

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΚΟΛΟΚΥΘΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Α.Μ.6404)
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ (Α.Υ)

ΠΑΤΡΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή μου Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, μέσω της οποίας πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη φωτοβολταϊκών μονάδων ηλιακής ενέργειας.

Η απόφαση μου να ασχοληθώ με το θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η θέλησή μου καθώς και η πρόθεσή μου να ασχοληθώ με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας μετά το τέλος των σπουδών μου. Η εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παρουσιάζει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον, ενώ και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, βελτιώνονται καθημερινά τα ήδη υπάρχοντα συστήματα. Ωστόσο, με τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας δε δίνονται μόνο τα πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης των ανεξάντλητων πηγών ενέργειας και της φιλικότητας τους προς το περιβάλλον, αλλά και η οικονομική στήριξη που δίνεται από τα Ευρωπαϊκά Προγράμματα για τις εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό που απαιτείται για την εκμετάλλευσή τους.

Από την θέση αυτή, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες στον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Σουλιώτη Εμμανουήλ, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, για την υπομονή και την στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

Ανδρέας Κολοκυθάς

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό την συγκριτική μελέτη των φωτοβολταϊκών μονάδων ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικά σύστημα τύπου Fresnel για την αύξηση της παραγόμενης ισχύς. Η συγκεντρωτική μονάδα μελετήθηκε για την ενδεχόμενη τοποθέτησή του στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας (Κοζάνη) και στο νότιο τμήμα της (Πάτρα).

Στο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας αναλύονται οι συμβατικές και μη ενέργειες καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζει κάθε κατηγορία. Στην συνέχεια αναλύεται η ηλιακή ενέργεια και ποιες είναι οι εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και περιγράφεται η ηλιακή γεωμετρία και ακτινοβολία σύμφωνα με την κίνηση του ηλίου και της γης. Ακολουθούν οι γεωγραφικές συντεταγμένες που δίνουν την δυνατότητα να υπολογισθεί ένα σημείο στην επιφάνεια της γης με ακρίβεια καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της απόκλισης ηλίου, την ωριαία γωνία και των λοιπών βασικών γωνιών. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διαχωρίζονται σε διαφορές κατηγορίες ανάλογα με το υλικό που κατασκευάζονταν με συνέπεια να παρουσιάζουν διαφορετικές αποδόσεις κατά την λειτουργία τους κάτω από πανομοιότυπες συνθήκες. Ωστόσο, μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στα ηλιακά συστήματα με ενισχυτικούς ανακλαστήρες καθώς και στην σχεδίαση των διατάξεων συλλέκτη – κατόπτρου, στην ανάλυση των θερμικών ηλιακών συστημάτων, των υβριδικών θερμικών φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.

Στο υπολογιστικό μέρος της εργασίας δίνονται οι αρχές και τα γεωμετρικά στοιχεία της συγκεντρωτικής διάταξης που μελετάται. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται μελέτη για την Κοζάνη και την Πάτρα, υπολογίζονται τα γεωμετρικά στοιχεία των περιοχών, τα οποία περιλαμβάνουν την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και την γωνία του συγκεντρωτικού συστήματος για όλο το έτος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος (ύψος, πλάτος, μήκος, αποστάσεις μεταξύ των πλαισίων κ.ά.) και η σχεδίαση τους υλοποιείται στο Solidworks, το οποίο βοηθά και στον υπολογισμό των εξισώσεων ευθείας. Ακολουθεί η παρακολούθηση των ηλιακών ακτινών με το πρόγραμμα RayTracing και απεικονίζονται - καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

Τέλος, δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας, τονίζοντας ότι τα συγκεντρωτικά συστήματα έχουν την δυνατότητα μιας αξιόλογης αύξησης της ισχύος. Ωστόσο, σε κάθε μελέτη θα πρέπει να μην υποτιμάται το φαινόμενο σκίασης, το οποίο είναι υπεύθυνο για την δραματική μείωση της παραγόμενης ισχύος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	4
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
1.2. ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	5
1.2.1. Γεωγραφικές συντεταγμένες	6
1.2.2. Απόκλιση ήλιου	8
1.2.3. Ωριαία γωνία ήλιου.....	10
1.2.4. Βασικές γωνίες της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου	13
1.2.5. Γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια	14
1.3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	15
1.3.1. Ιστορική ανάδρομη.....	16
1.3.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα	17
1.3.3. Ημιαγωγός	17
1.3.4. Επαφή p-n	19
1.3.5. Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της διόδου	20
1.3.6. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	22
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	24
2.1. ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	24
2.2. ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	25
2.3. ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	25
2.3.1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους.....	26
2.3.2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων (ThinFilm).....	28
2.3.3. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	31
2.3.4. Οργανικά φωτοβολταϊκά	31
2.3.5. Άλλες τεχνολογίες	32
3. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ.....	33
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	34
3.3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΗ - ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ.....	35
3.3.1. Θερμικά ηλιακά συστήματα.....	35
3.3.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα – Υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα	39
3.3.3. Γενική περιγραφή συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων	43
3.3.3.1. Τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων.....	44
3.3.4. Τοποθέτηση και αξιοποίηση επιφάνειας ενισχυτικών ανακλαστήρων... ..	46

