



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**

**Ανάπτυξη και μελέτη υβριδικού φωτοβολταϊκού – θερμοηλεκτρικού  
συστήματος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Γεράσιμος Δ. Βουτσινάς**

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

**Ανάπτυξη και μελέτη υβριδικού φωτοβολταϊκού – θερμοηλεκτρικού  
συστήματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεράσιμος Δ. Βουτσινάς

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....

.....

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Άνθιμος Ξενίδης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Νυμφοδώρα Παπασιώπη  
Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον Καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου για την ευκαιρία που μου έδωσε και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, ώστε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την στήριξη και καθοδήγησή του σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα Δημήτριο Κοσσυβάκη για την πολύτιμη βοήθειά και στήριξη που μου παρείχε, καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων αλλά και για την τελειοποίηση του τελικού κειμένου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, κ. Άνθιμο Ξενίδη και κα Νυμφοδώρα Παπασιώπη, για το χρόνο και τη βοήθεια που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια της φοίτησής μου.

Τέλος, θα πρέπει να ευχαριστήσω την εταιρεία Solar Cells Hellas A.E. που παρείχε τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για την ενσωμάτωση συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο σύνολο των παγκόσμιων υποδομών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι στις μέρες μας πιο εμφανής από ποτέ εξαιτίας των συνεχιζόμενων φαινομένων της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της κλιματικής αλλαγής. Στην κατεύθυνση αυτή τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια αξιόπιστη και πλέον σχετικά οικονομική λύση. Παρά όμως την ευρεία διείσδυσή τους στις ενεργειακές αγορές και τις συνεχείς βελτιώσεις που έχουν συντελεστεί σε ερευνητικό επίπεδο, είναι γεγονός ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων παραμένει ακόμα σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή τους είναι η αδυναμία πλήρους εκμετάλλευσης του ηλιακού φάσματος καθώς και η σημαντική πτώση απόδοσης που παρουσιάζουν με την άνοδο της θερμοκρασίας τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε πειραματικά η πιθανότητα ενσωμάτωσης θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε φωτοβολταϊκές διατάξεις με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του υβριδικού, πλέον, συστήματος. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν δύο υβριδικές διατάξεις και εκτελέστηκαν πειράματα τόσο σε εξωτερικό όσο και σε εργαστηριακό περιβάλλον.





## Πίνακας περιεχομένων

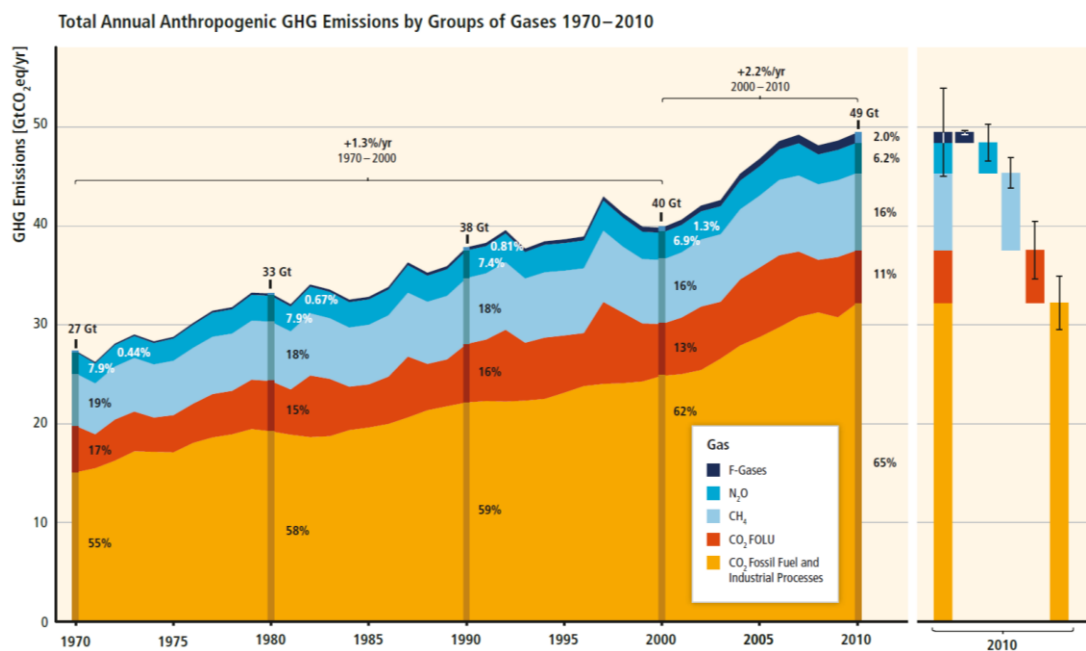
1	ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	1
1.1	Οι επιβλαβείς εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.....	1
1.2	Ανάλυση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα.....	3
1.2.1	Μεταφορές.....	3
1.2.2	Βιομηχανικός τομέας .....	4
1.2.3	Κτιριακός τομέας.....	5
1.2.4	Αγροτικός τομέας.....	5
1.3	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	6
1.3.1	Βιοενέργεια .....	7
1.3.2	Ηλιοθερμία.....	8
1.3.3	Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	9
1.3.4	Γεωθερμικά συστήματα .....	10
1.3.5	Υδροηλεκτρικά συστήματα .....	10
1.3.6	Αιολικά συστήματα .....	11
2	ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	12
2.1	Γενικά στοιχεία.....	12
2.2	Τεχνολογίες εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας .....	14
2.2.1	Εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής .....	15
2.2.2	Εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης.....	18
3	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ .....	23
3.1	Φωτοβολταϊκά συστήματα .....	23
3.2	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	25
3.3	Διαθέσιμες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	26
3.3.1	Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου .....	26
3.3.2	Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου .....	27
3.3.3	Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου .....	28
3.3.4	Πολυμερή Φ/Β στοιχεία.....	28
3.3.5	Φ/Β στοιχεία πολλαπλών επαφών (multi – junction).....	29
3.3.6	Φ/Β στοιχεία κβαντικής κηλίδας (quantum – dot) .....	30
3.4	Απόδοση φωτοβολταϊκών διατάξεων.....	31
3.4.1	Παράμετροι απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	31

3.4.2	Μοντέλα πρόβλεψης απόδοσης.....	36
3.4.3	Επιπτώσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του τύπου εγκατάστασης στην απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων .....	37
3.5	Τεχνικές Αύξησης Παραγόμενης Ισχύος.....	40
3.5.1	Συγκεντρωτικά Φ/Β συστήματα.....	41
3.5.2	Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμικά συστήματα .....	43
4	ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	46
4.1	Γενικά στοιχεία.....	46
4.2	Θερμοηλεκτρικά υλικά.....	46
4.3	Ανάλυση λειτουργίας θερμοηλεκτρικών διατάξεων .....	47
4.3.1	Λειτουργία Peltier .....	47
4.3.2	Λειτουργία Seebeck .....	49
4.4	Μαθηματική περιγραφή λειτουργίας θερμοηλεκτρικών γεννητριών.....	50
5	Υβριδικά Φωτοβολταϊκά – Θερμοηλεκτρικά Συστήματα .....	52
5.1	Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμοηλεκτρικά συστήματα με διαχωρισμό του ηλιακού φάσματος.....	54
5.2	Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμοηλεκτρικά συστήματα παράλληλης διάταξης	55
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	57
6.1	Κατασκευή των πειραματικών διατάξεων .....	57
6.1.1	Πειραματική διάταξη με ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικού σε φωτοβολταϊκό πάνελ (μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο).....	57
6.1.2	Πειραματική διάταξη με ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικού σε φωτοβολταϊκή κυψέλη (μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον) .....	59
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	63
7.1	Μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον .....	63
7.2	Μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον.....	66
7.2.1	Διάταξη με ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας GM 200 – 71 – 14 – 16	66
7.2.2	Διάταξη με ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής συσκευής τύπου Peltier	68
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	71
9	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ .....	72

# 1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1 Οι επιβλαβείς εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου

Είναι γεγονός ότι η επί πολλές δεκαετίες αλόγιστη εκμετάλλευση των ενεργειακών και όχι μόνο πηγών του πλανήτη έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε μια σχεδόν ανεξέλεγκτη κλιματική αλλαγή, με σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το φυσικό οικοσύστημα. Το σύνολο των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παρουσιάζει συνεχιζόμενη αύξηση τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες (Σχήμα 1), ενώ το πρόβλημα έχει καταστεί ακόμα πιο έντονο μετά το 2000. Στα πλαίσια αυτά έχει γίνει πλέον κατανοητό ότι για την επιβράδυνση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση. Η μετρίαση εξάλλου του συνόλου των επιβλαβών επιπτώσεων αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου πολιτικής για την σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδα που θεωρούνται ασφαλή για τον ανθρώπινο οργανισμό.



Σχήμα 1: Μεταβολή των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το χρονικό διάστημα 1970 – 2010

Η έκταση των επιπτώσεων του φαινομένου έχει καταστήσει σαφές ότι πρόκειται για ένα κοινό παγκόσμιο πρόβλημα, το οποίο προϋποθέτει τη διεθνή συνεργασία σε συνδυασμό με τοπικές, εθνικές και περιφερειακές πολιτικές σε πολλά διαφορετικά ζητήματα προκειμένου να φτάσουμε στην επίλυσή του. Η διεθνής συνεργασία για την κλιματική αλλαγή σαφώς και εγείρει και ηθικά ζητήματα, συμπεριλαμβανομένου του ισότιμου επιμερισμού της προσπάθειας στα διάφορα κράτη.

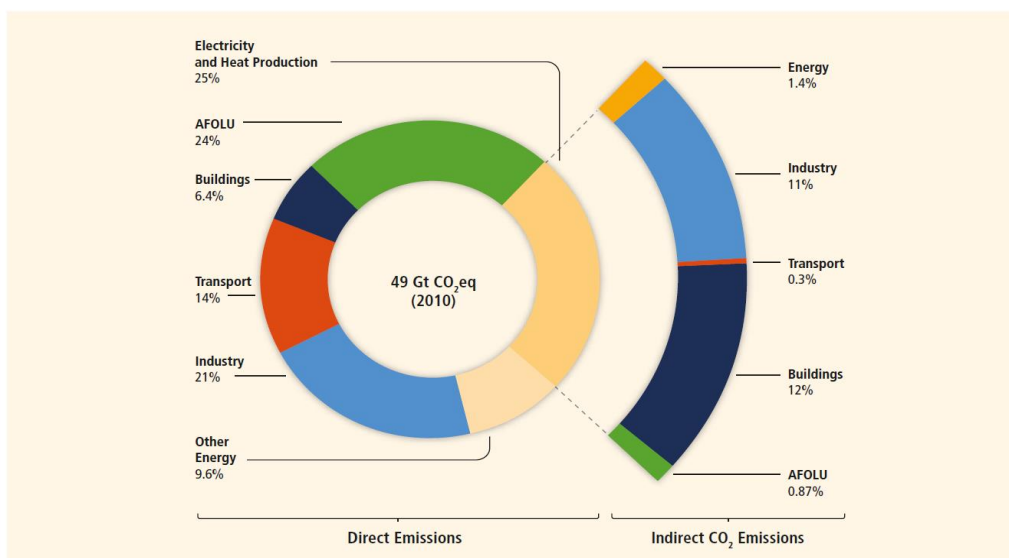
Σε παγκόσμιο επίπεδο, η οικονομική και πληθυσμιακή ανάπτυξη συνεχίζουν να αποτελούν τις σημαντικότερες κινητήριες δυνάμεις της αύξησης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, που

προέρχεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η αύξηση του πληθυσμού μεταξύ των ετών 2000 και 2010 παρέμεινε σχεδόν ταυτόσημη με τις τρεις προηγούμενες δεκαετίες, ενώ αντιθέτως η συμβολή της οικονομικής ανάπτυξης έχει αυξηθεί κατακόρυφα. Χωρίς επιπλέον προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου πέραν των ήδη υφιστάμενων μέτρων, η αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών αναμένεται να συνεχιστεί με τους ίδιους ρυθμούς, τόσο λόγω της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και όσο και λόγω της έντασης της οικονομικής και βιομηχανικής δραστηριότητας.

Ο τομέας της παραγωγής ενέργειας αποτελεί αναμφισβήτητα το μεγαλύτερο ρυπαντή σε ότι αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι ετήσιες εκπομπές από τον παγκόσμιο κλάδο παροχής ενέργειας αυξήθηκαν ταχύτερα την τελευταία δεκαετία σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Ο ρυθμός αύξησης εκπομπών εκτινάχτηκε από 1,7% ανά έτος την δεκαετία 1990 – 2000 σε 3,1% ανά έτος την επόμενη δεκαετία 2000 – 2010 [1]. Οι κύριοι παράγοντες που συνέβαλαν σε αυτή την τάση είναι η αυξανόμενη ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών και το αυξανόμενο μερίδιο του άνθρακα στο παγκόσμιο μείγμα καυσίμων. Ο τομέας της παροχής ενέργειας περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες (εξαγωγή ορυκτών υλών, μετατροπή, αποθήκευση, μετάδοση και διανομή), ενώ οι κυριότεροι τομείς τελικής χρήσης είναι οι μεταφορές, ο βιομηχανικός τομέας, ο κτιριακός τομέας και ο αγροτικός τομέας (Σχήμα 2).

Οι επιλογές για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνουν τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, την ελάττωση των εκπομπών κατά την εξόρυξη καυσίμων, τη βελτίωση των διαδικασιών μετατροπής της ενέργειας στους σταθμούς παραγωγής καθώς και της απόδοσης και λειτουργίας των δικτύων μεταφοράς και διανομής. Σε κάθε περίπτωση όμως έχει γίνει κατανοητή η ανάγκη απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και η στροφή προς τεχνολογίες χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών (ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα κλπ.).

Greenhouse Gas Emissions by Economic Sectors



**Σχήμα 2: Σύνολο ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά οικονομικό τομέα**

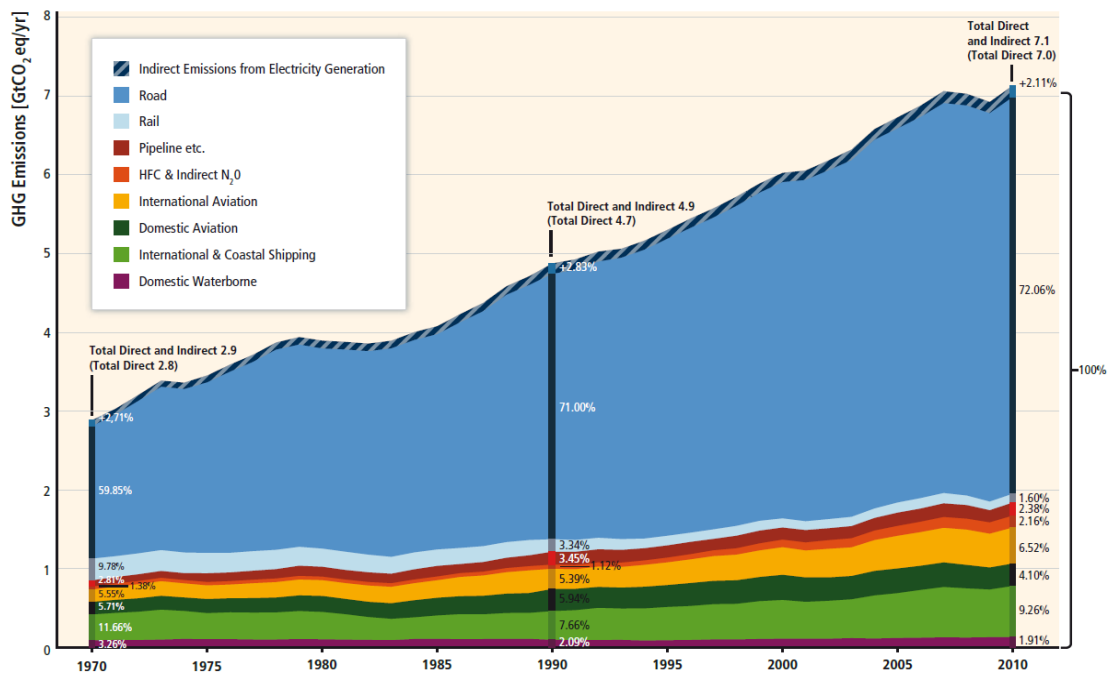
## 1.2 Ανάλυση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα

### 1.2.1 Μεταφορές

Τα τελευταία χρόνια οι προερχόμενες από τον τομέα των παγκόσμιων μεταφορών εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έχουν αυξηθεί, παρά την χρήση πιο αποδοτικών οχημάτων (οδικές, σιδηροδρομικές, σκάφη και αεροσκάφη) και τις πολιτικές αντιμετώπισης που υιοθετούνται. Οι οδικές μεταφορές κυριαρχούν στις συνολικές εκπομπές, αλλά και οι αερομεταφορές διαδραματίζουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο, με αυξητικές τάσεις για το μέλλον. Ο κλάδος των μεταφορών αντιπροσωπεύει το 27% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, εκ των οποίων το 40% προέρχεται από τις αστικές μεταφορές. Κάθε προσπάθεια μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων θα είναι οπωσδήποτε ένα δύσκολο έργο, δεδομένης της αναπόφευκτης αύξησης της ζήτησης και των μη ανακτήσιμων δαπανών των αποθεμάτων (κυρίως αεροσκάφη, τρένα, και τα μεγάλα πλοία) και των υποδομών. Χωρίς επιθετικές και σταθερές πολιτικές για τη μείωση των εκπομπών στον συγκεκριμένο τομέα, δεν θα ήταν απίθανο σενάριο ο υπερδιπλασιασμός των εκπομπών CO<sub>2</sub> μέχρι το 2050 [1].

Οι άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων μπορεί να μειωθεί με:

- Στροφή προς συστήματα μεταφοράς επιβατών και εμπορευμάτων που αξιοποιούν καύσιμα χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των οχημάτων
- Αποφεύγοντας διαδρομές (όπου αυτό είναι δυνατόν)
- Επενδύσεις σε πιο αποδοτικές υποδομές.

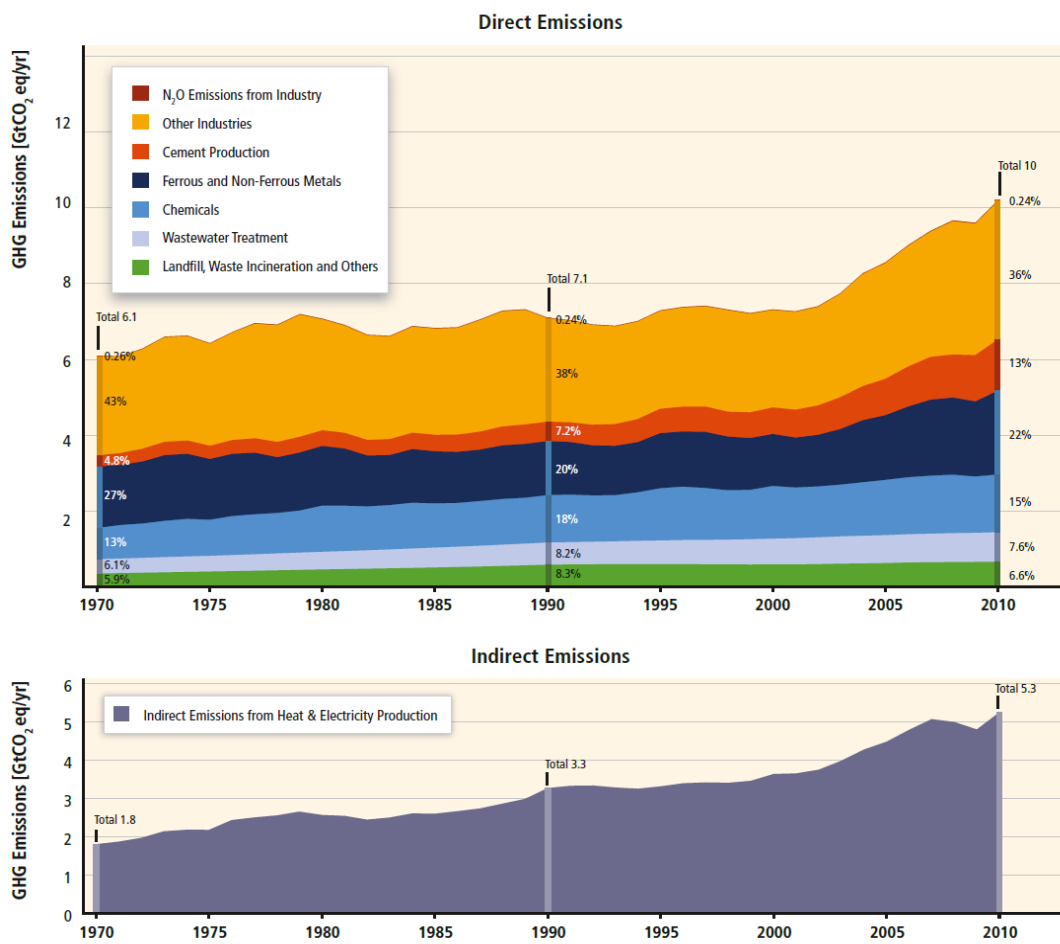


Σχήμα 3: Αύξηση άμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών ανά τον πλανήτη από το 1970 έως το 2010

## 1.2.2 Βιομηχανικός τομέας

Το 2010, ο τομέας της βιομηχανίας αντιπροσώπευε περίπου το 28% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω βιομηχανικής δραστηριότητας ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του κτιριακού τομέα και του τομέα των μεταφορών, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 30% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2010. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από τη βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων των άμεσων και έμμεσων εκπομπών προβλέπεται να αυξηθούν από 13 GtCO<sub>2</sub> ανά έτος το 2010 σε 20 – 24 GtCO<sub>2</sub> ανά έτος το 2050.

Μια σημαντική μείωση των εκπομπών στον τομέα της βιομηχανίας θα απαιτήσει την ανάπτυξη μιας ευρείας σειράς αποτελεσματικών επιλογών, που υπερβαίνουν το επίπεδο απλών μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Στο πλαίσιο της συνεχιζόμενης αύξησης της βιομηχανικής δραστηριότητας, απαιτούνται παράλληλες προσπάθειες, όπως η ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών και των προϊόντων, η αύξηση της αποδοτικότητας των προϊόντων και των υπηρεσιών, ριζικές καινοτομίες σε όλα τα στάδια των διαδικασιών παραγωγής καθώς και μείωση στη ζήτηση των υπηρεσιών. Με την υιοθέτηση τέτοιων πολιτικών εκτιμάται ότι είναι δυνατή συνολική εξοικονόμηση της τελικής ενεργειακής ζήτησης στα επίπεδα του 30% έως το 2050 [1].

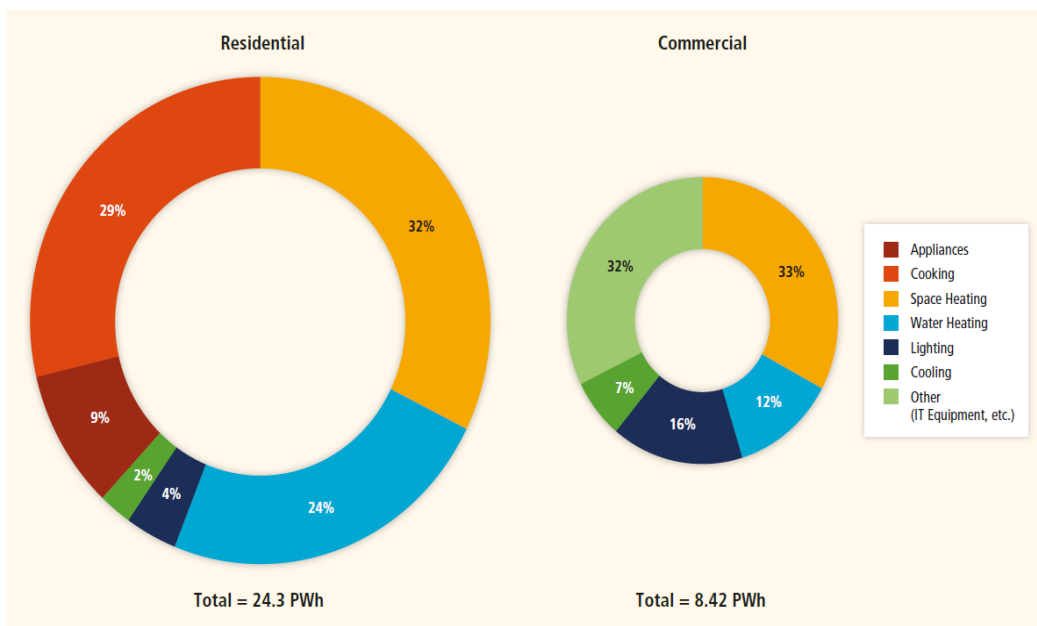


**Σχήμα 4: Σύνολο των άμεσων και έμμεσων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των αποβλήτων και των λυμάτων της παγκόσμιας βιομηχανίας**

### 1.2.3 Κτιριακός τομέας

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των κτηρίων έχουν στις μέρες μας υπερδιπλασιαστεί συγκριτικά με το 1970, αντιπροσωπεύοντας το 19% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά το 2010, συμπεριλαμβανομένων των έμμεσων εκπομπών από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο τομέας των κτηρίων αντιπροσωπεύει το 32% της συνολικής παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και περίπου το 1/3 των εκπομπών μαύρου άνθρακα. Οι άμεσες και έμμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub> από τα κτίρια προβλέπεται να αυξηθεί από 8,8 GtCO<sub>2</sub> ανά έτος το 2010 σε 13-17 GtCO<sub>2</sub> ανά έτος το 2050 [1].

Με εφαρμογή κατάλληλων πολιτικών είναι δυνατόν να συγκρατηθεί η παγκόσμια χρήση ενέργειας του κτιριακού τομέα σε σταθερά επίπεδα ή και να μειωθεί σημαντικά. Λεπτομερείς μελέτες σχετικά με τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στους διάφορους τομείς καταδεικνύουν ότι ο κτιριακός τομέας διαθέτει αναμφισβήτητα το μεγαλύτερο δυναμικό εξοικονόμησης. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται δυνατότητα εξοικονόμησης της τάξης του 70% σε ότι αφορά την τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, που αποτελούν και τις πλέον ενεργοβόρες δραστηριότητες.

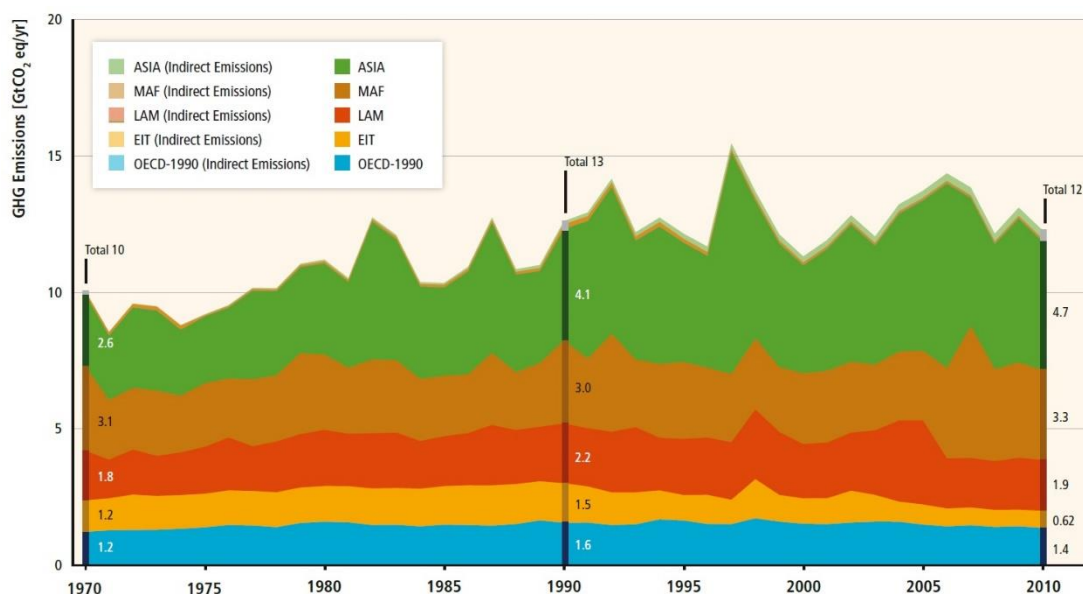


**Σχήμα 5: Ενεργειακή κατανάλωση κτηρίων του οικιακού και τριτογενή τομέα για το έτος 2010**

### 1.2.4 Αγροτικός τομέας

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η μεταβολή των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εξαιτίας των δραστηριοτήτων του αγροτικού τομέα. Στη δραστηριότητα του αγροτικού τομέα οφείλεται σήμερα το 25% περίπου των ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές αυτές προκύπτουν κυρίως από την αποψίλωση των δασών και την καύση βιομάζας για σκοπούς άλλους πέραν της παραγωγής θερμικής ενέργειας. Η

καμπύλη του Σχήματος 6 εμφανίζει επίσης μια αυξητική τάση, σε μικρότερο όμως βαθμό συγκρινόμενη με τη μεταβολή που παρατηρείται σε άλλους τομείς [1].



