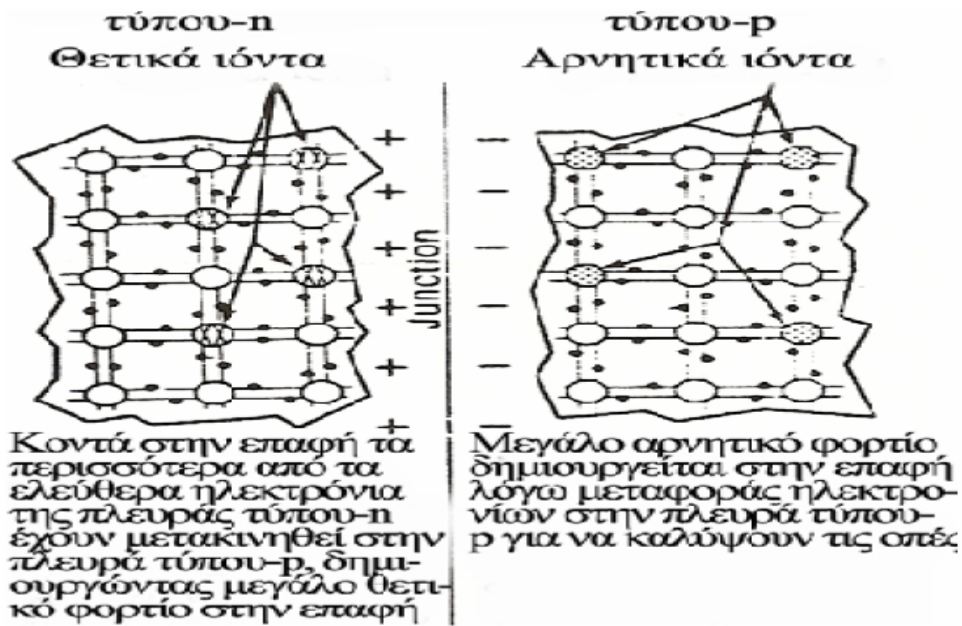
Αυτή η διαδικασία μεταφοράς των φορτίων (σχήμα 2.6) δημιουργεί μια ανισορροπία φορτίων στις δυο πλευρές της επαφής: αρνητικά φορτία (επί πλέον ηλεκτρόνια) στην πλευρά τύπου-p της επαφής και θετικά φορτία (ιόντα) στην πλευρά τύπου-n της επαφής.



Εικόνα 4.6 : Υλικό τύπου-n σε επαφή με υλικό τύπου-p. Ηλεκτρόνια και σπές αρχίζουν να μετακινούνται

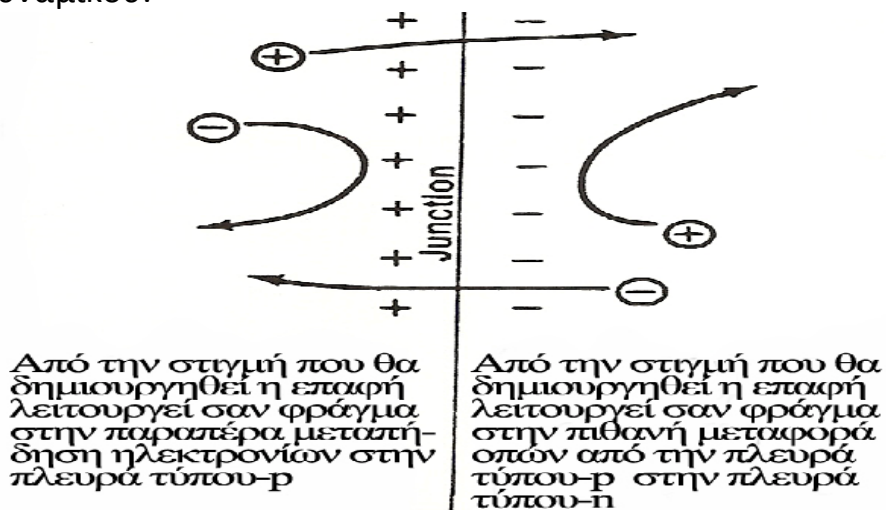
4.5 Το φράγμα δυναμικού

Η παραπάνω διαδικασία δεν συνεχίζεται απεριόριστα. Οι φορτισμένοι φορείς που μεταφέρθηκαν στις δυο πλευρές της επαφής δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο που ενεργεί σαν φράγμα (σχήμα 2.7) και αντιτίθεται στην παραπέρα ροή των φορέων.



Εικόνα 4.7 : Θετικά φορτία δημιουργούνται στο υλικό τύπου-n και αρνητικά φορτία στο υλικό τύπου-p

Με άλλα λόγια, σε μια στενή περιοχή περί την επαφή (SPACE CHARGE REGION ή DEPLETION REGION) δημιουργούνται φορτία χώρου, που έχουν σαν συνέπεια την δημιουργία ενός φράγματος δυναμικού (για το οποίο είχαμε μιλήσει στην αρχή) περί την επαφή, που αντισταθεί στην παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας μέσω της επαφής (σχήμα 2.8). Ωστόσο, οι φορείς μειονότητας δεν εμποδίζονται από το φράγμα δυναμικού.



Εικόνα 4.8 : Η επίδραση του φράγματος δυναμικού

Αντίθετα μάλιστα, (χωρίς φωτισμό του κυττάρου) υπάρχει μικρός αριθμός φορέων μειονότητας, όπως ελεύθερα ηλεκτρόνια στο υλικό τύπου-p, τα οποία οδηγούνται από το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής στην αντίθετη πλευρά δηλαδή στο υλικό τύπου-n και συνιστούν το ρεύμα ολίσθησης (DRIFT CURRENT) που δίνεται από τη σχέση:

$$J_e = q\mu_e nE$$

Όπου μ_e = ευκινησία (MOBILITY) των ηλεκτρονίων, E = ηλεκτρικό πεδίο.

Το ίδιο ισχύει και για τις οπές που βρίσκονται στο υλικό τύπου-n, που συνιστούν ένα ρεύμα ολίσθησης:

$$J_h = q\mu_h PE$$

Όπου μ_h = ευκινησία (MOBILITY) των οπών

Το ολικό ρεύμα ολίσθησης προκύπτει σαν άθροισμα των δύο παραπάνω συνιστωσών, οπότε η αγωγιμότητα σ του ημιαγωγού προκύπτει:

$$\sigma = \frac{J}{E} = q\mu_e n + q\mu_h P$$

Επιπλέον οι διαδικασίες διάχυσης και ολίσθησης αλληλοσχετίζονται και οι ευκινησίες και οι σταθερές διάχυσης δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αλλά συνδέονται με τις σχέσεις:

$$D_e = \frac{KT}{q} \mu_e \quad \text{και} \quad D_h = \frac{KT}{q} \mu_h$$

Όπου K : σταθερά BOLTZMANN (= 1.38×10^{-23} JOULE / K), T : απόλυτη θερμοκρασία [K]

Τα παραπάνω αποτελούν την αρχή κατασκευής και κατ' επέκταση τη βάση για την αρχή λειτουργίας τόσο μιας διόδου επαφής p-n (όπως είναι ένα ηλιακό κύτταρο όταν δεν φωτίζεται) όσο και του ηλιακού κυττάρου όταν φωτίζεται.

4.6 Η δίοδος p-n

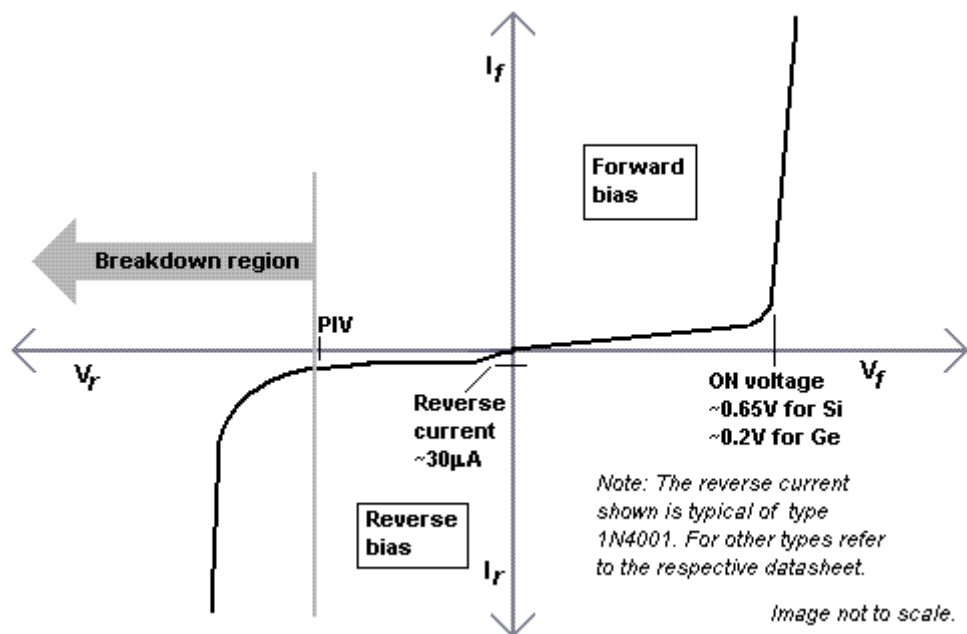
Οι περισσότερες σύγχρονες διόδοι βασίζονται στον ημιαγωγό p-n επαφών. Σε μια p-n δίοδο, συμβατικό ρεύμα μπορεί να ρέει από τη μεριά τύπου p (η άνοδος) στην άλλη μεριά τύπου n (η κάθοδος), αλλά δεν μπορεί να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Ένας άλλος τύπος διόδου ημιαγωγών, η δίοδος Schottky, σχηματίζεται από την επαφή μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού παρά από μια επαφή p-n.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ή I-V μιας διόδου ημιαγωγού αποδίδεται στη συμπεριφορά της περιοχής κατάρρευσης η οποία υπάρχει στην επαφή p-n μεταξύ των διαφορετικών ημιαγωγών. Όταν αρχικά δημιουργήθηκε η επαφή p-n, ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας (conduction band) της νοθευμένης-N (N-doped) περιοχής διαχέονται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή όπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από οπές (μέρη για τα ηλεκτρόνια στα οποία δεν βρίσκεται κανένα ηλεκτρόνιο) με τις οποίες τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο συνδυάζεται με μια οπή, η οπή εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο παύει να είναι ελεύθερο. Επομένως δυο φορείς αγωγιμότητας εξαφανίστηκαν. Η περιοχή γύρω από την επαφή p-n ελλατώνεται από φορείς αγωγιμότητας και επομένως λειτουργεί ως μονωτής.

Παρόλ 'αυτά, το πλάτος κατάρρευσης (depletion width) δεν μπορεί να μεγαλώσει απεριόριστα. Για κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής που ανασυνδυάζονται, ένα θετικά φορτισμένο «νοθευμένο» (dopant) ιόν αφήνεται πίσω στη νοθευμένη-N περιοχή και ένα αρνητικά φορτισμένο «νοθευμένο» ιόν αφήνεται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή. Καθώς προχωράνε οι ανασυνδυασμοί και περισσότερα ιόντα δημιουργούνται, δημιουργείται ένα αυξανόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη ζώνη κατάρρευσης το οποίο επιδρά στην επιβράδυνση και τελικά στη διακοπή των ανασυνδυασμών. Σε αυτό το σημείο, υπάρχει μια ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού στην ζώνη κατάρρευσης. Αν μια εξωτερική τάση εφαρμοστεί στη δίοδο με την ίδια πολικότητα με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, η ζώνη κατάρρευσης συνεχίζει να λειτουργεί ως μονωτής εμποδίζοντας τη διέλευση σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάστροφη πόλωση. Αντίθετα, αν η πολικότητα της εξωτερικής τάσης είναι αντίθετη με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, θα συνεχίσουν οι ανασυνδυασμοί με αποτέλεσμα να έχουμε διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της επαφής p-n. Για τις διόδους από πυρίτιο, η εσωτερική τάση είναι περίπου ίση με 0.6 V. Επομένως, αν ένα εξωτερικό ρεύμα περάσει από τη δίοδο, θα δημιουργηθεί στη δίοδο μια τάση περίπου 0.6 V έτσι ώστε η νοθευμένη-P περιοχή να είναι θετική σε σχέση με τη νοθευμένη-N περιοχή και η δίοδος χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, αφού έχει ορθή πόλωση.

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της διόδου μπορεί να προσεγγιστεί από δυο περιοχές λειτουργίας. Αν η τάση ανάμεσα στα δύο άκρα (leads) είναι κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, η ζώνη κατάρρευσης έχει σημαντικό πλάτος και η δίοδος μπορεί

να θεωρηθεί ως ένα ανοικτό(μη αγώγιμο) κύκλωμα. Όσο η τάση αυξάνεται, σε κάποιο σημείο η διάοδος θα γίνει αγώγιμη και θα επιτρέψει τη διαρροή του ηλεκτρικού ρεύματος, και μπορεί να θεωρηθεί ως μια σύνδεση με μηδενική (ή τουλάχιστον πολύ μικρή) αντίσταση.



Σχήμα 4.2 : Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας επαφής P-N διάοδου.

Σε μια κανονική διάοδο από πυρίτιο, η πτώση τάσης σε μια αγώγιμη διάοδο είναι περίπου 0.6 με 0.7 V. Η τιμή αυτή είναι διαφορετική για άλλους τύπους διόδων – για τις διόδους Schottky μπορεί να είναι 0.2 V και για τις διόδους εκπομπής φωτός (LED) μπορεί να είναι 1.4 V ή μεγαλύτερη (στα γαλάζια LED μπορεί να φτάνει και τα 4.0 V). Σχετικά με το διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V, στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης για μια κανονική ανορθωτική διάοδο P-N, το ρεύμα μέσω της συσκευής είναι πολύ μικρό (της τάξεως των μA) για όλες τις ανάστροφες τάσεις μέχρι ένα σημείο που ονομάζεται Κορυφή Ανάστροφης Τάσης (PIV). Μετά από αυτό το σημείο, συμβαίνει μια διαδικασία που ονομάζεται αντίστροφη κατάρρευση η οποία προκαλεί βλάβες στη συσκευή με ταυτόχρονη μεγάλη αύξηση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Για ειδικές περιπτώσεις διόδων όπως η avalanche ή οι διόδοι zener, η αρχή της Κορυφής Ανάστροφης Τάσης δεν είναι εφαρμόσιμη αφού έχουν μια εσκεμμένη κατάρρευση μετά από ένα γνωστό αντίστροφο ρεύμα έτσι ώστε η αντίστροφη τάση να φτάσει σε μια γνωστή τιμή (η οποία ονομάζεται τάση zener ή τάση

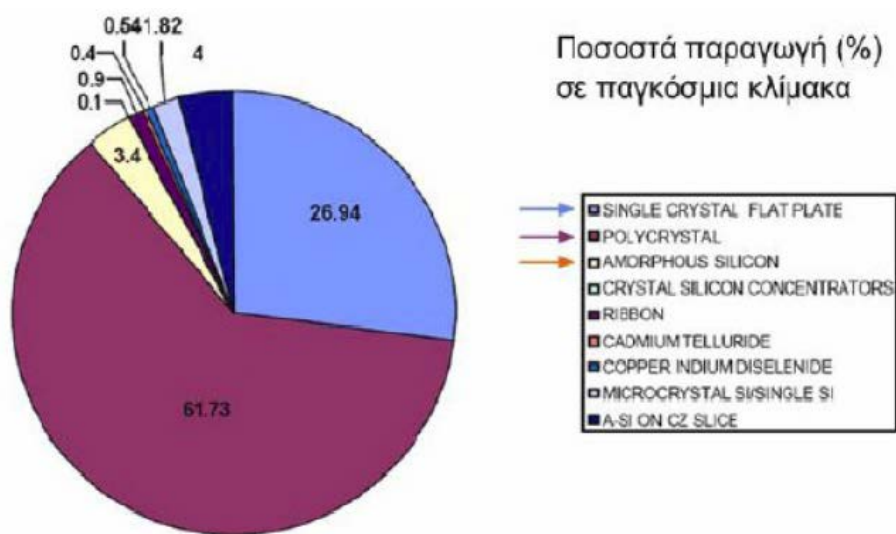
κατάρρευσης). Αυτές οι συσκευές όμως έχουν ένα ανώτατο όριο στο ρεύμα και στην ισχύ στην περιοχή zener ή avalanche.