3.3.4.1.	Αξιοποίηση διαθέσιμης επιφάνειας οριζόντιας οροφής κτιρίων	47
3.3.4.2.	Αισθητική ενσωμάτωση ενισχυτικών ανακλαστήρων σε κτήρια	49
4.	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	54
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	54
4.2.	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΚΟΖΑΝΗ.....	54
4.2.1.	Υπολογισμούς γεωμετρικών στοιχείων	54
4.2.2.	Υπολογισμός εξισώσεων ευθείας.....	63
4.2.3.	Παρακολούθηση ηλιακών ακτίνων (Ray Tracking).....	64
4.3.	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΠΑΤΡΑ.....	67
4.3.1.	Υπολογισμούς γεωμετρικών στοιχείων	68
4.3.2.	Υπολογισμός εξισώσεων ευθείας.....	72
4.3.3.	Παρακολούθηση ηλιακών ακτίνων (Ray Tracking).....	73
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	1
Εικόνα 2: Ηλιακή ακτινοβολία	4
Εικόνα 3: Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.	26
Εικόνα 4: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου	27
Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου	28
Εικόνα 6: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου	28
Εικόνα 7: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS	29
Εικόνα 8: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου	30
Εικόνα 9: Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe	30
Εικόνα 10: Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου	30
Εικόνα 11: Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο	31
Εικόνα 12: Διαγράμματα Μέσης Ημερήσιας Αποδοτικότητας για επίπεδο συλλέκτη – και κατόπτρου για τις εποχές του χρόνου	38
Εικόνα 13: Διαγράμματα κατανομής ποσοστού δεσμευόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας επιφάνειας απορρόφησης σε κατάσταση στασιμότητας	39
Εικόνα 14: Παραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα	44
Εικόνα 15: Πιάτο Sterling.....	45
Εικόνα 16: Ανακλαστήρες Frensel	45
Εικόνα 17: Ηλιακός Πύργος Ισχύος	46
Εικόνα 18: Παράδειγμα ενσωμάτωσης ανακλαστήρων στην πρόσοψη, με κινούμενο απορροφητή στο απέναντι κτήριο.....	49
Εικόνα 19: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων ανάποδα κάτω από τα μπαλκόνια κτιρίου σε συνδυασμό με καμπύλους ανακλαστήρες για αύξηση της προσπίπτουσας στο φβ ηλιακής ακτινοβολίας	50
Εικόνα 20: Κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτινών στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	51
Εικόνα 21: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με ενισχυτικούς ανακλαστήρες σε στέγη βιομηχανικού κτηρίου και κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτινών.	51

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία	6
Σχήμα 2: Γεωγραφικό πλάτος.....	7
Σχήμα 3: Γεωγραφικό μήκος.....	7
Σχήμα 4: Γεωγραφικό στίγμα	8
Σχήμα 5: Απόκλιση άξονα γης ως προς το επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς.	9
Σχήμα 6: Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης.....	9
Σχήμα 7: Εκλειπτική τροχιά και γωνίες απόκλισης ηλίου – γης.....	10
Σχήμα 8: Τροχίες ήλιου στον ορίζοντα συναρτήσει της διάρκειας της ημέρας	11
Σχήμα 9: Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας ω του ήλιου	12
Σχήμα 10: Ηλιακό ύψος, γωνία ζενίθ και αζιμούθιο του ήλιου.....	13
Σχήμα 11: Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια .	15
Σχήμα 12: Άτομο πυριτίου	18
Σχήμα 13: Κρυσταλλικός δεσμός πυριτίου (Si), φωσφόρου (P) και βορίου (B).	18
Σχήμα 14: Επαφή p-n.....	19
Σχήμα 15: Διατομή του ηλιακού κυττάρου ενός φωτοβολταϊκού	20
Σχήμα 16: Ορθή και αντίστροφη πόλωση διόδου	21
Σχήμα 17: Χαρακτηριστική I-V διόδου.	21
Σχήμα 18: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο	22
Σχήμα 19: Διαδικασία μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια	23
Σχήμα 20: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου	24
Σχήμα 21: Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου 1) διαχωρισμός φορτίου, 2) επανασύνδεση, 3) αχρησιμοποίητη φωτεινή ενέργεια και 4) αγώγιμα ελάσματα.....	25
Σχήμα 22: Εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών.....	26
Σχήμα 23: Θερμοσιφωνική συσκευή με ενισχυτικό κάτοπτρο (α) Διάταξη για λειτουργία το καλοκαίρι (β) Διάταξη για λειτουργία το χειμώνα	36
Σχήμα 24: Συσκευή Integrated Collector Storage (ICS) με ενισχυτικό κάτοπτρο (α) Διάταξη για λειτουργία το καλοκαίρι (β) Διάταξη για περιορισμό των θερμικών απωλειών κατά τη διάρκεια της νύχτας.....	37
Σχήμα 25: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών σε διαδοχικές σειρές με κατοπτρικό σύστημα	37
Σχήμα 26: Διάταξη τύπου V-trough.....	40
Σχήμα 27: Επιτυγχανόμενη ηλεκτρική απόδοση η_{el} φωτοβολταϊκού pc-Si με διάχυτους ανακλαστήρες για $1.0 \leq C \leq 1.5$	41
Σχήμα 28: Τύποι υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συλλεκτών	42
Σχήμα 29: Συνδυασμός φωτοβολταϊκών θερμικών συσκευών με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες σε διάταξη οριζόντιας οροφής κτιρίου	42