**Σχήμα 6: Εξέλιξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που οφείλονται στη δραστηριότητα του αγροτικού τομέα (1970 – 2010)**

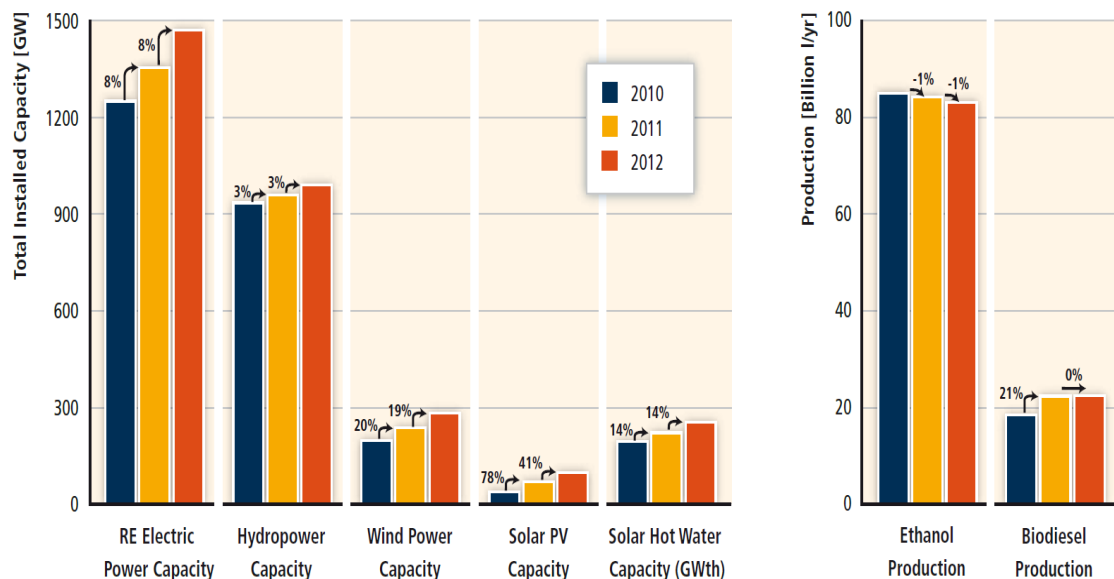
### 1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Από τα παραπάνω στοιχεία γίνεται προφανές ότι απαιτούνται άμεσα μέτρα για τον περιορισμό και την εξάλειψη των επιβλαβών επιπτώσεων της ανθρωπογενούς δραστηριότητας στο περιβάλλον, με στόχο την όσο το δυνατόν πιο άμεση ανάσχεση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Στα πλαίσια αυτά, τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μια στροφή του ενδιαφέροντος προς τις τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), η οποία έχει συνοδευτεί από πολλές παράλληλες υποστηρικτικές πολιτικές με στόχο την ενίσχυση της διείσδυσής τους στον τομέα κυρίως της ηλεκτροπαραγωγής.

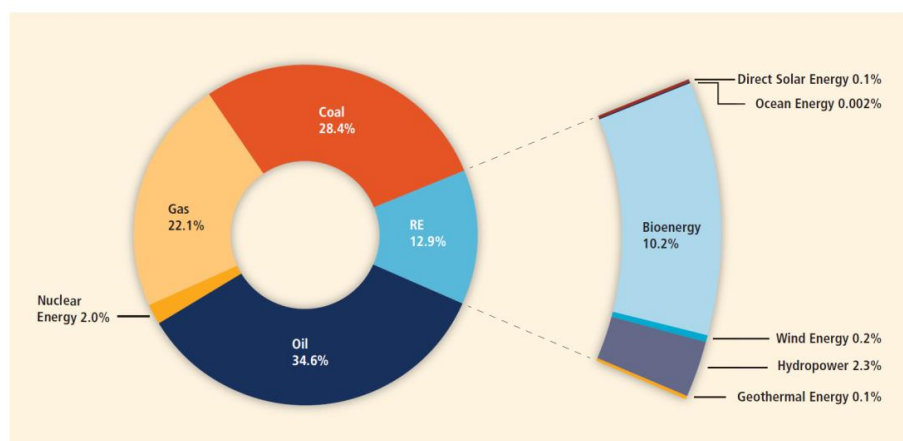
Ως ανανεώσιμη ενέργεια θεωρείται η ενέργεια οποιασδήποτε μορφής που αναπληρώνεται μέσα από φυσικές διεργασίες σε ένα ποσοστό που ισούται ή υπερβαίνει το ποσοστό της χρήσης της. Μια ανανεώσιμη πηγή λαμβάνεται από τη συνεχιζόμενη ή επαναλαμβανόμενη ροή ενέργειας που εκτελείται στο φυσικό περιβάλλον και περιλαμβάνει πόρους όπως η βιομάζα, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η παλίρροια και τα κύματα, η θερμική ενέργεια των ωκεανών και η αιολική ενέργεια.

Παρά τα προφανή πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε., η διείσδυσή τους στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και στις περισσότερες περιπτώσεις κάτω από τους επιθυμητούς στόχους (Σχήμα 8). Στις επόμενες ενότητες γίνεται μια σύντομη αναφορά στις διαφορετικές μορφές ενέργειας που μπορούν να αξιοποιηθούν και παρατίθενται ενδεικτικά στοιχεία σε ότι αφορά τη διείσδυσή τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.





**Σχήμα 7: Αύξηση εγκατεστημένης ισχύος των κυριότερων τεχνολογιών Α.Π.Ε. για την περίοδο 2010 – 2012**

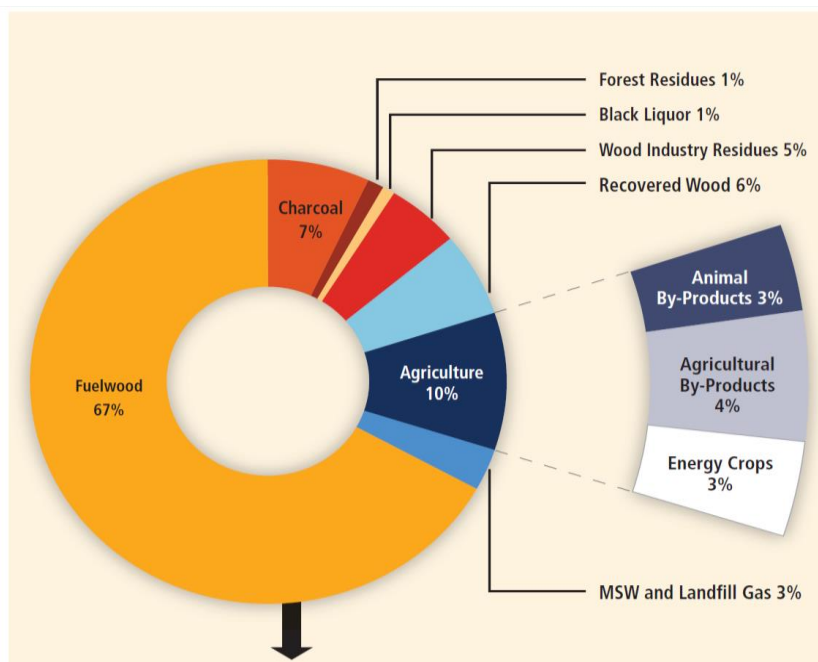


**Σχήμα 8: Μεριδία των διαφορετικών πηγών ενέργειας στη συνολική παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας για το έτος 2008**

### 1.3.1 Βιοενέργεια

Η βιοενέργεια είναι ενσωματωμένη με πολλούς και πολύπλοκους τρόπους στα παγκόσμια συστήματα βιομάζας για τρόφιμα, ζωοτροφές, παραγωγή ινών και στα δασικά προϊόντα, καθώς και στα απόβλητα αλλά και στη διαχείριση των υπολειμμάτων. Η βιοενέργεια παίζει κρίσιμο ρόλο στις καθημερινές συνθήκες διαβίωσης δισεκατομμυρίων ανθρώπων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σημαντική επέκταση της παραγωγής θα απαιτήσει πολύ προσεκτική χρήση της γης και των υδάτων, ουσιαστικές βελτιώσεις στις τεχνολογίες μετατροπής και μια βαθιά κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της κοινωνίας, της ενέργειας και του περιβάλλοντος. Το 2008 η βιομάζα παρείχε περίπου το 10% της παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγής ενέργειας. Η χρήση της βιομάζας ως πηγής θερμικής

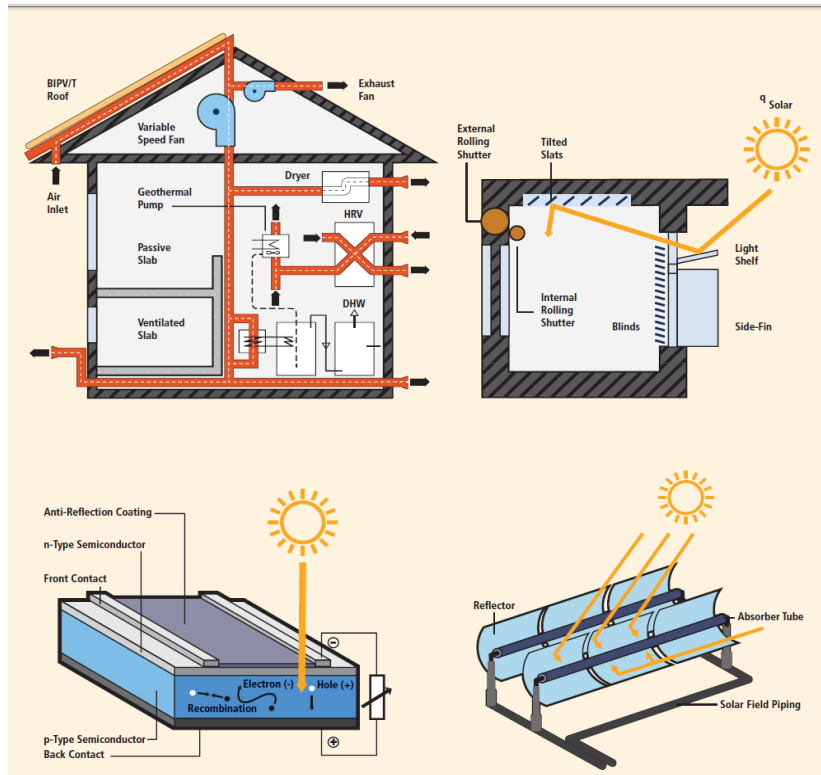
ή ηλεκτρικής ενέργειας είναι για την ώρα περισσότερο διαδεδομένη στις αναπτυσσόμενες χώρες.



**Σχήμα 9: Ποσοστά χρήσης των πρωτογενών πηγών βιομάζας που χρησιμοποιούνται για ενεργειακούς σκοπούς**

### 1.3.2 Ηλιοθερμία

Το βασικό συστατικό στοιχείο ενός ηλιοθερμικού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης. Πρόκειται στην ουσία για μια επίπεδη πλάκα από χαλκό ή αλουμίνιο που συνήθως φέρει επίστρωση που χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα και πολύ συχνά χαμηλή εκπεψιμότητα. Μέσα στο σώμα της πλάκας δημιουργούνται κανάλια διέλευσης, μέσω των οποίων διέρχεται το υγρό που πρόκειται να θερμανθεί. Η συνηθέστερη μορφή των συστημάτων αυτών είναι οι επίπεδοι συλλέκτες που αξιοποιούνται συνήθως για τη θέρμανση του νερού για οικιακή και εμπορική χρήση. Πιο σπάνια απαντώνται συστήματα που ενσωματώνουν κάποια τεχνολογία συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τεχνολογίες ηλιακής ψύξης (χρήση ηλιακών συλλεκτών για την παροχή θερμότητας για την οδήγηση ενός κύκλου ψύξης με απορρόφηση) έχουν επίσης προταθεί και θεωρούνται πλέον ώριμη τεχνολογία. Πολύ συχνά οι συλλέκτες συνδυάζονται με μονάδες αποθήκευσης θερμότητας (δεξαμενές νερού) για τη χρήση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας/νύχτας ή σε μικρά διαστήματα συννεφιάς. Σε συνδυασμό και με άλλες πηγές ενέργειας τα ηλιοθερμικά συστήματα μπορούν να παρέχουν 40-80% της ζήτησης για θερμική ενέργεια στα κτήρια. Η συνολική παγκόσμια παραγωγή ενέργειας των ηλιοθερμικών έφτασε το 2009 τα 31GW [2].



**Σχήμα 10: Παραδείγματα των συνηθέστερων ηλιοθερμικών συστημάτων σε κτήρια**

### 1.3.3 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

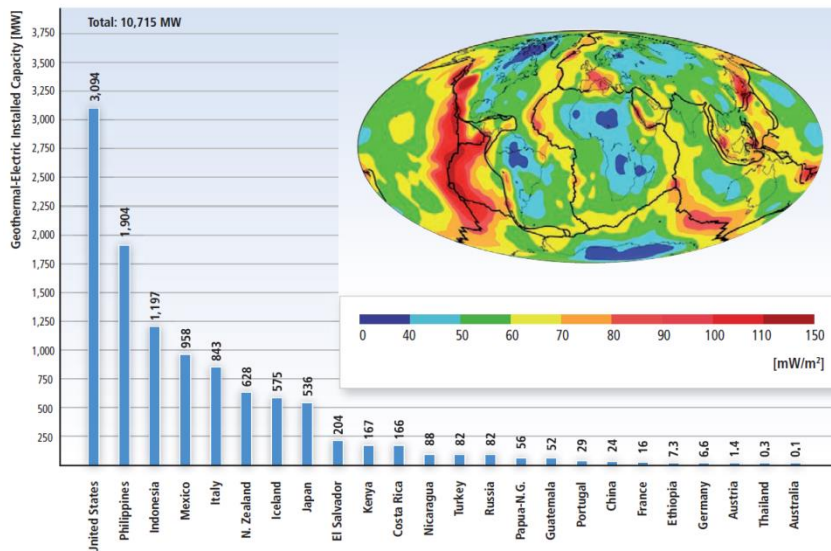
Μια αναλυτικότερη περιγραφή για τα φωτοβολταϊκά συστήματα υπάρχει σε επόμενη ενότητα λόγω του ότι αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για ημιαγωγικά υλικά που έχουν την ιδιότητα να παράγουν ισχύ όταν διεγείρονται από κάποιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα (π.χ. ηλιακό φως). Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις απαντώνται τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη κλίμακα. Για την αύξηση της ισχύος εξόδου των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν φακοί ή κάτοπτρα που εστιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της κυψέλης με αποτέλεσμα την αύξηση της προσπίπτουσας στο φωτοβολταϊκό στοιχείο ακτινοβολίας. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών έως το 2013 ήταν περίπου 140 GW [2].



**Σχήμα 11: Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας**

### 1.3.4 Γεωθερμικά συστήματα

Η γεωθερμική τεχνολογία εκμεταλλεύεται τη θερμική ενέργεια που πηγάζει από το εσωτερικό της γης και είναι αποθηκευμένη σε μορφή ατμού ή υγρού. Οι γεωθερμικές πηγές χρησιμοποιούνται για να παράγουν ενέργεια σε θερμικές μονάδες παραγωγής ή σε άλλες αγροτοβιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν θερμότητα. Τα τελευταία χρόνια η γεωθερμία αξιοποιείται επίσης και σε εφαρμογές συμπαραγωγής. Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς γεωθερμικών συστημάτων ανερχόταν σε 10,7 GW το 2009 [2].



Σχήμα 12: Εγκατεστημένη ισχύς γεωθερμικών συστημάτων ανά χώρα κατά το έτος 2009

### 1.3.5 Υδροηλεκτρικά συστήματα

Στην περίπτωση της υδροηλεκτρικής τεχνολογίας η παραγόμενη ισχύς προέρχεται από την ενέργεια του νερού που κινείται από υψηλότερα σε χαμηλότερα επίπεδα. Είναι μια δοκιμασμένη, ώριμη, προβλέψιμη και οικονομικά ανταγωνιστική τεχνολογία. Εξάλλου, η μηχανική δύναμη της πτώσης του νερού είναι ένα μέσο που χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση διάφορων αναγκών από την αρχαιότητα ακόμη. Αν και πρωταρχικός ρόλος της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην παγκόσμια ηλεκτρική τροφοδοσία σήμερα είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από μεγάλες κεντρικές μονάδες ισχύος εκατοντάδων MW, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν σε μικρότερη κλίμακα να λειτουργήσουν με επιτυχία και απομονωμένα, πολύ συχνά σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές.



**Σχήμα 13: Υδροηλεκτρικό φράγμα περιοχής Λάδωνα**

### **1.3.6 Αιολικά συστήματα**

Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί για χιλιάδες χρόνια σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Παρόλα αυτά, η χρήση της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού σε ευρεία εμπορική κλίμακα κατέστη βιώσιμη μόνο στη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα των τεχνικών εξελίξεων στον τομέα των ανεμογεννητριών και την υποστήριξη που υπήρξε σε επίπεδο κυβερνήσεων (π.χ. Κίνα). Ένας αριθμός διαφορετικών τεχνολογιών αιολικής ενέργειας είναι διαθέσιμος σήμερα ακόμα και σε επίπεδα εκατοντάδων Watt. Η κύρια όμως χρήση της αιολικής τεχνολογίας στην κατεύθυνση της ανάσχεσης της κλιματικής αλλαγής παραμένει η παραγωγή ηλεκτρισμού από μεγαλύτερα διασυνδεδεμένα δίκτυα ανεμογεννητριών που τοποθετούνται κατά πρώτο λόγο στην ξηρά αλλά, πιο πρόσφατα και στη θάλασσα. Η εγκατεστημένη ισχύς μεγάλων ανεμογεννητριών μέχρι το τέλος του 2009 ανερχόταν σε 160GW [2].



**Σχήμα 14: Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στη Δανία**

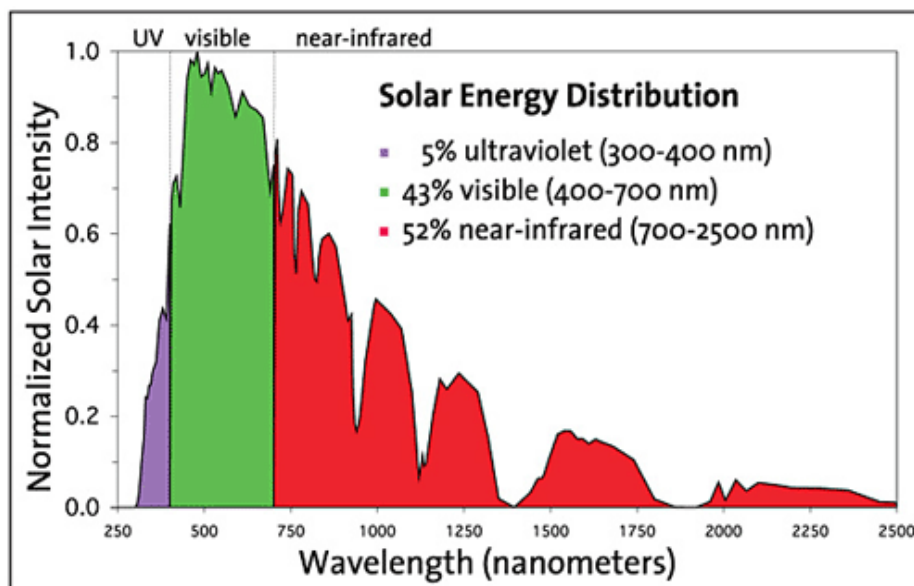
## 2 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Η ηλιακή ενέργεια (ή ηλιακή ακτινοβολία) είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται από τον ήλιο και φθάνει στην επιφάνεια της Γης, οπότε και κάποιο ποσοστό της απορροφάται ενώ το υπόλοιπο ανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα. Τα δύο κυριότερα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, τα οποία παίζουν και σημαντικότερο ρόλο σε εφαρμογές Α.Π.Ε., είναι η έντασή της καθώς και η γωνία πρόσπτωσης. Σε ότι αφορά το φασματικό περιεχόμενό της, διακρίνονται οι παρακάτω περιοχές, ανάλογα με το μήκος κύματος εκπομπής  $\lambda$  (Σχήμα 15):

- $\lambda < 10 \text{ A}$  (ακτίνες  $\gamma$  και  $\chi$ )
- $100 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$  (υπεριώδης UV ακτινοβολία)
- $400 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$  (ορατή ακτινοβολία)
- $780 \text{ nm} < \lambda < 3000 \text{ nm}$  (υπέρυθρη IR ακτινοβολία)
- $\lambda > 3000 \text{ nm}$  (μικροκύματα, ραδιοκύματα)

Οι δύο κυριότερες φασματικές περιοχές είναι η ορατή ακτινοβολία (περίπου 43% της συνολικής) και η υπέρυθρη ακτινοβολία (περίπου 52% της συνολικής). Συνολικά δηλαδή οι δύο αυτές υποκατηγορίες συνιστούν άνω του 90% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης.

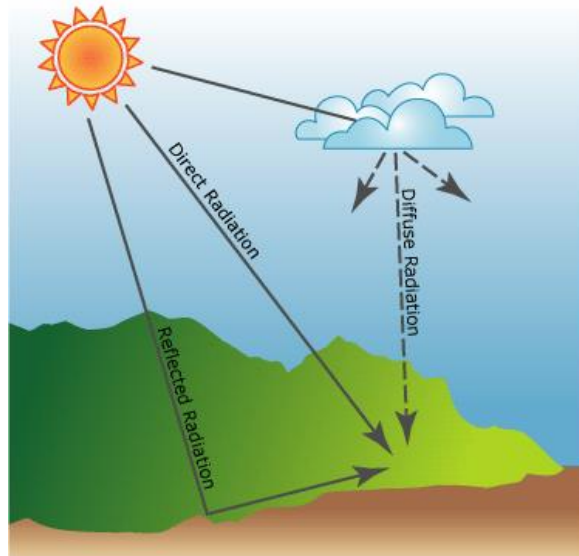


Σχήμα 15: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας

Η ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο ανέρχεται περίπου σε  $3,91 \cdot 10^{26} \text{ W}$ , παρόλα αυτά στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας της Γης φθάνει ένα πολύ μικρό ποσοστό της τάξης των  $1,8 \cdot 10^{16} \text{ W}$ . Από αυτό το ποσό περίπου το 35% ανακλάται πίσω στο διάστημα ενώ το υπόλοιπο διαπερνά την ατμόσφαιρα και φθάνει στην επιφάνεια της Γης [3].

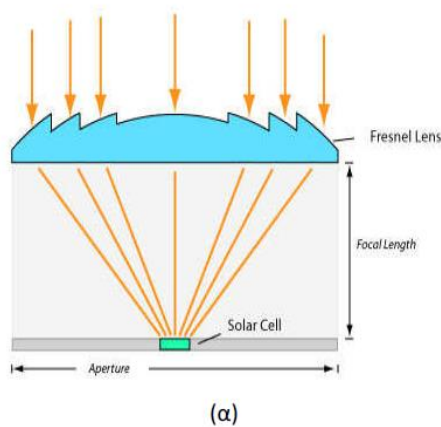
Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στη Γη αποτελείται από δύο επί μέρους συνιστώσες (Σχήμα 16):

- Την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (δέσμη ακτινών προερχόμενη απευθείας από τον ήλιο). Η διεύθυνσή της καθορίζεται από τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο.
- Τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (προέρχεται από σκέδαση στα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας). Δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και το ποσοστό της εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αιωρούμενα σωματίδια, το μέγεθος της νέφωσης καθώς και την ανακλαστικότητα του εδάφους.



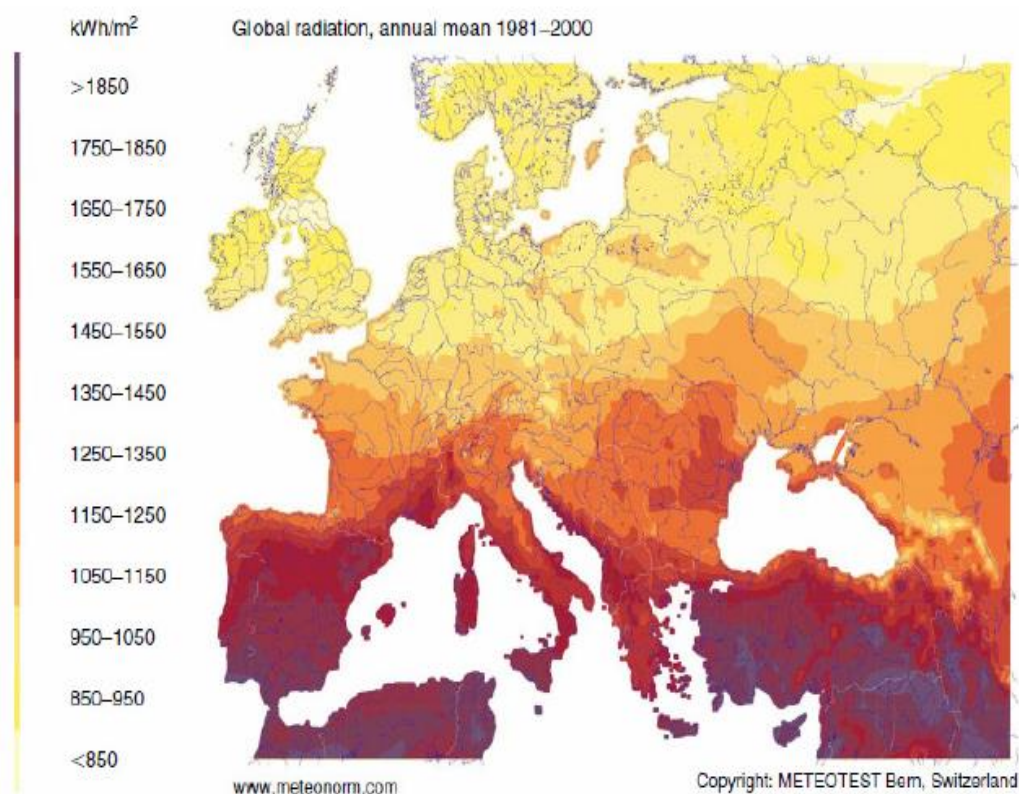
**Σχήμα 16: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας**

Εν γένει τα ποσοστά της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερα κατά τις περιόδους που ο ουρανός είναι καθαρός, ενώ η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την κυρίαρχη συνιστώσα κατά τις ημέρες που επικρατεί εκτεταμένη νέφωση [4]. Σε ότι αφορά τις διαφορετικές τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν συστήματα που εκμεταλλεύονται κατά κύριο λόγο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και ελάχιστα τη διάχυτη (π.χ. συστήματα συγκέντρωσης), ενώ άλλα συστήματα εκμεταλλεύονται εξίσου και τις δύο συνιστώσες (π.χ. ηλιακοί θερμοσίφωνες).



**Σχήμα 17: Συγκεντρωτικός φακός (α) και ηλιοθερμικό σύστημα (β)**

Στο Σχήμα 18 δίνεται η απεικόνιση της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στον ευρωπαϊκό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη οριζόντια επιφάνεια πρόσπτωσης. Όπως είναι προφανές, η χώρα μας διαθέτει από τα υψηλότερα ηλιακά δυναμικά στην Ευρώπη, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αποδοτικότερη εκμετάλλευσή του στην κατεύθυνση της μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και του περιορισμού του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.



**Σχήμα 18: Χάρτης απεικόνισης της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην Ευρώπη, λαμβάνοντας υπόψη οριζόντια επιφάνεια πρόσπτωσης**

## 2.2 Τεχνολογίες εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας

Σε γενικές γραμμές οι εφαρμογές εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το σκοπό και το τελικό προϊόν που προκύπτει από την όλη διαδικασία:

- Εφαρμογές όπου ο σκοπός είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Εφαρμογές όπου ο σκοπός είναι η θέρμανση κάποιου ρευστού μέσου ή του αέρα, με απώτερο στόχο τη θέρμανση χώρων, εγκαταστάσεων κλπ.

Στη συνέχεια παρατίθενται εν συντομία οι κυριότερες διαθέσιμες τεχνολογίες για κάθε μία από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.



## 2.2.1 Εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής

### Φωτοβολταϊκές γεννήτριες

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες (Σχήμα 19) αποτελούν το μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς ηλιακών συστημάτων που έχουν ως σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [5]. Παρότι μέχρι το 2000 το ποσοστό των συστημάτων αυτών στην αγορά ήταν αρκετά μικρό και αφορούσε κυρίως αυτόνομες εγκαταστάσεις σε απομακρυσμένες περιοχές, τα τελευταία χρόνια ο συγκεκριμένος κλάδος γνώρισε μεγάλη άνθιση και στη χώρα μας, κυρίως λόγω των υποστηρικτικών πολιτικών για την ενίσχυση της άμεσης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον υπάρχει μεγάλος αριθμός διασυνδεδεμένων συστημάτων που παρέχουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο και συναντώνται τόσο σε επίπεδο μεγάλων εγκαταστάσεων (ισχύς μεγαλύτερη των 50 kWp) όσο και σε επίπεδο οικιακών εφαρμογών (συνήθως έως 10 kWp). Στη χώρα μας οι κλιματολογικές συνθήκες ευνοούν ιδιαίτερα τις εφαρμογές φωτοβολταϊκών γεννητριών λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους, η οποία συνοδεύεται από σχετικά ήπιες θερμοκρασίες, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό όπως θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.