4.7 Είδη ηλιακών κυττάρων

Η μεγάλη πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών κυττάρων αυτή τη στιγμή γίνεται από πυρίτιο, αλλά υπάρχουν και άλλα ημιαγωγικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το GaAs και το CdTe. Τα είδη ηλιακών κυττάρων, που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην αγορά είναι τα εξής:

- Μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
- Πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
- Λεπτής μεμβράνης (Thin – film).
- Υβριδικά.

Από τα παραπάνω, οι τεχνολογίες βασισμένες στο κρυσταλλικό πυρίτιο (μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό) αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της γενικής παραγωγής ηλιακών κυττάρων, όπως φαίνεται και στο σχήμα.



Εικόνα 4.9 : Υλικά κατασκευής φ/β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα

4.7.1 Κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Τα κελιά αυτά κατασκευάζονται με μια 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



Εικόνα 4.10 : Μονοκρυσταλλικοί ράβδοι Si

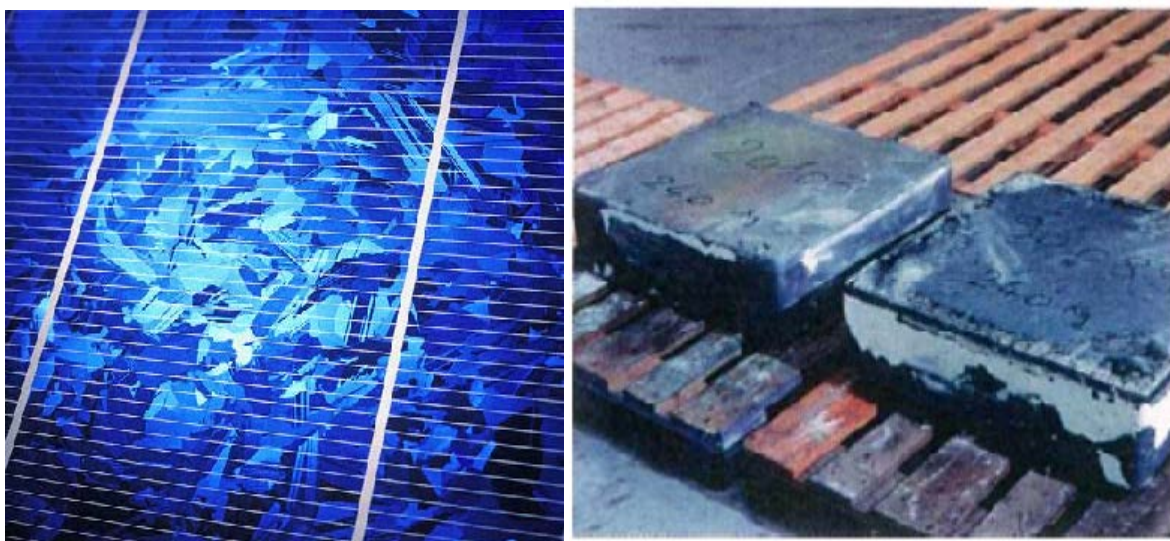
είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία 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).



Εικόνα 4.11 : Πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε λειτουργία

4.7.2 Κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου

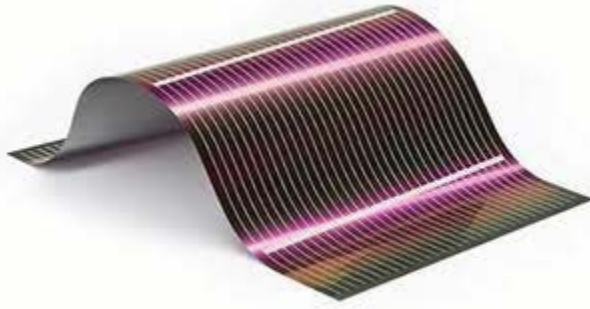
Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερα από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού κελιού απαιτεί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



Εικόνα 4.12 : Φωτοβολταϊκά κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου

4.7.3 Κύτταρα λεπτής μεμβράνης

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.



Εικόνα 4.13 : Κύτταρα λεπτής μεμβράνης

4.7.3.1 Κύτταρα καδμίου – τελλουρίου (CdTe)

Η κρυσταλλική ένωση καδμίου – τελλουρίου (CdTe) είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κυττάρων. Για τη δημιουργία μιας ένωσης p – n σε ένα ηλιακό κύτταρο, 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 κύτταρο. 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.

4.7.3.2. Κύτταρα Χαλκού – Ινδίου / Γαλλίου - Δισεληνιούχου

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου τα κύτταρα λεπτής μεμβράνης 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 κύτταρα λεπτής μεμβράνης.

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

4.7.3.3. Κύτταρα αρσενίδιου του Γαλλίου (GaAs):

Αποτελούν κύτταρα υψηλής απόδοσης (έως και 36%), ωστόσο ιδιαίτερα ακριβά.

4.7.3.4. Οργανικά / πολυμερή κύτταρα

Αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά κύτταρα λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες. Αντί για

ημιαγώγιμες p – n επαφές, τα οργανικά κύτταρα 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 κυττάρων.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ”

Για να προχωρήσουμε στην εξομοίωση μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας, πρέπει πρώτα να εξετάσουμε την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας ένα πρότυπο το οποίο είναι ηλεκτρικά ισοδύναμο και βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Σκοπός τους είναι να περιγράψουν με επαρκή ακρίβεια την καμπύλη I-V, να καθορίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης ακτινοβολίας που υπάρχουν και να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία συσκευών ελέγχου και μέτρησης. Το απλούστερο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα είναι το ιδανικό ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο.

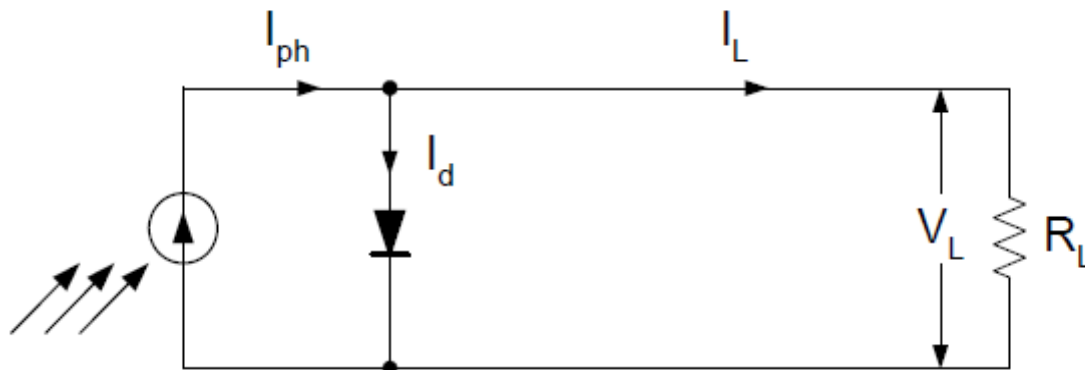
5.1. 1^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.1. απεικονίζεται το 1ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου το κύκλωμα είναι ιδανικό. Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή πρέπει να ισχύει η σχέση :

$$I_{ph} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right]$$

όπου I_{ph} το φωτόρευμα, I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου, q το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$), T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και A ένας συντελεστής, που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2. Από την παραπάνω σχέση βρίσκουμε ότι η τιμή της τάσης ανοιχτούκύκλωσης V_{oc} του στοιχείου είναι :

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} - 1\right)$$



Σχήμα 5.1 : 1ο ισοδύναμο κύκλωμα

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο , η τιμή του I_{ph} είναι πολύ μεγαλύτερη του I_0 οπότε η παραπάνω σχέση απλοποιείται στη :

$$V_L = V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα.

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το φωτόρευμα I_{ph} :

$$I_{sc} = I_{ph} \text{ και } V = 0$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων υπό φορτίο, το ρεύμα φορτίου I_L υπολογίζεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_L R_L}{AkT} \right) - 1 \right]$$

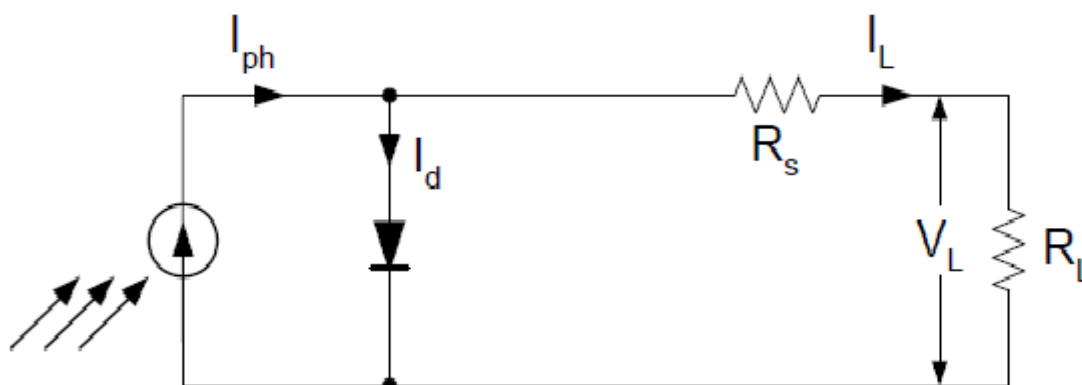
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L=V_{mpp}$ και δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 = \left(1 + q \frac{V_{mpp}}{AkT} \right) \exp \left(q \frac{V_{mpp}}{AkT} \right)$$

Το ιδανικό μοντέλο είναι το πιο απλοποιημένο ισοδύναμο με αποτέλεσμα βέβαια να υστερεί πάρα πολύ σε ακρίβεια.

5.2. 2^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.2. απεικονίζεται το 2ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το απλό μοντέλο και περιέχει την αντίσταση R_s η οποία παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό.



Σχήμα 5.2 : 2ο ισοδύναμο κύκλωμα

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η αντίσταση R_s πρέπει να έχει τιμή όσο δυνατόν μικρότερη τιμή. Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_s και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{AkT} - 1 \right) \right]$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{AkT} \right) - 1 \right]$$

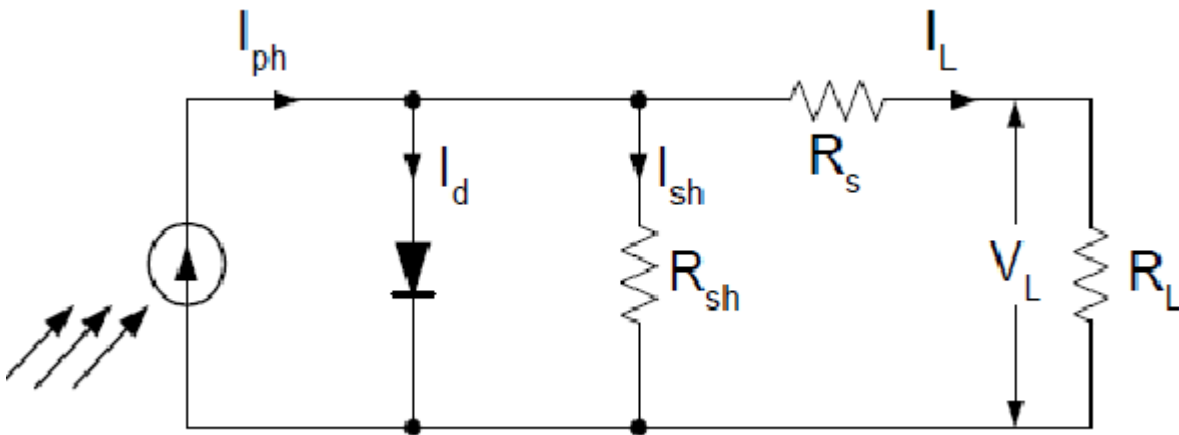
Η προσθήκη της αντίστασης με την οποία υπολογίζουμε τις απώλειες λόγω της πτώσης τάσης πάνω στις ηλεκτρικές επαφές μας δίνει περισσότερη ακρίβεια σε σύγκριση με το ιδανικό μοντέλο.

5.3. 3ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.3. απεικονίζεται το 3ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο μιας διόδου και περιέχει την αντίσταση R_s και την αντίσταση R_{sh} η οποία είναι η



αντίσταση διαμέσου της διόδου και εκφράζει τις απώλειες από τις διαρροές ρεύματος που υπάρχουν λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων



Σχήμα 5.3 : 3ο Ισοδύναμο κύκλωμα

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η R_{sh} έχει μεγαλύτερη των 500Ω . Οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} μειώνουν αισθητά την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου αφού επηρεάζουν τόσο την τάση V_L όσο και το ρεύμα I_L . Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}}$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_s , R_{sh} και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{AkT} - 1 \right) \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}$$

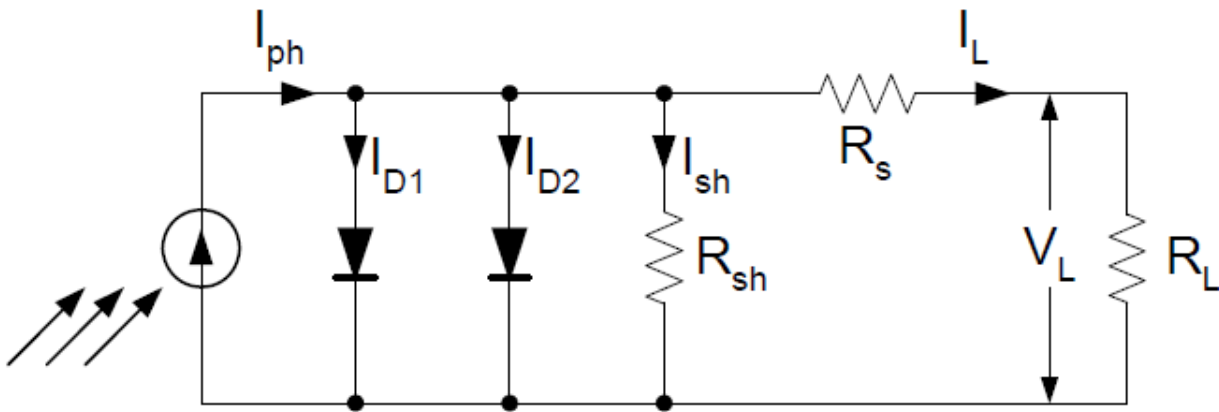
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}}$$

Το μοντέλο μιας διόδου έχει μη επαρκή ακρίβεια σε μεγάλο αριθμό Εφαρμογών.

5.4. 4^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.4. απεικονίζεται το 4^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο δύο διόδων και περιέχει τις αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τη δίοδο D1 η οποία συνήθως είναι ιδανική σύμφωνα με τη σχέση $I_{D1} = I_{s1} \exp \left(q \frac{V_D}{A_1 kT} \right)$ και έχει συντελεστή κατασκευής A_1 ίσο με 1 και τη δίοδο D2 η οποία είναι μη ιδανική υπακούοντας τη σχέση $I_{D2} = I_{s2} \exp \left(q \frac{V_D}{A_2 kT} \right)$ και έχει συντελεστή κατασκευής A_2 .



Σχήμα 5.4 : 4ο ισοδύναμο κύκλωμα

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_1 k T} \right) \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_2 k T} \right) \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}}$$

όπου I_{s1} το ρεύμα κόρου λόγω διάχυσης και I_{s2} το ρεύμα κόρου λόγω επανασύνδεσης.