Σχήμα 30: Δύο διαδοχικές σειρές ηλιακών συσκευών στην ελάχιστη απόσταση για την αποφυγή σκίασης	47
Σχήμα 31: Εναλλακτικοί τρόποι τοποθέτησης παράλληλων σειρών ηλιακών συσκευών στην οριζόντια οροφή κτιρίων	48
Σχήμα 32: Κατεύθυνση ανακλώμενων ακτινών σε διαδοχικά θερμοκήπια με ενσωματωμένα φβ σε τμήμα της μιας στέγης, με δίριχτη ή τοξωτή στέγη.....	52
Σχήμα 33: Κατεύθυνση διαχεόμενων ακτινών σε διαδοχικά θερμοκήπια με ενσωματωμένα φβ σε τμήμα της μιας στέγης, με δίριχτη ή τοξωτή στέγη.....	53
Σχήμα 34: Γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης του κατοπτρικού συστήματος	57
Σχήμα 35: Διαστάσεις του χώρου τοποθέτησης για το κατοπτρικό σύστημα σε σχέση με την φωτοβολταϊκή διάταξη	58
Σχήμα 36: Διαστάσεις του χώρου τοποθέτησης κατοπτρικού συστήματος.....	59
Σχήμα 37: Το ύψος (h) του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel	60
Σχήμα 38: Διαστάσεις του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel.....	61
Σχήμα 39: Διαστάσεις του συγκεντρωτικού συστήματος στην μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 36,44^\circ$)	62
Σχήμα 40: Διαστάσεις του συγκεντρωτικού συστήματος στην ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 26,75^\circ$).	63
Σχήμα 41: Εξισώσεις ευθείας για την μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 36,44^\circ$)	63
Σχήμα 42: Εξισώσεις ευθείας για την ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 26,75^\circ$)	64
Σχήμα 43: Βαθμός σκίασης επιμέρους κατοπτρικού τμήματος για τον μήνα Νοέμβριο ($\alpha = 30,9^\circ$ και $\varphi_2 = 15,5^\circ$).	65
Σχήμα 44: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για το θερινό ηλιοστάσιο ($\varphi_2 = 36,5^\circ$).	66
Σχήμα 45: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την φθινοπωρινή ισημερία ($\varphi_2 = 26^\circ$).	66
Σχήμα 46: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την εαρινή ισημερία ($\varphi_2 = 23,65^\circ$).	67
Σχήμα 47: Γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης του κατοπτρικού συστήματος	68
Σχήμα 48: Διαστάσεις του χώρου τοποθέτησης κατοπτρικού συστήματος.....	70
Σχήμα 49: Το ύψος (h) του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel	70
Σχήμα 50: Διαστάσεις του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel.....	71
Σχήμα 51: Βαθμός σκίασης επιμέρους κατοπτρικού τμήματος τον μήνα Νοέμβριο ($\alpha = 32,84^\circ$ και $\varphi_2 = 16,42^\circ$)	74
Σχήμα 52: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για το θερινό ηλιοστάσιο ($\varphi_2 = 37,4^\circ$)	75
Σχήμα 53: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την φθινοπωρινή ισημερία ($\varphi_2 = 26,98^\circ$).	76
Σχήμα 54: Γωνία τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την εαρινή ισημερία ($\varphi_2 = 24,67^\circ$)	76