**Σχήμα 19: Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας (α) και οικιακού επιπέδου (β)**

### Ηλιοθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα 20) αφορούν κατά βάση εφαρμογές μεγάλης ηλεκτρικής ισχύος (άνω των 500 kW). Αποτελούνται από δύο κυρίως τμήματα:

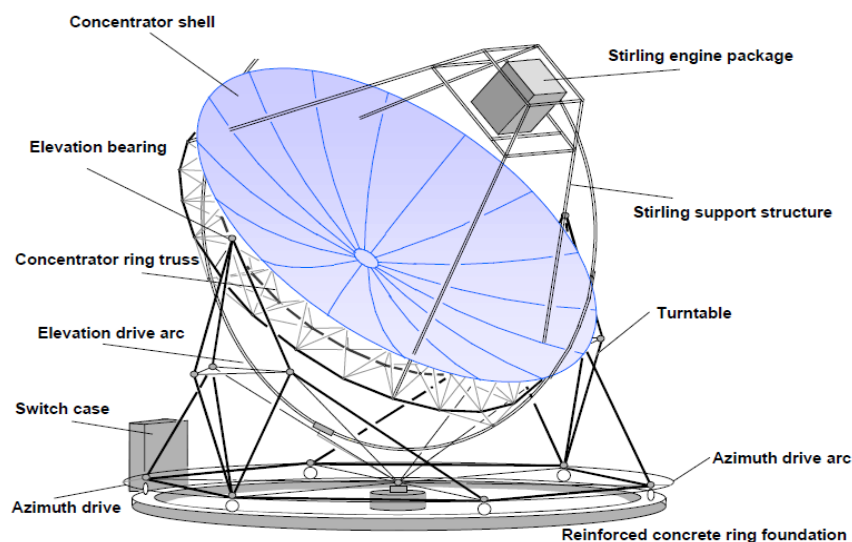
- Το τμήμα όπου το νερό ή κάποιο άλλο ρευστό θερμαίνεται και αποκτά υψηλές θερμοκρασίες με τη χρήση κατόπτρων ή άλλων συγκεντρωτικών συστημάτων. Τα συγκεντρωτικά συστήματα κατά περίπτωση μπορεί να διαθέτουν και υποσύστημα για την ανίχνευση της ηλιακής τροχιάς (μηχανισμοί tracking).
- Το τμήμα όπου το θερμό μέσο διοχετεύεται σε κάποια θερμική μηχανή (π.χ. τύπου Stirling) όπου και πραγματοποιείται η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Ανάλογα με τη θερμοκρασία του θερμού ρευστού επιλέγεται και ο τύπος της θερμικής μηχανής που είναι περισσότερο κατάλληλη για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Μέχρι τους 600 °C οι τουρμπίνες ατμού καθώς και οι μηχανές Stirling θεωρούνται οι πιο αποδοτικές επιλογές. Σε κάθε περίπτωση η απόδοση της εγκατάστασης εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του θερμού ρευστού [6].



**Σχήμα 20: Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικής εστίασης (α) και σημειακής εστίασης (β)**

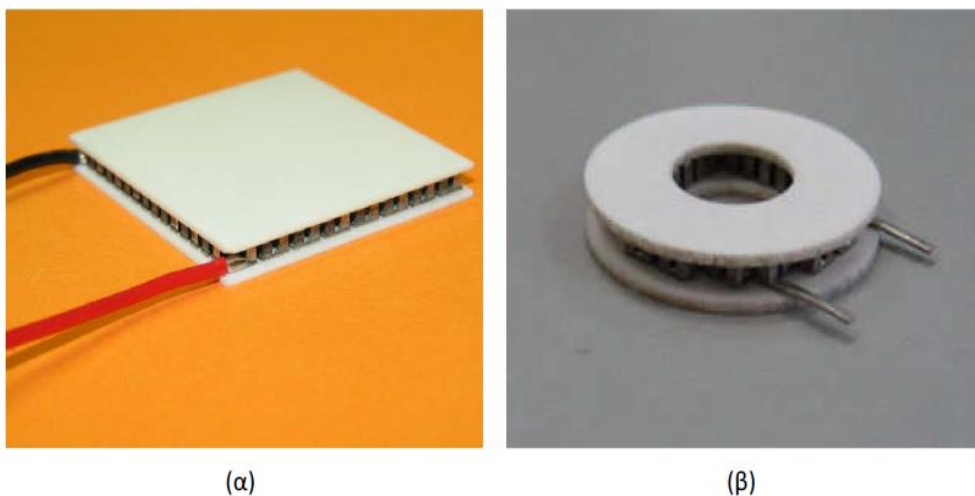
Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται στις ηλιοθερμικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής διακρίνονται σε συλλέκτες γραμμικής και σημειακής εστίασης [7]. Στην πρώτη περίπτωση οι συλλέκτες συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε σωλήνες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κατά μήκος του συλλέκτη, μέσα στους οποίους ρέει το θερμό ρευστό (Σχήμα 20). Στη δεύτερη περίπτωση η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε ένα σημείο. Στους συλλέκτες σημειακής εστίασης πολλές φορές η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται άμεσα, τοποθετώντας μια μηχανή Stirling στο σημείο εστίασης (Σχήμα 21).



**Σχήμα 21: Συλλέκτης σημειακής εστίασης σε συνδυασμό με μηχανή Stirling**

### Θερμοηλεκτρικές γεννήτριες

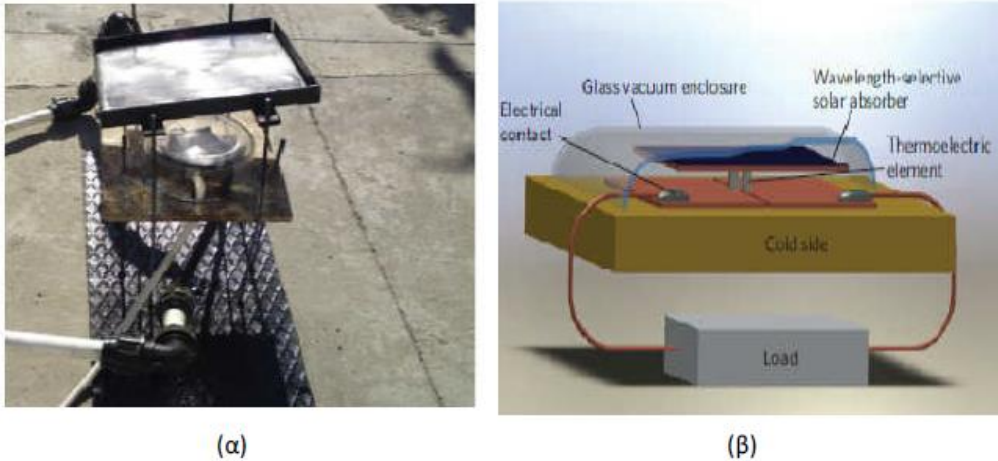
Οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις (Σχήμα 22) στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο Seebeck και αποτελούν μια σχετικά παλαιά τεχνολογία. Μόλις πρόσφατα όμως οι συγκεκριμένες διατάξεις άρχισαν να συγκεντρώνουν αυξημένο ενδιαφέρον σε ότι αφορά τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι εμπορικά διαθέσιμες θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αποτελούνται από πολλά ημιαγώγιμα  $p - n$  θερμοζεύγη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά εν σειρά αλλά θερμικά εν παραλλήλω. Για την ηλεκτρική απομόνωση του συνόλου των θερμοστοιχείων από άλλες ηλεκτρικά αγώγιμες επιφάνειες στις οποίες μπορεί να χρειαστεί να προσκολληθούν (π.χ μέταλλα), συνηθίζεται η τοποθέτηση κεραμικών πλακιδίων εκατέρωθεν των θερμοστοιχείων [8].



**Σχήμα 22: Εμπορικά διαθέσιμες θερμοηλεκτρικές διατάξεις**

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες εκμεταλλεύονται τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο πλευρών τους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση του φαινομένου Seebeck. Λόγω του ότι στην παρούσα εργασία εξετάζεται η εφαρμογή τους σε ένα υβριδικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει και φωτοβολταϊκά στοιχεία, η ανάλυση της λειτουργίας τους θα πραγματοποιηθεί εκτεταμένα σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

Σε ότι αφορά την ενσωμάτωσή τους σε συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω της μικρής τους επιφάνειας και της αρκετά χαμηλής απόδοσής τους, απαιτείται για την αποδοτικότερη λειτουργία τους η χρησιμοποίηση κάποιου τύπου συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (οπτική ή θερμική). Προς το παρόν, οι μικρές αποδόσεις (περίπου 6% για εμπορικά διαθέσιμες διατάξεις) εμποδίζουν την ενσωμάτωσή τους σε εμπορικά συστήματα, κάτι όμως που αναμένεται να αλλάξει στα αμέσως επόμενα χρόνια [9].



**Σχήμα 23: Ηλιακό θερμοηλεκτρικό σύστημα με οπτική (α) και θερμική (β) συγκέντρωση**

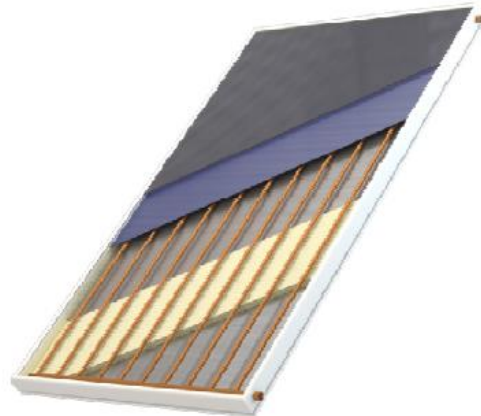
## 2.2.2 Εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης

### Ηλιακοί θερμοσίφωνες

Η συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογών επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ΖΝΧ. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών, από απλούς επίπεδους συλλέκτες μέχρι συλλέκτες κενού, οι οποίοι παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες αποδόσεις. Αν και οι κλιματολογικές συνθήκες στη χώρα μας είναι ιδανικές για την εγκατάσταση τέτοιων διατάξεων και είναι δυνατή η επίτευξη υψηλών επιπέδων εξοικονόμησης ενέργειας, στην Ελλάδα μέχρι πρόσφατα αντιστοιχούσαν περίπου  $0,32 \text{ m}^2$  ηλιακών συλλεκτών ανά κάτοικο, έναντι  $0,94 \text{ m}^2$  για την Κύπρο, στην οποία παρουσιάζεται η υψηλότερη συνολικά εγκατεστημένη θερμική ισχύς ανά κάτοικο παγκοσμίως. Για τα δεδομένα της Ελλάδας θεωρείται ότι η εγκατάσταση συλλεκτικής επιφάνειας της τάξης των  $1 \text{ m}^2$  ανά κάτοικο είναι επαρκής, ανάλογα πάντα με την τοποθεσία και τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Η σημασία της συνολικά εγκατεστημένης θερμικής ισχύος καταδεικνύεται από το γεγονός ότι έχει υπολογιστεί πως η έλλειψη θερμικών ηλιακών συστημάτων οικιακού επιπέδου στη χώρα μας θα καθιστούσε αναγκαία τη λειτουργία μιας επιπλέον μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ισχύος περίπου  $600 \text{ MW}$  [3].



(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 24: Ηλιακός συλλέκτης χωρίς κάλυμμα (α), Απλός επίπεδος συλλέκτης (β), Επιλεκτικός επίπεδος συλλέκτης (γ) και Συλλέκτης κενού (δ)**

Οι κυριότερες κατηγορίες συλλεκτών που απαντώνται στην πράξη (Σχήμα 24) είναι οι παρακάτω:

- Ηλιακοί συλλέκτες χωρίς κάλυμμα: Αποτελούν την πιο οικονομική κατηγορία ηλιακών συλλεκτών και είναι ιδανικοί για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (28 – 30 °C). Η απόδοσή τους, εκτός από τα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την ταχύτητα του ανέμου, διότι λόγω της έλλειψης καλύμματος ο συγκεκριμένος τύπος συλλέκτη εμφανίζει εξαιρετικά υψηλό ποσοστό απωλειών λόγω συναγωγής. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς σε εφαρμογές θέρμανσης νερού για πισίνες.
- Απλοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες: Είναι η πλέον διαδεδομένη τεχνολογία συλλεκτών σε εγκαταστάσεις οικιακού επιπέδου, λόγω καλής αναλογίας κόστους – οφέλους. Εκμεταλλεύονται την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα της ακτινοβολίας και χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας (50 – 80 °C).
- Επιλεκτικοί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες: Ως προς τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά μοιάζουν πολύ με τους απλούς επίπεδους συλλέκτες. Η κύρια διαφορά τους εντοπίζεται στη χρήση εξελιγμένων βαφών ή υλικών στην επιφάνεια πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή

απορροφητικότητα, ώστε να εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά την ηλιακή ακτινοβολία και αντίστοιχα χαμηλή εκπεψιμότητα ώστε να ελαχιστοποιούν τις θερμικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας.

- Ηλιακοί συλλέκτες κενού: Αποτελούνται από πολλούς γυάλινους σωλήνες, οι οποίοι στο εσωτερικό τους περιέχουν μεταλλικές σωληνώσεις βαμμένες με επιλεκτική βαφή. Μεταξύ του γυάλινου και του μεταλλικού σωλήνα δημιουργείται κενό. Το θερμό ρευστό (νερό ή αέρας) ρέει διαμέσου των μεταλλικών σωληνώσεων. Λόγω του κενού οι απώλειες λόγω συναγωγής ελαχιστοποιούνται και για το λόγο αυτό αποτελούν την πλέον αποδοτική μορφή ηλιακών συλλεκτών. Η υψηλές τους αποδόσεις έχουν ως συνέπεια επίτευξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών ακόμα και κατά τους χειμερινούς μήνες ή κατά τη διάρκεια ημερών χωρίς ιδιαίτερη ηλιοφάνεια.

### Ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις

Οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία τόσο για την παραγωγή ΖΝΧ όσο και για την παραγωγή θερμότητας για χρήση σε συστήματα θέρμανσης. Συνήθως είναι γνωστές με το χαρακτηρισμό συστήματα combi [6]. Συνήθως απαιτείται σημαντικά αυξημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών συγκριτικά με τις εφαρμογές που αποσκοπούν μόνο στην παραγωγή ΖΝΧ. Για τα κλιματολογικά δεδομένα της Ελλάδας θεωρείται ότι 1 m<sup>2</sup> συλλεκτικής επιφάνειας επαρκεί για την κάλυψη περίπου 700 W θερμικού φορτίου, ανάλογα πάντα με την εκάστοτε περιοχή και την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Στις εγκαταστάσεις αυτές αξιοποιούνται οι ίδιες τεχνολογίες συλλεκτών που αξιοποιούνται και για την παραγωγή ΖΝΧ. Στη χώρα μας το ποσοστό τέτοιων συστημάτων, παρά τις αυξητικές τάσεις που παρουσιάζονται, είναι για την ώρα ιδιαίτερα μικρό (περίπου 5% των συνολικά εγκατεστημένων ηλιακών συστημάτων), σε άλλες χώρες της Ευρώπης όμως η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Ενδεικτικά αποτελούν το 40% των εγκατεστημένων ηλιακών συστημάτων στην Αυστρία, το 35% στην Ελβετία και το 20% στην Ολλανδία.



**Σχήμα 25: Ενδεικτικό λειτουργικό διάγραμμα συστήματος combi**

### Ηλιακή ψύξη

Οι τεχνολογίες ηλιακής ψύξης συγκεντρώνουν τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της δεδομένης ταύτισης των ψυκτικών φορτίων της καλοκαιρινής περιόδου με την υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας. Σε πιο σύγχρονα συστήματα η ίδια επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών αξιοποιείται για την παραγωγή ΖΝΧ και θέρμανσης (κατά τη διάρκεια του χειμώνα) καθώς και ψύξης (κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού). Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά με την ονομασία combi – plus. Η διεύθυνση των διατάξεων αυτών στην αγορά αναμένεται να αυξηθεί στα αμέσως επόμενα χρόνια λόγω της μεγάλης προόδου που έχει συντελεστεί τελευταία σε ότι αφορά την απόδοση των διαφορετικών επί μέρους υποσυστημάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τέτοιων διατάξεων [10].

Οι βασικές τεχνολογίες ηλιακού κλιματισμού περιλαμβάνουν:

- Συστήματα κλειστού κύκλου (ψύκτες απορρόφησης ή/και προσρόφησης)
- Συστήματα ανοιχτού κύκλου

Και στις δύο περιπτώσεις μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο υγρά όσο και στερεά μέσα απορρόφησης. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα αυτής της κατηγορίας είναι οι ψύκτες απορρόφησης που χρησιμοποιούν  $H_2O/LiBr$  ως μέσο απορρόφησης. Μια τυπική εγκατάσταση αυτής της μορφής αποτελείται από τα παρακάτω επί μέρους υποσυστήματα:

- Ηλιακοί συλλέκτες, που παρέχουν την απαραίτητη θερμότητα για τη λειτουργία του ψύκτη
- Δεξαμενή αποθήκευσης νερού
- Μονάδα ψύξης
- Σύστημα κλιματισμού

Σε πολλές περιπτώσεις ενσωματώνεται στην όλη εγκατάσταση και εφεδρικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης για την κάλυψη των φορτίων σε περιπτώσεις έλλειψης επαρκούς ηλιοφάνειας. Ανάλογα με τα υπάρχοντα φορτία και την απόδοση του χρησιμοποιούμενου συλλέκτη καθορίζεται και η συνολικά απαιτούμενη επιφάνεια συλλεκτών.



**Σχήμα 26: Ψύκτης απορρόφησης**

Οι μονοβάθμιοι (COP της τάξης του 0,7) και οι διβάθμιοι (COP της τάξης του 1,2) ψύκτες αποτελούν ήδη εμπορικά διαθέσιμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες. Με την εξέλιξη των πολυβάθμιων ψυκτών αναμένεται η επίτευξη COP της τάξης του 2, γεγονός που θα προσδώσει μεγαλύτερη ώθηση στην ανάπτυξη της συγκεκριμένης αγοράς [3].



### 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

#### 3.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούν μια τεχνολογία ημιαγώγιμων υλικών, η οποία μπορεί να μετατρέψει απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε DC ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την τροφοδοσία DC ηλεκτρικών φορτίων ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα (inverter) και να τροφοδοτήσει μια σειρά τυπικών φορτίων. Λόγω της σχετικά μικρής ισχύος εξόδου των μεμονωμένων στοιχείων, περισσότερες κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά, δημιουργώντας φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία αποτελούν τη δομική μονάδα όλων των τύπων εγκαταστάσεων. Αναλόγως των απαιτήσεων, περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους εν σειρά και εν παραλλήλω προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου [5].



(α)



(β)



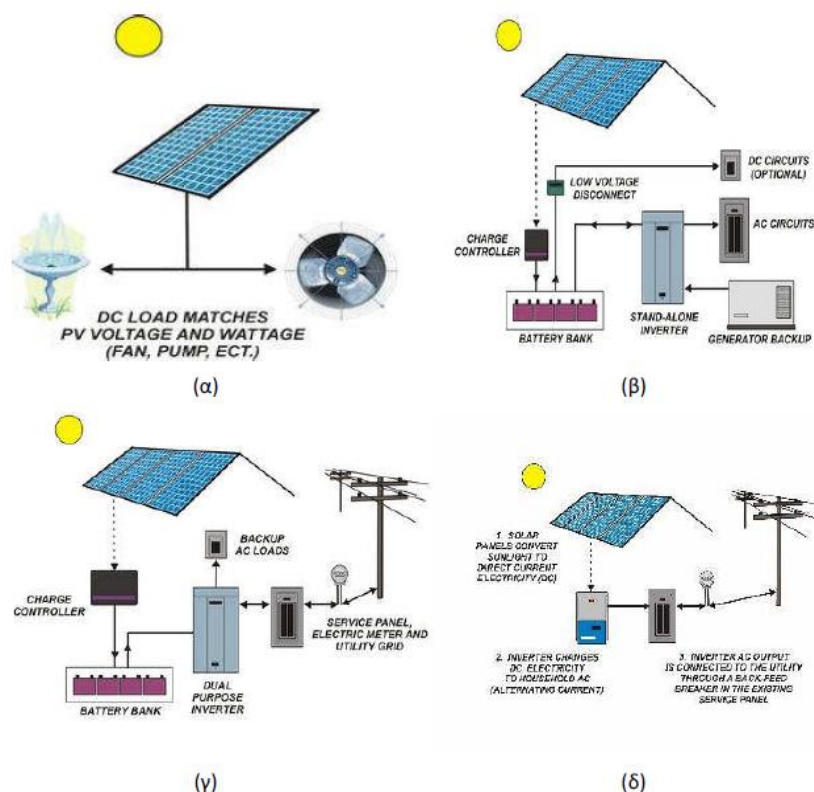
(γ)

**Σχήμα 27: Φωτοβολταϊκό στοιχείο (α), φωτοβολταϊκό πλαίσιο (β) και εγκατάσταση αποτελούμενη από περισσότερα συνδεδεμένα μεταξύ τους φωτοβολταϊκά πλαίσια**

Όταν χρησιμοποιείται αντιστροφέας για τη μετατροπή της συνεχούς εξόδου της εγκατάστασης σε εναλλασσόμενη, είναι δυνατή τόσο η απευθείας τροφοδότηση AC ηλεκτρικών φορτίων (αυτόνομα συστήματα ή συστήματα net-metering) όσο και η διάθεση της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο (διασυνδεδεμένα συστήματα).

Στις περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων απαιτείται και η ύπαρξη μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές), προκειμένου να επιτευχθεί εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης αλλά και κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους με εκτεταμένη νέφωση [11]. Αυτή η απαίτηση οπωσδήποτε ανεβάζει σημαντικά το συνολικό κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης, παρόλα αυτά οι συνεχώς αυξητικές τάσεις κοστολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας στρέφουν σιγά – σιγά υπολογίσιμο τμήμα του καταναλωτικού κοινού στην επιλογή της ενεργειακής αυτονομίας. Τα αυτόνομα συστήματα προτιμώνται κατά κύριο λόγο σε περιπτώσεις που η ηλεκτροδότηση αφορά σημεία απομακρυσμένα από το δίκτυο, μιας και το κόστος διασύνδεσης προκύπτει εξαιρετικά μεγάλο.

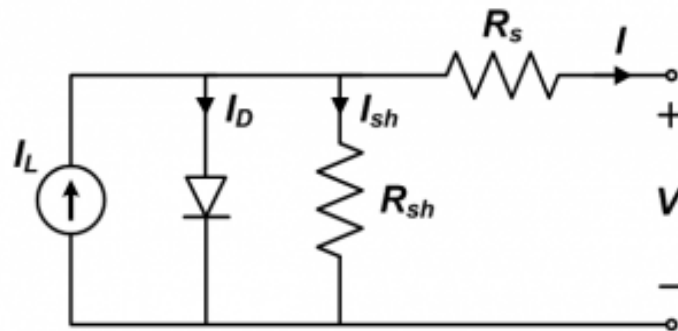
Στην κατηγορία των διασυνδεδεμένων συστημάτων ανήκει η συντριπτική πλειοψηφία των εγκαταστάσεων μεγάλης και πολύ μεγάλης ισχύος αλλά και των οικιακών εγκαταστάσεων που απαντώνται στη χώρα μας. Επιπλέον, πολύ πρόσφατα θεσμοθετήθηκε και στην Ελλάδα ο θεσμός του net – metering που προβλέπει τον ενεργειακό συμψηφισμό μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης και πριμοδοτεί την κατασκευή φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων σχετικά μικρής ισχύος με στόχο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας για τον καταναλωτή.



**Σχήμα 28:** Ενδεικτικά λειτουργικά διαγράμματα για σύστημα απευθείας τροφοδότησης DC φορτίων (α), αυτόνομο σύστημα (β), αυτόνομο σύστημα με διασύνδεση στο δίκτυο (γ) και σύστημα net – metering (δ)

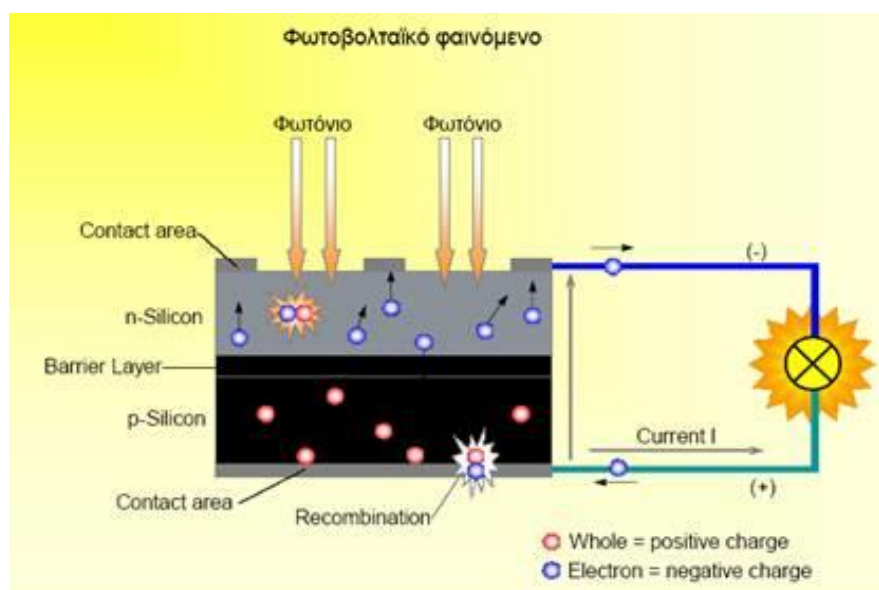
### 3.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να προσομοιαστούν κυκλωματικά με το μοντέλο της ηλεκτρικής διόδου, αποτελούν δηλαδή πρακτικά μία ένωση ημιαγωγού τύπου p – n (Σχήμα 29). Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη τα άτομα του ημιαγωγού απορροφούν φωτόνια, τα οποία περιέχονται στο ηλιακό φως και διαθέτουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το διάκενο του ημιαγωγίμου υλικού που χρησιμοποιείται.



Σχήμα 29: Ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου

Καθώς το άτομο του ημιαγωγού απορροφά ένα φωτόνιο, απελευθερώνει αντίστοιχα ένα ηλεκτρόνιο της στοιβάδας σθένους του, το οποίο προσλαμβάνει την ενέργεια του απορροφούμενου φωτονίου και μεταπηδά στη στοιβάδα αγωγιμότητας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται κατά τη διάρκεια της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μια περίσσεια από ζεύγη φορέων ηλεκτρικού φορτίου (ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς την περιοχή τύπου n ενώ οι οπές προς την περιοχή τύπου p (Σχήμα 30), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου. Αυτή η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της εμπρόσθιας και πίσω όψης του στοιχείου αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση της διόδου και αποτελεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Σχήμα 30: Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων

### 3.3 Διαθέσιμες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Οι κυριότερες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων οι οποίες είναι αυτή τη στιγμή διαθέσιμες εμπορικά και αποτελούν πλέον δοκιμασμένες λύσεις είναι οι παρακάτω:

- Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο
- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο
- Άμορφο πυρίτιο

Επιπλέον, τρεις σχετικά νεότερες τεχνολογίες οι οποίες εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με τις προηγούμενες αλλά χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό βαθμό ωριμότητας και είναι άγνωστο πότε θα είναι ευρέως διαθέσιμες στην αγορά είναι οι παρακάτω:

- Πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών επαφών
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία κβαντικής κηλίδας

Στη συνέχεια γίνεται συνοπτική αναφορά στα χαρακτηριστικά λειτουργίας, τις ιδιότητες αλλά και το κόστος καθεμιάς από τις προαναφερόμενες τεχνολογίες.

#### 3.3.1 Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου αποτελούν το μεγαλύτερο κομμάτι της αγοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων σήμερα. Εξωτερικά είναι αρκετά εύκολο να τα ξεχωρίσει κανείς από τα αντίστοιχα πολυκρυσταλλικά στοιχεία, εξαιτίας του έντονου και μονότονου μαύρου χρώματος που τα χαρακτηρίζει (Σχήμα 31).