Οι υπόλοιπες παράμετροι ομοίως με παραπάνω.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_1 k T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_2 k T} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}$$

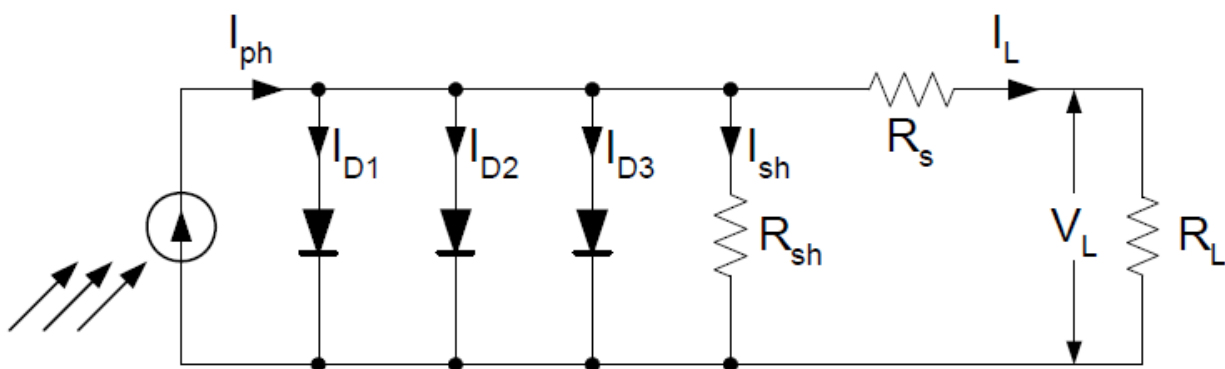
Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L=V_{mpp}$ και $I_L=I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s}{R_{sh}}$$

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.5. 5^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.5. απεικονίζεται το 5^ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το μοντέλο τριών διόδων και περιέχει τις αντιστάσεις R_s και R_{sh} , τη δίοδο D1, τη δίοδο D2 και τη δίοδο D3.



Σχήμα 5.5 : 5^ο ισοδύναμο κύκλωμα

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_{sh}}$$

όπου I_{s1} το ρεύμα κόρου λόγω διάχυσης, I_{s2} το ρεύμα κόρου λόγω επανασύνδεσης και I_{s3} το ρεύμα κόρου λόγω θερμιονικής εκπομπής. Οι υπόλοιπες παράμετροι ομοίως με παραπάνω.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L=V_{oc}$ και $I_L=0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{A_3 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0$$

οπότε η σχέση γίνεται:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_s}{A_3 kT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L=V_{mpp}$ και $I_L=I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - I_{s3} \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_3 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}}$$

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.6. 6^ο Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Στο Σχήμα 5.6. απεικονίζεται το 6ο ισοδύναμο κύκλωμα όπου είναι το αποτελεσματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου και περιέχει την αντίσταση R_{pv} η οποία είναι ο συνδυασμός των R_s και R_{sh} και δεν είναι ωμική αντίσταση αφού παίρνει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές.

Για την περιγραφή αυτού του μοντέλου απαιτούνται τέσσερις παράμετροι των

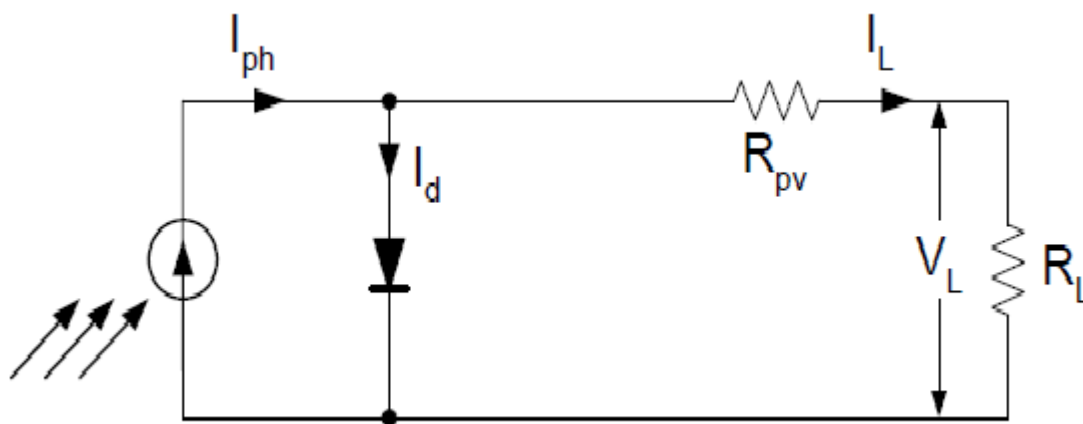


φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι τέσσερις παράμετροι που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η αντίσταση R_{pv} , η θερμοκρασία T , το ρεύμα I_0 και το φωτόρευμα I_{ph} . Αρχικά υπολογίζουμε την κλίση M . Υπάρχουν δύο τρόποι για τον υπολογισμό της. Ο πρώτος είναι γραφικά όπου $M = \frac{dV}{dI} = \tan\varphi = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ και το MPP βρίσκεται πάνω στην καμπύλη σε γωνία 45ο (Αφού $\tan 45^\circ = 1$) και ο δεύτερος είναι από τη σχέση :

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(-5.411 \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{V_{oc} I_{sc}} + 6.450 \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} + 3.417 \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} - 4.422 \right)$$

Γνωρίζοντας τώρα την κλίση M μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση R_{pv} από τη σχέση :

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} + \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} \right)$$



Σχήμα 5.6 : 6ο ισοδύναμο κύκλωμα

Το ρεύμα I_L υπολογίζεται από τη σχέση :

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_L + I_L R_{pv}}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι I_{ph} , R_{pv} και A ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$. Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το ρεύμα I_L :

$$I_{sc} = I_L \text{ και } V_L = 0$$

οπότε η σχέση γίνεται :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{I_{sc} R_{\pi\omega}}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι $V_L = V_{mpp}$ και $I_L = I_{mpp}$ δίνεται από τη λύση της εξίσωσης :

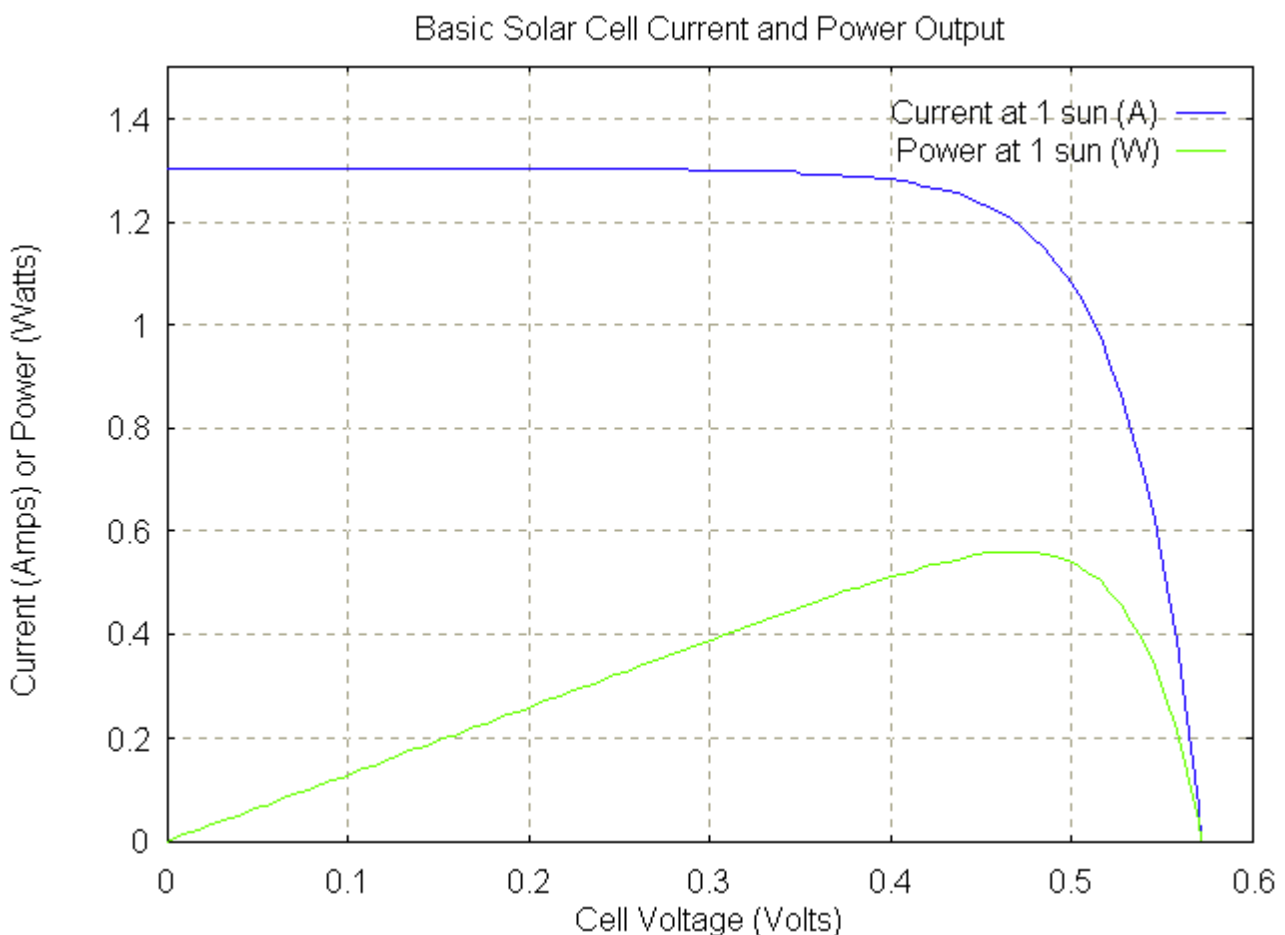
$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_{pv}}{AkT} \right) - 1 \right]$$

Το αποτελεσματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και σε εφαρμογές προσομοίωσης.

5.7. Η καμπύλη I - V

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο ως πηγή παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας έχει αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Ενώ οι περισσότερες ηλεκτρικές πηγές διατηρούν τη τάση τους σταθερή στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (Το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και έχει μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και σε άπειρη αντίσταση (Το κύκλωμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο και έχει μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω χαρακτηριστική.

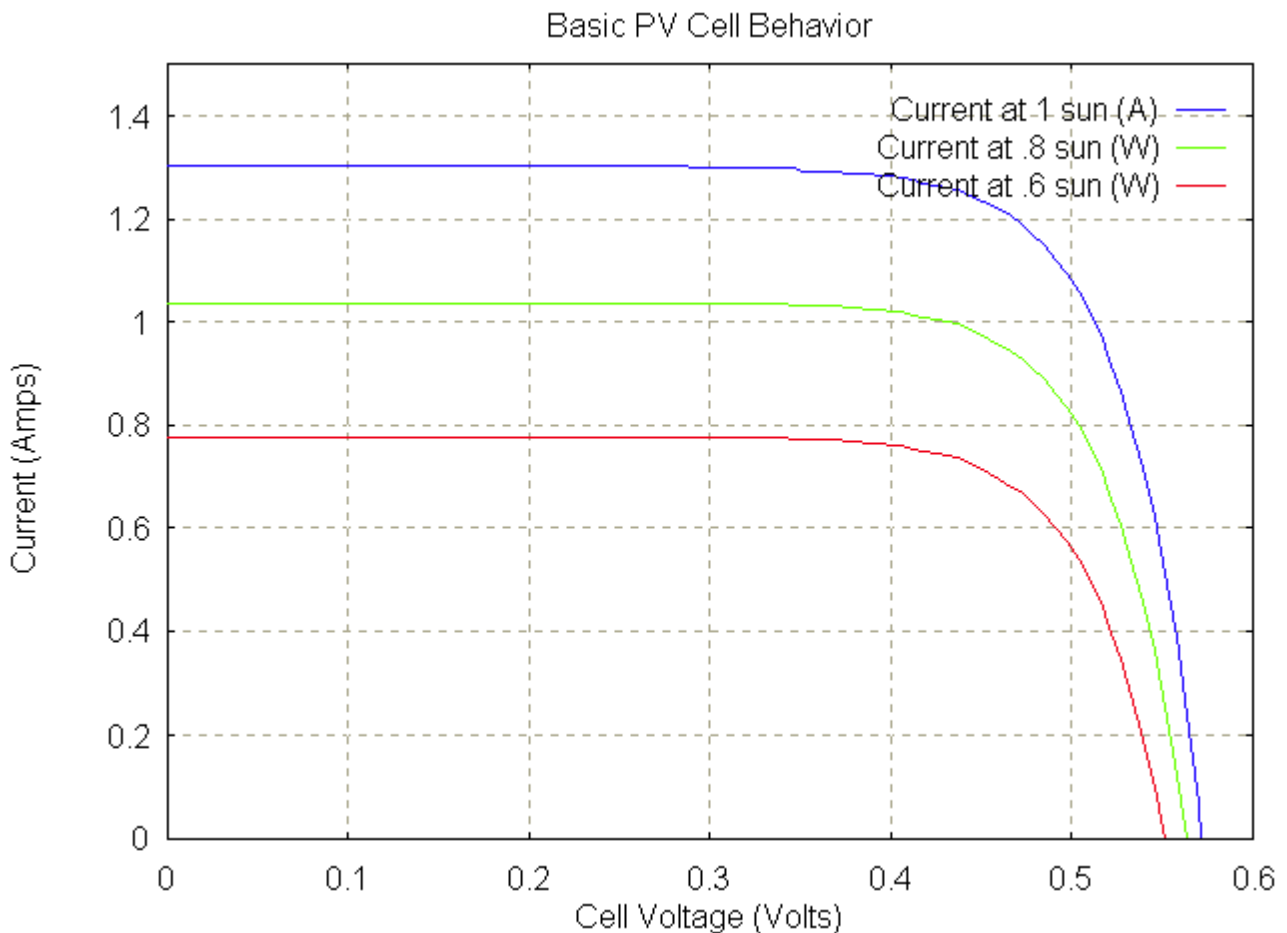


Εικόνα 5.1 : Χαρακτηριστική P-V και I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερή ένταση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

5.7.1. Παράγοντες που επηρεάζουν τη καμπύλη I - V

5.7.1.1. Η ένταση G της ηλιακής ακτινοβολίας

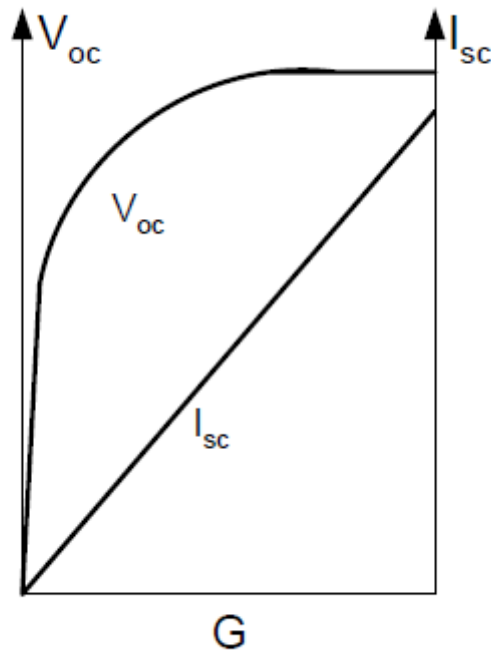
Σε αυτή τη περίπτωση η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς του.



Εικόνα 5.2 : Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από την ένταση ακτινοβολίας G

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος I_{sc} μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, ενώ η τάση του ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} μένει σχεδόν σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας για μεγάλες σχετικά τιμές ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με τη σχέση :

$$V_L = V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right)$$



Εικόνα 5.3 : Χαρακτηριστική V-G και I-G Φωτοβολταϊκού στοιχείου

5.7.1.2. Η θερμοκρασία T του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η θερμοκρασία επηρεάζει την χαρακτηριστική I-V με δύο τρόπους : άμεσα, μέσω του T που βρίσκεται στον εκθετικό όρο της χαρακτηριστικής εξίσωσης 3.1 και έμμεσα μέσω της επίδρασης του I_0 . Ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το μέγεθος του εκθέτη, το μέγεθος του I_0 αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση θερμοκρασίας. Η πιο σωστή επίδραση είναι να μειωθεί η V_{oc} γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Το μέγεθος αυτής της μείωσης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την V_{oc} δηλαδή τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με τις υψηλότερες τιμές της

V_{oc} υφίστανται τις μικρότερες μειώσεις της τάσης με την αυξανόμενη θερμοκρασία.