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Πηγές και μορφές Ενέργειας	2
Πίνακας 2: Γεωγραφικά μήκη και πλάτη αστικών κέντρων την Ελλάδας	55
Πίνακας 3: Εποχιακές αλλαγές ηλιακής ακτινοβολίας	56
Πίνακας 4: Γωνία πρόσπτωσης (α) της ηλιακής ακτινοβολίας και γωνία του συγκεντρωτικού συστήματος φ_2 για όλο το έτος στην περιοχή της Κοζάνης.....	57
Πίνακας 5: Επιλεγμένη θέση τοποθέτησης πραγματοποίησης προσομοίωσης.....	65
Πίνακας 6: Γωνία πρόσπτωσης (α) της ηλιακής ακτινοβολίας και γωνία του συγκεντρωτικού συστήματος φ_2 για όλο το έτος στην περιοχή της Πάτρας	69
Πίνακας 7: Επιλεγμένη θέση τοποθέτησης πραγματοποίησης προσομοίωσης.....	74
Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων γεωμετρικών στοιχείων διάταξης	78

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εκτός από τις συμβατικές μορφές ενέργειας, υπάρχουν και μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες και είναι εκμεταλλεύσιμες. Αυτές είναι οι επανομαζόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν ως ήπιες μορφές ενέργειας, διότι για να αξιοποιηθούν δεν απαιτείται καμία ενεργειακή παρέμβαση καθώς προσλαμβάνονται απευθείας από το περιβάλλον. Ο όρος ΑΠΕ συμπεριλαμβάνει όλες τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, όπως ο ήλιος και ο άνεμος, ενώ βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον.



Εικόνα 1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
[Πηγή: Ροδόπουλος, 2015]

Σκοπός της χρήσης των ΑΠΕ είναι να αντικαταστήσουν τις ρυπογόνους για το περιβάλλον συμβατικές πηγές ενέργειας. Πρακτικά θεωρούνται ανεξάντλητες ενεργειακές πηγές και σε αυτές βασίζεται η ενεργειακή βιωσιμότητα του πλανήτη. Τον βασικό κορμό των ΑΠΕ αποτελούν η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια του νερού, η γεωθερμία και τέλος η βιομάζα (Νικολακοπούλου Α., 2012 ; Ασημακόπουλος και συν., 2015).

Πίνακας 1: Πηγές και μορφές Ενέργειας
[Πηγή: Ασημακόπουλος και συν., 2015]

ΠΗΓΗ	ΦΟΡΕΑΣ	ΜΟΡΦΗ
Ήλιος	Ηλιακή ακτινοβολίας	Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολίας
Θερμός εσωτερικό γης	Έδαφος – υπόγεια ύδατα	Θερμική
Έλξη ουράνιων σωμάτων	Επιφανειακά ύδατα της γης (παλίρροιες)	Δυναμική
Άνεμος	Κινούμενες αέριες μάζες	Κινητική
Κατακρημνίσεις υδάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι)	Κινούμενο νερό (υδατόπτωση , ροή)	Δυναμική – κινητική
Βιομάζα	Οργανική ύλη	Χημική
Αποθέματα ορυκτών καυσίμων	Άνθρακες υδρογονάνθρακες	Χημική
Πυρηνικά ορυκτά	Ακτινοβολία Σωματιδίων	Κινητική

Η στροφή προς τις ΑΠΕ οφείλεται αρχικά στην πετρελαϊκή κρίση, αλλά κυρίως στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς η χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας αποτελεί το 95% της ρύπανσης του περιβάλλοντος (Ασημακόπουλος και συν., 2015).

Επιπλέον η χρήση των ΑΠΕ παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως (Αντωνίου, 2014):

- Μειωμένη ανάγκη χρήσης συμβατικών μορφών ενέργειας.
- Ενεργή συμβολή στην άμβλυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας.
- Έντονη ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας σε εθνικό επίπεδο.
- Αξιοποίηση των προσφερόμενων ενεργειακών πόρων για τις εκάστοτε ενεργειακές ανάγκες.
- Πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος.
- Έντονη συνεισφορά στην βελτίωση της οικονομικής κατάστασης αναπτυσσόμενων χωρών (π.χ. νέες θέσεις εργασίας).

Ωστόσο, η χρήση των ΑΠΕ παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα (Αντωνίου, 2014):

- Ο συντελεστής απόδοσής τους είναι της τάξης του 30%.
- Δεν έχουν την δυνατότητα κάλυψης των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η απόδοσή τους επηρεάζεται ανάλογα με την εποχή, το κλίμα και το γεωγραφικό πλάτος.
- Αρκετές εγκαταστάσεις των ΑΠΕ είναι άκομψες και παράλληλα επιβαρύνουν το ήδη υπάρχον πρόβλημα του έντονου θορύβου στα αστικά κέντρα.

Στην παρούσα εργασία θα δοθεί έμφαση στην ενέργεια του ήλιου, δηλαδή στην ηλιακή ενέργεια, που δίνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσής της με την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου με το πέρασμα των ετών κερδίζει σημαντικό έδαφος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως το γεγονός ότι είναι μια τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον, αφού δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή και διατίθεται σε μεγάλο μέρος του πλανήτη με μεγάλη αφθονία. Επιπλέον, με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής.