**Σχήμα 31: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου**

Κάθε στοιχείο αποτελείται από έναν μονοκρυσταλλο πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Η μονοκρυσταλλική κυψέλη προκύπτει μετά τις φάσεις καθαρισμού της πρώτης ύλης σε κυκλική ή οκταγωνική μορφή. Ακριβώς λόγω της απαιτούμενης καθαρότητας του τελικού προϊόντος, τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια είναι και τα πιο ακριβά εν συγκρίσει με τις άλλες δύο κατηγορίες που απαντώνται κατά κόρον στο εμπόριο. Είναι όμως και πιο αποδοτικά, με την απόδοσή τους να κυμαίνεται από 18 – 20%, ενώ τα τελευταίας τεχνολογίας προϊόντα έχουν πετύχει αποδόσεις της τάξης του 24%. Παρόλα αυτά, το θεωρητικό όριο απόδοσης κυμαίνεται στην περιοχή του 30% [12], πράγμα που σημαίνει ότι σταδιακά η τεχνολογία αυτή φθάνει στα όριά της και θα πρέπει να αναζητηθούν μέθοδοι για τη δραστική μείωση του κόστους κατασκευής προκειμένου τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία να παραμείνουν ανταγωνιστική τεχνολογία. Σημαντικό μειονέκτημά τους επίσης είναι ότι η πτώση της απόδοσής τους συναρτήσεται της θερμοκρασίας είναι περισσότερο απότομη σε σχέση με το πολυκρυσταλλικό και το άμορφο πυρίτιο.

### 3.3.2 Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου

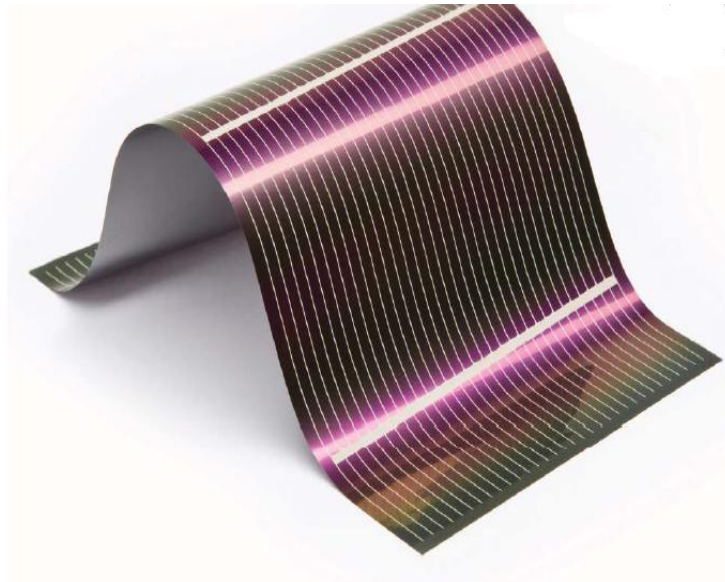
Αποτελούν μια πιο φθηνή εκδοχή των στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου, κυρίως λόγω της φθηνότερης διαδικασίας παραγωγής των κυψελών. Το τελικό προϊόν, το οποίο προκύπτει με την στερεοποίηση τηγμένου πυριτίου, ονομάζεται πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και διαθέτει κοκοειδή μορφή. Το μέγεθος των κρυστάλλων εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες ψύξης του πυριτίου. Το τελικό προϊόν διατίθεται σε μορφή στερεού κομματιού ή σε σχήμα κορδέλας η οποία απάγεται από το τηγμένο πυρίτιο. Έχουν μικρότερο κόστος από τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία αλλά εμφανίζουν παράλληλα και χαμηλότερες αποδόσεις (16 – 18%). Για σχετικά ζεστά κλίματα όμως, όπως π.χ. το κλίμα της Ελλάδας, η απόδοσή τους είναι εφάμιλλη των μονοκρυσταλλικών στοιχείων διότι παρουσιάζουν ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά σε υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Εξωτερικά είναι εύκολος ο διαχωρισμός τους από τις άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων λόγω της χαρακτηριστικής μπλε απόχρωσης που εμφανίζουν (Σχήμα 32). Για αισθητικούς λόγους προτιμώνται ιδιαίτερα από τους αρχιτέκτονες σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών ενσωματωμένων σε όψεις κτιρίων.



**Σχήμα 32: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

### 3.3.3 Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου

Πρόκειται για κυψέλες με βάση το άμορφο πυρίτιο, δηλαδή πυρίτιο το οποίο δεν διαθέτει κρυσταλλική δομή. Μια τέτοια κυψέλη περιέχει πολύ λιγότερο ενεργό υλικό από ότι τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (λιγότερο από 1%). Για το λόγο αυτό το κόστος τους είναι σημαντικά μικρότερο [3]. Σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι οι αποδόσεις τους είναι αρκετά χαμηλότερες των ανταγωνιστικών τεχνολογιών (κυμαίνονται από 9 – 12%). Παρόλα αυτά εκμεταλλεύονται καλύτερα τη διάχυτη ακτινοβολία και έχουν καλύτερη συμπεριφορά στις υψηλές θερμοκρασίες και γι' αυτό χρησιμοποιούνται και στη χώρα μας σε πλήθος εγκαταστάσεων όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ιδανικού προσανατολισμού ή όπου σε μεγάλο μέρος του έτους εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σημαντικό πλεονέκτημα τους επίσης αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να παραχθούν σε μορφή εύκαμπτων λεπτών υμενίων (Σχήμα 33), γεγονός που ευνοεί την ενσωμάτωσή τους σε εφαρμογές ειδικών απαιτήσεων (οχήματα, φορετά συστήματα κλπ.) [13].



**Σχήμα 33: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου**

### 3.3.4 Πολυμερή Φ/Β στοιχεία

Μοιάζουν αρκετά εξωτερικά με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, υπό την έννοια ότι είναι και αυτά εξαιρετικά λεπτά και εύκαμπτα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Κατασκευάζονται από οργανικά υλικά και οι μέθοδοι παραγωγής του είναι πολύ χαμηλότερου κόστους σε σχέση με τις τεχνολογίες κυψελών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η απόδοσή τους προς το παρόν παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα (της τάξης του 8% για τα τελευταίας τεχνολογίας πολυμερή στοιχεία), παρόλα αυτά αναμένεται στα επόμενα χρόνια να ξεπεράσει το 10% [14]. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι είναι για την ώρα περισσότερο ευπαθή στην πρόωρη γήρανση. Ωστόσο, με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους, αναμένεται τα επόμενα χρόνια η ενσωμάτωσή τους και σε κτιριακές εφαρμογές (κουφώματα κλπ.) εξαιτίας του γεγονότος ότι μπορούν να παραχθούν και σε ημι-διαφανή

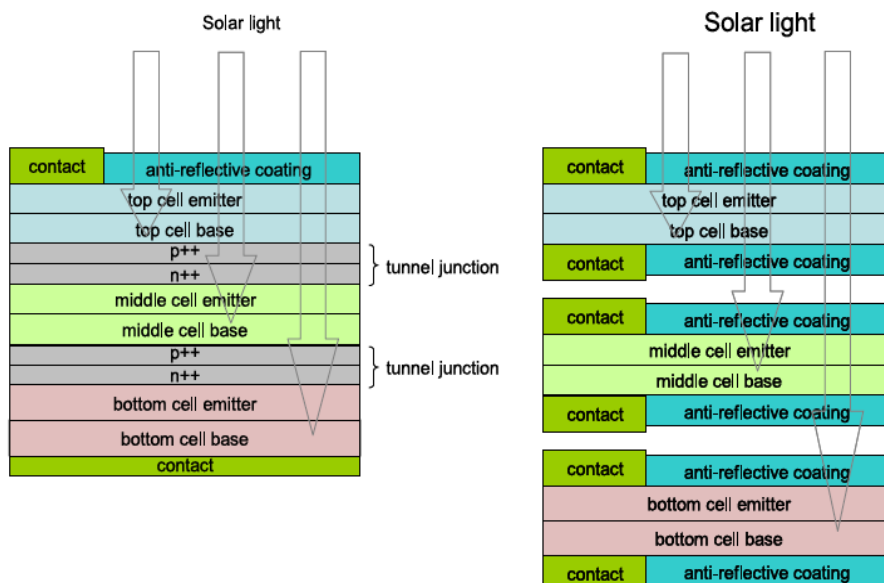
μορφή (Σχήμα 34) και να ενσωματωθούν εύκολα σε πλήθος εφαρμογών. Αν και σχετικά δυσεύρετα, τα πολυμερή στοιχεία αποτελούν εμπορικό προϊόν εδώ και κάποια χρόνια.



**Σχήμα 34: Πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία ενσωματωμένα σε κτιριακό κούφωμα (Brite Solar)**

### 3.3.5 Φ/Β στοιχεία πολλαπλών επαφών (multi - junction)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολλαπλών επαφών αποτελούν μια πιο νέα προσέγγιση η οποία έχει προταθεί στην κατεύθυνση βελτίωσης της απόδοσης των υφιστάμενων τεχνολογιών. Πρόκειται ουσιαστικά για υπέρθεση διαφορετικών ημιαγωγικών υλικών που διαθέτουν διαφορετικά διάκενα. Βάση της προτεινόμενης τεχνικής τα διαφορετικά στοιχεία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο (Σχήμα 35) με τα στοιχεία που παρουσιάζουν το υψηλότερο διάκενο να τοποθετούνται στα ανώτερα τμήματα της κυψέλης.



**Σχήμα 35: Φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούμενες από διαφορετικά υλικά, [15]**

Αυτό που επιτυγχάνει η συγκεκριμένη τεχνική είναι η αξιοποίηση μεγαλύτερου μέρους του ηλιακού φάσματος, λόγω της ενσωμάτωσης διαφορετικών ημιαγώγιμων υλικών. Κατ' επέκταση επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις και μικρότερη άνοδος θερμοκρασίας της κυψέλης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της αφού μεγαλύτερο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με την τεχνική κατασκευής των κυψελών, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών αλλά και στη σειρά με την οποία θα τοποθετηθούν ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους. Εργαστηριακά έχουν αναφερθεί αποδόσεις λίγο πάνω από 40%, με το θεωρητικό όριο να προσεγγίζει το 65% για συστήματα χωρίς συγκέντρωση και το 80% για συστήματα που διαθέτουν συστήματα για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας [15]. Προς το παρόν αποτελούν καθαρά εργαστηριακό προϊόν και η εμπορική τους διαθεσιμότητα είναι άγνωστη. Σε κάθε περίπτωση όμως, ακόμα και όταν διατεθούν εμπορικά, το κόστος τους θα είναι αρκετά υψηλότερο των υφιστάμενων τεχνολογιών.

### 3.3.6 Φ/Β στοιχεία κβαντικής κηλίδας (quantum - dot)

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες κβαντικής κηλίδας διαφέρουν από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά υλικά στο ότι χρησιμοποιούν quantum dots ως το ενεργό φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι αναφερόμενες αποδόσεις μέχρι και πρόσφατα ήταν της τάξης του 7 – 9%, παρόλα αυτά τα συγκεκριμένα στοιχεία μπορούν να κατασκευαστούν αξιοποιώντας εξαιρετικά φθηνές μεθόδους παραγωγής και κατ' επέκταση το κόστος τους μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αντίστοιχο των υφιστάμενων τεχνολογιών. Τα επόμενα χρόνια η απόδοσή τους αναμένεται να προσεγγίσει το 14% [16].



**Σχήμα 36: Quantum dot φωτοβολταϊκή κυψέλη**

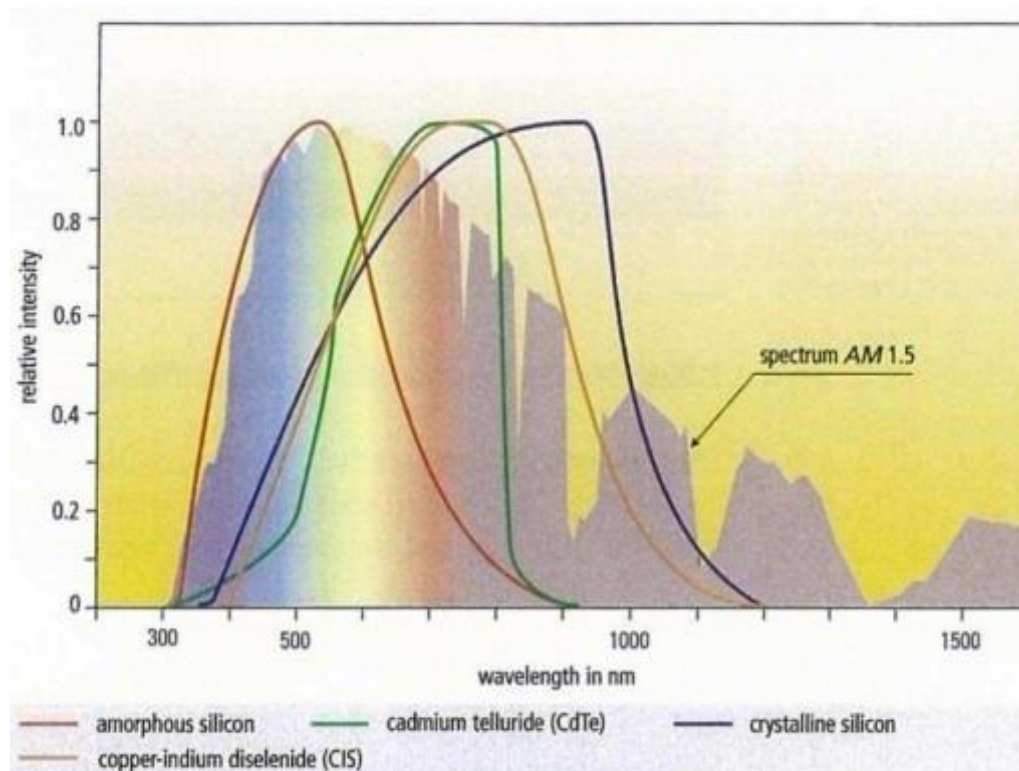


### 3.4 Απόδοση φωτοβολταϊκών διατάξεων

#### 3.4.1 Παράμετροι απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

##### Εκμετάλλευση του ηλιακού φάσματος

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η απόδοση των συνηθισμένων φωτοβολταϊκών υλικών κυμαίνεται στα όρια του 15 – 21 %. Τα σχετικά χαμηλά επίπεδα απόδοσης οφείλονται στην αδυναμία των κυψελών να μετατρέψουν αποδοτικά το σύνολο του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην κυψέλη (Σχήμα 37). Το γεγονός αυτό σχετίζεται με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθαυτό, καθώς κάθε φωτόνιο που προσπίπτει στην επιφάνεια της κυψέλης μπορεί να απελευθερώσει ένα μόνο ηλεκτρόνιο στο άτομο του ημιαγωγού, οδηγώντας το στη στοιβάδα αγωγιμότητας. Τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το διάκενο του ημιαγωγού δεν μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια. Επιπλέον, τα φωτόνια που διαθέτουν ενέργεια περισσότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου μετατρέπουν την περίσσεια ενέργειας σε θερμότητα πάνω στο ίδιο το υλικό.

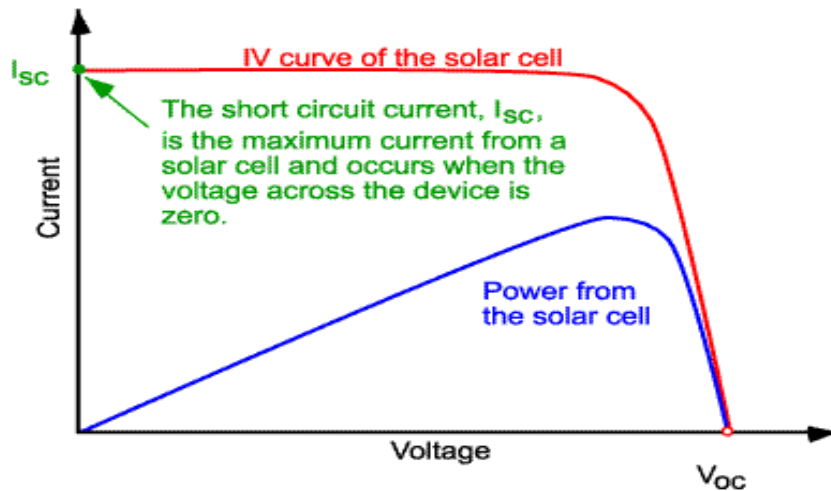


**Σχήμα 37: Αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία φωτοβολταϊκής κυψέλης**

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι ένα μεγάλο κομμάτι της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας παραμένει αναξιοποίητο. Επιπλέον ένα σημαντικό ποσοστό της μη αξιοποιούμενης ακτινοβολίας επιφέρει άνοδο της θερμοκρασίας της κυψέλης, με αποτέλεσμα περαιτέρω πτώση της απόδοσης, όπως θα αναλυθεί περισσότερο αναλυτικά και στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου.

### Μεγέθη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Ως πηγή ρεύματος, η φωτοβολταϊκή κυψέλη μεταβάλλει την τάση και το ρεύμα εξόδου της ανάλογα με το φορτίο το οποίο συνδέεται στα άκρα της. Με τον τρόπο αυτό, για κάθε κατάσταση λειτουργίας (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασία περιβάλλοντος και ταχύτητα ανέμου) προκύπτουν διαφορετικά ζεύγη τιμών ρεύματος – τάσης, ανάλογα με τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου (Σχήμα 38). Με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει και η καμπύλη ισχύος - ρεύματος εξόδου, όπου η ισχύς ισούται με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα. Όταν η φωτοβολταϊκή κυψέλη λειτουργεί υπό συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος ενδιαφέρει μόνο η τάση εξόδου της (τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ ) ενώ όταν οι ακροδέκτες εξόδου βραχυκυκλωθούν ενδιαφέρει μόνο το ρεύμα που τη διαρρέει (ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ ). Η τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες τιμές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα που μπορεί να δώσει το στοιχείο στην έξοδό του για δεδομένες συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και ταχύτητας ανέμου.



**Σχήμα 38: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης και ισχύος – τάσης φωτοβολταϊκού στοιχείου**

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου παρέχεται από το πηλίκο της μέγιστης ισχύος εξόδου προς την προσπίπτουσα σε αυτό ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αντιστοιχεί στο γόνατο της καμπύλης του Σχήματος 38:

$$\eta = \frac{P}{A * I} \quad (1)$$

όπου

P: η μέγιστη ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής κυψέλης (W)

A: η επιφάνεια της φωτοβολταϊκής κυψέλης ( $m^2$ )

I: η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )

Δεδομένου ότι σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν είναι δυνατή η κάλυψη του συνόλου της επιφάνειάς του με φωτοβολταϊκά στοιχεία (απαιτούνται διάκενα μεταξύ των κυψελών λόγω της γεωμετρίας τους και των απαραίτητων ηλεκτρικών ενώσεων μεταξύ τους), η απόδοση ενός πλαισίου είναι πάντα ελαφρώς χαμηλότερη των κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας διαφορετικών φωτοβολταϊκών κυψελών είναι ο συντελεστής πληρότητας (Fill Factor) του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ισχύος εξόδου του στοιχείου προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης επί την τάση ανοιχτοκύκλωσης. Το γινόμενο αυτό αντιπροσωπεύει τη μέγιστη θεωρητικά ισχύ που μπορεί να αποδώσει το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

$$FF = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2)$$

όπου

$V_{mpp}$ : Η τάση εξόδου του σημείου μέγιστης ισχύος

$I_{mpp}$ : Το ρεύμα εξόδου του σημείου μέγιστης ισχύος

$P_{mpp}$ : Η μέγιστη ισχύς εξόδου

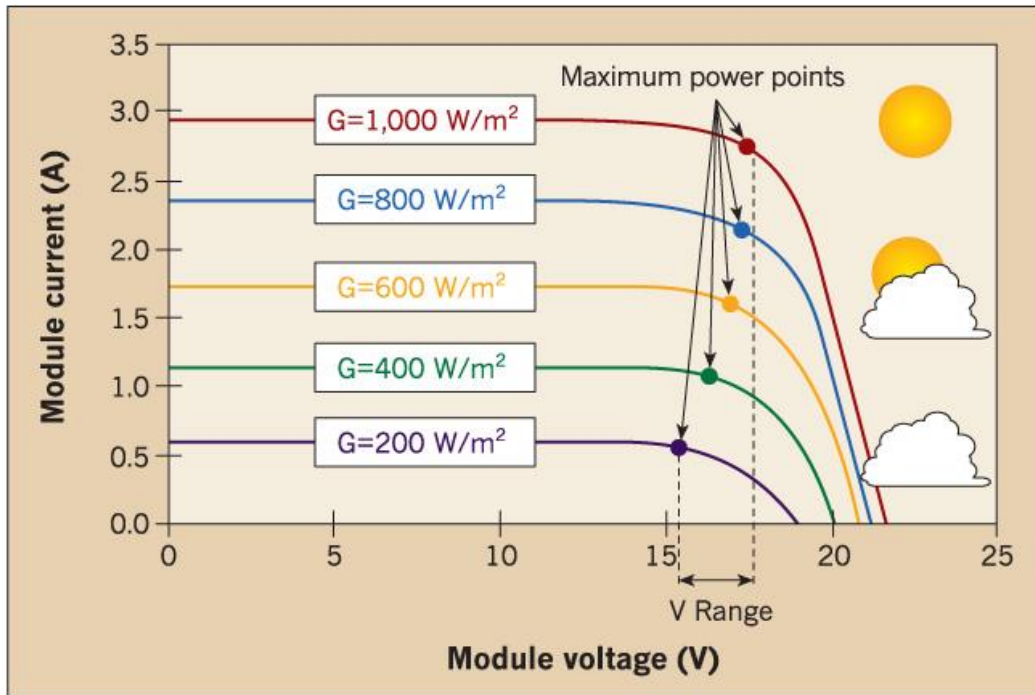
$V_{oc}$ : Η τάση ανοιχτού κυκλώματος

$I_{sc}$ : Το ρεύμα βραχυκύκλωσης

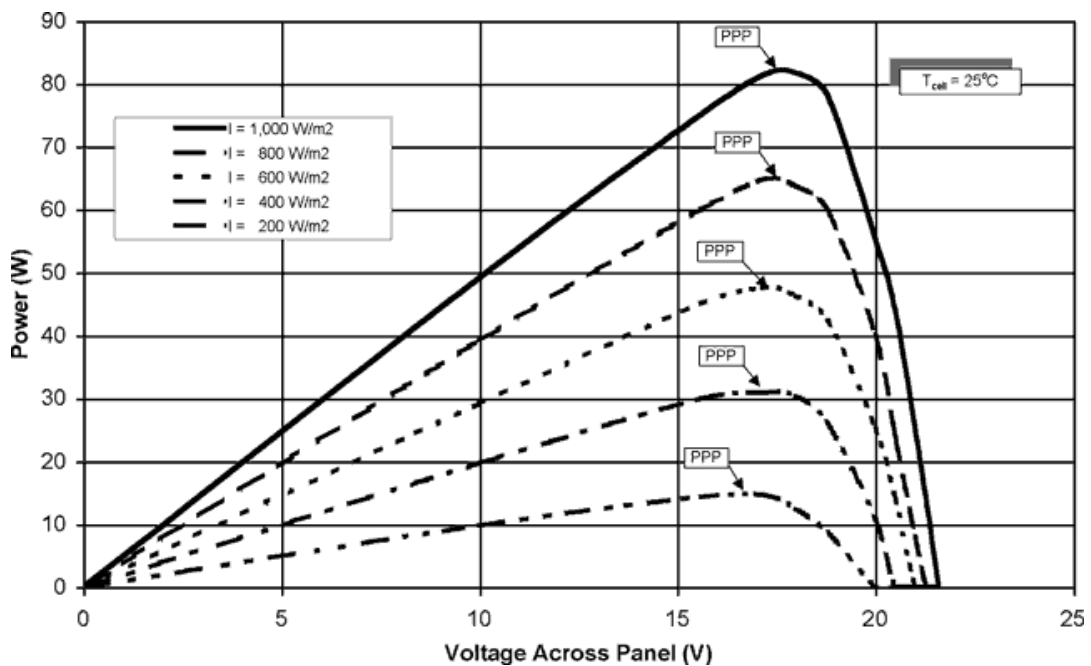
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα μεγέθη της Σχέσης (2) αναφέρονται σε σταθερές συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ταχύτητας ανέμου, υπό την έννοια ότι μεταβολή ενός εξ' αυτών των παραγόντων επιφέρει αλλαγές σε όλα τα μεγέθη της Σχέσης (2). Για φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου ο συντελεστής πληρότητας κυμαίνεται στα επίπεδα του 0,8 ενώ για στοιχεία άμορφου πυριτίου στα επίπεδα του 0,6.

### **Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας**

Όπως είναι λογικό, η συνολική ισχύς που μπορεί να παρέχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται άμεσα από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (Σχήματα 39 και 40). Όσο μεγαλύτερη η ένταση της προσπίπτουσας στην κυψέλη ηλιακής ακτινοβολίας τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα εξόδου και επομένως και η συνολική ισχύς που το στοιχείο παρέχει στο φορτίο. Αντιθέτως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 39, η τάση εξόδου παρουσιάζει μόνο μικρές μεταβολές συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας.



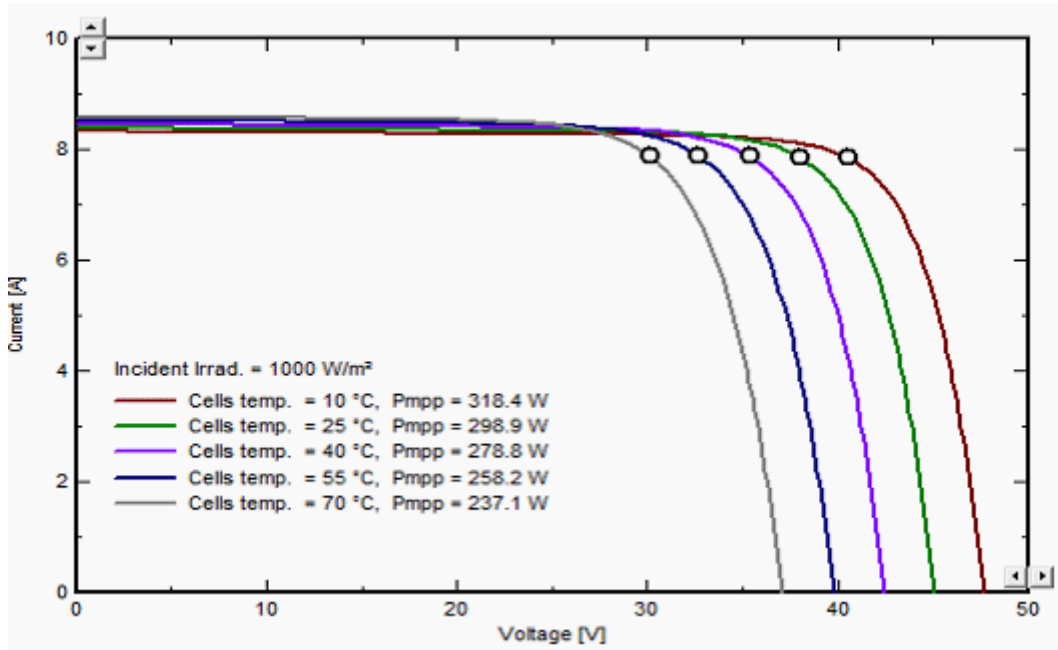
Σχήμα 39: Μεταβολή τάσης και ρεύματος εξόδου συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας



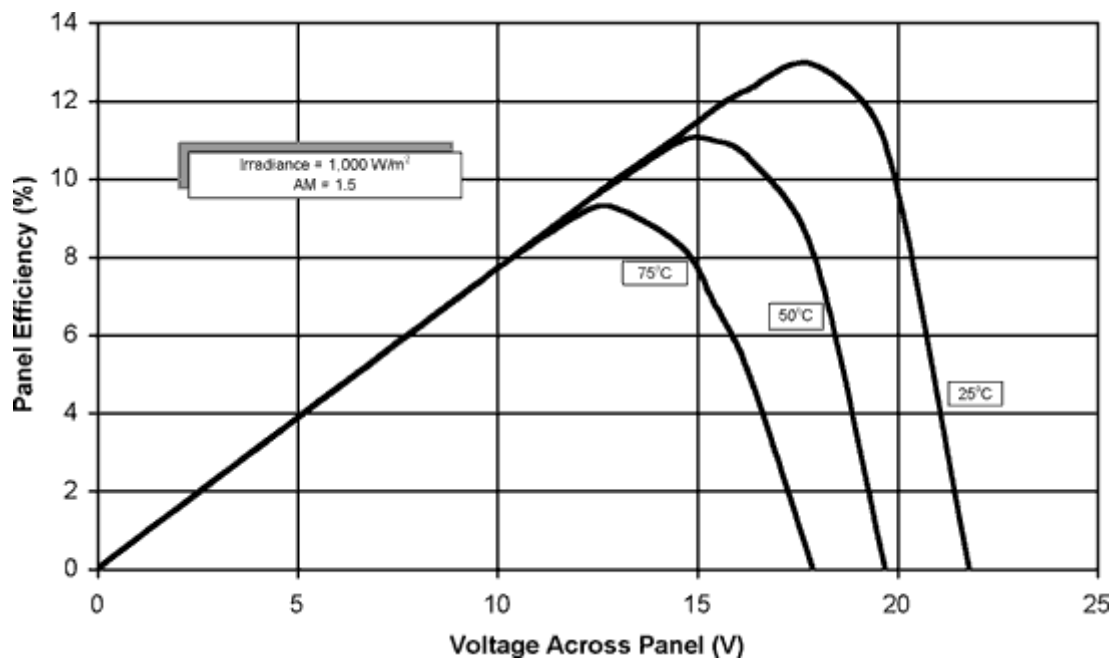
Σχήμα 40: Μεταβολή ισχύος εξόδου συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

### Επίδραση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου επηρεάζεται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία του και κατ' επέκταση και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στα Σχήματα 41 και 42 δίνεται η μεταβολή της τάσης και του ρεύματος εξόδου καθώς και της απόδοσης ενός μονοκρυσταλλικού πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού, θεωρώντας ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σταθερή και ίση με  $1000 \text{ W/m}^2$ .