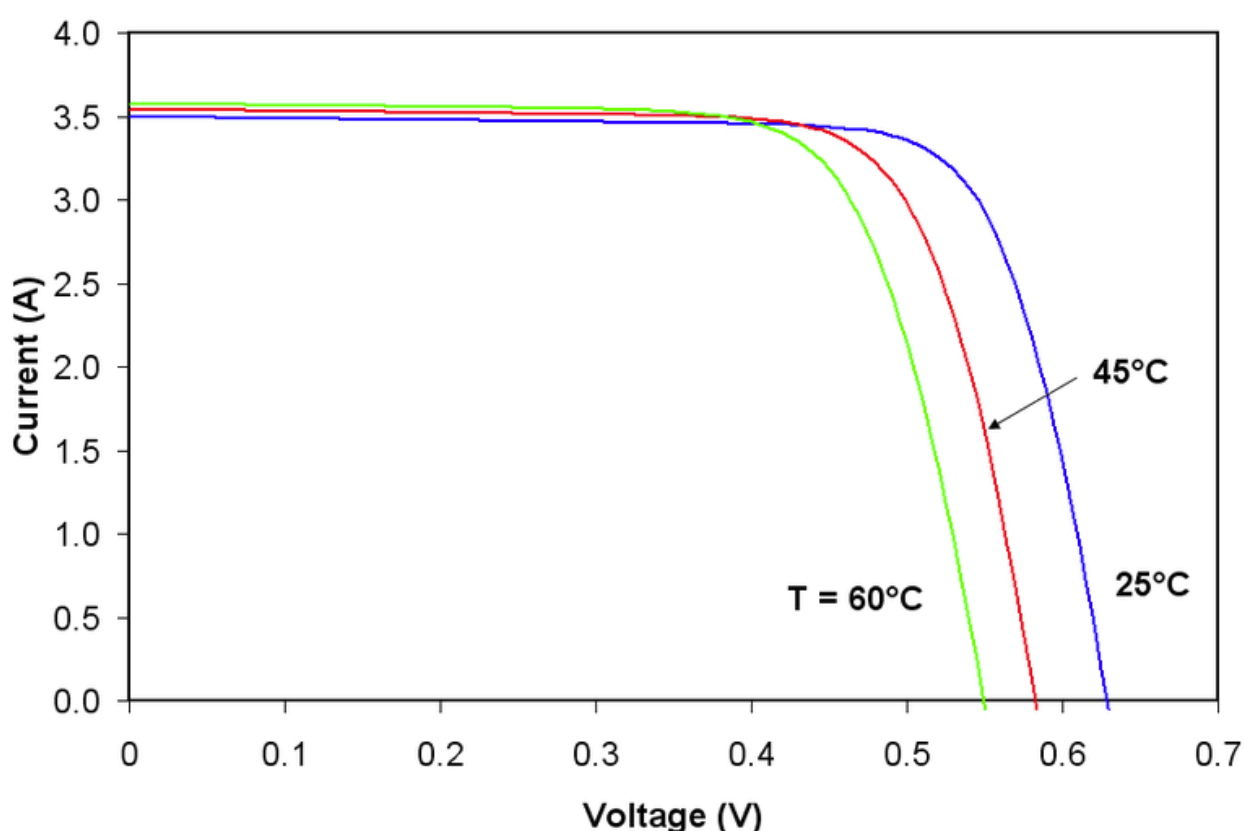
Για τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου η αλλαγή στην V_{oc} με τη θερμοκρασία είναι της τάξης του $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$ ενώ για τα υψηλής απόδοσης είναι της τάξης του $-0,3\%/^{\circ}\text{C}$.

Η τιμή του φωτορεύματος I_{ph} αυξάνεται αργά καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία λόγω της αύξησης των φορέων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Πάντως αυτή η επίδραση είναι μικρή της τάξης του $0.065\%/^{\circ}\text{C}$ για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου και $0.09\%/^{\circ}\text{C}$ για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου

πυριτίου.

Η γενική επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας αυτούς τους παράγοντες σε σχέση με τη χαρακτηριστική εξίσωση. Εντούτοις, δεδομένου ότι η αλλαγή στην τάση είναι πολύ ισχυρότερη από την αλλαγή στο ρεύμα, η γενική επίδραση στην απόδοση τείνει να είναι παρόμοια με αυτήν στη τάση. Στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία

κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται η απόδοσή τους κατά $0.50\%/^{\circ}\text{C}$ και στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου μειώνεται κατά $0.15-0.25\%/^{\circ}\text{C}$.



Εικόνα 5.4 : Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από T

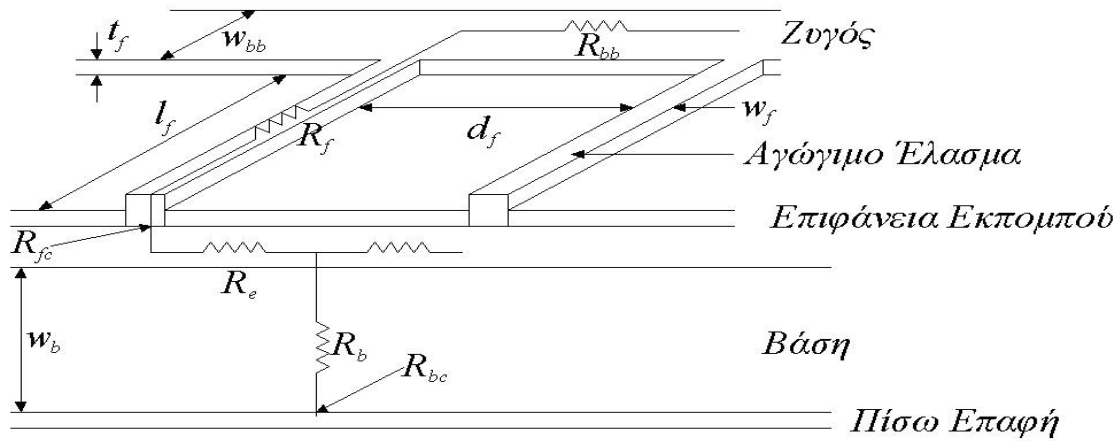
5.7.1.3. Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A

Ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας A εκφράζει πόσο πλησιάζει η συμπεριφορά της διόδου την θεωρητική όπου η επαφή p-n είναι ιδανική και δεν υπάρχει καμία επανασύνδεση φορέων μέσα στην περιοχή ανταλλαγής φορτίου. Όταν

ο συντελεστής είναι 1 έχουμε την ιδανική δίοδο ενώ είναι 2 όταν υπάρχει σε μεγάλο βαθμό επανασύνδεση φορέων.

5.7.1.4. Η αντίσταση σειράς R_s

Όπως αναφέραμε παραπάνω η αντίσταση σειράς R_s εμποδίζει τη διέλευση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό. Στο παρακάτω Σχήμα φαίνεται αναλυτικότερα η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου καθώς και οι αντιστάσεις από τις οποίες αποτελείται η αντίσταση σειράς.



Εικόνα 5.5 : Αντιστάσεις που αποτελούν την αντίσταση σειράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου

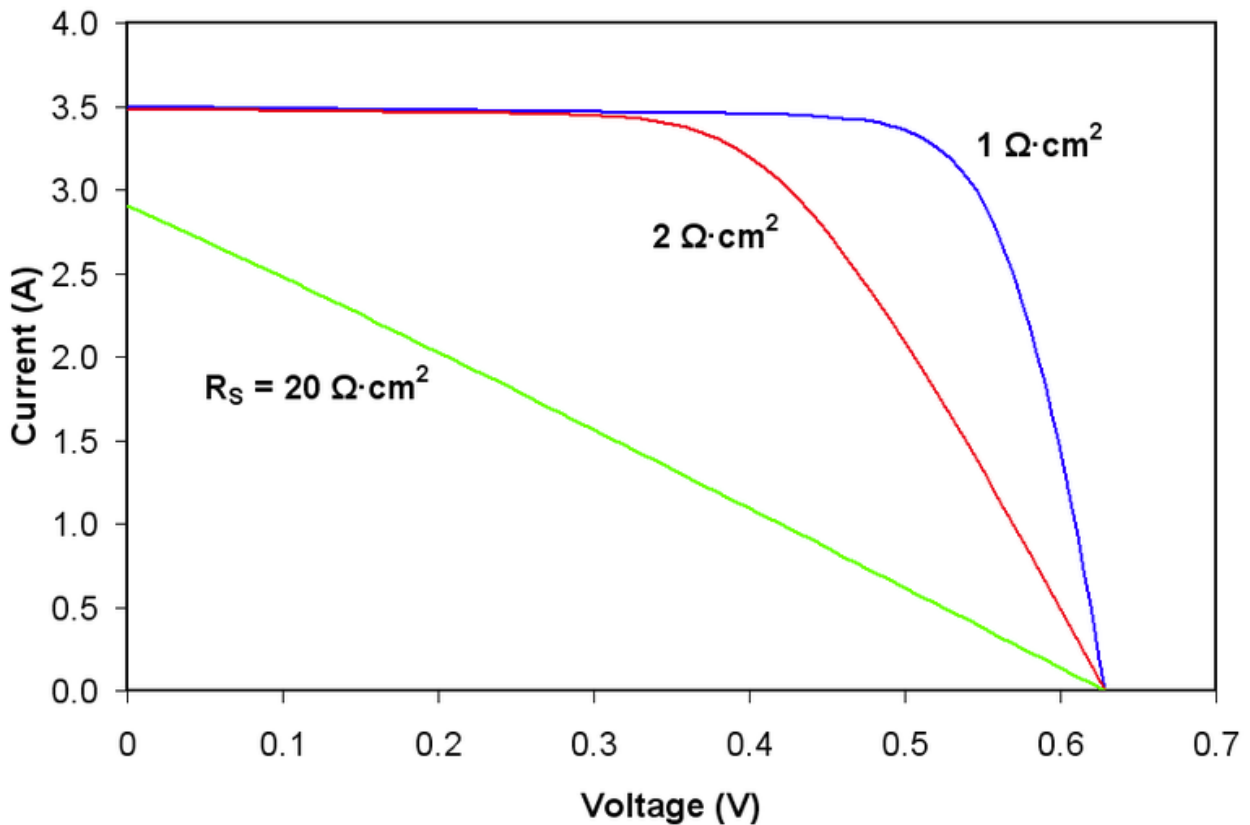
Οι εκφράσεις για τις διάφορες αντιστάσεις οι οποίες αποτελούν την αντίσταση σειράς R_s αναλύονται στον παρακάτω πίνακα. Συγκεκριμένα R_{sp} είναι η αντίσταση επιφάνειας του εκπομπού (Ω /τετράγωνο), r_{cf} και r_{cb} είναι οι ειδικές αντιστάσεις της μπροστινής και της πίσω επαφής, r_b είναι η ειδική αντίσταση της βάσης και r_m είναι η ειδική αντίσταση των μπροστινών αγωγίμων ελασμάτων.

Πίνακας 5.1 : Τύποι υπολογισμού αντίστασης των στοιχείων της R_s

Εξάρτημα Αντίστασης	Σύμβολο	Τύπος
Αντίσταση εκπομπού	R_e	$R_e = \frac{R_{sp} d_f}{7l_f}$
Αντίσταση βάσης	R_b	$R_b = AW_b \rho_b$
Αντίσταση μπροστινής επαφής	R_{fc}	$R_{fc} = \frac{\sqrt{R_{sp} \rho_{cf}}}{l_f} \coth \left(W_f \sqrt{\frac{R_{sp}}{\rho_{cf}}} \right)$
Αντίσταση πίσω επαφής	R_{bc}	$R_{bc} = A \rho_{cr}$
Αντίσταση αγώγιμων ελασμάτων	R_f	$R_f = \frac{l_f \rho_m}{3t_f W_f}$
Αντίσταση ζυγού	R_{bb}	$R_{bb} = \frac{\rho_m}{3t_f W_{bb}}$

Αν υποθέσουμε ότι η αντίσταση σειράς αυξάνεται, τότε η πτώση τάσης στα άκρα της αυξάνεται για την ίδια τιμή της έντασης του ρεύματος, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τάση V στα άκρα του φορτίου άρα και του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} για μεγάλες τιμές της R_s , ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} παραμένει σταθερή.

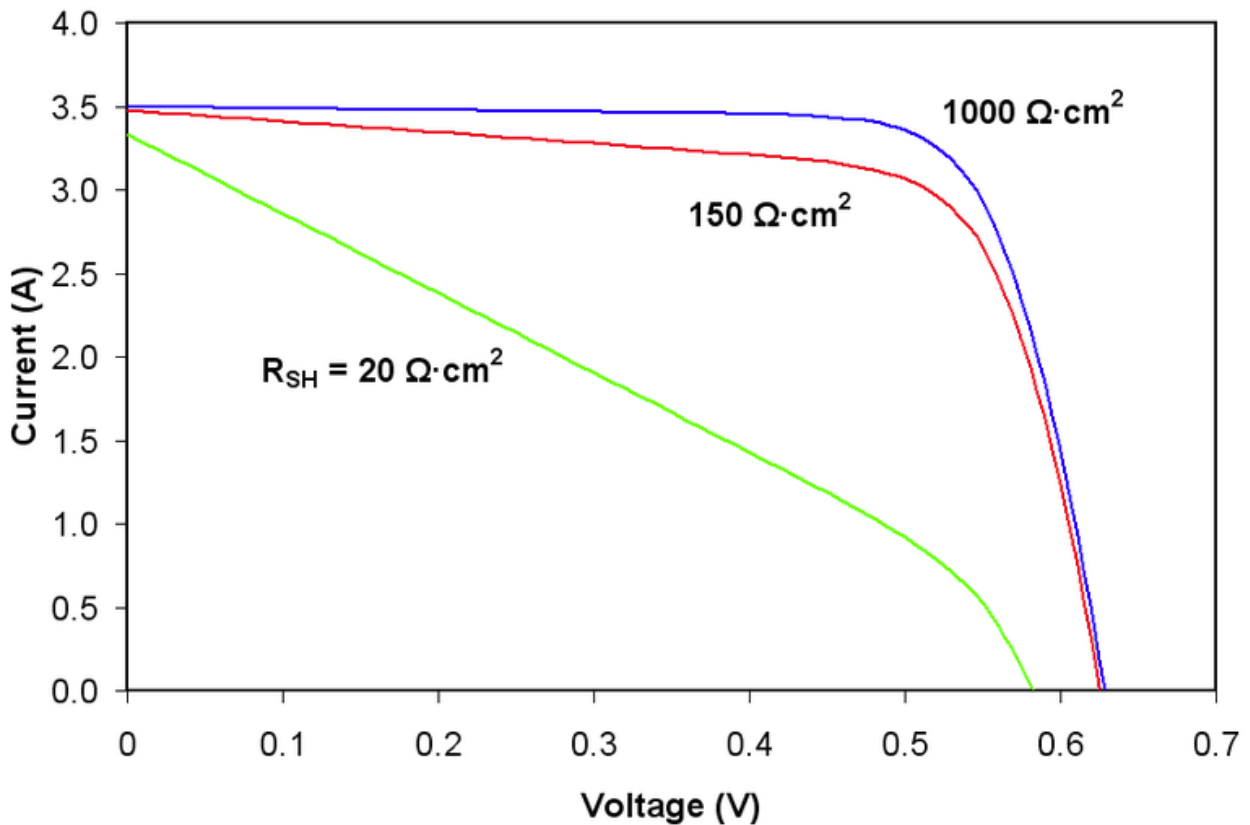
Οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση $P = I^2 R_s$ και αυξάνονται όσο αυξάνεται το I_{ph} δηλαδή όσο αυξάνεται η ένταση ακτινοβολίας.