Η λειτουργία αυτών των συστημάτων είναι αθόρυβη, απαιτούν ελάχιστα έξοδα συντήρησης και παρουσιάζουν διάρκεια ζωής που αγγίζει τα τριάντα χρόνια.

Ακόμα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι πάντοτε δίνεται η δυνατότητα επέκτασης ενός συστήματος φωτοβολταϊκών πλαισίων αρκεί να υπάρχει διαθέσιμος χώρος καθώς επίσης και να τοποθετούνται σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές (στέγη, πρόσοψη οικίας κ.ά.). Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές αφού είναι άριστα αυτόνομα και υβριδικά συστήματα με τον κατάλληλο συνδυασμό τεχνολογιών. Ωστόσο, υπάρχει και ένα μειονέκτημα καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν κόστος και παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα πλεονεκτήματα που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πολλά και με την βελτίωση της τεχνολογίας δίνονται νέες δυνατότητες. Συγκεκριμένα μπορεί να γίνει εκμετάλλευση ακόμα και της θερμοκρασία, η οποία πολλές φορές κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα, μετατρέποντάς την με κατάλληλους μηχανισμούς σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, με κατάλληλους μηχανισμούς αυξάνεται η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με συνέπεια την επιπλέον αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Στην συνέχεια τις παρούσας εργασίας θα αναλυθούν περεταίρω οι τεχνολογίες και οι δυνατότητες των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) με τον όρο Ηλιακή Ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται, απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη Γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας (ΥΠΕΚΑ, 2015).

Η πηγή της ηλιακής ενέργειας, όπως προαναφέρθηκε, είναι ο ήλιος, ο οποίος είναι απαραίτητος σε πολλές διεργασίες που πραγματοποιούνται στην γη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι η σημαντικότητα του για την χλωρίδα και την πανίδα του πλανήτη η οποία είναι καίρια. Επιπλέον, η ύπαρξη και η διατήρηση της ζωής στον πλανήτη οφείλεται στον ήλιο, καθώς είναι η βασική πηγή ενέργειας η οποία είναι απαραίτητη για να αναπτυχθούν όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί. Ακόμα, ο ήλιος είναι υπεύθυνος για την διατήρηση της θερμοκρασίας του πλανήτη σε βιώσιμα επίπεδα (Κόρκης, 2008).

Σύμφωνα με την επιστήμη της αστρολογίας ο ήλιος είναι απλανής αστέρας σφαιρικού σχήματος και το μέγεθος του είναι 109 φορές μεγαλύτερο από τον πλανήτη γη. Η διάμετρός του φτάνει στα 1,4 εκατομμύρια χιλιόμετρα και η θερμοκρασία του καταγράφεται σε μερικά εκατομμύρια βαθμών Κελσίου (C°) (Αντωνίου, 2014).



Εικόνα2: Ηλιακή ακτινοβολία
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Στον πλανήτη γη η μεταφορά ηλιακής ενέργειας αγγίζει τις 10^{18} kWh ετησίως. Ένα τέτοιο ποσό ενέργειας είναι υπεραρκετό για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως. Συμπερασματικά, ερευνητές καταλήγουν ότι η ηλιακή ενέργεια πρέπει να αξιοποιείται στο έπακρον λόγω των δυνατοτήτων της (Κόρκης, 2008 ;Αντωνίου, 2014).

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται σε διάφορες εφαρμογές όπως (Αντωνίου, 2014):

- Θερμικές εφαρμογές κατά τις οποίες η συλλογή ηλιακής ενέργειας γίνεται με σκοπό την παραγωγή θερμότητας κυρίως για την θέρμανση νερού.
- Φωτοβολταϊκές εφαρμογές κατά τις οποίες η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό.

Γενικά, η ηλιακή ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας πρακτικά ανεξάντλητη. Έτσι λοιπόν δεν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά την εκμετάλλευσή της (Ασημακόπουλος και συν., 2015).

1.2. ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ηλιακή γεωμετρία περιγράφει τη σχετική κίνηση γης και ήλιου και αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του ενεργειακού ισολογισμού. Η ηλιακή γεωμετρία της ακτινοβολίας απαιτείται με στόχο τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για οποιαδήποτε ώρα του έτους της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων ή ηλιακών συλλεκτών, που ενδέχεται να υπάρχει σκίαση είτε από φυσικά είτε από τεχνητά εμπόδια.