Σχήμα 41: Μεταβολή τάσης και ρεύματος εξόδου μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού



Σχήμα 42: Μεταβολή της απόδοσης μονοκρυσταλλικού πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού

Γίνεται κατανοητό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυψελών επιφέρει σημαντική μείωση της απόδοσής τους, γεγονός το οποίο έχει οδηγήσει την εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας στην κατεύθυνση της εύρεσης αποτελεσματικών μεθόδων ψύξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Για το λόγο αυτό οι καλύτερες αποδόσεις των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων συναντώνται συνήθως κατά το μήνα Μάιο και όχι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς, παρά τα αυξημένα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας, η υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα σημαντική πτώση της απόδοσης κατά το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

### 3.4.2 Μοντέλα πρόβλεψης απόδοσης

Στη βιβλιογραφία απαντώνται διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης της απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία θεωρούνται πλέον δοκιμασμένα και ιδιαίτερα αξιόπιστα [17, 18]. Ένα σχετικά απλό παραμετρικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι το μοντέλο Beyer. Το συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού μέσω αναλυτικών σχέσεων της θερμοκρασίας του στοιχείου, της απόδοσής του καθώς και της ισχύος εξόδου του. Στη συνέχεια δίνονται οι αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις μέσα από τις οποίες προκύπτουν τα παραπάνω δεδομένα.

Αρχικά υπολογίζεται η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$T_M = T_A + c * I \quad (3)$$

όπου

$T_M$ : η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου

$T_A$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος

$I$ : η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

$c$ : σταθερά η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες εγκατάστασης (Πίνακας 1)

**Πίνακας 1: Τιμές σταθεράς  $c$  ανάλογα με τον τύπο εγκατάστασης**

<b>Τύπος Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης</b>	<b>Τιμή Σταθεράς <math>C</math></b>
Ενσωμάτωση σε στέγη	0.058
Εγκατάσταση σε στέγη με μικρό διάκενο αερισμού (έως 10 cm)	0.036
Εγκατάσταση σε στέγη με μεγάλο διάκενο αερισμού (άνω των 10 cm)	0.027
Εγκατάσταση σε ύπαιθρο	0.020

Γίνεται επομένως προφανές ότι η θερμοκρασία του πλαισίου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις εκάστοτε συνθήκες εγκατάστασης, αφού από αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η αποδοτική ψύξη του πλαισίου λόγω της επαφής του με τον αέρα (απώλειες θερμότητας λόγω συναγωγής). Όσο πιο δύσκολη γίνεται η ψύξη του πλαισίου τόσο μεγαλύτερες τιμές αποκτά η σταθερά  $c$  και επομένως τόσο μεγαλύτερη είναι και η τελική του θερμοκρασία.

Ακολούθως, υπολογίζεται η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία  $T_M$  βάση της ακόλουθης σχέσης:

$$\eta = \eta_{STC} * [1 + \alpha * (T_M - 25)] \quad (4)$$

όπου

$\eta$ : η ζητούμενη απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

$\eta_{STC}$ : η απόδοση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία πλαισίου  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$\alpha$ : σταθερά η οποία εκφράζει την πτώση της απόδοσης συναρτήσει της θερμοκρασίας και είναι συγκεκριμένη για κάθε κυψέλη (συνήθως παρέχεται από τον κατασκευαστή)

Η απόδοση του στοιχείου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta_{STC} = \alpha_1 + \alpha_2 * I + \alpha_3 * \ln(I) \quad (5)$$

όπου  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  και  $\alpha_3$  χαρακτηριστικές σταθερές του φωτοβολταϊκού στοιχείου που συνήθως παρέχονται από τον κατασκευαστή.

Τέλος, η ισχύς εξόδου υπολογίζεται ως το γινόμενο της απόδοσης επί την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία:

$$P = \eta * A * I \quad (6)$$

### 3.4.3 Επιπτώσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του τύπου εγκατάστασης στην απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Βάση του αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, γίνεται σε αυτή την ενότητα μια προσπάθεια προσεγγιστικού προσδιορισμού των επιδράσεων της θερμοκρασίας περιβάλλοντος καθώς και του τύπου της εγκατάστασης (στέγη, δώμα, ύπαιθρος κλπ.) στην ισχύ εξόδου και την απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για την απλοποίηση της διαδικασίας καθώς και λόγω του ότι δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν δεδομένα για τις απαιτούμενες για τη μοντελοποίηση σταθερές των

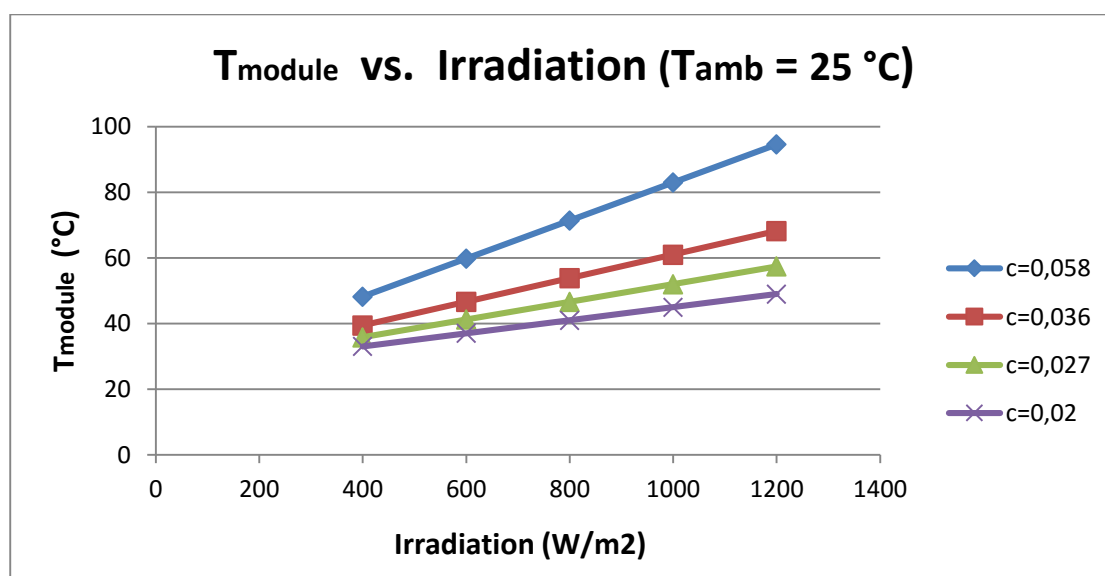
Σχέσεων (4) και (5), για τις ανάγκες της μελέτης έγινε χρήση μόνο της Σχέσης (3), η οποία παρέχει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου και της πτώσης της απόδοσης αξιοποιήθηκαν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά συγκεκριμένης φωτοβολταϊκής γεννήτριας, τα οποία και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, όπως προκύπτουν από το φυλλάδιο του κατασκευαστή.

**Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά λειτουργίας φωτοβολταϊκής γεννήτριας Aleo S18J260**

Λειτουργικά Χαρακτηριστικά	Μονάδα	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς $P_{mpp}$	W	260
Ονομαστική Τάση $V_{mpp}$	V	30,5
Ονομαστικό Ρεύμα $I_{mpp}$	A	8,51
Τάση Ανοιχτοκύκλωσης $V_{oc}$	V	37,7
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης $I_{sc}$	A	9,01
Συντελεστής Θερμοκρασίας $\gamma$ ( $P_{mpp}$ )	%/K	-0,43

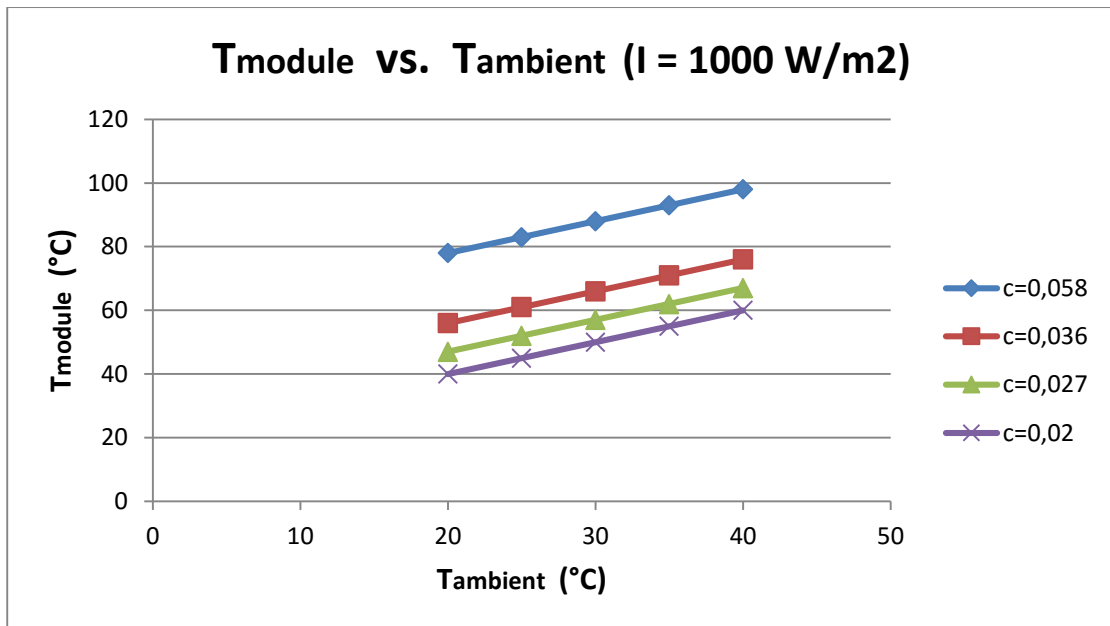
Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του Πίνακα 2 σε ότι αφορά την παρούσα μελέτη, το οποίο συναρτά άμεσα την ισχύ εξόδου του πλαισίου με την θερμοκρασία του, είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας  $\gamma$ , ο οποίος δίνεται ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του πλαισίου. Δεδομένου ότι η ονομαστική ισχύς ισούται με 260 W, η τιμή του συντελεστή θερμοκρασίας καταδεικνύει πτώση της ισχύος κατά 1,12 W για κάθε °C άνω των 25 °C.

Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνεται η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όπως υπολογίστηκε από την σχέση (3), για διαφορετικές συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος αντίστοιχα. Ο υπολογισμός έχει γίνει και για τους τέσσερις τύπους εγκατάστασης που αναφέρονται στον Πίνακα 1.



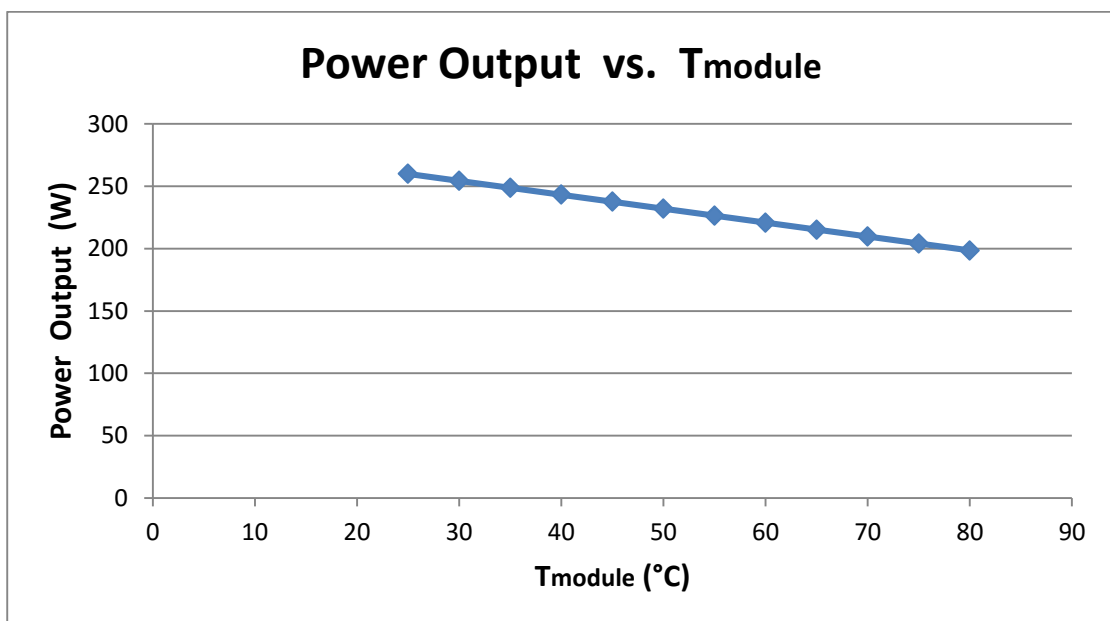
**Σχήμα 43: Μεταβολή της θερμοκρασίας πλαισίου συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας**



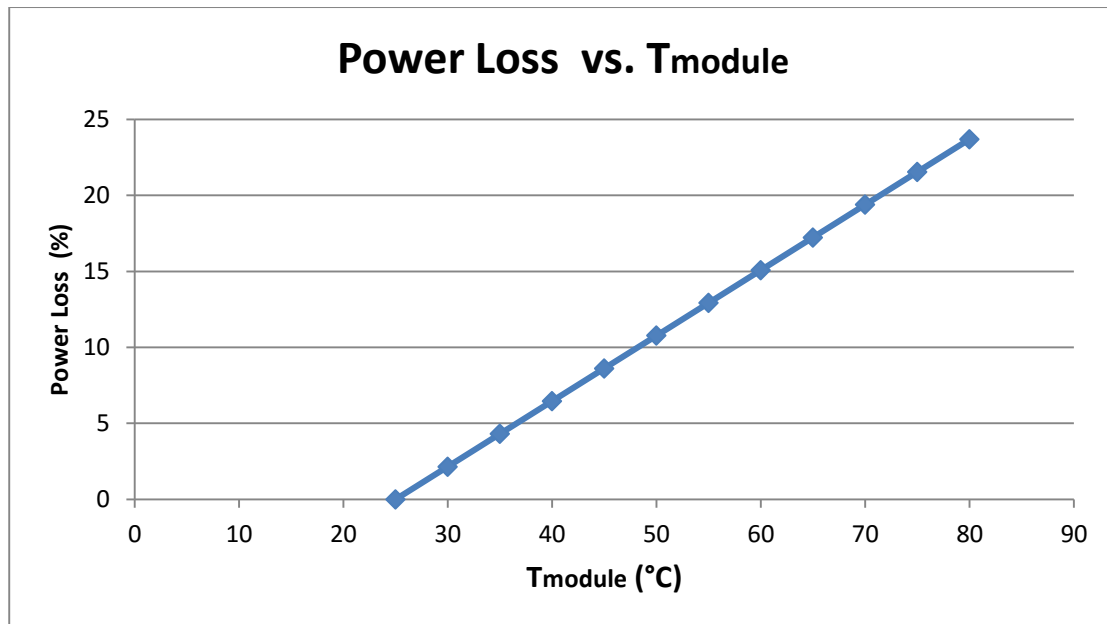


**Σχήμα 44: Μεταβολή της θερμοκρασίας πλαισίου συναρτήσει της έντασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος**

Δεδομένου ότι πολλοί κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων θεωρούν την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας στα επίπεδα των 80 – 85 °C [18], από τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανές ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες και ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις προσαρτημένες σε στέγες το όριο αυτό είναι πιθανό να ξεπεραστεί. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το ποσοστό των εγκαταστάσεων αυτών είναι σημαντικό και δεν αποτελεί αμελητέα ποσότητα. Παρατηρείται επίσης ότι σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας η θερμοκρασία του πλαισίου μπορεί να ξεπεράσει τους 60 °C.



**Σχήμα 45: Μεταβολή ισχύος εξόδου συναρτήσει της θερμοκρασίας του πλαισίου**



**Σχήμα 46: Απώλεια ισχύος (%) συναρτήσει της θερμοκρασίας του πλαισίου**

Για να γίνει κατανοητή η επίδραση των παραπάνω στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, στα Σχήματα 45 και 46 δίνεται σε απόλυτους αριθμούς και επί τοις εκατό η απώλεια ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο του Πίνακα 2.

Από τα παραπάνω γραφήματα μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι ακόμα και για θερμοκρασίες που εύκολα μπορούν να απαντηθούν στη χώρα μας (τάξης 50 °C), η απώλεια ισχύος δεν είναι καθόλου αμελητέα και ξεπερνά το 10%. Η ήδη χαμηλή απόδοση δηλαδή των φωτοβολταϊκών συστημάτων μειώνεται ακόμη περισσότερο. Είναι λοιπόν εμφανές ότι απαιτούνται μέθοδοι μείωσης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

### 3.5 Τεχνικές Αύξησης Παραγόμενης Ισχύος

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι οι αποδόσεις των συμβατικών φωτοβολταϊκών συστημάτων παραμένουν για την ώρα σε αρκετά χαμηλά επίπεδα, ενώ και το θεωρητικά μέγιστο όριο απόδοσης (περίπου 30%) είναι επίσης ιδιαίτερα χαμηλό. Δεδομένου ότι οι νέες, περισσότερο εξελιγμένες, τεχνολογίες (multijunction cells, quantum – dot cells κλπ.) αποτελούν προς το παρόν εργαστηριακό υλικό με άγνωστο ορίζοντα εμπορευματοποίησης, απαιτούνται διαφορετικές τεχνικές προκειμένου για την ενίσχυση της απόδοσης των υφιστάμενων τεχνολογιών αλλά και την αντιμετώπιση των λειτουργικών τους προβλημάτων (π.χ. πτώση απόδοσης με άνοδο της θερμοκρασίας). Στις επόμενες δύο ενότητες γίνεται συνοπτική αναφορά σε δύο εκ των σημαντικότερων τεχνικών ενίσχυσης της απόδοσης:

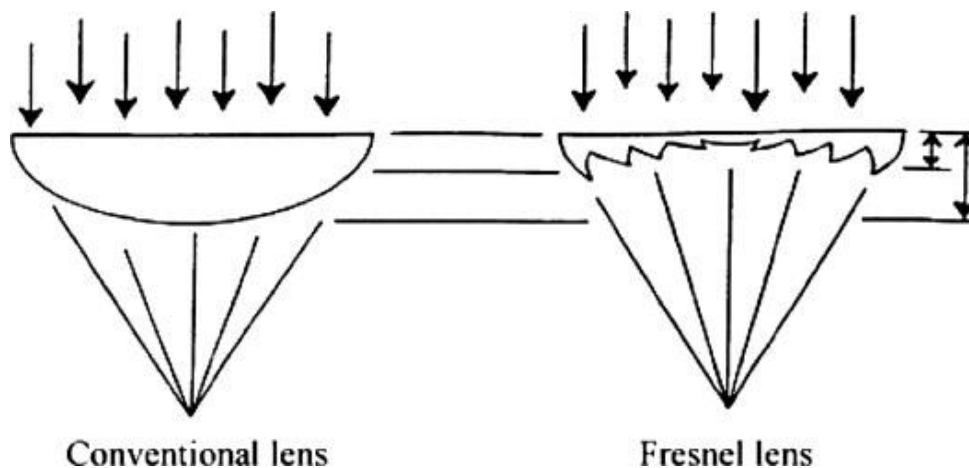
- Χρήση συστημάτων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας
- Ενσωμάτωση διατάξεων απαγωγής της θερμότητας σε φωτοβολταϊκά πλαίσια.

### 3.5.1 Συγκεντρωτικά Φ/Β συστήματα

Μία μεθοδολογία η οποία προσφέρει αύξηση της προσπίπτουσας στην φωτοβολταϊκή κυψέλη ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς αυξημένη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδό της είναι η χρήση ηλιακών συγκεντρωτών. Οι συγκεκριμένες διατάξεις συγκεντρώνουν λόγω της μεγάλης τους επιφάνειας μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, τα οποία στη συνέχεια κατευθύνουν προς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι να αυξάνεται η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην κυψέλη άρα και η ισχύς που αυτή μπορεί να παρέχει στο φορτίο. Στη συνέχεια δίνονται περιληπτικά οι κυριότερες τεχνολογίες ηλιακών συγκεντρωτών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση αυτών των διατάξεων έχει ως συνέπεια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας των κυψελών. Για το λόγο αυτό, παρά τα αυξημένα επίπεδα ισχύος, η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι μειωμένη, ανάλογα πάντα με τα επίπεδα συγκέντρωσης και τη χρησιμοποιούμενη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στην πλειοψηφία τους τα συγκεντρωτικά συστήματα αδυνατούν να εκμεταλλευτούν τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και αξιοποιούν μόνο την άμεση, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της απαιτούμενης επιφάνειάς τους [4]. Σε κάθε περίπτωση όμως, επιτυγχάνεται με τη χρήση τους μείωση της αναλογίας κόστους/αποδιδόμενης ισχύος.

#### Φακοί Fresnel

Οι φακοί Fresnel αποτελούν μία από τις πλέον διαδεδομένες τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας [19]. Λόγω της γεωμετρίας του απαιτεί σημαντικά λιγότερο κατασκευαστικό υλικό απ' ό,τι ένας αντίστοιχος συμβατικός φακός (Σχήμα 47). Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί επίσης ότι μπορεί να κατασκευαστεί και από πολυμερή υλικά για μεγαλύτερη μείωση του τελικού κόστους, αν και σε αυτή την περίπτωση συνήθως παρουσιάζεται μια μικρή πτώση της τελικής οπτικής απόδοσης.



**Σχήμα 47: Συμβατικός συγκεντρωτικός φακός και φακός Fresnel**

Συνήθως χρησιμοποιείται σε εφαρμογές σημειακής συγκέντρωσης (η προσπίπτουσα στο φακό ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε ένα σημείο), με αποτέλεσμα σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας της κυψέλης. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε συνδυασμό με συμβατικές τεχνολογίες (μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά

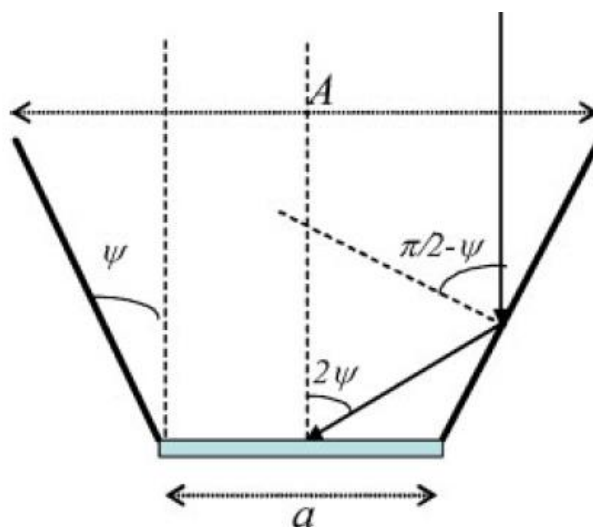
κλπ.) που απαιτούν σχετικά μεγάλη επιφάνεια κυψέλης. Αντ' αυτού, αξιοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με νεότερες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και κυρίως multi-junction κυψέλλες. Σε τέτοιες εφαρμογές τα επίπεδα συγκέντρωσης μπορεί να είναι πολύ υψηλά, απαιτείται όμως και κάποια μέθοδος απαγωγής θερμότητας από την κυψέλη.



**Σχήμα 48: Εμπορική εκδοχή φακού Fresnel**

### Συγκεντρωτικά κάτοπτρα σχήματος V

Μια εναλλακτική μεθοδολογία συγκέντρωσης, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί και σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες τεχνολογίες κυψελών, είναι η χρησιμοποίηση κατόπτρων σχήματος V. Τα κάτοπτρα τοποθετούνται εκατέρωθεν της κυψέλης και λόγω της γωνίας υπό την οποία χωροθετούνται, αντανακλούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω τους στο φωτοβολταϊκό στοιχείο (Σχήμα 49). Οι συγκεντρώσεις που μπορούν να επιτευχθούν είναι σχετικά μικρές (της τάξης του 2) και για το λόγο αυτό δεν οδηγούν σε μεγάλες αυξήσεις της θερμοκρασίας της κυψέλης [20, 21].



**Σχήμα 49: Σχηματικό διάγραμμα ηλιακών συγκεντρωτών σχήματος V**

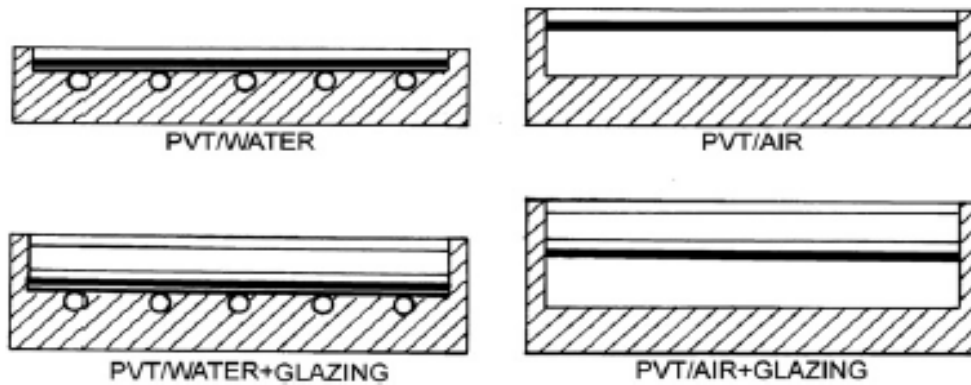


**Σχήμα 50: Πιλοτική εγκατάσταση συγκεντρωτών τύπου V στην Κρήτη**

Μεγάλο τους πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δυνητικά θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις, αν και για συστήματα μεγάλης ισχύος το κόστος μετατροπής πιθανότατα θα υπερκάλυπτε το αναμενόμενο όφελος.

### **3.5.2 Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμικά συστήματα**

Μια εναλλακτική μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία έχει συγκεντρώσει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον κυρίως την τελευταία δεκαετία, αποτελεί η κατασκευή υβριδικών φωτοβολταϊκών – θερμικών διατάξεων. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία προβλέπει την απαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μέσω ειδικών διατάξεων (συνήθως σωληνώσεων προσαρτημένων στις φωτοβολταϊκές κυψέλες), με τη βοήθεια κάποιου ρευστού μέσου (συνηθέστερα νερό ή αέρας). Με τον τρόπο αυτό η θερμοκρασία του πλαισίου μειώνεται οδηγώντας σε υψηλότερες αποδόσεις, όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως. Πέραν αυτού, είναι δυνατό να αξιοποιηθεί περαιτέρω η απαγόμενη θερμότητα για άλλους σκοπούς (π.χ. θέρμανση χώρων). Με τον τρόπο αυτό το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να παρέχει ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τη συνολική απόδοση της υβριδικής διάταξης [22, 23]. Στο Σχήμα 51 δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα των συνηθέστερων εκδοχών ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος.

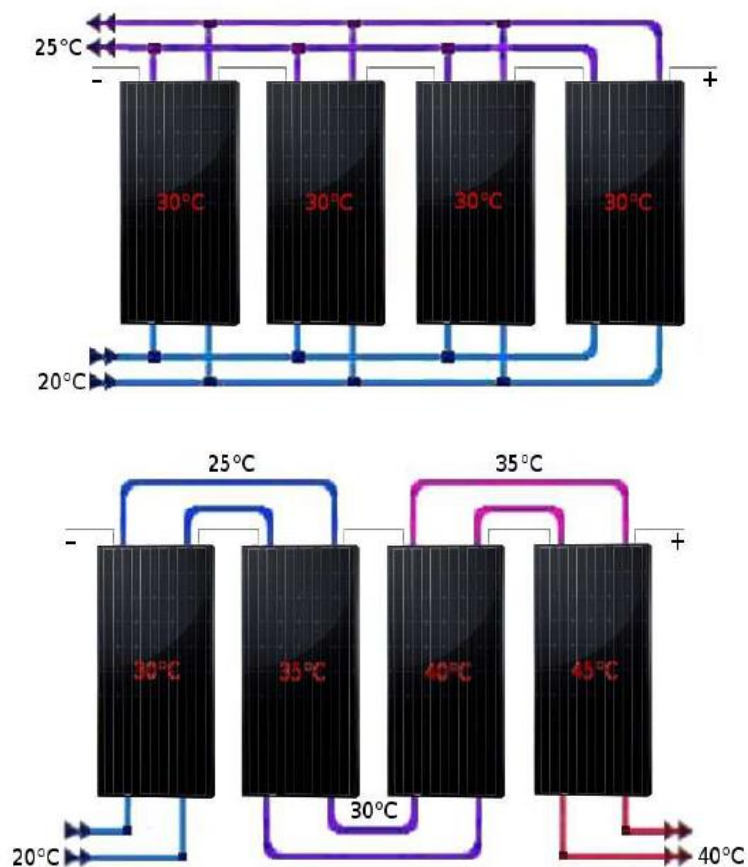


**Σχήμα 51: Συνηθέστεροι τύποι υβριδικών φωτοβολταϊκών – θερμικών συστημάτων με μέσο απαγωγής το νερό (αριστερά) και τον αέρα (δεξιά)**

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι ότι αυτού του τύπου τα συστήματα είναι ήδη στο στάδιο της εμπορευματοποίησης. Αυτή τη στιγμή υπάρχει ένας μικρός αριθμός εταιρειών που προσφέρουν ολοκληρωμένες λύσεις στον τομέα των υβριδικών φωτοβολταϊκών – θερμικών συστημάτων [24, 25]. Απαντώνται εμπορικά συστήματα που χρησιμοποιούν ως μέσο απαγωγής τόσο τον αέρα (Σχήμα 52) όσο και το νερό (Σχήμα 53).