Εικόνα 5.6 : Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_s

5.7.1.5. Η παράλληλη αντίσταση R_{sh}

Αν υποθέσουμε ότι η παράλληλη αντίσταση μειώνεται, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_{sh} αυξάνεται για δεδομένη τιμή της τάσης V στα άκρα της, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή της έντασης του ρεύματος φορτίου I_L και συνεπώς η τάση V_{oc} . Για μικρές τιμές της R_{sh} θα υπάρξει σημαντική μείωση της τάσης V_{oc} .



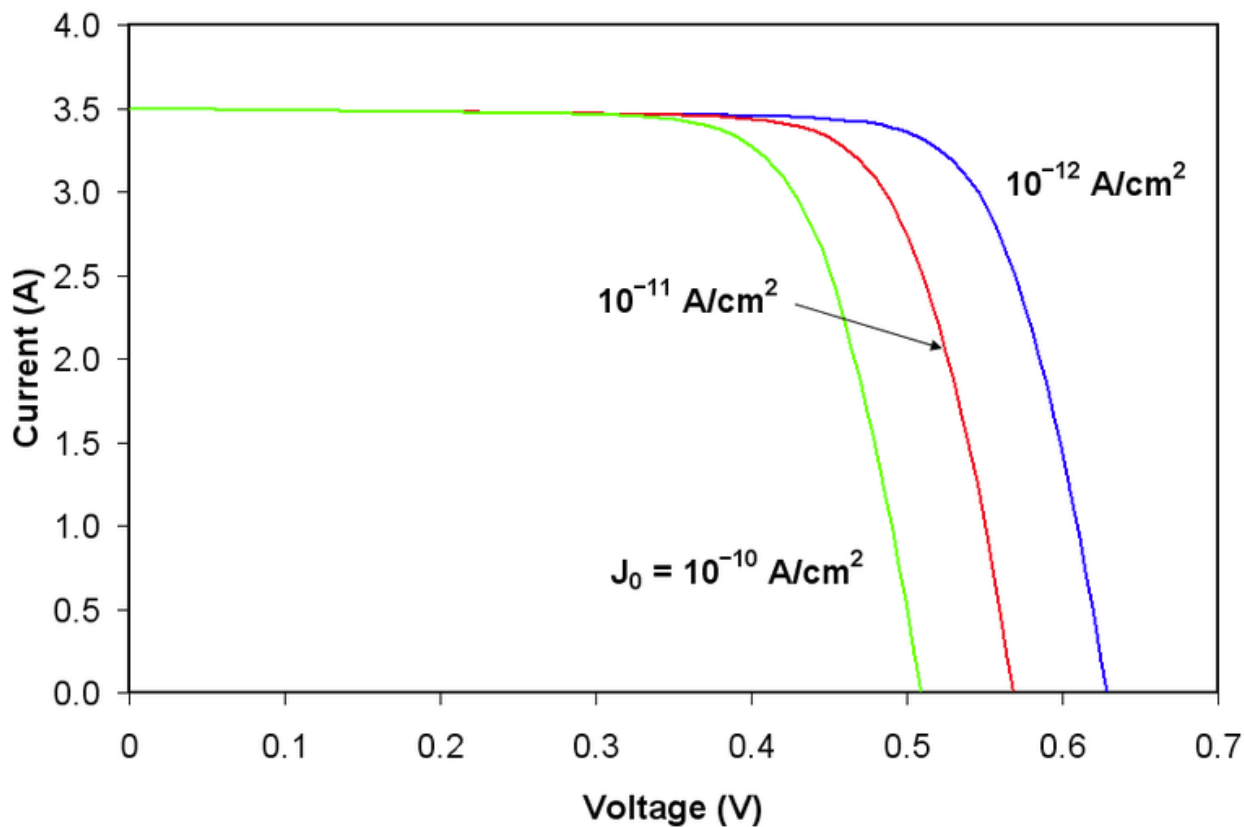
Εικόνα 5.7 : Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από R_{sh}

5.7.1.6. Ανάστροφο ρεύμα κόρου

Εάν υποθέσουμε πως η παράλληλη αντίσταση είναι άπειρη τότε η χαρακτηριστική εξίσωση του κυκλώματος μπορεί να λυθεί ως προς V_{oc} :

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right)$$

Οπότε μία αύξηση του ρεύματος κόρου έχει ως συνέπεια τη μείωση της V_{oc} η οποία είναι ανάλογη του αντιστροφου του λογαρίθμου.



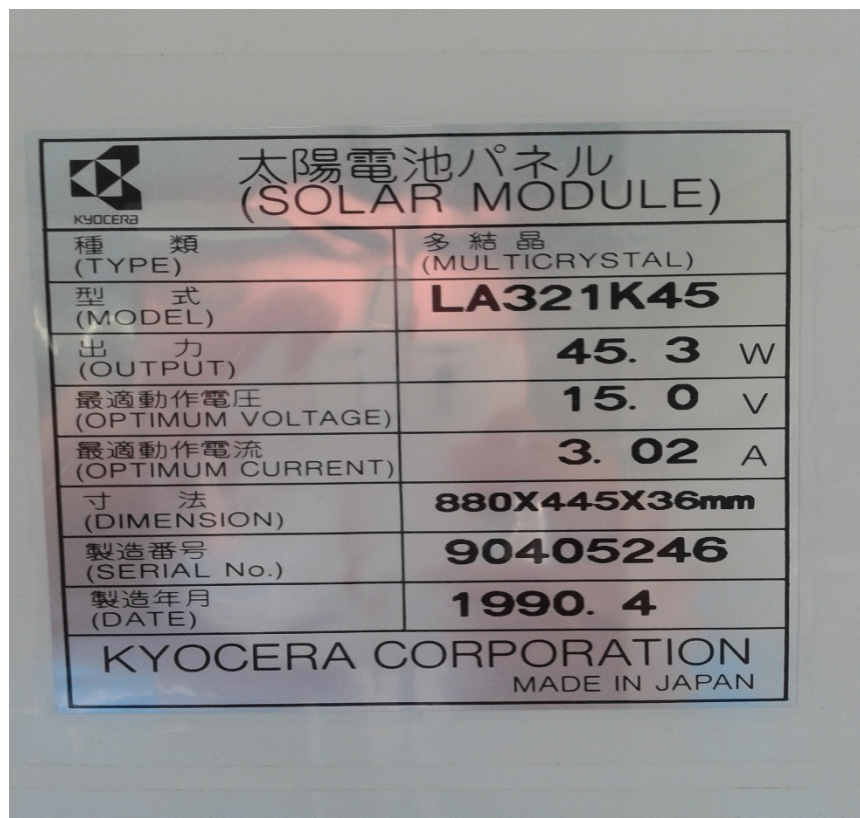
Εικόνα 5.8 : Χαρακτηριστική I-V Φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτώμενη από I_0

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ”

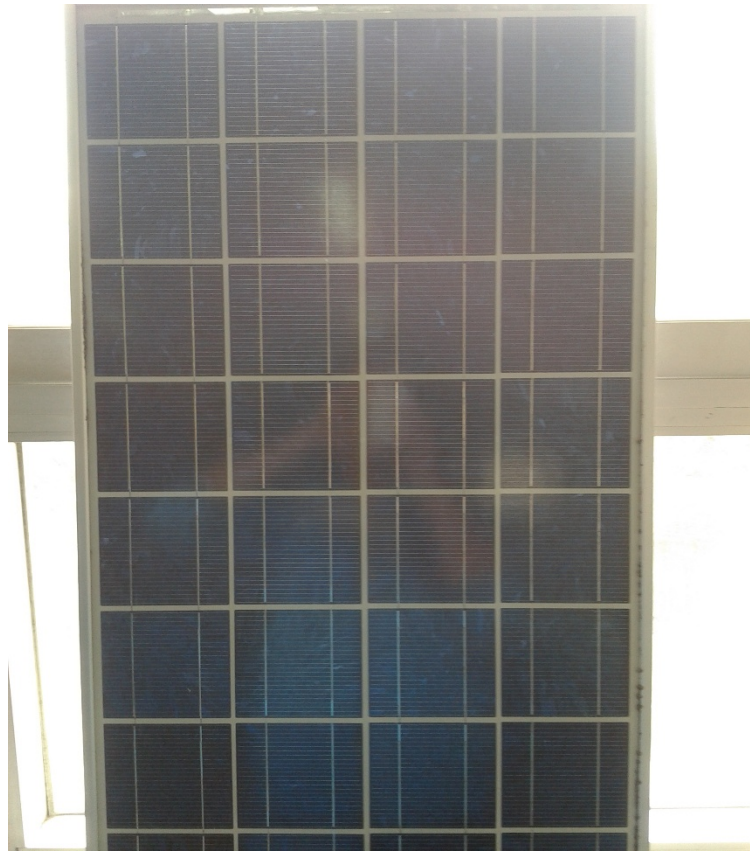
Οι προσομοιώσεις φωτοβολταϊκών γεννητριών βάσει των ισοδύναμων ηλεκτρικών που εξετάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες όταν θέλουμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος όταν οι καιρικές συνθήκες δεν είναι οι ιδανικότερες (π.χ. έντονη συννεφιά, βροχόπτωση). Συγκεκριμένα μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος του κυκλώματος με ένα ποτενσιόμετρο προσομοιώνουμε τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G και το πώς επηρεάζει πειραματικά τις καμπύλες I-V και P-V.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα επιχειρήσουμε να προσομοιώσουμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο 24 κυψελών (cells) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:



太陽電池パネル (SOLAR MODULE)	
種類 (TYPE)	多結晶 (MULTICRYSTAL)
型式 (MODEL)	LA321K45
出力 (OUTPUT)	45.3 W
最適動作電圧 (OPTIMUM VOLTAGE)	15.0 V
最適動作電流 (OPTIMUM CURRENT)	3.02 A
寸法 (DIMENSION)	880X445X36mm
製造番号 (SERIAL No.)	90405246
製造年月 (DATE)	1990. 4
KYOCERA CORPORATION MADE IN JAPAN	

Εικόνα 6.1 : Πίνακας χαρακτηριστικών πρότυπου φωτοβολταϊκού πλαισίου



Εικόνα 6.2 : Πρότυπο πάνελ

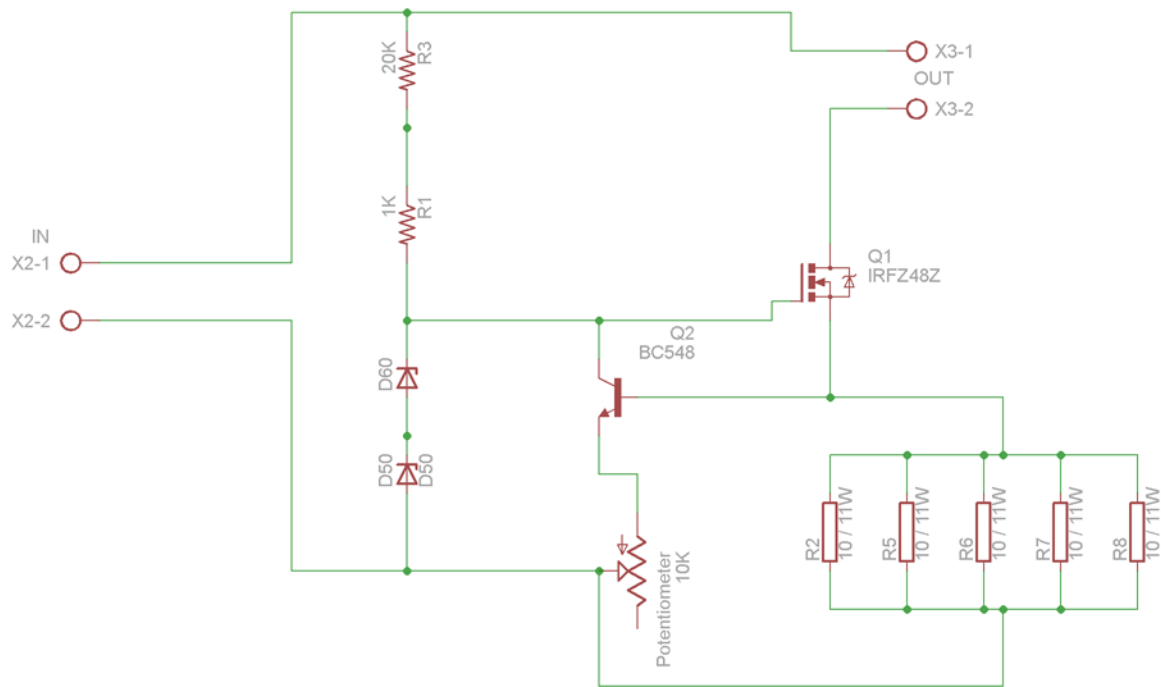
Επίσης θα μπορούμε να μεταβάλουμε την ένταση του ρεύματος, προσομοιώνοντας έτσι τη μεταβολή της καμπύλης $I - V$ βάσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G).

6.1. Σχεδίαση ηλεκτρικού κυκλώματος

Σαν σύνολο το κύκλωμα της συγκεκριμένης προσομοίωσης αποτελείται από τρία επιμέρους κυκλώματα τα οποία είναι:

6.1.1. Γεννήτρια ρεύματος

Ένα κύκλωμα γεννήτριας ρεύματος, το οποίο προσομοιώνει τις διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Οι αντιστάσεις καθορίζουν τα όρια της έντασης του ρεύματος που μπορεί να παράγει η γεννήτρια (τα οποία είναι $300\text{mA} - 4,07\text{A}$), ενώ το τρανζίστορ και το mosfet διατηρούν σταθερή τη τάση του κυκλώματος.



Σχήμα 6.1 Το κύκλωμα της γεννήτριας ρεύματος

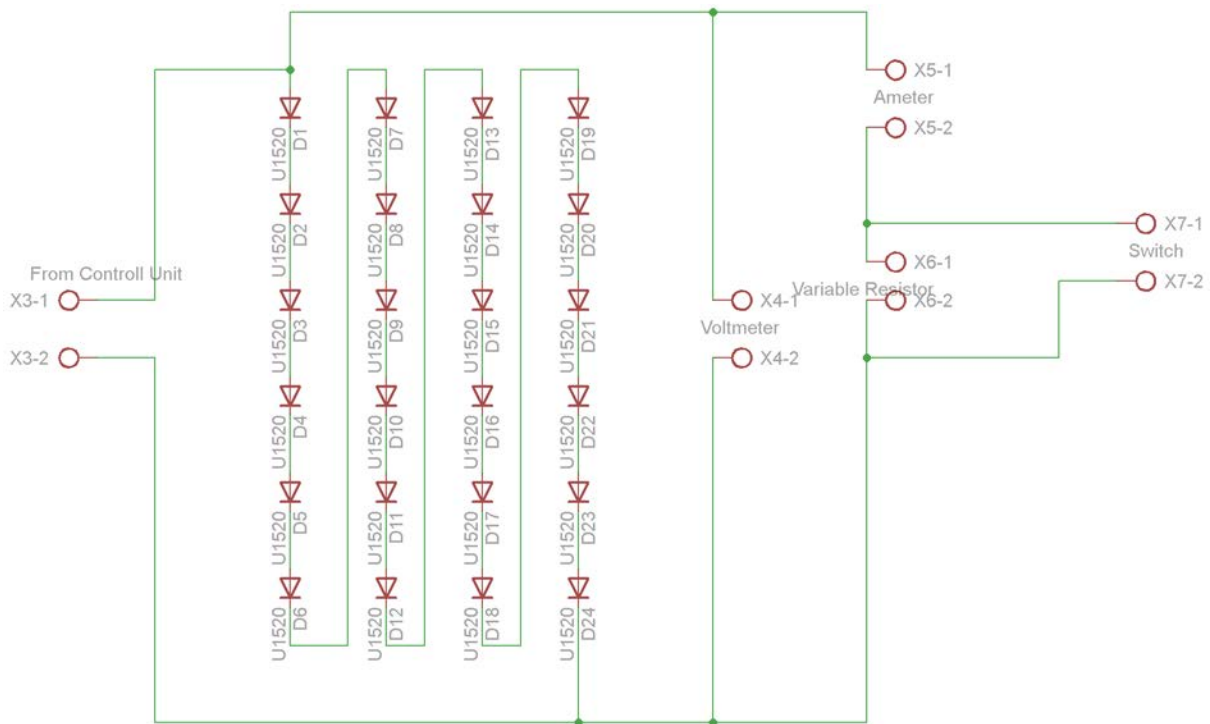
Ακολουθεί ο πίνακας με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη γεννήτρια ρεύματος.