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσλαμβάνεται από μία επιφάνεια εξαρτάται από τη γωνία με την οποία προσπίπτει στην επιφάνεια (γωνία πρόσπτωσης). Η ανάλυση της ηλιακής γεωμετρίας οδηγεί στον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια, οποιαδήποτε στιγμή του έτους, εφόσον είναι γνωστά η γεωγραφική θέση της επιφάνειας, ο προσανατολισμός της και η κλίση της ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

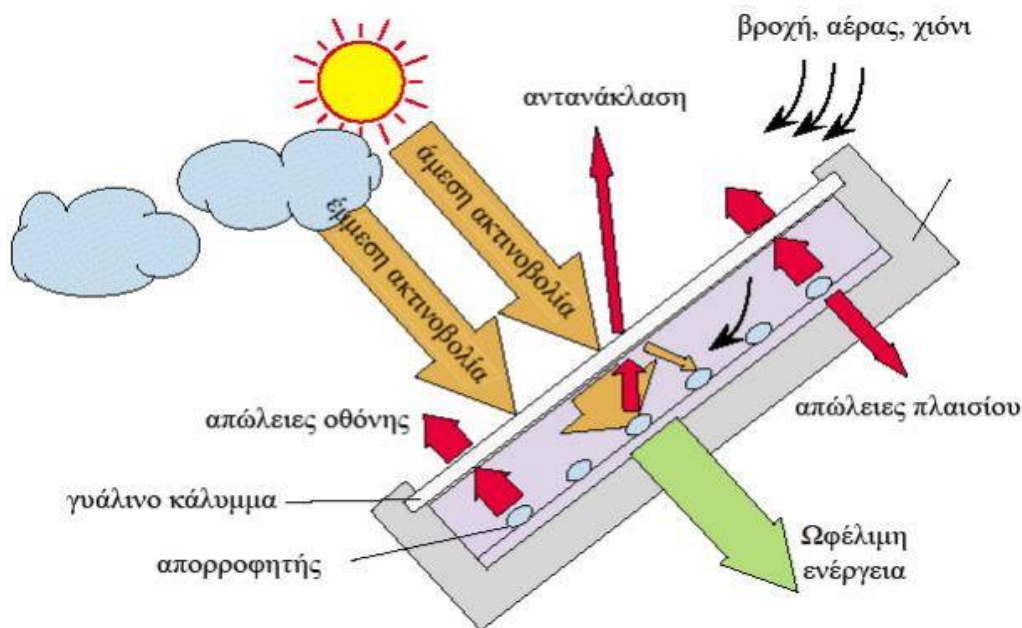
Στη περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης είναι γνωστή δίνεται ακόμα η δυνατότητα να υπολογισθεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, αρχικά απαιτείται ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμη στην θέση εγκατάστασης της επιφάνειας. Για τον άρτιο υπολογισμό της διαθέσιμης ακτινοβολίας προτείνονται είτε μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή που επιθυμείται να τοποθετηθεί η εγκατάσταση, είτε εμπειρικές προσεγγιστικές αριθμητικές μέθοδοι.

Με την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα και στη θέση εγκατάστασης γνωστές, είναι στη συνέχεια δυνατός ο υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που θα προσπέσει πάνω στην επιφάνεια. Η ολική ακτινοβολία που τελικά θα δεχτεί η επιφάνεια μελέτης αποτελεί το σύνολο τριών τύπων ακτινοβολίας και είναι της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης (Σχήμα 1) (Ασημακόπουλος και συν., 2015 ; Κατσαπάκης & Μονιάκης, 2015).

Αναλυτικά κάθε τύπος από τις προαναφερόμενες ακτινοβολίες ορίζονται ως ακολούθως(Ασημακόπουλος και συν., 2015):

- Άμεση ακτινοβολία (direct – deam), ορίζεται ως η ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μία επιφάνεια άμεσα χωρίς ή με ελάχιστη σκέδαση.
- Διάχυτη ακτινοβολία (diffuse), ορίζεται ως η ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μία επιφάνεια έμμεσα, δηλαδή εφόσον έχει υποστεί σκέδαση ή έχει αλλάξει διεύθυνση.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία (reflected), ορίζεται ως η ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε μία επιφάνεια κατόπιν ανάκλασης σε τεχνητές ή φυσικές επιφάνειες.
- Ολική ακτινοβολία (totalsolarradiation), ορίζεται ως το άθροισμα της διάχυτης και της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια.

Στην συνέχεια ακολουθεί το Σχήμα 1 όπου απεικονίζονται οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας και πώς αυτές προσπίπτουν επάνω σε μία επιφάνεια.