**Σχήμα 52: Υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικό σύστημα με μέσο ψύξης τον αέρα**



**Σχήμα 53: Υβριδικό φωτοβολταϊκό – θερμικά σύστημα με μέσο ψύξης το νερό**

Από το Σχήμα 53 γίνεται εμφανές ότι ανάλογα με την τοπολογία του συστήματος απαιτείται κάποιος συμβιβασμός μεταξύ της ηλεκτρικής και της θερμικής απόδοσής του.

## 4 ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

### 4.1 Γενικά στοιχεία

Η θερμοηλεκτρική τεχνολογία τα τελευταία χρόνια προσελκύει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και της βιομηχανίας λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει έναντι άλλων τεχνολογιών αλλά και των πολλαπλών δυνατοτήτων ενσωμάτωσής της σε μια σειρά υφιστάμενων εφαρμογών [8]. Η χρήση των θερμοηλεκτρικών γεννητριών ποικίλει ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο αξιοποιούνται. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξειδικευμένες εφαρμογές ψύξης (επεξεργαστές Η/Υ, ψύξη επιφανειών οποιουδήποτε τύπου) αλλά και ως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ικανότητας τους να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμική και το αντίστροφο. Δεδομένης της επιτακτικής ανάγκης που υπάρχει για νέες και περισσότερο αποδοτικές τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες αποτελούν πλέον μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εναλλακτική.

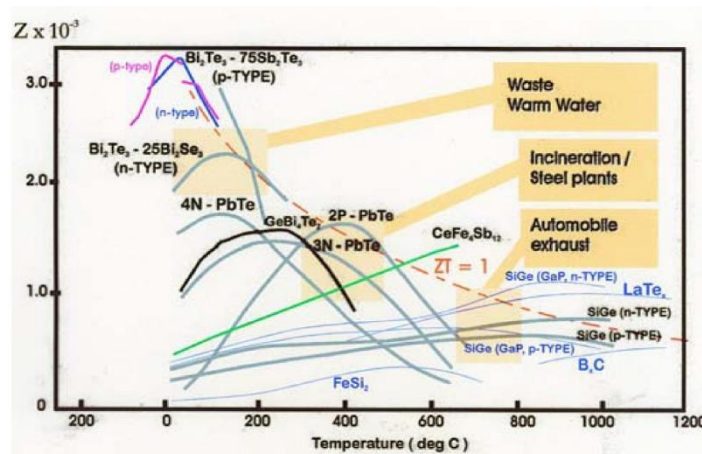
Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο συναντάται με δύο μορφές:

- Φαινόμενο Seebeck: Πρόκειται για την εκμετάλλευση υφιστάμενων πεδίων διαφοράς θερμοκρασίας προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια
- Φαινόμενο Peltier: Ουσιαστικά πρόκειται για την αντιστροφή του φαινομένου Seebeck. Στην περίπτωση αυτή παρέχεται ηλεκτρική τάση στη γεννήτρια η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε διαφορά θερμοκρασίας πάνω στη θερμοηλεκτρική διάταξη.

Οι δύο αυτές μορφές του θερμοηλεκτρικού φαινομένου θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενη ενότητα.

### 4.2 Θερμοηλεκτρικά υλικά

Τα θερμοηλεκτρικά υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας συμπεριφέρονται διαφορετικά μεταβάλλοντας την απόδοσή τους ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία καλούνται να λειτουργήσουν (Σχήμα 54).



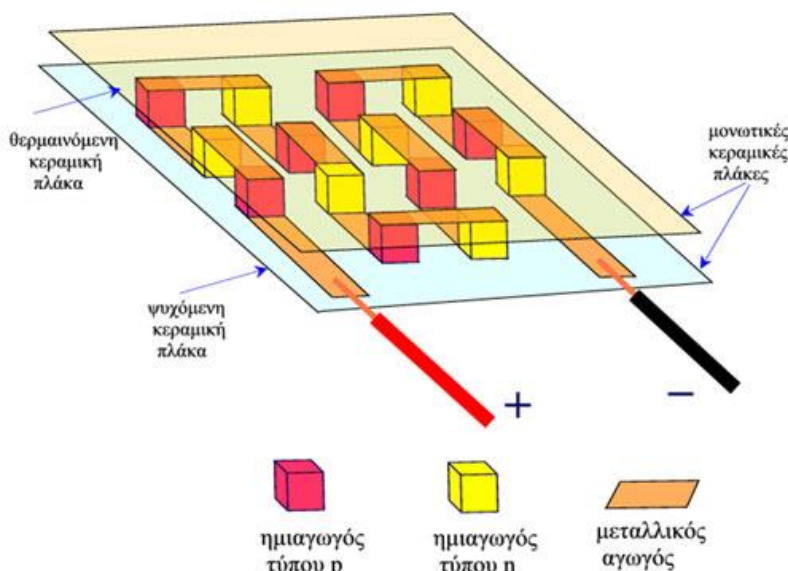
Σχήμα 54: Μεταβολή της απόδοσης των περισσότερο διαδεδομένων θερμοηλεκτρικών υλικών συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας



Κράματα με βάση το βισμούθιο σε συνδυασμό με αντιμόνιο, τελλούριο ή σελήνιο χρησιμοποιούνται σε χαμηλές θερμοκρασίες, κυρίως κοντά στους 450 K. Σε θερμοκρασίες περί τους 850 K τα θερμοηλεκτρικά υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται βασίζονται στον μόλυβδο ενώ για θερμοκρασίες μέχρι τους 1300 K αξιοποιούνται κράματα πυριτίου-γερμανίου [26]. Παρόλο που τα υλικά αυτά είναι τα συνηθέστερα στην αγορά των θερμοηλεκτρικών εφαρμογών, η εξέλιξη της ερευνητικής δραστηριότητας έχει οδηγήσει στην εύρεση και κατασκευή νέων περισσότερο αποδοτικών υλικών [9].

### 4.3 Ανάλυση λειτουργίας θερμοηλεκτρικών διατάξεων

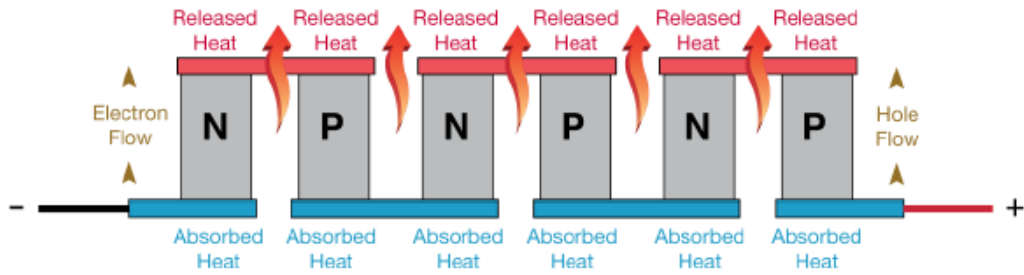
Στο Σχήμα 55 δίνεται η άποψη μιας τυπικής θερμοηλεκτρικής συστοιχίας αποτελούμενης από ημιαγωγικά στοιχεία τύπου p και n καθώς και των μεταλλικών αγωγών που απαιτούνται για την εν σειρά ηλεκτρική τους διασύνδεση. Οι μονωτικές κεραμικές πλάκες αποτελούν τη ζεστή και κρύα πλευρά της συσκευής.



Σχήμα 55: Άποψη της γεωμετρίας τυπικής θερμοηλεκτρικής διάταξης

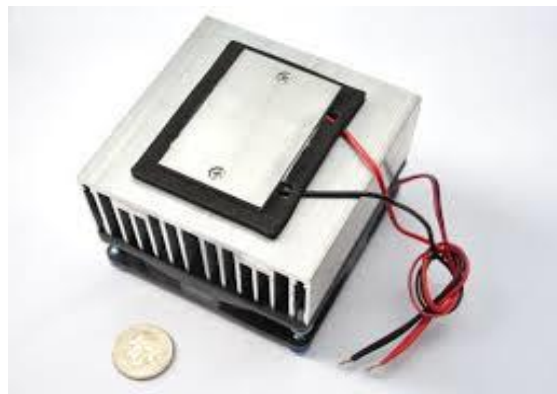
#### 4.3.1 Λειτουργία Peltier

Σε αυτή την περίπτωση το ζητούμενο είναι η εκμετάλλευση του φαινομένου Peltier για εφαρμογές ψύξης (συνηθέστερα) ή θέρμανσης. Καταρχάς απαιτείται η εφαρμογή μιας ηλεκτρικής τάσης στα άκρα της συστοιχίας των ζευγών p-n. Η τάση που εφαρμόζεται προκαλεί κίνηση των φορέων του ηλεκτρικού φορτίου (οπών και ηλεκτρονίων αντίστοιχα) μέσα στα ημιαγωγικά στοιχεία. Συνεπακόλουθο αυτού είναι η μεταφορά θερμότητας από την μια πλευρά της διάταξης (κρύα πλευρά – κεραμική πλάκα) στην άλλη (ζεστή πλευρά – κεραμική πλάκα). Η επιφάνεια δηλαδή από την οποία απορροφάται θερμότητα ψύχεται, ενώ η επιφάνεια στην οποία η θερμότητα μεταφέρεται θερμαίνεται (Σχήμα 56).



**Σχήμα 56: Λειτουργία Peltier της θερμοηλεκτρικής συστοιχίας [27]**

Η θερμότητα που καταλήγει στην θερμή επιφάνεια της θερμοηλεκτρικής συσκευής διοχετεύεται στο περιβάλλον μέσω κάποιου θερμοαπαγωγού μέσου που στις συνήθεις περιπτώσεις είναι μια ψύκτρα αέρα ή νερού (Σχήμα 57). Αντίστοιχα η κρύα πλευρά χρησιμοποιείται για να ψύξει κάποιο ηλεκτρονικό εξάρτημα ή μια επιφάνεια. Σε πιο απαιτητικές εφαρμογές μπορούν να συνδεθούν περισσότερες συσκευές παράλληλα για διαχείριση μεγαλύτερου θερμικού φορτίου ή να τοποθετηθούν η μία πάνω στην άλλη για να πετύχουν μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας (Σχήμα 58).



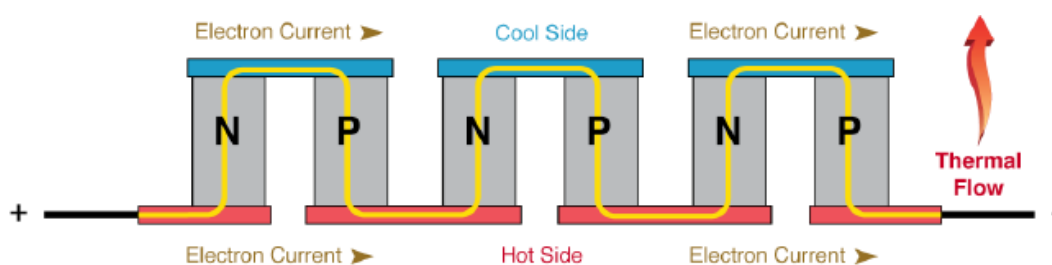
**Σχήμα 57: Θερμοηλεκτρική συσκευή με ψύκτρα αέρα για την απαγωγή της θερμότητας**



**Σχήμα 58: Θερμοηλεκτρικές συσκευές στοιβαγμένες η μία πάνω στην άλλη για αποδοτικότερη διαχείριση του θερμικού φορτίου**

### 4.3.2 Λειτουργία Seebeck

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα πρόκειται ουσιαστικά για το αντίστροφο του φαινομένου Peltier. Στην περίπτωση αυτή η διάταξη τοποθετείται μέσα σε ένα υφιστάμενο πεδίο θερμοκρασιακής διαφοράς με τρόπο τέτοιο ώστε η μία κεραμική πλάκα να έρχεται σε επαφή με την θερμή πηγή (ζεστή πλευρά) ενώ η άλλη κεραμική πλάκα να έρχεται σε επαφή με την κρύα πηγή (κρύα πλευρά). Εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας από την ζεστή στην κρύα πλευρά μέσα από τα ημιαγώγιμα στοιχεία  $p$  και  $n$  που είναι τοποθετημένα μεταξύ των κεραμικών πλακών (Σχήμα 59). Συνεπακόλουθο της μεταφοράς θερμότητας είναι και η μεταφορά των φορέων ηλεκτρικού φορτίου (οπών και ηλεκτρονίων) μέσω των ημιαγώγιμων στοιχείων  $p$  και  $n$ . Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται επομένως μια διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρικά άκρα της θερμοηλεκτρικής συστοιχίας.



**Σχήμα 59: Λειτουργία Seebeck της θερμοηλεκτρικής συστοιχίας [27]**

Όπως και στην περίπτωση λειτουργίας σε εφαρμογές ψύξης (Peltier) η πλευρά της συσκευής στην οποία διοχετεύεται η θερμότητα πρέπει να ψύχεται ώστε η διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα των ημιαγωγών να διατηρηθεί. Σε διαφορετική περίπτωση μετά από σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα η θερμοκρασίες των δύο πλευρών θα τείνουν να εξισωθούν μειώνοντας σημαντικά την ηλεκτρική απόδοση.

Αν και σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας των θερμοηλεκτρικών γεννητριών αποτελεί η σχετικά χαμηλή τους απόδοση (περίπου 6% για εφαρμογές έως 450 K) τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έχουν στρέψει σημαντικό κομμάτι της έρευνας τόσο στην αναζήτηση πιο αποδοτικών υλικών όσο και στη βελτίωση των ιδιοτήτων των υφιστάμενων υλικών. Πρόκειται για τεχνολογία αθόρυβη, αξιόπιστη, παρουσιάζει μεγάλο χρόνο ζωής και απαιτεί ελάχιστη συντήρηση. Δεν είναι εξάλλου τυχαίο ότι η θερμοηλεκτρική τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας σε μεγάλο αριθμό διαστημικών αποστολών [26].

Στην παρούσα εργασία γίνεται πειραματική διερεύνηση της απόδοσης ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού – θερμοηλεκτρικού συστήματος προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες είναι κατάλληλες για να εκμεταλλευτούν μέσω του φαινομένου Seebeck τις υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται στα φωτοβολταϊκά κελιά κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η φιλοσοφία των συστημάτων αυτών αναλύεται σε επόμενη ενότητα, αμέσως μετά την παράθεση των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν εν γένει τη λειτουργία των θερμοηλεκτρικών γεννητριών.

#### 4.4 Μαθηματική περιγραφή λειτουργίας θερμοηλεκτρικών γεννητριών

Λόγω της φύσης των θερμοηλεκτρικών γεννητριών (θερμικές μηχανές), η μέγιστη απόδοσή τους περιορίζεται από την απόδοση Carnot:

$$\eta_{max} = \frac{T_H - T_C}{T_H} * \frac{\sqrt{1 + Z * \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z * \bar{T}} + T_C/T_H} \quad (7)$$

όπου  $T_H$  και  $T_C$  οι θερμοκρασίες ζεστής και κρύας πλευράς (δεξαμενής) αντίστοιχα, ενώ  $\bar{T}$  η μέση θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{T} = \frac{T_H + T_C}{2} \quad (8)$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης (7) αντιστοιχεί στην απόδοση Carnot. Η παράμετρος  $Z$  ονομάζεται θερμοηλεκτρικός συντελεστής κέρδους. Πρόκειται για θερμοκρασιακά εξαρτώμενη παράμετρο και αποτελεί ουσιαστικά το κυριότερο κριτήριο σύγκρισης της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών υλικών (όσο μεγαλύτερο το  $Z$  τόσο καλύτερη η απόδοση της γεννήτριας). Ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής κέρδους συναρτάται από τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς και τη σταθερά Seebeck του θερμοηλεκτρικού υλικού:

$$Z = a^2 * \frac{\sigma}{\kappa} \quad (9)$$

όπου  $a$  η σταθερά Seebeck του υλικού και  $\sigma, \kappa$  η ηλεκτρική και θερμική του αγωγιμότητα αντίστοιχα. Η σταθερά Seebeck ( $\mu\text{V}/\text{K}$ ) αποτελεί άμεσο δείκτη του μεγέθους του φαινομένου Seebeck σε ένα οποιοδήποτε θερμοηλεκτρικό υλικό και ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα του υλικού για κάθε βαθμό  $\text{K}$  διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των άκρων του σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος:

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (10)$$

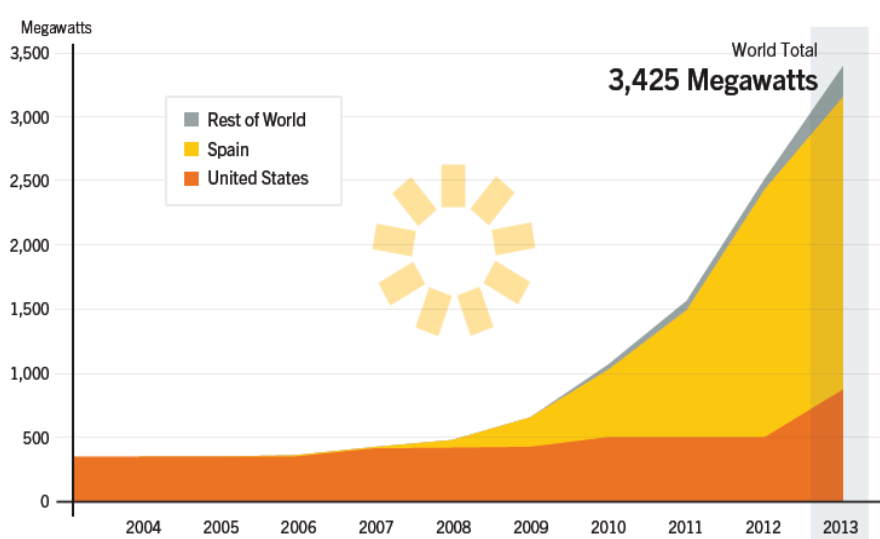
Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η απόδοση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προς την θερμική ισχύ που απορροφάται στη ζεστή πλευρά της:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (11)$$

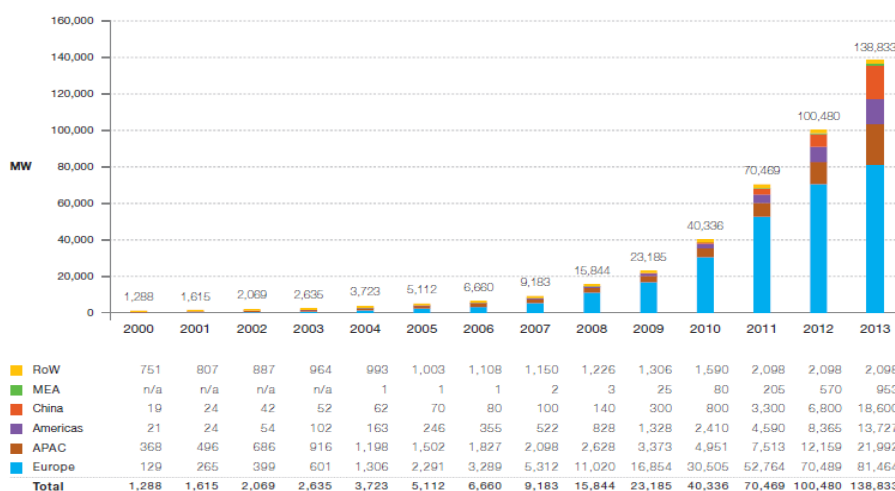
όπου  $P_{OUT}$  η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας,  $Q_H$  η θερμική ισχύς που απορροφά στη ζεστή πλευρά της και  $Q_C$  η θερμική ισχύς που απορρίπτεται στην κρύα πλευρά της διάταξης.

## 5 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά – Θερμοηλεκτρικά Συστήματα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο σύνολο των παγκόσμιων υποδομών παραγωγής ενέργειας αποτελεί πλέον μια αναγκαιότητα, λόγω της αδυναμίας ελέγχου περιβαλλοντικών ζητημάτων όπως είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή. Στα πλαίσια αυτά, οι τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιοθερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα) αναμένεται να διαδραματίσουν στα αμέσως επόμενα χρόνια πολύ σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή αγορά. Αν και η διεξόδυση των δύο αυτών τεχνολογιών στην αγορά ποικίλει από χώρα σε χώρα, είναι ξεκάθαρο ότι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία τυγχάνει μεγαλύτερης αποδοχής (Σχήμα 60), κυρίως εξαιτίας της απουσίας μηχανικών μερών και της ευκολότερης συντήρησης.



(α)



RoW: Rest of the World. MEA: Middle East and Africa. APAC: Asia Pacific. Methodology used for RoW data collection has changed in 2012.

(β)

Σχήμα 60: Εγκατεστημένη ισχύς ηλιοθερμικών (α) και φωτοβολταϊκών (β) συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το έτος 2013, [2]

Παρά όμως την εξαιρετική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια τόσο σε ότι αφορά νέα υλικά όσο και στα ζητήματα της μηχανικής των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι αποδόσεις των εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα, τα οποία στην πράξη σπανίως ξεπερνούν το 17%. Ο κυριότερος λόγος είναι η αδυναμία πλήρους εκμετάλλευσης του ηλιακού φάσματος, η οποία έχει σαν συνέπεια και τη σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας των κυψελών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, προκαλώντας επιπρόσθετα προβλήματα. Η εκμετάλλευση υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες (κυψέλες πολλαπλής επαφής κλπ.) αποτελεί οπωσδήποτε μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για το μέλλον, σε κάθε όμως περίπτωση τα υλικά αυτά αποτελούν προς το παρόν εργαστηριακή τεχνολογία και ο χρόνος εμπορικής τους διάθεσης είναι ακόμη άγνωστος. Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση βελτίωσης της απόδοσης, απαιτούν όμως την ύπαρξη ενός συστήματος απαγωγής της θερμότητας προκειμένου η θερμοκρασία των κυψελών να παραμείνει σε αποδεκτά επίπεδα.

Στα πλαίσια αυτά, έχει πρόσφατα εξεταστεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών κυψελών και θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε ένα υβριδικό σύστημα το οποίο θα μπορούσε να προσφέρει μια διαφορετική εναλλακτική πρόταση στην κατεύθυνση βελτίωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στα συστήματα αυτά, η προσθήκη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας λειτουργεί σε δύο κατευθύνσεις:

- Ψύξη της φωτοβολταϊκής κυψέλης ώστε να επιτευχθεί βελτιωμένη απόδοση
- Εκμετάλλευση της θερμότητας που απάγεται μέσω του φαινομένου Seebeck με στόχο την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διαδικασία της απαγωγής

Στο σύνολό τους τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο επί μέρους κατηγορίες:

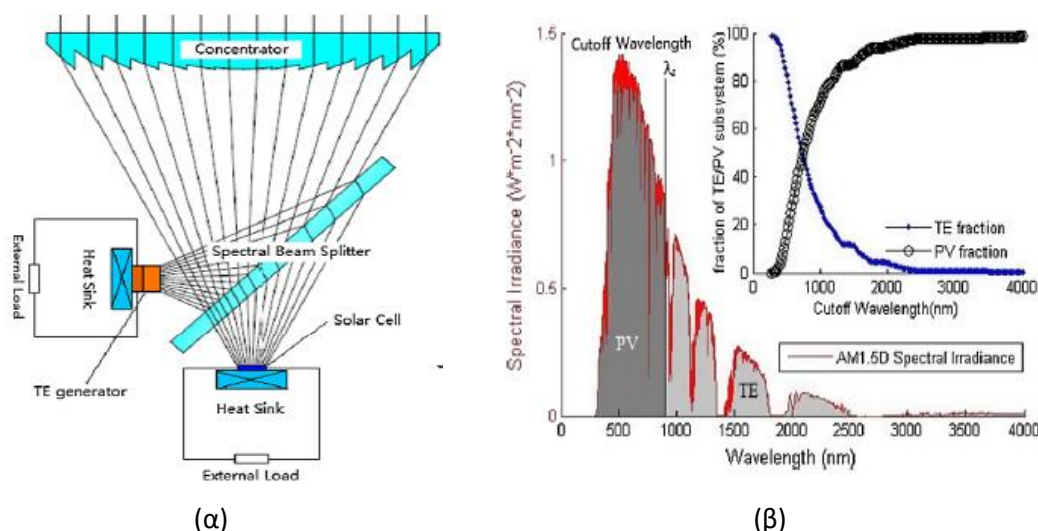
- Υβριδικά συστήματα με διαχωρισμό του ηλιακού φάσματος
- Υβριδικά συστήματα παράλληλης διάταξης

Στις επόμενες δύο ενότητες γίνεται μια πιο εκτενής αναφορά στο σχεδιασμό των δύο αυτών τύπων υβριδικού συστήματος και δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τα αποτελέσματα που απαντώνται στη σχετική βιβλιογραφία.

## 5.1 Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμοηλεκτρικά συστήματα με διαχωρισμό του ηλιακού φάσματος

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται κατάλληλη διάταξη (π.χ. πρίσμα) πριν την φωτοβολταϊκή κυψέλη, η οποία διαχωρίζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε δύο τμήματα (Σχήμα 61):

- Ένα τμήμα που αποτελείται από το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι περίπου τα 900 nm το οποίο οδηγείται στην φωτοβολταϊκή κυψέλη
- Ένα τμήμα που αποτελείται από το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας πέραν των 900 nm το οποίο οδηγείται στην θερμοηλεκτρική γεννήτρια



**Σχήμα 61: Υβριδική φωτοβολταϊκή – θερμοηλεκτρική διάταξη με διαχωρισμό του ηλιακού φάσματος (α) και διάγραμμα με ένδειξη του μήκους κύματος αποκοπής (β), [28]**

Με τον τρόπο αυτό η προσπίπτουσα στην φωτοβολταϊκή κυψέλη ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται μόνο από τα φάσμα στο οποίο υπάρχει δυνατότητα αποδοτικής μετατροπής ενώ το υπόλοιπο τμήμα του φάσματος αξιοποιείται οδηγούμενο στη θερμοηλεκτρική γεννήτρια. Είναι σαφές ότι πολύ μεγάλο ρόλο στη συνολική απόδοση μιας τέτοιας διάταξης παίζει ο ακριβής διαχωρισμός του ηλιακού φάσματος ανάλογα με την τεχνολογία φωτοβολταϊκής κυψέλης η οποία χρησιμοποιείται. Ο σημαντικότερος, επομένως, παράγοντας είναι η ακρίβεια προσδιορισμού της συχνότητας αποκοπής. Διατάξεις αυτού του τύπου έχουν ήδη κατασκευαστεί σε εργαστηριακό επίπεδο και μπορεί να χρησιμοποιούν επιπλέον και συγκεντρωτικό φακό πριν τη συσκευή διαχωρισμού για καλύτερη απόδοση [28, 29]. Εξακολουθεί φυσικά να υπάρχει η απαίτηση για ψύξη της κρύας πλευράς της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.