Πίνακας 6.1 : Υλικά γεννήτριας ρεύματος

Υλικό	Ποσότητα
Αντίσταση 20kΩ	1
Αντίσταση 1kΩ	1
Αντίσταση 10Ω/11W	5
Ποτενσιόμετρο 10kΩ πολύστροφο	1
IRFP150 Mosfet	1
BC546 Transistor	1
Δίοδος 16V	1
Πλαστικοί connectors molex	2

6.1.2. Κύκλωμα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κυρίως κύκλωμα της προσομοίωσης, αποτελείται από 24 διόδους συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, όπως και οι κυψέλες (cells) σε ένα panel.



Σχήμα 6.2 Το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου

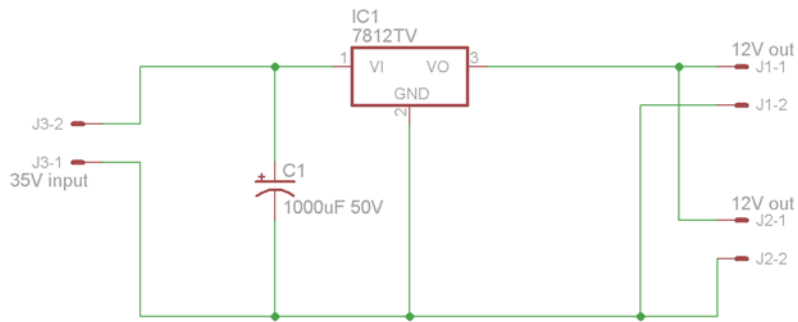
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα του κυρίως πλαισίου είναι τα παρακάτω:

Πίνακας 6.2 : Υλικά φωτοβολταϊκού πλαισίου

Υλικό	Ποσότητα
Δίοδος MUR1520	24
Κλέμμες τυπομένου κυκλώματος	5

6.1.3. Τροφοδοτικό συστήματος ψύξης

Λόγω της μεγάλης έντασης ρεύματος που διαρρέει το σύνολο του κυκλώματος και κατά συνέπεια της μεγάλης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, είναι απαραίτητη η παροχή ψυχρού αέρα, αλλά και η ομαλή ροή του στο εσωτερικό της κατασκευής. Γι' αυτό το λόγο το συγκεκριμένο κύκλωμα παρέχει στους 2 ανεμιστήρες (ventilators) τάση 12V που απαιτείται για τη λειτουργία τους.



Σχήμα 6.3 Το κύκλωμα τροφοδοσίας του συστήματος ψύξης

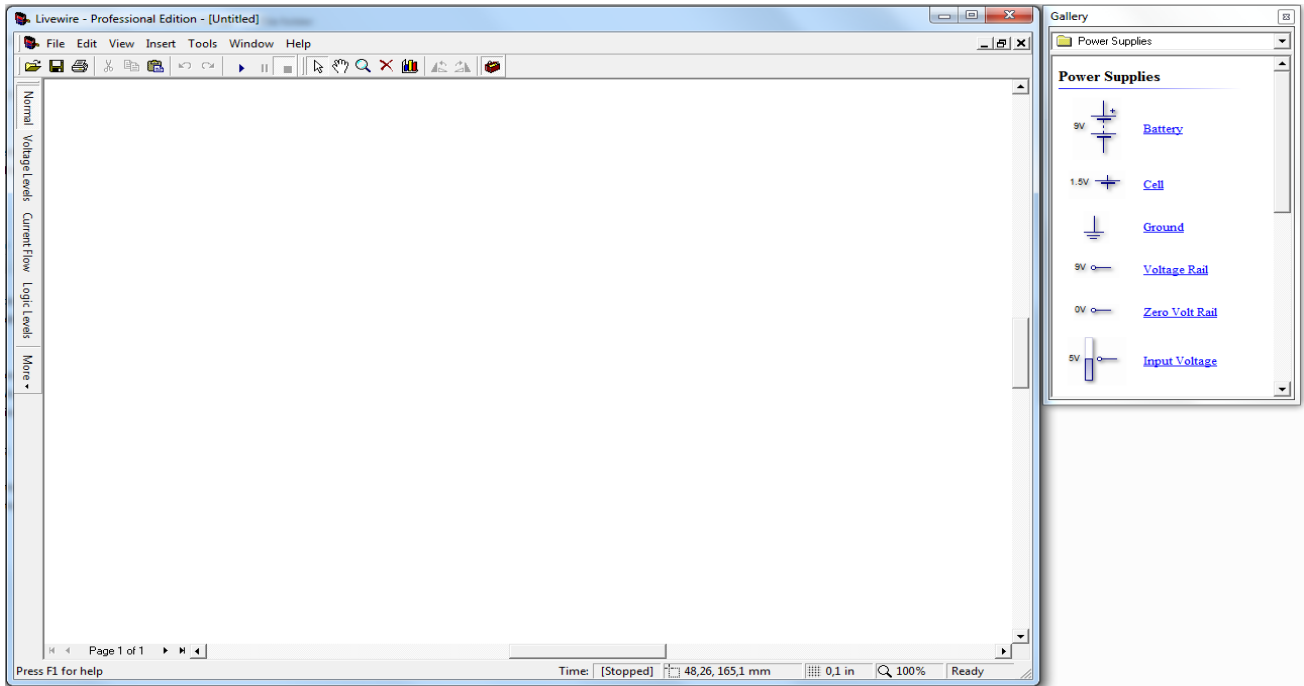
Χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

Πίνακας 6.3 : Υλικά τροφοδοτικού συστήματος ψύξης

Υλικό	Ποσότητα
Σταθεροποιητής τάσης LM7812	1
Υλεκτρολυτικός πυκνωτής 1000µF 50 V	1
Πλαστικοί connectors molex	3

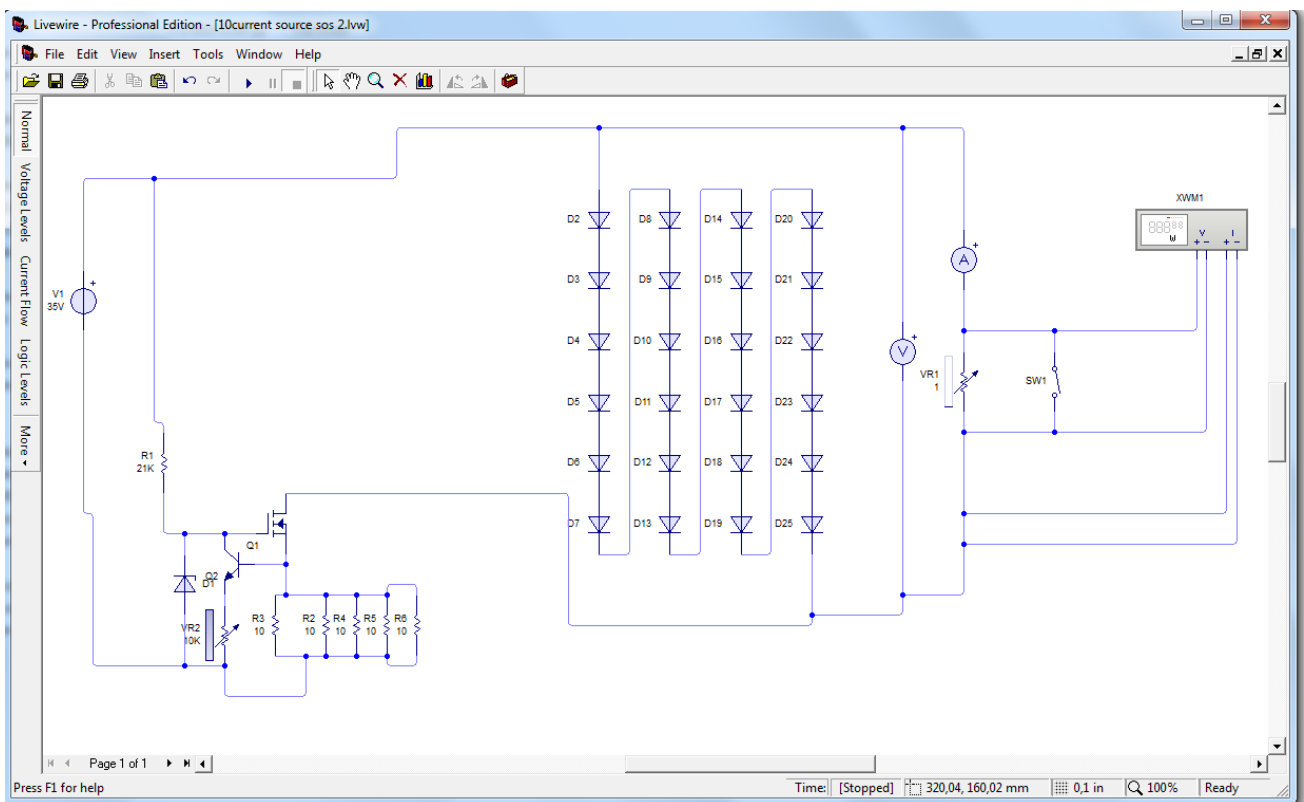
6.2. Εξομοίωση στο LiveWire

Έχοντας σχεδιάσει τα κυκλώματα που θα χρησιμοποιήσουμε, πρέπει πριν προχωρήσουμε στη κατασκευή, να εξετάσουμε τη λειτουργία τους σε κάποιο πρόγραμμα εξομοίωσης στον υπολογιστή. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήσαμε το LiveWire το οποίο είναι αρκετά εύκολο και προσιτό στον χρήστη.



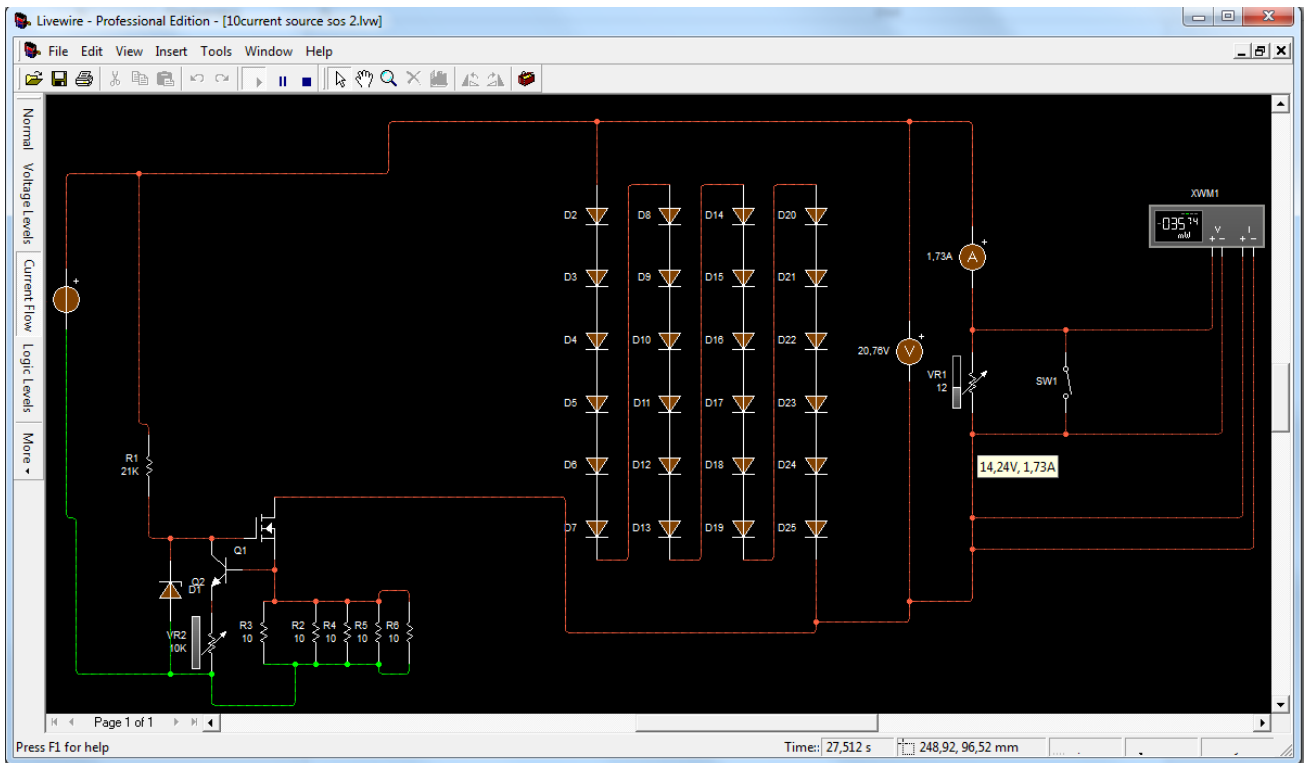
Εικόνα 6.3 : Το περιβάλλον εργασίας του LiveWire

Σχεδιάζουμε τα κυκλώματα της κατασκευής και τοποθετούμε όργανα μέτρησης για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6.4 : Σχεδίαση του κυκλώματος

Τέλος, τρέχοντας το πρόγραμμα μπορούμε να παρακολουθήσουμε τη διαδρομή του ρεύματος, καθώς και τις μεταβολές της τάσης V και έντασης I όσο αυξάνεται το φορτίο.



Εικόνα 6.5 : Εξομοίωση της λειτουργίας του κυκλώματος

6.3. Υπολογισμός ψήκτρας

Η εξομοίωση του κυκλώματος στον υπολογιστή, εκτός του ότι επιβεβαίωσε την ορθή λειτουργία του, μας βοήθησε να εντοπίσουμε την μεγάλη ισχύ που αναπτύσσεται στο Mosfet. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να προχωρήσουμε στον υπολογισμό μιας ψήκτρας η οποία θα εφαρμόζει επάνω στο mosfet, έτσι ώστε να αυξηθεί η θερμική του αντίσταση Rth.

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης, το δυναμικό που αναπτύσσεται στα άκρα του mosfet είναι 27 V ενώ το μέγιστο ρεύμα που το διαρρέει είναι 4,07 A. Έχουμε λοιπόν ανάπτυξη ισχύος - και κατά συνέπεια απαιτούμενη απαγωγή θερμότητας - $4,07 * 27 = 109,89 \text{ W}$. Από τα χαρακτηριστικά του βρίσκουμε ότι η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία για το mosfet είναι 175°C. Η τιμή αυτή αναφέρεται στη χειρότερη περίπτωση. Εάν το mosfet έφτανε πραγματικά σε τέτοιες θερμοκρασίες, ένα απλό

άγγιγμα θα ήταν πολύ οδυνηρό. Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 25°C. Η διαφορά θερμοκρασίας $T_j - T_a$ είναι λοιπόν 150°C.

Η ολική θερμική αντίσταση $R_{th\ total}$ υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$R_{th\ total} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{150}{109,89} = 1,365\ K/W$$

Το άθροισμα λοιπόν όλων των θερμικών αντιστάσεων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από αυτή τη τιμή.