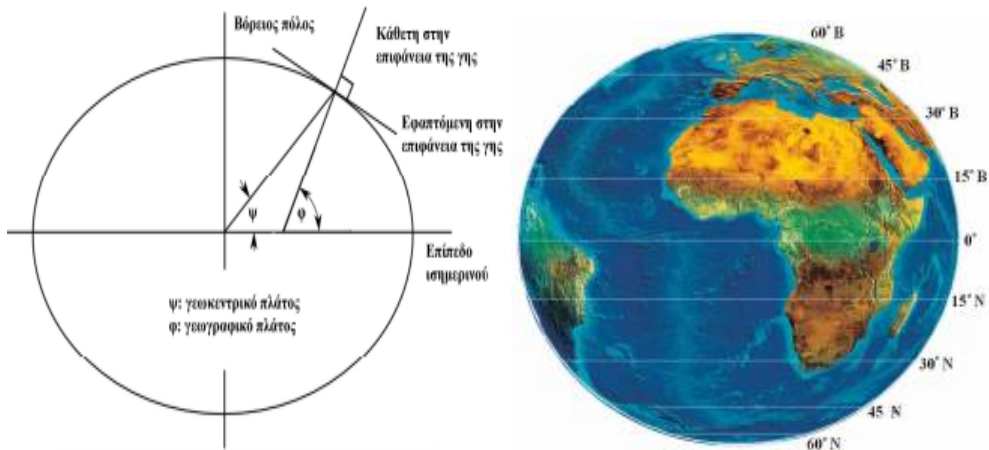
Σχήμα1: Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία
[Πηγή: Μοναχός, 2014]

1.2.1. Γεωγραφικές συντεταγμένες

Οι γεωμετρικές συντεταγμένες δίνουν την δυνατότητα να υπολογισθεί ένα σημείο στην επιφάνεια της γης με απόλυτη ακρίβεια. Ωστόσο, για τον ακριβή εντοπισμό απαιτούνται δύο συντεταγμένες, η τεταγμένη και η τετμημένη του σημείου ως προς ένα δεδομένο σύστημα αναφοράς. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι και για την περίπτωση εντοπισμού μιας επιφάνειας της γης απαιτούνται και οι δύο συντεταγμένες με στόχο την ένδειξη του γεωγραφικού της σημείου (Ασημακόπουλος και συν., 2015).

Με τις γεωγραφικές συντεταγμένες δίνονται το γεωγραφικό πλάτος και μήκος κάθε σημείου. Σύμφωνα με τους Κατσαπάρκη και Μονιάκη (2015) το γεωγραφικό πλάτος (latitude) (φ) ενός σημείου που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετη ευθεία στην επιφάνεια της γης από το επιφανειακό σημείο προς το επίπεδο του ισημερινού, με το επίπεδο του ισημερινού.

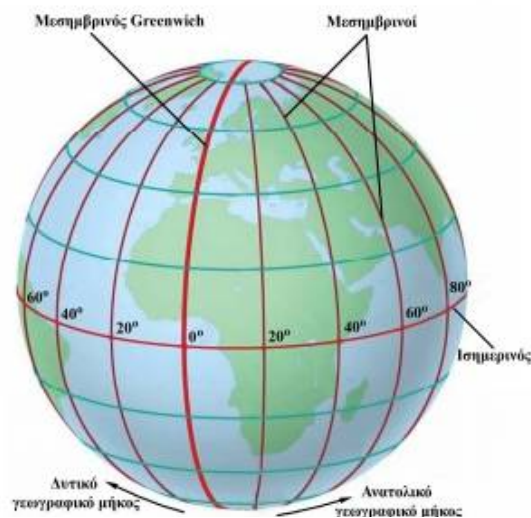
Σύμφωνα με τους Κατσαπάρκη και Μονιάκη (2015) το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται Βόρειο Β (North N) ή Νότιο Ν (South S), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη, σε αντίθεση με σημεία διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερώνυμα πλάτη. Το γεωγραφικό πλάτος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα λεπτά, από $0^\circ - 90^\circ$ Β ή $0^\circ - 90^\circ$ Ν, αρχής γενομένης της μέτρησης από τον ισημερινό του οποίου το γεωγραφικό πλάτος είναι 0° (Σχήμα 2).



Σχήμα2: Γεωγραφικό πλάτος
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

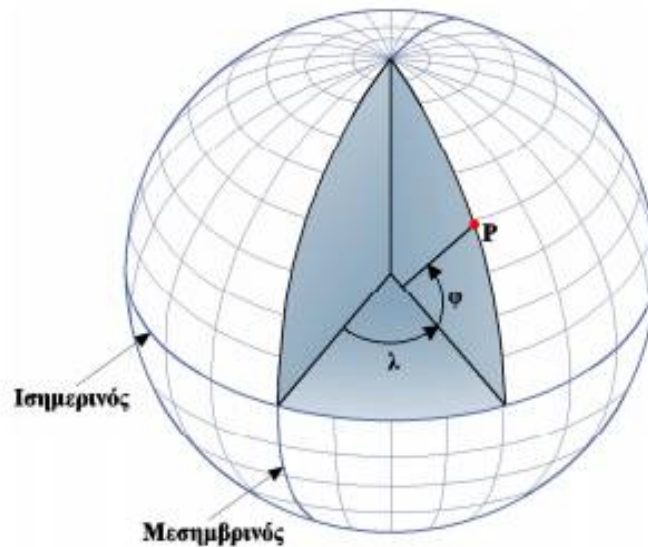
Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί από το Σχήμα 1 είναι ότι με το γεωγραφικό πλάτος ορίζεται και η γωνία που σχηματίζεται από το γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης προς το κέντρο της γης, με το επίπεδο του ισημερινού