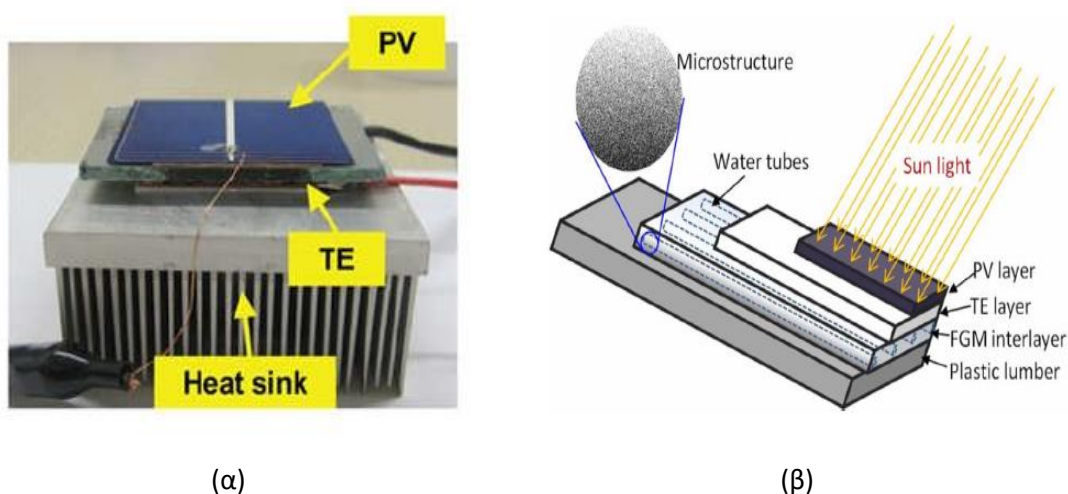
Θεωρητικές μελέτες έδειξαν ότι τέτοια συστήματα μπορούν να πετύχουν αύξηση της απόδοσης της τάξης του 10 – 20% για κελιά κρυσταλλικού ή άμορφου πυριτίου, ενώ



στην περίπτωση πολυμερών κυψελών η αύξηση της απόδοσης μπορεί να ξεπεράσει και το 60% [28]. Πειραματικές δοκιμές υπογραμμίζουν επίσης τη σημασία της ενσωμάτωσης μέσων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου η απόδοση του υβριδικού συστήματος να γίνει οικονομικά βιώσιμη [29]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των συστημάτων διαχωρισμού είναι η διατήρηση της φωτοβολταϊκής απόδοσης σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα και η δυνατότητα αξιοποίησης μεγάλων συγκεντρωτικών συστημάτων με συνεπακόλουθη αύξηση της παραγωγής. Μειονέκτημα όμως αποτελεί η απαίτηση ενσωμάτωσης της συσκευής διαχωρισμού που σε συνδυασμό με το συγκεντρωτικό φακό καθιστά το προτεινόμενο σύστημα ιδιαίτερα πολύπλοκο.

## 5.2 Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμοηλεκτρικά συστήματα παράλληλης διάταξης

Από κατασκευαστικής πλευράς οι διατάξεις αυτές είναι αρκετά πιο απλές συγκριτικά με τα συστήματα διαχωρισμού της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην περίπτωση αυτή η θερμοηλεκτρική γεννήτρια τοποθετείται στο πίσω μέρος της φωτοβολταϊκής κυψέλης (Σχήμα 62). Με τον τρόπο αυτό η θερμοηλεκτρική διάταξη λειτουργεί ως μέσο απαγωγής της θερμότητας, όπως ακριβώς θα λειτουργούσε οποιαδήποτε άλλη συσκευή ψύξης (π.χ. ψύκτρα αέρα ή νερού). Εμποδίζεται έτσι η αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης σε επικίνδυνα επίπεδα και παρέχεται κάποια επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μέσα στην οποία λειτουργεί η θερμοηλεκτρική συσκευή. Και εδώ απαιτείται κάποιο μέσο ψύξης της κρύας πλευράς του θερμοηλεκτρικού, το οποίο εξασφαλίζεται είτε μέσω του αέρα είτε μέσω διερχόμενου νερού.



**Σχήμα 62: Υβριδικά φωτοβολταϊκά – θερμοηλεκτρικά συστήματα παράλληλης διάταξης με ψύξη μέσω αέρα (α) και μέσω νερού (β) [30, 31]**

Οι πρώτες θεωρητικές μελέτες σχετικά με την απόδοση τέτοιων συστημάτων έδειξαν ότι αύξηση της απόδοσης σε ποσοστό άνω του 20% μπορεί να είναι εφικτή [18]. Παρόλα αυτά μεταγενέστερες προσπάθειες καταδεικνύουν την ανάγκη για θερμοηλεκτρικά

υλικά υψηλότερης απόδοσης αλλά και ενσωμάτωση μηχανισμών συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου τα υβριδικά συστήματα παράλληλης διάταξης να καταστούν ανταγωνιστικά [31, 32]. Δοκιμές με συστήματα στα οποία υπάρχει και εν σειρά ηλεκτρική σύνδεση της κυψέλης με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια έδωσαν αυξημένη απόδοση κατά 30% [30]. Πειραματική διερεύνηση ενός τέτοιου συστήματος που ενσωματώνει και θερμική συγκέντρωση στο θερμοηλεκτρικό τμήμα οδήγησαν σε διπλασιασμό της ισχύος εξόδου της υβριδικής διάταξης [33].

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε πειραματικά η απόδοση μιας υβριδικής φωτοβολταϊκής – θερμοηλεκτρικής συσκευής παράλληλης διάταξης. Για τις ανάγκες των πειραμάτων κατασκευάστηκαν δύο τέτοια υβριδικά συστήματα. Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου κατασκευής των διατάξεων, των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Δίνονται επίσης τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυσή τους. Τέλος γίνονται συγκεκριμένες προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της παρούσας εργασίας.

## 6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 6.1 Κατασκευή των πειραματικών διατάξεων

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.2, για τους σκοπούς της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκαν δύο πειραματικές διατάξεις. Η πρώτη διάταξη περιελάμβανε την ενσωμάτωση μιας εμπορικής θερμοηλεκτρικής συσκευής σε φωτοβολταϊκό πάνελ και σκοπός της ήταν να γίνουν μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο. Η δεύτερη διάταξη κατασκευάστηκε με ενσωμάτωση δύο θερμοηλεκτρικών συσκευών σε φωτοβολταϊκή κυψέλη με στόχο τη διεξαγωγή μετρήσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στις Ενότητες 6.1.1 και 6.1.2 περιγράφονται αναλυτικά οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ο τρόπος ενσωμάτωσης που επιλέχθηκε κατά περίπτωση.

#### 6.1.1 Πειραματική διάταξη με ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικού σε φωτοβολταϊκό πάνελ (μετρήσεις σε εξωτερικό χώρο)

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων σε εξωτερικό χώρο επιλέχθηκε φωτοβολταϊκό πάνελ του οίκου BSL Solar (Σχήμα 63), τα ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας του οποίου δίνονται στον Πίνακα 3 που ακολουθεί:

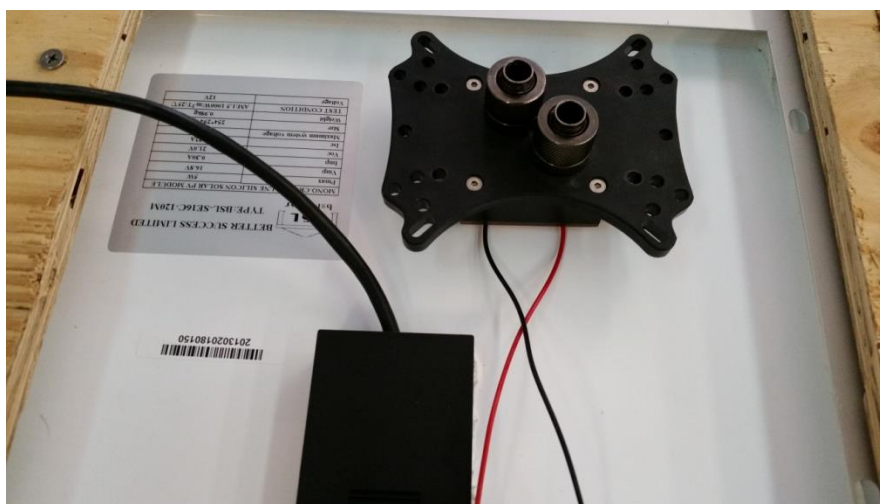


Σχήμα 63: Φωτοβολταϊκά πάνελ BSL-SE16C

Πίνακας 3: Λειτουργικές παράμετροι απόδοσης του Φ/Β πάνελ BSL-SE16C (συνθήκες STC)

Παράμετροι λειτουργίας STC	Μονάδα	Τιμή
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	V	21,0
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	A	0,32
Τάση Βέλτιστης Λειτουργίας	V	16,8
Ρεύμα Βέλτιστης Λειτουργίας	A	0,3
Ισχύς Βέλτιστης Λειτουργίας	W	5,0
Απόδοση	%	6,7
Συντελεστής Μείωσης Ισχύος	%/°C	-0,5

Από προκαταρκτικά πειράματα διαπιστώθηκε ότι η απόδοση του πάνελ σε εξωτερικό χώρο παρουσίαζε απόκλιση άνω του 5% σε σχέση με τα ονομαστικά μεγέθη του. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο όμοια πάνελ με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια να ενσωματώνεται μόνο στο ένα εξ αυτών (Σχήμα 64). Έτσι, τα αποτελέσματα από την προσθήκη της θερμοηλεκτρικής συσκευής εξήχθησαν με σύγκριση των ηλεκτρικών μεγεθών των δύο φωτοβολταϊκών κατά την έκθεσή τους στον ήλιο. Η λύση αυτή θεωρήθηκε περισσότερο ακριβής, αφού η διαφορά ισχύος εξόδου μεταξύ των δύο πάνελ σε εξωτερικό χώρο ακόμα και υπό συνθήκες υψηλής ηλιοφάνειας μετρήθηκε στο 1%.

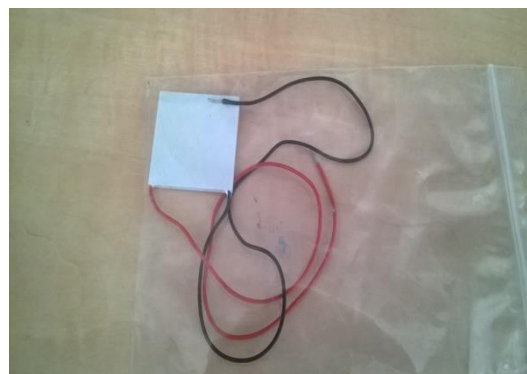


**Σχήμα 64: Φωτοβολταϊκό πάνελ με ενσωματωμένη τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια στο πίσω μέρος του**

Για να διατηρηθεί η κρύα πλευρά του θερμοηλεκτρικού στα επιθυμητά επίπεδα θερμοκρασίας τοποθετήθηκε χάλκινη ψύκτρα με ψυκτικό μέσο το νερό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 64. Στο Σχήμα 65 φαίνονται επίσης η θερμοηλεκτρική γεννήτρια GM200-71-14-16 του οίκου European Thermodynamics Ltd. καθώς και μια δεύτερη θερμοηλεκτρική συσκευή τύπου Peltier που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας. Η συσκευή Peltier τοποθετήθηκε μόνο στην πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες.



(α)



(β)

**Σχήμα 65: Θερμοηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία**

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων σε εξωτερικό χώρο και τα δύο πάνελ τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδικά κατασκευασμένη ξύλινη βάση (Σχήμα 66) με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς ανάλογα με την εποχή πραγματοποίησης της μέτρησης. Για τη μέτρηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) χρησιμοποιήθηκε ειδικό όργανο (πυρανόμετρο) του οίκου Kipp & Zonnen. Έξι συνολικά πολύμετρα χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτόχρονη παρακολούθηση των ηλεκτρικών μεγεθών των πάνελ και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας.



**Σχήμα 66:** Άποψη της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια μετρήσεων σε εξωτερικό χώρο

### **6.1.2 Πειραματική διάταξη με ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικού σε φωτοβολταϊκή κυψέλη (μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον)**

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων σε εργαστηριακό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκαν, αντί των πάνελ του Σχήματος 63, φωτοβολταϊκές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τις οποίες προμήθευσε ο οίκος Solar Cells Hellas A.E. (Σχήμα 67).



**Σχήμα 67:** Φωτοβολταϊκή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας των κυψελών (συνθήκες STC) δίνονται στον Πίνακα 4:

**Πίνακας 4: Λειτουργικές παράμετροι απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών (συνθήκες STC)**

<b>Παράμετροι λειτουργίας STC</b>	<b>Μονάδα</b>	<b>Τιμή</b>
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	V	0,60
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	A	7,70
Τάση Βέλτιστης Λειτουργίας	V	0,48
Ρεύμα Βέλτιστης Λειτουργίας	A	7,00
Ισχύς Βέλτιστης Λειτουργίας	W	3,36
Απόδοση	%	13,8
Συντελεστής Μείωσης Ισχύος	%/°C	-0,5

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε προβολέας LED (Σχήμα 68) ηλεκτρικής ισχύος 50 W και φωτιστικής απόδοσης περίπου 4500 lumen (ονομαστικά μεγέθη).



**Σχήμα 68: Προβολέας LED που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων σε εσωτερικό χώρο**

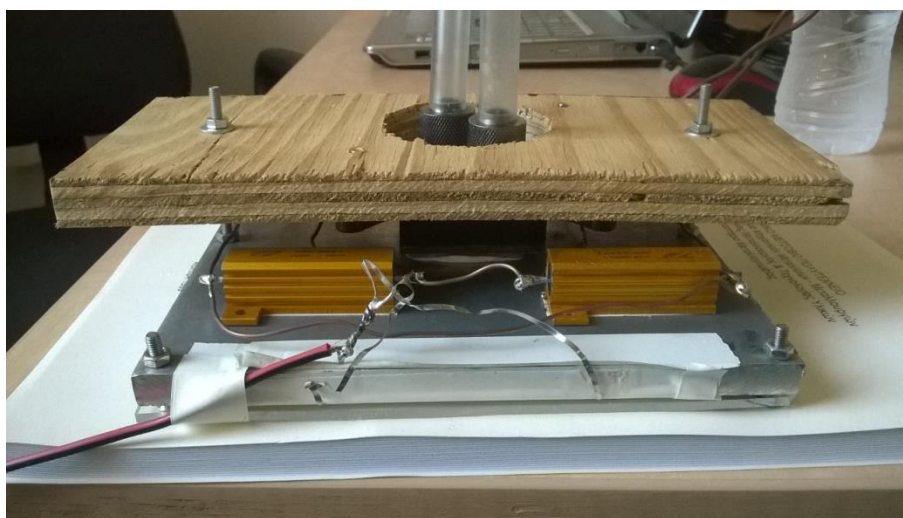
Παρότι η φωτιστική ισχύς του προβολέα κρίθηκε επαρκής για τη διέγερση της κυψέλης (στα προκαταρκτικά πειράματα η ισχύς εξόδου κυμάνθηκε από 0,3 έως 0,4 W ανάλογα με την απόσταση του προβολέα από την κυψέλη), ήταν αδύνατο να προκαλέσει σημαντική άνοδο της θερμοκρασίας της ώστε να μελετηθεί ουσιαστικά η μεταβολή της απόδοσης λόγω της ενσωμάτωσης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση της διάταξης τροποποιήθηκε καταλλήλως. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη τοποθετήθηκε πάνω σε πλάκα αλουμινίου πάχους περίπου 1 cm (Σχήμα 69) ώστε να

βελτιωθεί η διαδικασία απαγωγής της θερμότητας. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου η θερμοηλεκτρική γεννήτρια και η χάλκινη ψύκτρα.

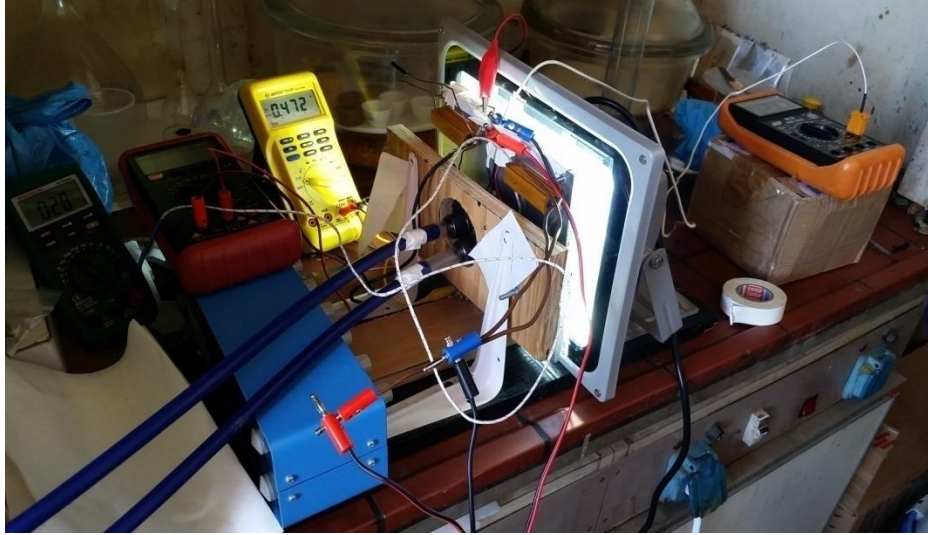


**Σχήμα 69: Φωτοβολταϊκή κυψέλη τοποθετημένη πάνω στην πλάκα αλουμινίου**

Για να επιτευχθεί η θέρμανση της κυψέλης, στο πίσω μέρος της πλάκας αλουμινίου επικολλήθηκαν επίσης τέσσερις αντιστάσεις ισχύος,  $22\Omega/50W$  η καθεμία. Οι τέσσερις αντιστάσεις συνδεθήκαν μεταξύ τους παράλληλα με τη συνολική αντίσταση να ανέρχεται σε  $5,5\ \Omega$  περίπου. Στην περίπτωση δηλαδή των εργαστηριακών δοκιμών η κυψέλη λειτούργησε υπό σταθερή φωτεινή ισχύ και η μεταβολή της θερμοκρασίας της πραγματοποιήθηκε τροφοδοτώντας με τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος τη συστοιχία των αντιστάσεων. Η τελική εκδοχή της διάταξης δίνεται στα Σχήματα 70 και 71. Κατά την πειραματική διαδικασία το ρεύμα των αντιστάσεων αυξήθηκε σταδιακά από 1 A έως 3 A με βήμα μεταβολής 0,5 A.



**Σχήμα 70: Φωτοβολταϊκή κυψέλη με ενσωματωμένη θερμοηλεκτρική γεννήτρια**



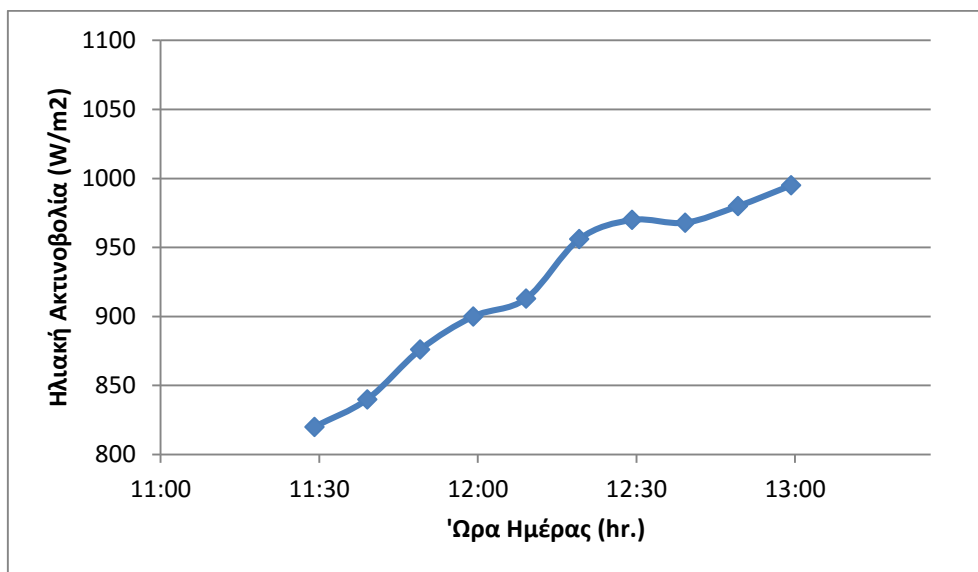
**Σχήμα 71: Τελική εκδοχή της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τα εργαστηριακά πειράματα σε εσωτερικό χώρο**



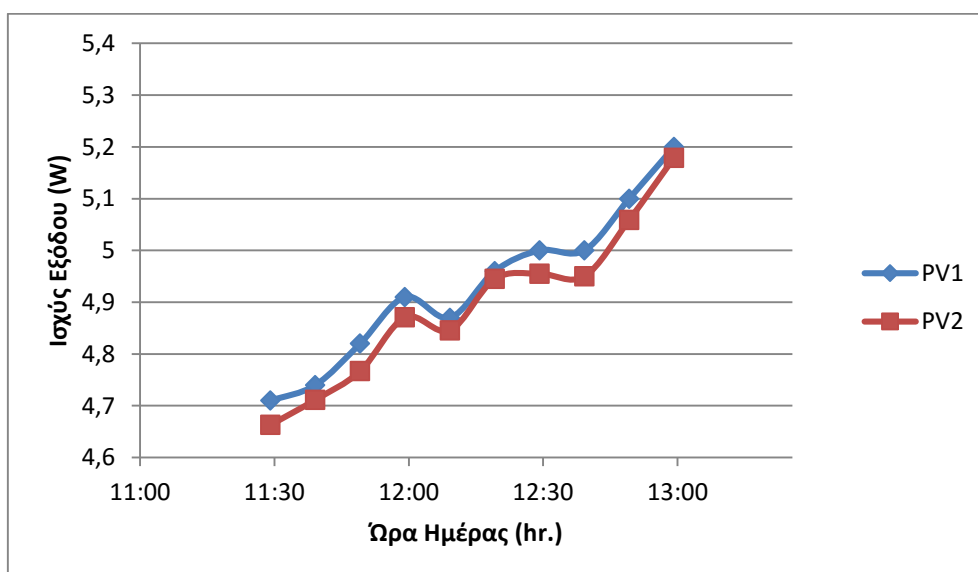
## 7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 7.1 Μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο στάδια, αρχικά χωρίς την προσθήκη της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας και στη συνέχεια με αυτή. Ο σκοπός του πρώτου πειράματος ήταν να επιβεβαιωθεί ότι τα δύο φωτοβολταϊκά πάνελ παρουσιάζουν μικρή απόκλιση σε ότι αφορά την ισχύ εξόδου τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 27/7/2015 σε συνθήκες έντονης ηλιοφάνειας από τις 11.30 έως τις 13.00. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμάνθηκε από 31 έως 34 °C. Στη συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα ηλιακής ακτινοβολίας και ισχύος εξόδου των πάνελ όπως καταγράφηκαν από τον μετρητικό εξοπλισμό:



Σχήμα 72: Διάγραμμα μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

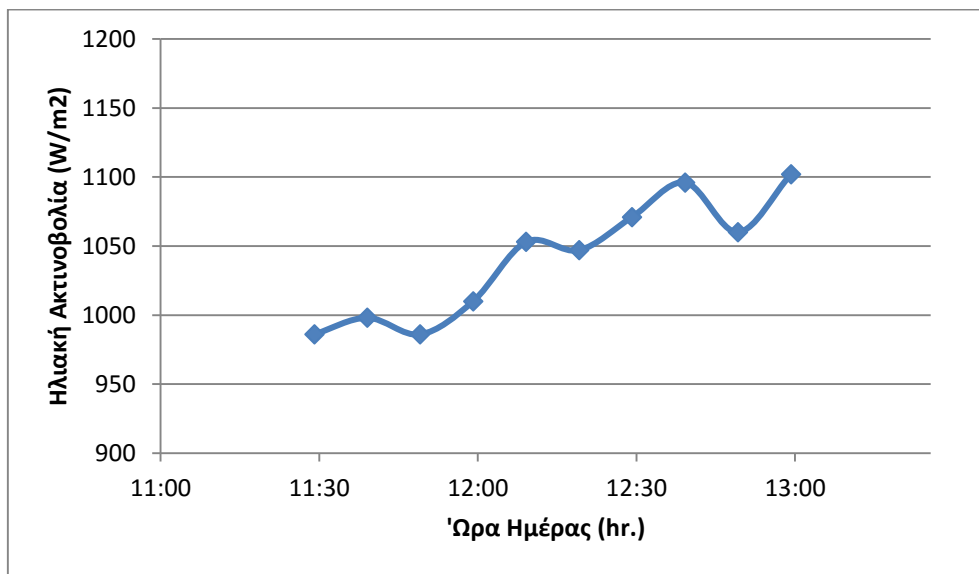


Σχήμα 73: Διάγραμμα μεταβολής της ισχύος των φωτοβολταϊκών πάνελ

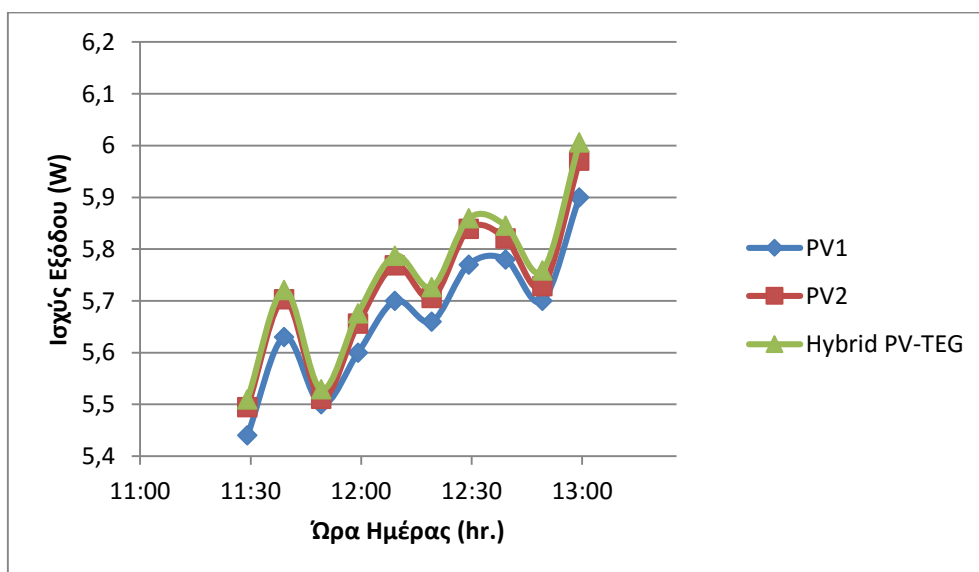
Από το διάγραμμα μεταβολής της ισχύος προέκυψε ότι η απόκλιση ισχύος εξόδου μεταξύ των δύο πάνελ κυμάνθηκε από 0,3% έως 0,9%. Για το επόμενο πείραμα θεωρήθηκε ότι η απόκλιση στην ισχύ εξόδου ισούται με 0,5%, δηλ.

$$P_{PV2} = 0,95 * P_{PV1} \quad (12)$$

Εν συνεχεία η πειραματική διαδικασία επαναλήφθηκε στις 29/7/2015 για το ίδιο χρονικό διάστημα της ημέρας. Αυτή τη φορά η θερμοηλεκτρική γεννήτρια ενσωματώθηκε στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πάνελ PV2. Στη συνέχεια δίνονται και πάλι τα διαγράμματα ηλιακής ακτινοβολίας και ισχύος εξόδου.



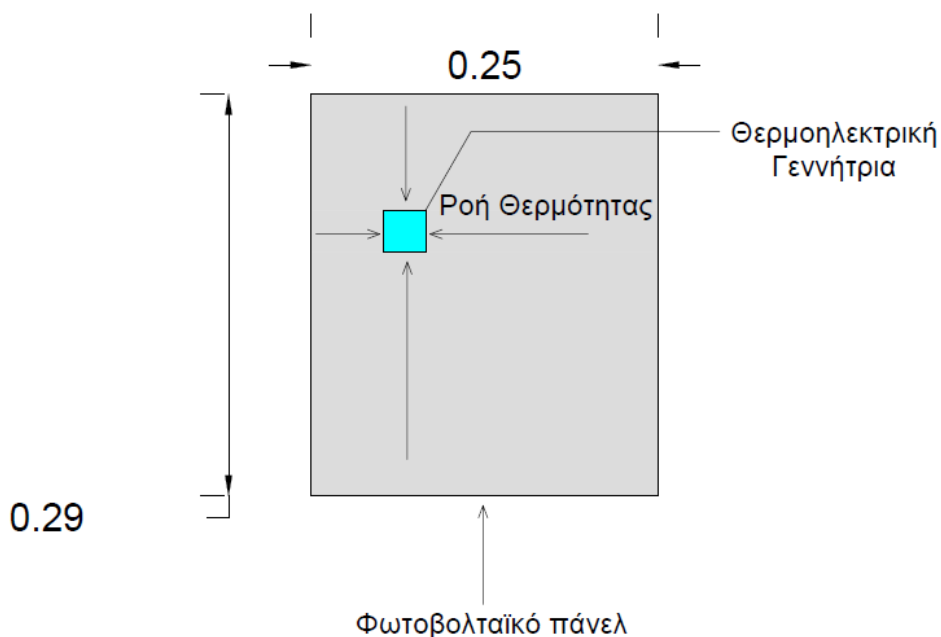
**Σχήμα 74:** Διάγραμμα μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων



**Σχήμα 75:** Διάγραμμα μεταβολής της ισχύος των φωτοβολταϊκών πάνελ και του υβριδικού συστήματος

Από το Σχήμα 75 προκύπτει ότι το πάνελ PV2 παρουσιάζει βελτιωμένη απόδοση λόγω της επίδρασης της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, καταγράφοντας αύξηση της ισχύος που κυμάνθηκε από 0,8% έως 1,2%. Συνυπολογίζοντας και την ισχύ της θερμοηλεκτρικής συσκευής, η συνολική αύξηση της ισχύος κυμάνθηκε από 1 έως 1,5%.