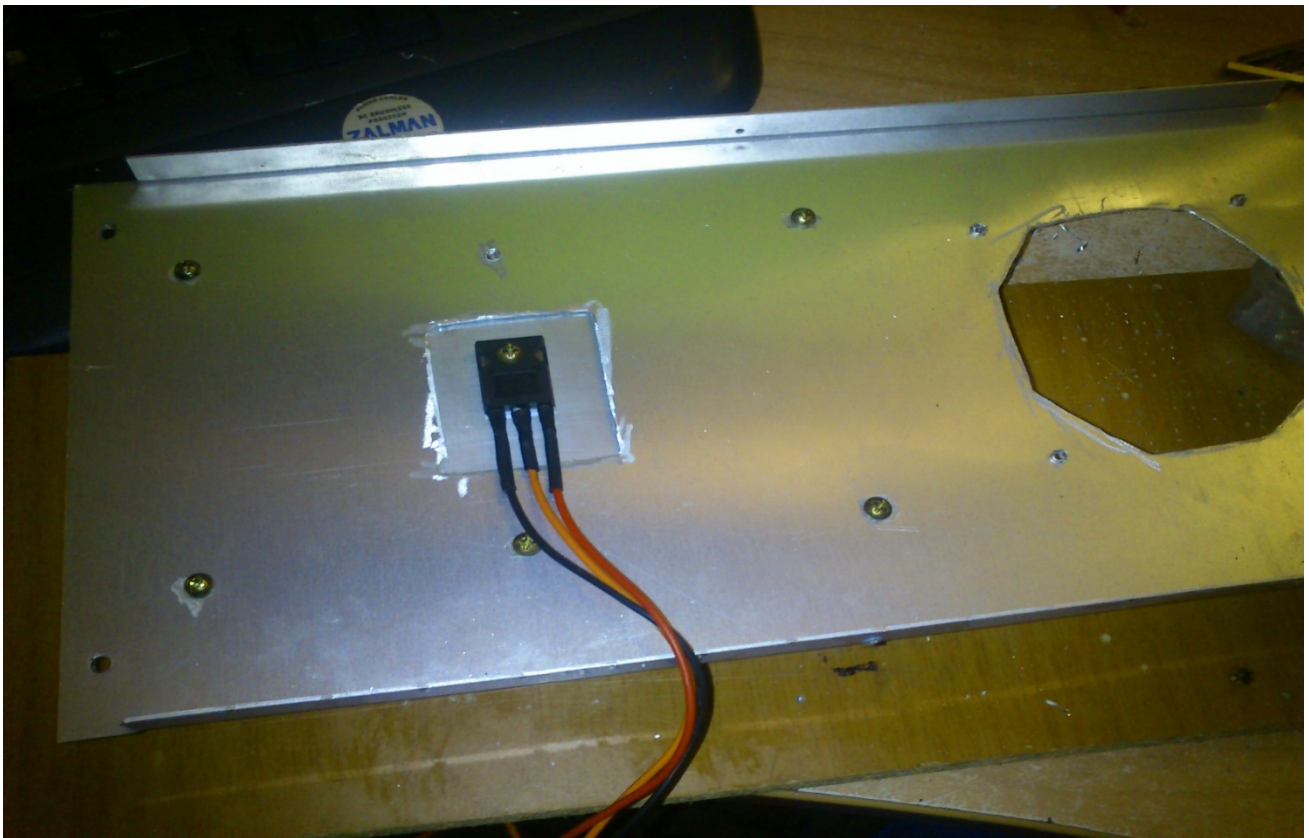
Η τιμή της θερμικής αντίστασης R_{thjc} από τα χαρακτηριστικά του mosfet είναι 0,65, ενώ η R_{thcs} είναι 0,24 K/W. Από αυτά τα δεδομένα προκύπτει ότι η τιμή της θερμικής αντίστασης της ψήκτρας $R_{th\ h-a}$ πρέπει να είναι:

$$R_{th\ h-a} = 1,365 - (0,65 + 0,24) = 0,475\ K/W$$

Αυτό σημαίνει ότι η ψήκτρα που θα χρησιμοποιήσουμε πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη σε μέγεθος, οπότε τη τοποθετήσαμε στην πλάτη του κουτιού και το mosfet βιδώθηκε επάνω της όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 6.6 : Τοποθέτηση της ψήκτρας στο σασί της κατασκευής



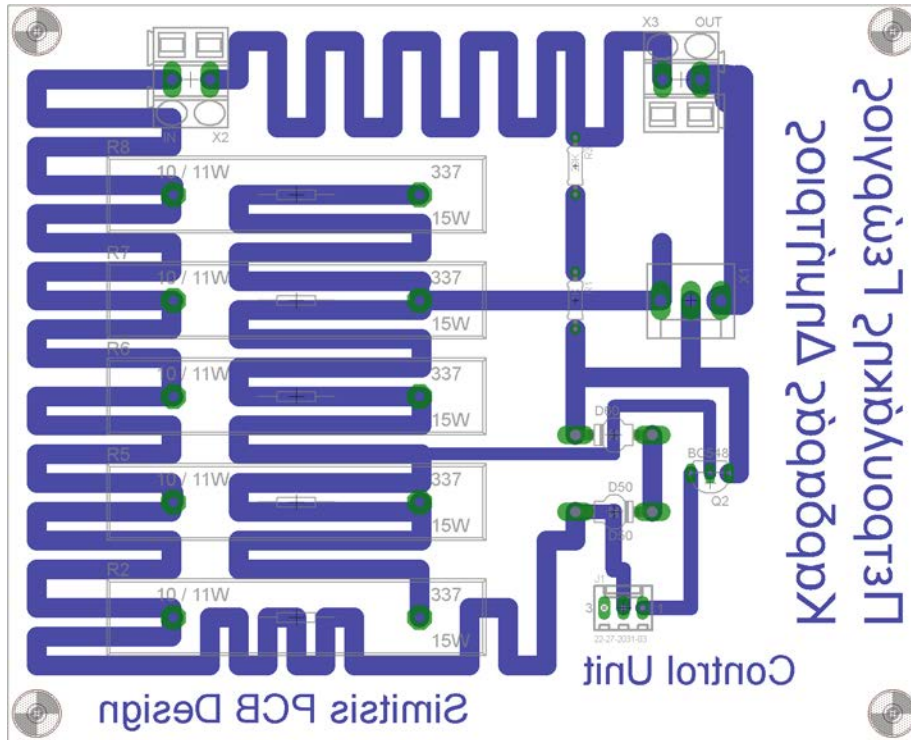
Εικόνα 6.7 : Το mosfet τοποθετημένο πάνω στη ψήκτρα

6.4. Συναρμολόγηση προσομοίωσης

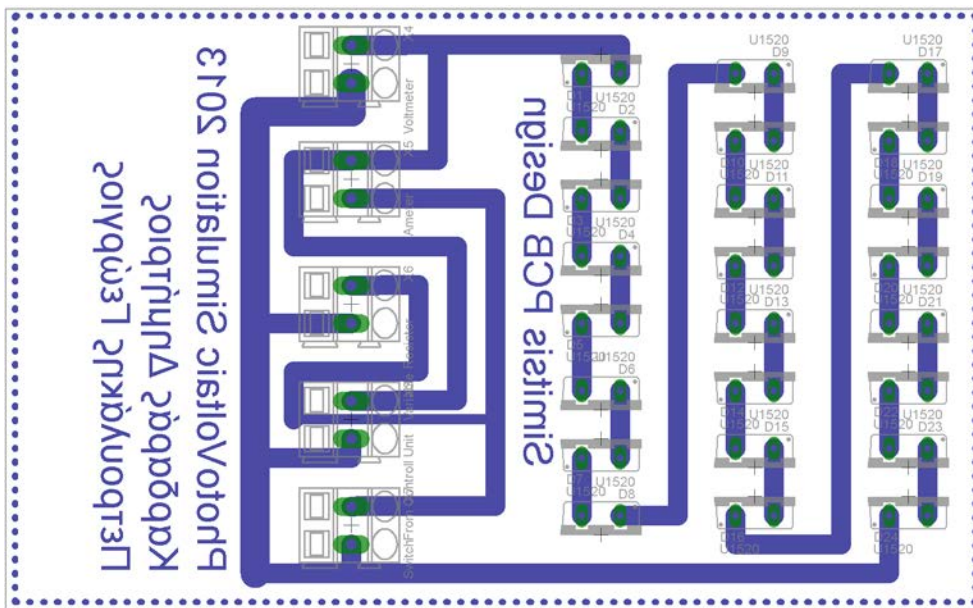
Πλέον έχουμε όλα τα δεδομένα που χρειαζόμαστε για να προχωρήσουμε στη κατασκευή του προσομοιωτή.

6.4.1. Σχεδίαση και αποτύπωση κυκλωμάτων

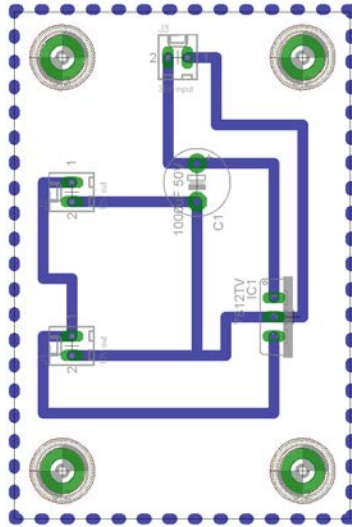
Σχεδιάσαμε τα κυκλώματα του συστήματος με το πρόγραμμα Eagle ώστε να πετύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα κατά την αποτύπωση.



Εικόνα 6.8 : Το κύκλωμα της γεννήτριας ρεύματος στο Eagle



Εικόνα 6.9 : Το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου



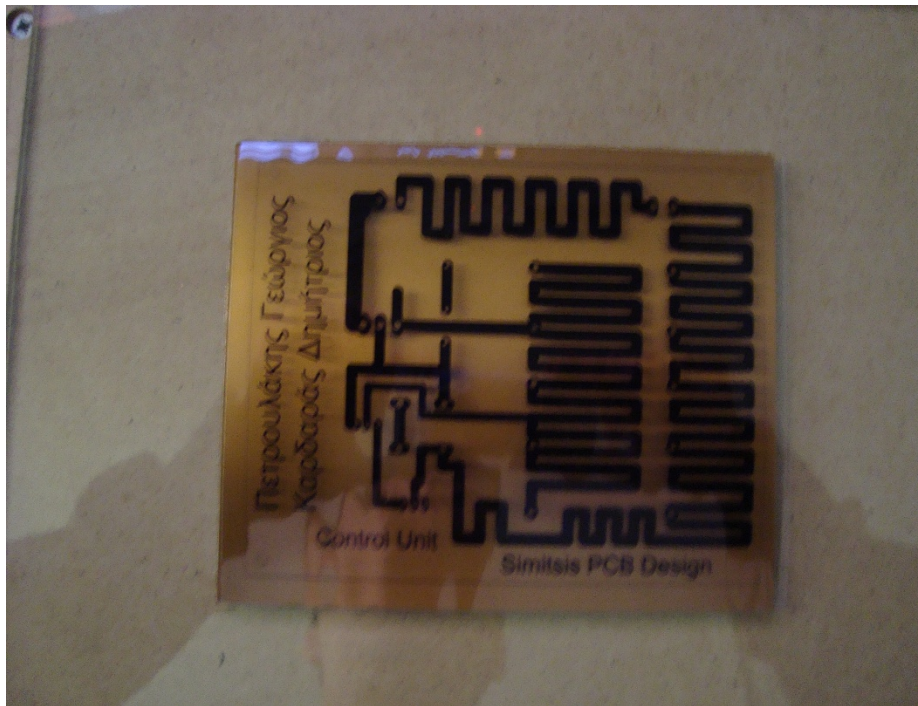
Εικόνα 6.10 : Το κύκλωμα τροφοδοσίας συστήματος ψύξης

Για αποτύπωση των κυκλωμάτων χρησιμοποιήσαμε φωτοευαίσθητες πλακέτες βακελίτη.

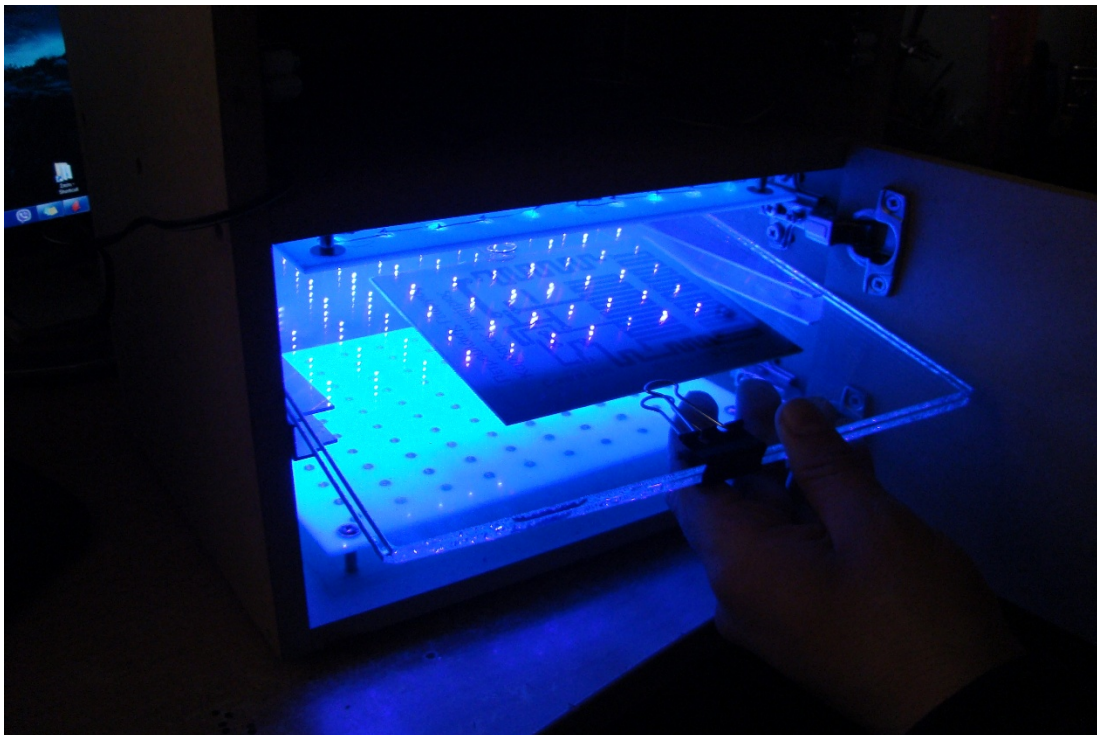
Εκτυπώσαμε τα τρία κυκλώματα του συστήματος σε διαφάνειες και στη συνέχεια τοποθετήσαμε κομμάτι της πλακέτας με το κύκλωμα στον θάλαμο αποτύπωσης υπεριώδους ακτινοβολίας για 9 λεπτά.



Εικόνα 6.11 : Φωτοευαίσθητη πλακέτα βακελίτη

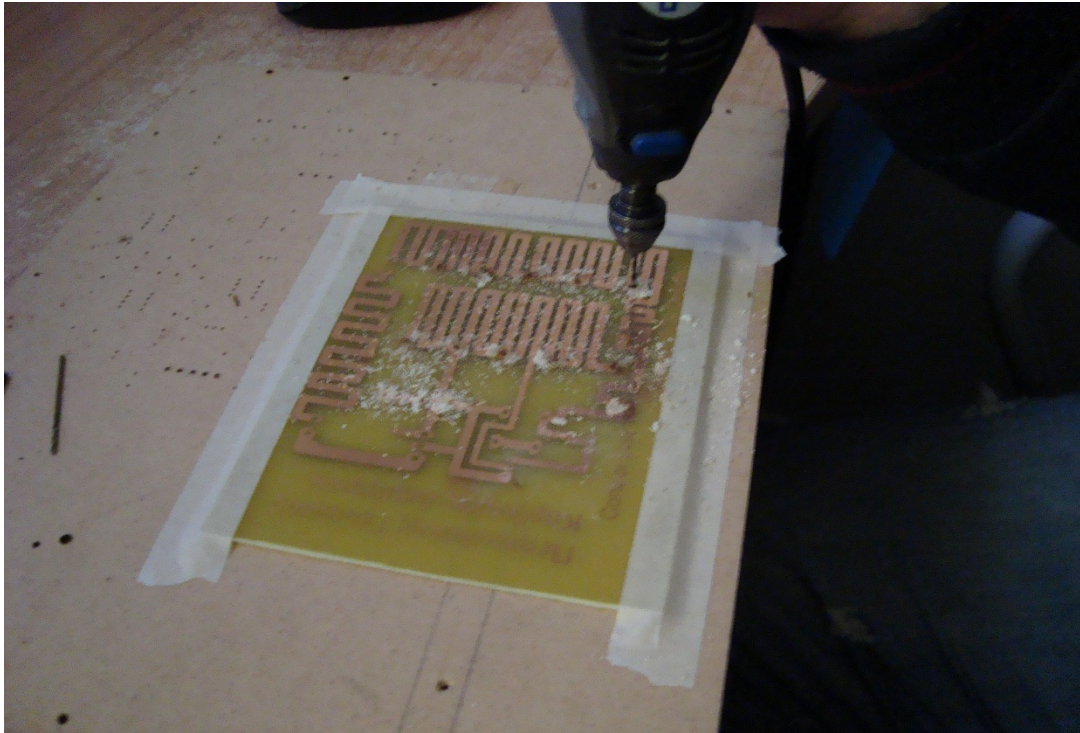


Εικόνα 6.12 : Πλακέτα με τυπωμένη διαφάνεια

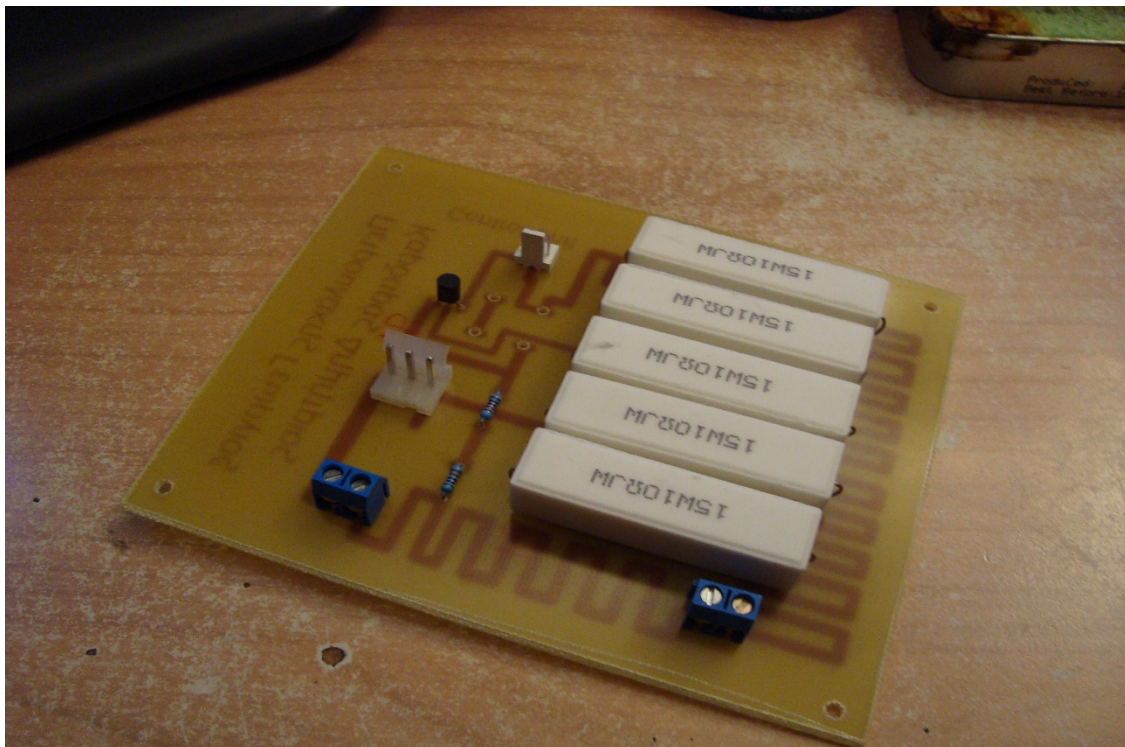


Εικόνα 6.13 : Στον θάλαμο αποτύπωσης

Μετά την αποτύπωση των κυκλωμάτων στις πλακέτες ακολουθεί το τρύπημα τους για την τοποθέτηση των υλικών.



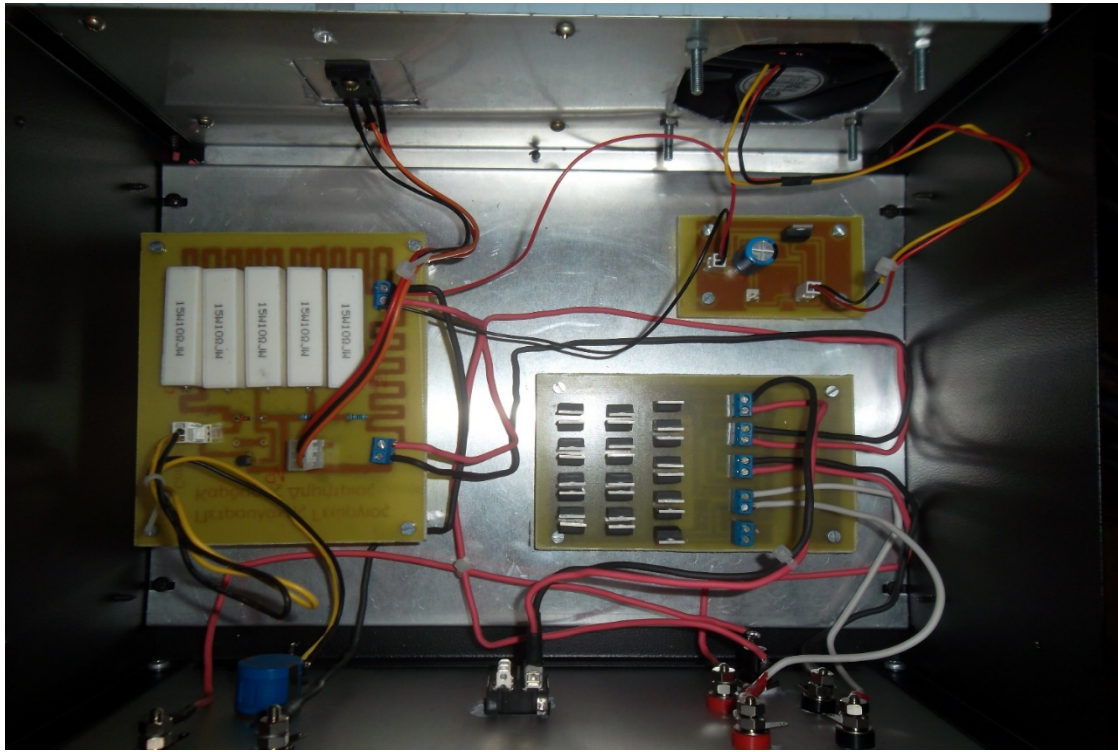
Εικόνα 6.14 : Διάνοιξη οπών για την τοποθέτηση των εξαρτημάτων



Εικόνα 6.15 : Ολοκληρωμένη πλακέτα

6.4.2. Συνδεσμολογία προσομοίωσης

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε τις πλακέτες σε θήκη και τις συνδέσαμε μεταξύ τους, ώστε να ολοκληρωθεί το κατασκευαστικό μέρος.



Εικόνα 6.16 : Το εσωτερικό της θήκης με το ολοκληρωμένο σύστημα



Εικόνα 6.17 : Η πρόσοψη της κατασκευής

Ακολουθεί πίνακας με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη συναρμολόγηση της θήκης:

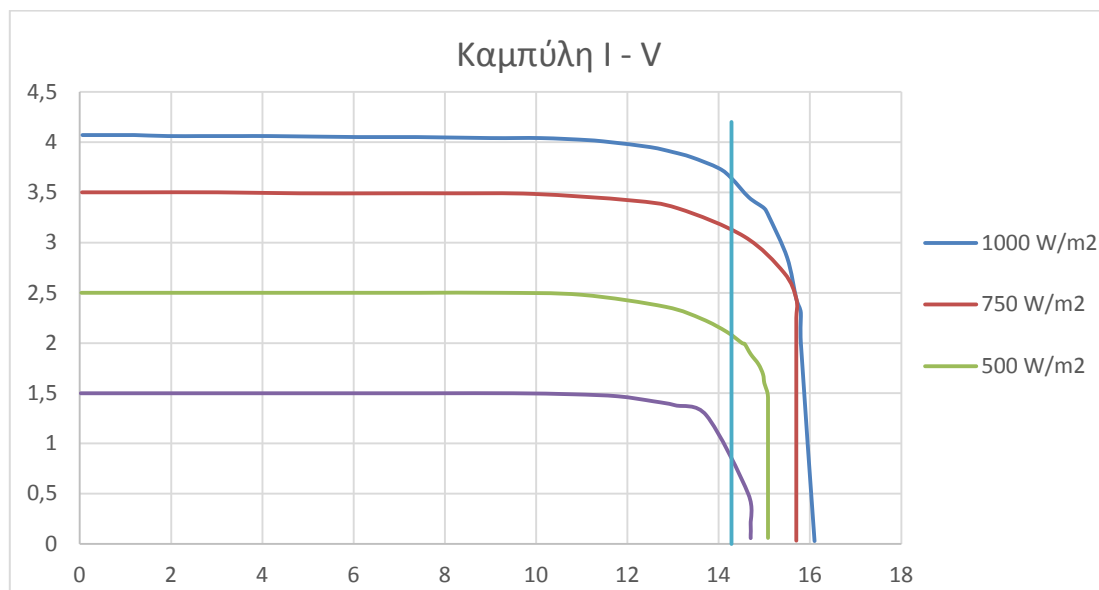
Πίνακας 1Υλικά θήκης

Υλικό	Ποσότητα
Ανεμιστήρας 12V-0,26A	2
Διακόπτης βραχυκύκλωσης 10A	1
Ακροδέκτες κόκκινοι	3
Ακροδέκτες μαύροι	3
Κnob ποτενσιόμετρου	1
Ασφαλειοθήκη	1
Ασφάλεια 6A	1

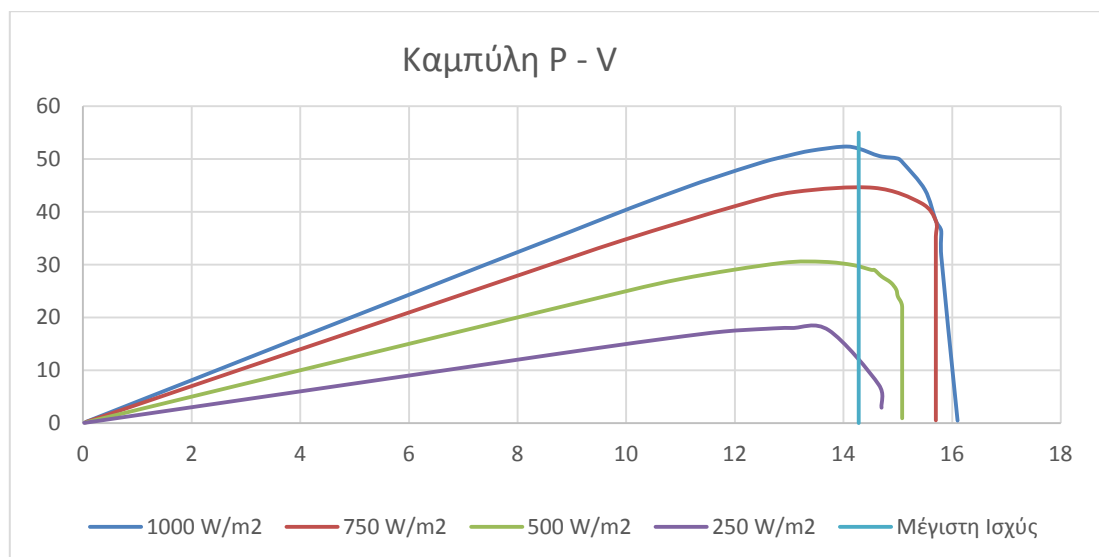
7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“Πειραματικό μέρος - μετρήσεις”

Πραγματοποιήσαμε το πειραματικό μέρος στο εργαστήριο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, έχοντας σαν φορτίο μεταβλητή αντίσταση $R = 250 \Omega$. Πήραμε τέσσερις σειρές μετρήσεων για διαφορετικές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας G και προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες ρεύματος I και ισχύος P .



Εικόνα 7.1 : Προσομοίωση καμπύλης I-V



Εικόνα 7.2 : Προσομοίωση καμπύλης P-V

Ενδεικτικά παραθέτουμε στον παρακάτω πίνακα, τη πρώτη σειρά μετρήσεων, για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G = 1000 \text{ W/m}^2$:

Πίνακας 7.1 : Μετρήσεις για ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 1000 W/m^2

I (A)	V (Volt)	P (W)
4,07	0,0568	0,231176
4,07	1,11	4,5177
4,07	1,2	4,884
4,06	1,93	7,8358
4,06	2,63	10,6778
4,06	3	12,18
4,06	3,56	14,4536
4,06	4,18	16,9708
4,05	6,1	24,705
4,05	7,38	29,889
4,04	9	36,36
4,04	10,1	40,804
4,02	11,12	44,7024
4	11,61	46,44
3,95	12,5	49,375
3,9	13	50,7
3,85	13,4	51,59
3,74	14	52,36
3,64	14,28	51,9792
3,45	14,66	50,577
3,34	15	50,1
3,26	15,1	49,226
2,85	15,5	44,175
2,44	15,7	38,308
2,3	15,8	36,34
2	15,8	31,6
0,029	16,1	0,4669

Από τις παραπάνω μετρήσεις έχουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προσομοιωμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου:

- Ισχύς εξόδου : 52 Wp
- Μέγιστη τάση εξόδου (V_{mpp}) : 14,28 V

- Μέγιστο ρεύμα εξόδου (I_{mpp}) : 3,64 A
- Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) : 16,8 V
- Ρεύμα κλειστού κυκλώματος (I_{sc}) : 4,07 A
-

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία, μειώνεται και η απόδοση του συστήματος, γι' αυτό σε πραγματικές συνθήκες επιλέγονται περιοχές με αρκετή ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και τα πλαίσια τοποθετούνται με μια κλίση τέτοια ώστε η προσπίπτουσα ακτινοβολία να είναι όσο το δυνατόν κάθετη επάνω τους.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η συγκεκριμένη προσομοίωση επιδέχεται βελτιώσεων σε αρκετά επίπεδα. Οι περισσότερες από αυτές που θα αναφέρουμε παρακάτω δεν έγιναν, λόγω έλλειψης χρόνου αλλά και οικονομικών δυσχερειών. Θα βοηθήσουν στην αυτονομία του συστήματος, αλλά και στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

1. **Αυτονομία:** Το σύστημα μπορεί να γίνει αυτόνομο (χωρίς να χρειάζεται η τροφοδοσία από εργαστηριακό εξοπλισμό), τοποθετώντας ένα τροφοδοτικό μετασχηματισμού της οικιακής τάσης 230V AC στα 35V συνεχούς τάσης που απαιτούνται για τη λειτουργία του.
2. **Ενσωματωμένα όργανα μέτρησης:** Είναι δυνατό να σχεδιάσουμε και να τοποθετήσουμε αμπερομετρικά και βολτομετρικά όργανα μέτρησης εντός της κατασκευής, τις μετρήσεις από τα οποία θα τις λαμβάνουμε μέσω οθόνης LCD στην πρόσοψη του συστήματος.
3. **Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων:** Τέλος λόγω έλλειψης χρόνου δεν καταφέραμε να ολοκληρώσουμε τη σύνδεση στον ακροδέκτη που υπάρχει ήδη στην κατασκευή για τη τοποθέτηση παλμογράφου. Αυτό θα μας βοηθήσει να έχουμε άμεση εικόνα της χαρακτηριστικής του ρεύματος και των μεταβολών της για διάφορα μεγέθη φορτίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Φωτοβολταϊκά συστήματα – Ι.Ε. Φραγκιαδάκης
2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Τόμος Β' – Πολυεκδοτική-Αναπτυξιακή
3. Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων – Διπλωματική εργασία Στέφανου Ε. Τετελένης (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο)
4. Ενέργεια και περιβάλλον – Ν. Ανδρίτσος
5. Εξομοίωση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης – Διπλωματική εργασία Δώδας Σοφίας (Πανεπιστήμιο Πατρών)
6. <http://epas-amarous.att.sch.gr/daidalosapospasmata.htm>