Προέκυψε δηλαδή ότι η επίδραση από τη λειτουργία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας ήταν πολύ μικρή στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πάνελ ενώ και η ισχύς εξόδου του ίδιου του θερμοηλεκτρικού παρέμεινε σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας (18 mW έως 35 mW). Ως πιθανότερη αιτία για τη χαμηλή απόδοση που καταγράφηκε θεωρείται η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του πλαστικού υποστρώματος πάνω στο οποίο ήταν τοποθετημένες οι φωτοβολταϊκές κυψέλες και στο οποίο επικολλήθηκε η θερμοηλεκτρική συσκευή. Λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πάνελ συγκριτικά με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια (725 cm<sup>2</sup> έναντι 9 cm<sup>2</sup>), η ροή της θερμότητας από το πάνελ προς το θερμοηλεκτρικό γίνεται κατά κύριο λόγο από τις άκρες των ακμών του πάνελ προς το σημείο στο οποίο είναι τοποθετημένη η θερμοηλεκτρική γεννήτρια [34]. Η ροή της θερμότητας φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 76 που ακολουθεί:



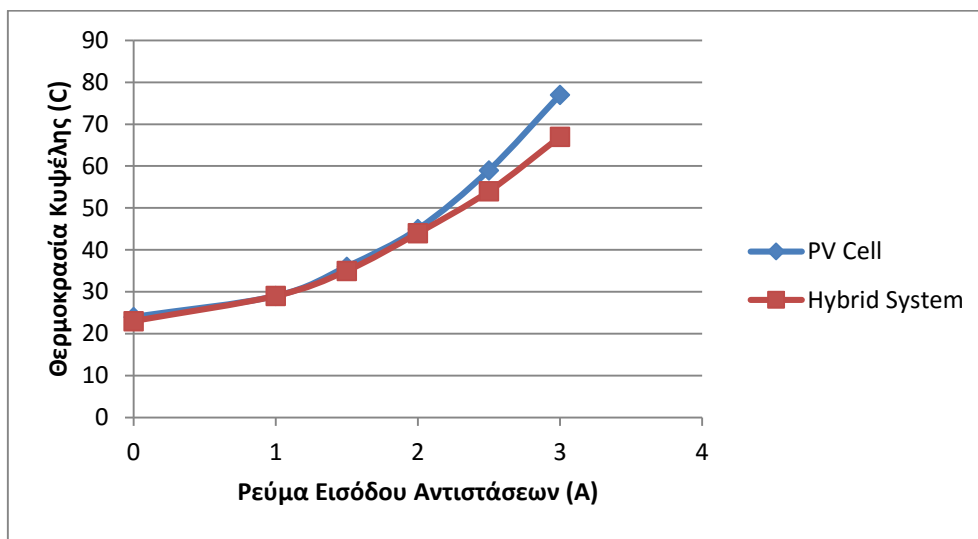
**Σχήμα 76: Ροή θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πάνελ προς τη θερμοηλεκτρική συσκευή**

Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του πλαστικού υποστρώματος εισάγει αυξημένη θερμική αντίσταση κατά τη ροή της θερμότητας προς τη θερμοηλεκτρική συσκευή, με αποτέλεσμα την σημαντική πτώση της θερμοκρασίας στη διαδρομή της ροής. Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία επαφής της γεννήτριας με το πάνελ είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αναμενόμενη και από τη θερμοκρασία στην υπόλοιπη επιφάνεια του πάνελ. Η λειτουργία της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας σε χαμηλά πεδία θερμοκρασίας είναι επομένως η πιθανότερη αιτία για τη χαμηλή της απόδοση.

## 7.2 Μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον

### 7.2.1 Διάταξη με ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας GM 200 - 71 - 14 - 16

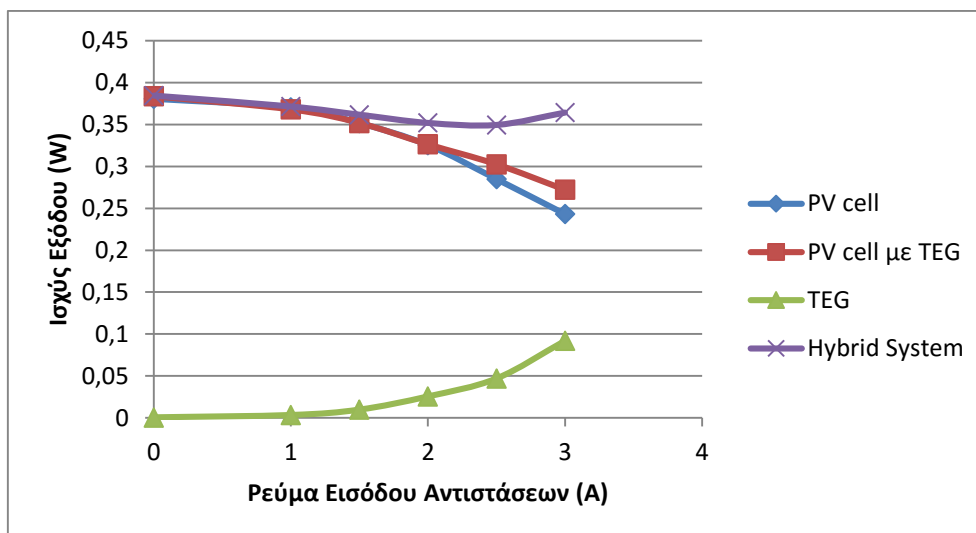
Και στην περίπτωση αυτή πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη φάση της πειραματικής διαδικασίας μετρήθηκαν μόνο τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής κυψέλης, χωρίς την ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας, ενώ στη συνέχεια προστέθηκε και η θερμοηλεκτρική γεννήτρια και έγινε επανάληψη της διαδικασίας. Στο Σχήμα 77 δίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας της κυψέλης σε συνάρτηση με το ρεύμα που τροφοδοτούσε τις προσκολλημένες στο αλουμίνιο αντιστάσεις ισχύος.



**Σχήμα 77: Διακύμανση της θερμοκρασίας της κυψέλης συναρτήσει του ρεύματος των αντιστάσεων με και χωρίς την προσθήκη θερμοηλεκτρικής γεννήτριας**

Από το Σχήμα 77 γίνεται εμφανές ότι για χαμηλές τιμές του ρεύματος εισόδου (άρα χαμηλές θερμοκρασίες) η διαφορά στη θερμοκρασία της κυψέλης είναι αμελητέα. Για υψηλότερες όμως τιμές ρεύματος καταγράφονται σημαντικές διαφορές, με τη μέγιστη απόκλιση να εμφανίζεται, όπως αναμενόταν, για το μέγιστο ρεύμα (3 A) και να αγγίζει τους 10 °C. Αυτή η διαφορά καταρχάς υπογραμμίζει τη σημασία της εξασφάλισης βελτιωμένων συνθηκών σε ότι αφορά τη μεταφορά θερμότητας από την κυψέλη στη γεννήτρια. Θεωρούμε ότι η ενσωμάτωση της πλάκας αλουμινίου στη διάταξη προσέφερε πολύ καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με το πλαστικό υπόστρωμα των φωτοβολταϊκών πάνελ που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στην πράξη, η σχετικά μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας που καταγράφεται σε υψηλές τιμές ρεύματος σημαίνει ότι για φωτοβολταϊκά συστήματα στα οποία εμφανίζονται εν γένει υψηλές θερμοκρασίες (συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά, φωτοβολταϊκά τοποθετημένα σε στέγες όπου η δυνατότητα απαγωγής θερμότητας είναι περιορισμένη ή σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια όλο το χρόνο) η ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικών γεννητριών μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βελτιωμένη λειτουργία τους. Αντιθέτως, σε συστήματα όπου οι συνθήκες της εγκατάστασης

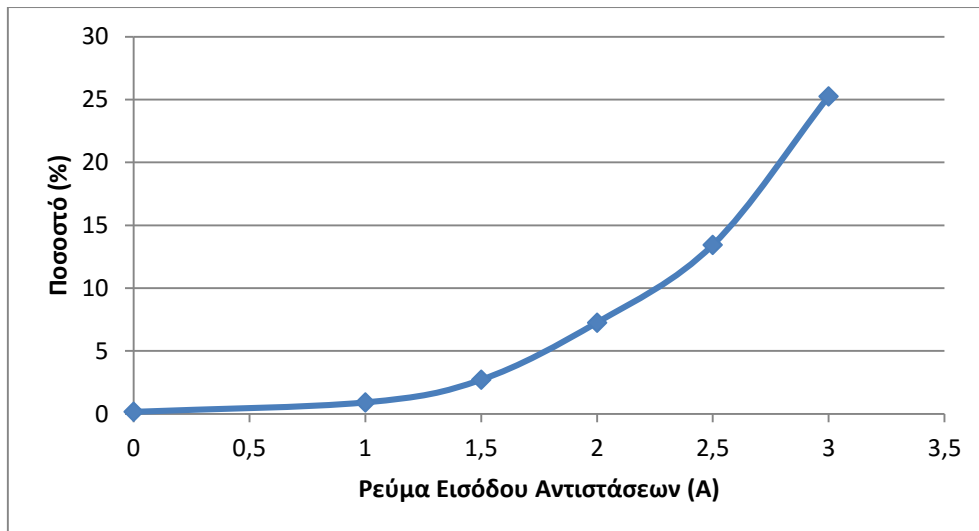
επιτρέπουν την ευκολότερη απαγωγή της θερμότητας η ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικών γεννητριών δεν θα επιφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοσή τους. Αυτό καταδεικνύεται περισσότερο έντονα στο Σχήμα 78, όπου δίνονται οι καμπύλες μεταβολής της ισχύος εξόδου για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.



**Σχήμα 78: Ισχύς εξόδου για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε συναρτήσει του ρεύματος εισόδου στις αντιστάσεις**

Οι καμπύλες του Σχήματος 78 δείχνουν ότι για χαμηλές τιμές ρεύματος των αντιστάσεων (άρα και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες της κυψέλης – μέχρι περίπου τους 40 °C) οι διαφορές στην ισχύ εξόδου είναι πρακτικά αμελητέες. Για ρεύμα εισόδου από 2 έως 3 A, το υβριδικό σύστημα εμφανίζει σημαντικά καλύτερη απόδοση έναντι της περίπτωσης κυψέλης που λειτουργεί χωρίς θερμοηλεκτρικό. Τα αποτελέσματα αυτά εξηγούνται από δύο παραμέτρους. Καταρχάς, για χαμηλές τιμές ρεύματος (έως 1,5 A) οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες της κυψέλης έχουν ως αποτέλεσμα μικρές τιμές εξαγόμενης από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια ισχύος και επομένως χαμηλά επίπεδα παραγωγής θερμότητας. Αντιθέτως για ρεύμα εισόδου από 2 A και πάνω τα επίπεδα παραγωγής του θερμοηλεκτρικού αυξάνονται σημαντικά και μαζί και η απαγωγή θερμότητας από την κυψέλη. Η επίδραση δηλαδή της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες, που σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις η δράση της πάνω στην κυψέλη είναι περισσότερο ευεργετική. Επιπλέον σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει βελτιωμένη απόδοση και από το ίδιο το θερμοηλεκτρικό, γεγονός που συντελεί σε υψηλότερα επίπεδα παραγωγής του υβριδικού συστήματος. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τελικά η έξοδος του υβριδικού συστήματος προσεγγίζει το σημείο λειτουργίας της κυψέλης για μηδενική είσοδο ρεύματος στις αντιστάσεις (θερμοκρασία δωματίου).

Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η συμβολή της ισχύος της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας στην παραγωγή του υβριδικού συστήματος, στο Σχήμα 79 δίνεται το ποσοστό ισχύος της σε σύγκριση με τη συνολική ισχύ εξόδου του υβριδικού συστήματος.

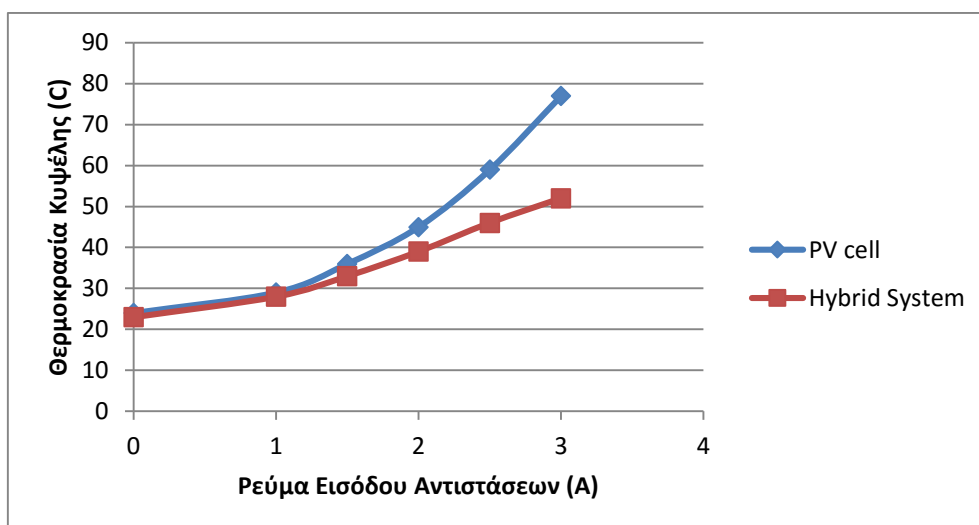


**Σχήμα 79: Ποσοστό ισχύος θερμοηλεκτρικής γεννήτριας συγκριτικά με τη συνολική ισχύ του υβριδικού συστήματος**

Από την καμπύλη του Σχήματος 79 γίνεται προφανές ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας περίπου το 25% της συνολικής ισχύος προέρχεται από τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια.

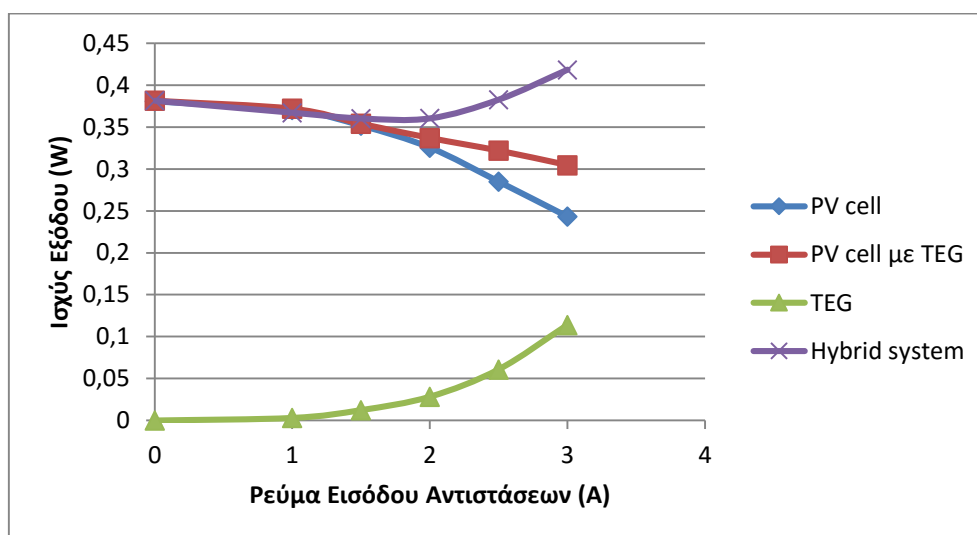
### 7.2.2 Διάταξη με ενσωμάτωση της θερμοηλεκτρικής συσκευής τύπου Peltier

Το ίδιο ακριβώς πείραμα επαναλήφθηκε με αντικατάσταση της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας GM200 – 71 – 14 – 16 από τη συσκευή Peltier (Σχήμα 65). Στο Σχήμα 80 δίνεται η διακύμανση της θερμοκρασίας της κυψέλης σε συνάρτηση με το ρεύμα που τροφοδοτούσε τις προσκολλημένες στο αλουμίνιο αντιστάσεις ισχύος.



**Σχήμα 80: Διακύμανση της θερμοκρασίας της κυψέλης συναρτήσει του ρεύματος των αντιστάσεων με και χωρίς την προσθήκη του στοιχείου Peltier**

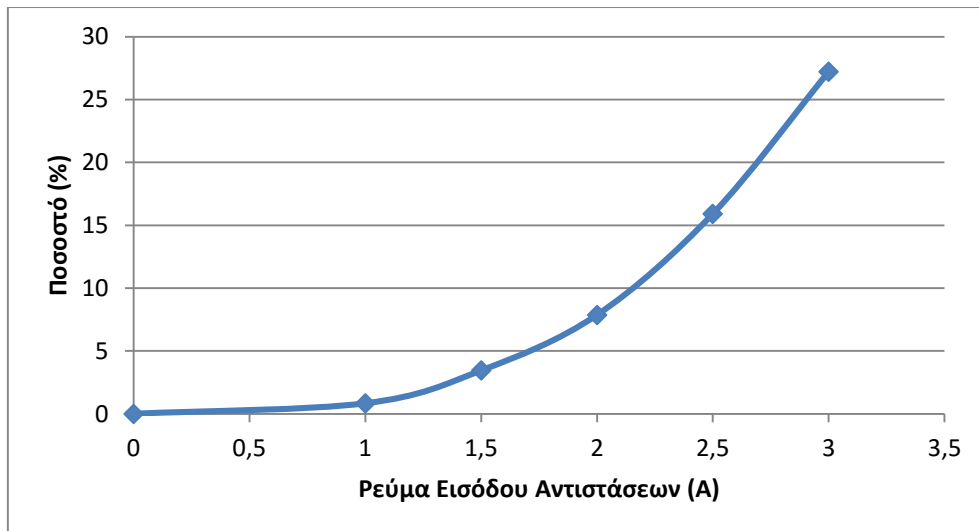
Παρατηρείται ποιοτικά η ίδια συμπεριφορά σε ότι αφορά τη θερμοκρασία της κυψέλης, καταγράφηκε δηλαδή σημαντική μείωση της θερμοκρασίας της, η οποία άγγιξε τους 25 °C για ρεύμα εισόδου στις αντιστάσεις ίσο με 3 A. Είναι επίσης εμφανές ότι η θερμοκρασία λειτουργίας μειώνεται περισσότερο σε σύγκριση με την περίπτωση ενσωμάτωσης της γεννήτριας GM200 – 71 – 14 – 16. Η χρησιμοποίηση δηλαδή του στοιχείου Peltier είχε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τη θερμοκρασία της κυψέλης, το οποίο αποτυπώνεται και στην ισχύ εξόδου της, όπως φαίνεται στο Σχήμα 81:



**Σχήμα 81: Ισχύς εξόδου για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε συναρτήσει του ρεύματος εισόδου στις αντιστάσεις**

Και εδώ φαίνεται ότι για τιμές ρεύματος αντιστάσεων έως 1,5 A οι διαφορές στην ισχύ εξόδου είναι πρακτικά αμελητέες. Για ρεύμα εισόδου από 2 έως 3 A, το υβριδικό σύστημα εμφανίζει σημαντικά καλύτερη απόδοση έναντι της περίπτωσης σκέτης κυψέλης, επιβεβαιώνεται δηλαδή ότι η επίδραση της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ισχύς εξόδου της συσκευής Peltier είναι αρκετά βελτιωμένη σε σχέση με τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια GM 200 – 71 – 14 – 16 για το ίδιο ρεύμα εισόδου στις αντιστάσεις (114 mW έναντι 92 mW για ρεύμα εισόδου ίσο με 3 A). Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι στην περίπτωση της συσκευής Peltier η έξοδος του υβριδικού συστήματος για το μέγιστο ρεύμα υπερβαίνει την ισχύ της κυψέλης για μηδενική είσοδο ρεύματος στις αντιστάσεις (θερμοκρασία δωματίου). Πιο συγκεκριμένα υπάρχει μια αύξηση της ισχύος κατά 10% (418 mW έναντι 380 mW), γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι η απόδοση του υβριδικού συστήματος μπορεί να υποσκελίσει ακόμα και το σημείο λειτουργίας της κυψέλης σε συνθήκες STC.

Τέλος, στο Σχήμα 82 δίνεται το ποσοστό ισχύος της συσκευής Peltier σε σύγκριση με τη συνολική ισχύ εξόδου του υβριδικού συστήματος:



**Σχήμα 82: Ποσοστό ισχύος της συσκευής Peltier συγκριτικά με τη συνολική ισχύ του υβριδικού συστήματος**

Για το μέγιστο ρεύμα εισόδου (3 A) περίπου το 28% της συνολικής ισχύος προέρχεται από τη συσκευή Peltier, αποτέλεσμα παρεμφερές με το σύστημα που ενσωματώνει τη θερμοηλεκτρική γεννήτρια GM200 – 71 – 14 – 16.



## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιώντας τόσο εμπορικά φωτοβολταϊκά πάνελ όσο και ξεχωριστές φωτοβολταϊκές κυψέλες έδειξαν ότι η εξασφάλιση συνθηκών καλής θερμικής επαφής μεταξύ του φωτοβολταϊκού και της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του συστήματος. Στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού πάνελ η αύξηση της ισχύος εξόδου ήταν σχετικά μικρή (κάτω από 2%), ενώ στην περίπτωση της κυψέλης η διαφορά στην ισχύ μεταξύ του υβριδικού συστήματος και της σκέτης κυψέλης άγγιξε το 50% και 72% αντίστοιχα (αναλόγως της θερμοηλεκτρικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε) σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.
- Η βελτίωση της απόδοσης προέρχεται τόσο από την πτώση θερμοκρασίας της κυψέλης (αύξηση της ισχύος της κατά 12% - 25% για το υψηλότερο ρεύμα εισόδου) όσο και από την ισχύ της θερμοηλεκτρικής γεννήτριας αυτής καθεαυτής.
- Για υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, το ποσοστό της ισχύος του θερμοηλεκτρικού τμήματος της διάταξης είναι αρκετά σημαντικό (25% - 28% περίπου επί της συνολικής ισχύος εξόδου του υβριδικού συστήματος ανάλογα με τη θερμοηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται).
- Η ενσωμάτωση θερμοηλεκτρικών γεννητριών σε φωτοβολταϊκές διατάξεις αποκτά νόημα στην περίπτωση συστημάτων όπου τα επίπεδα εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι ιδιαίτερα αυξημένα (συγκεντρωτικά συστήματα, συστήματα σε περιοχές με υψηλά επίπεδα ηλιοφάνειας όλο το χρόνο) καθώς και συστημάτων όπου λόγω εγκατάστασης η φυσική απαγωγή θερμότητας είναι περιορισμένη (π.χ. συστήματα σε στέγες). Σε διαφορετική περίπτωση το κέρδος από την προσθήκη του θερμοηλεκτρικού είναι σχεδόν αμελητέο και το υβριδικό σύστημα πιθανόν να καταστεί οικονομικά ασύμφορο.

## 9 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ως προτάσεις μελλοντικής εργασίας δίνονται συνοπτικά οι παρακάτω:

- Δοκιμή ενσωμάτωσης σε υβριδικά συστήματα θερμοηλεκτρικών γεννητριών διαφορετικής γεωμετρίας (διατομή και μήκος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων) προκειμένου να διαπιστωθεί ποια είναι τα αποτελέσματα της διαφοροποίησης αυτής στην έξοδο του συστήματος
- Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της θερμότητας που απάγεται στην κρύα πλευρά του θερμοηλεκτρικού, π.χ. με ψύξη νερού και αξιοποίηση του εξερχόμενου νερού υψηλότερης θερμοκρασίας για κάλυψη αναγκών σε ζεστό νερό.
- Δοκιμή λειτουργίας των ενσωματωμένων θερμοηλεκτρικών διατάξεων σε καθεσώς Peltier ώστε να διαπιστωθεί ποιο είναι το όφελος από την ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών σε αυτή την περίπτωση.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change*, 2014
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, 2011
- [3] Κλίμα και εσωτερικό περιβάλλον – Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτηρίων, ΤΕΕ, Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης ενεργειακών επιθεωρητών, Θεματική Ενότητα ΔΕ3, 2011
- [4] M. Telkes, *Solar Thermoelectric Generators*, *Journal of Applied Physics*, 25 (6), 1954, 765–777
- [5] *Planning and installing photovoltaic systems: A guide for installers, architects and engineers*, Routledge, 2012
- [6] *Planning and installing solar thermal systems: A guide for installers, architects and engineers*, Routledge, 2010
- [7] M.K. Gupta, S.C. Kaushik, K.R. Ranjan, N.L. Panwar, V. Siva Reddy, S.K. Tyagi, *Thermodynamic performance evaluation of solar and other thermal power generation systems: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 2015, 567 – 582
- [8] B.I. Ismail, W.H. Ahmed, *Thermoelectric power generation using waste – heat energy as an alternative green technology*, *Recent Patents on Electrical Engineering*, 2, 27 – 39
- [9] C.B. Vining, *An inconvenient truth about thermoelectrics*, *Nature Materials*, 8, 2009, 83 – 85
- [10] U. Eicker, D. Pietrushka, A. Schmidt, M. Haag, *Comparison of photovoltaic and solar thermal cooling systems for office buildings in different climates*, *Solar Energy*, 118, 2015, 243 – 255
- [11] Σ. Καπλάνης, *Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων*, Εκδόσεις Ίων, 2004
- [12] W. Shockley, H.J. Queisser, *Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells*, *Journal of Applied Physics*, 32 (3), 510 – 519
- [13] S. Pan, Z. Yang, P. Chen, J. Deng, H. Li, H. Peng, *Wearable solar cells by stacking textile electrodes*, *Angewandte Chemie International Edition*, 53 (24), 2014, 6110 – 6114
- [14] H. Yu, Y. Ge, S. Shi, *Improving power conversion efficiency of polymer solar cells by doping copper phthalocyanine*, *Electrochimica Acta*, 180, 2015, 645 – 650
- [15] V. Avrutin, N. Izyumskaya, H. Morkoc, *Semiconductor solar cells: Recent progress in terrestrial applications*, *Superlattices and Microstructures*, 49, 2011, 337 – 364
- [16] C.M. Chuang, P.R. Brown, V. Bulovic, M. Bawendi, *Improved performance and stability in quantum dot solar cells through band alignment engineering*, *Nature Materials*, 13, 2014, 796 – 801

- [17] E. Skoplaki, A.G. Boudouvis, J.A. Palyvos, A simple correlation for the operating temperature of photovoltaic modules of arbitrary mounting, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92, 2008, 1393 – 1402
- [18] W.G.J.H.M. van Sark, Feasibility of photovoltaic – thermoelectric hybrid modules, *Applied Energy*, 88, 2011, 2785 – 2790
- [19] W.T. Xie, Y. Dai, R.Z. Wang, K. Sumathy, Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (6), 2011, 2588 – 2606
- [20] N. Martin, J.M. Ruiz, Optical performance analysis of V – trough PV concentrators, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16 (4), 2008, 339 – 348
- [21] F.H. Klotz, H.D. Mohring, C. Gruel, M. Alonso Bella, J. Sherborne, T. Bruton, P. Tzanetakis, Field test results of the Archimedes Photovoltaic V-Trough concentrator system, *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, Germany, 2001, 492 – 495
- [22] Y. Tripanagnostopoulos, Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, *Solar Energy*, 81, 2007, 1117 – 1131
- [23] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, *Solar Energy*, 82, 2008, 1 – 12
- [24] [www.grammer-solar.de/twinsolar](http://www.grammer-solar.de/twinsolar)
- [25] [www.energies-sol.com](http://www.energies-sol.com)
- [26] D.M. Rowe, Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1), 2006, 13 – 23
- [27] [www.tellurex.com](http://www.tellurex.com)
- [28] X. Ju, Z. Wang, G. Flamant, P. Li, W. Zhao, Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic – thermoelectric hybrid system, *Solar Energy*, 86, 2012, 1941 – 1954
- [29] D. Kraemer, L. Hu, A. Muto, X. Chen, G. Chen, M. Chiesa, Photovoltaic – thermoelectric hybrid systems: A general optimization methodology, *Applied Physics Letters*, 92 (24), 2008
- [30] K.T. Park, S.M. Shin, A.S. Tazebay, H.D. Um, J.Y. Jung, S.W. Jee, M.W. Oh, S.D. Park, B. Yoo, C. Yu, J.H. Lee, Lossless hybridization between photovoltaic and thermoelectric devices, *Nature Scientific Reports*, 2013, 1 – 6
- [31] D. Yang, H. Min, Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 1 – 9
- [32] E. Chavez-Urbiola, Y. Vorobiev, L. Bulat, Solar hybrid systems with thermoelectric generators, *Solar Energy* 86 (1), 2012 369 – 378
- [33] Y. Deng, W. Zhu, Y. Wang, Y. Shi, Enhanced performance of solar-driven photovoltaic thermoelectric hybrid system in an integrated design, *Solar Energy*, 88, 2013, 182 – 191

[34] D. Kraemer, K. McEnaney, M. Chiesa, G. Chen, Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications, *Solar Energy*, 86, 2012, 1338 – 1350