Σύμφωνα με τους Κατσαπάρκη και Μονιάκη (2015) το γεωγραφικό μήκος (longitude) (λ) ενός σημείου στην επιφάνεια της γης είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού που διέρχεται από το εν λόγω σημείο με το επίπεδο του πρώτου μεσημβρινού. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες και υποδιαιρέσεις αυτών, πρώτα και δεύτερα από $0^\circ - 180^\circ$ Α ή $0^\circ - 180^\circ$ Δ, αρχής γενομένης της μέτρησης από τον πρώτο μεσημβρινό με γεωγραφικό μήκος 0° , ο οποίος διέρχεται από το αστεροσκοπείο του Greenwich στη Μεγάλη Βρετανία. Το γεωγραφικό μήκος χαρακτηρίζεται Ανατολικό Α (East E) ή Δυτικό Δ (West W), ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται το σημείο. Σημεία του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα μήκη σε αντίθεση με τόπους διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερόνυμα μήκη.



Σχήμα3: Γεωγραφικό μήκος
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Ωστόσο, γεωγραφικές συντεταγμένες ενός σημείου δίνονται από το γεωγραφικό στίγμα (geographical position) ενός γεωγραφικού σημείου και συγκεκριμένα δίνεται από τη τομή του αντίστοιχου παράλληλου πλάτους (φ) και του γεωγραφικού μήκους (λ) (Σχήμα 4).



Σχήμα4: Γεωγραφικό στίγμα
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Αρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα γίνεται κατανοητό ότι οι δύο διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες ορίζουν δύο διαφορετικά σημεία στην επιφάνεια της γης, τα οποία απέχουν μεταξύ τους συγκεκριμένη απόσταση. Η εξάρτηση μεταξύ των γεωγραφικών συντεταγμένων είναι σαφής (Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015).

1.2.2. Απόκλιση ήλιου

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ένα επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς. Ο κεντρικός κάθετος άξονας του βορρά – νότου παρουσιάζει μια απόκλιση με τον άξονα εκλειπτικής τροχιάς κατά μία γωνία, η οποία, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταβάλλεται από $-23,45^\circ$ έως $23,45^\circ$ και ονομάζεται απόκλιση άξονα γης και συμβολίζεται με « δ » (Σχήμα 5).

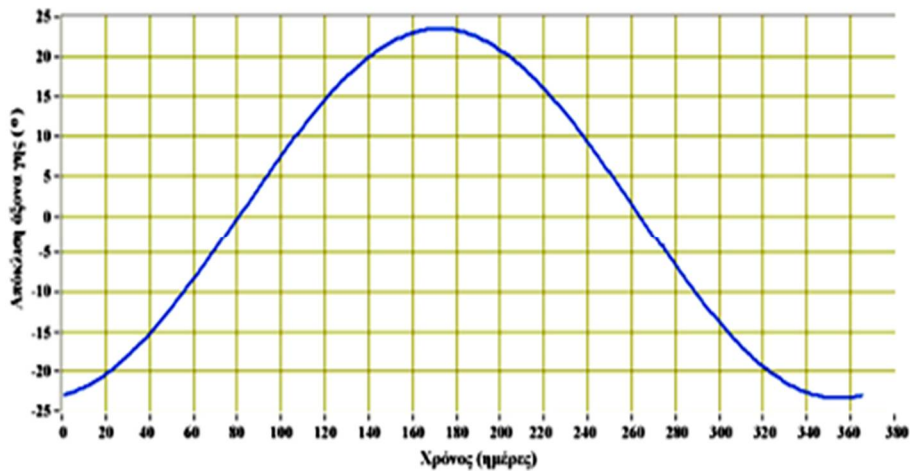
Η ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης σε μοίρες δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_n = 23.45^\circ \cdot \sin\left(360 \frac{284+D_n}{365}\right) \quad [1.1]$$

Η απόκλιση του άξονα της γης παίρνει κάποιες χαρακτηριστικές τιμές κατά την διάρκεια ενός έτους. Οι τιμές αυτές είναι ότι στα δύο άκρα της καμπύλης, η απόκλιση του άξονα της γης είναι 0° και ο χρόνος που λαμβάνει χώρα το γεγονός στις 21 Μαρτίου και στις 22 Σεπτεμβρίου καθώς και πριν την μέγιστη τιμή όπου για 21 Δεκεμβρίου παίρνει την ελάχιστη τιμή της, ίση με $-23,45^\circ$ και για 21 Ιουνίου παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ίση με $23,45^\circ$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιαίτερες αυτές τιμές διαμορφώνουν τις ισημερίες και τα ηλιοστάσια εντός του έτους όπως θα αναλυθεί και στην συνέχεια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Ακολουθεί το Σχήμα 6 που παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης.

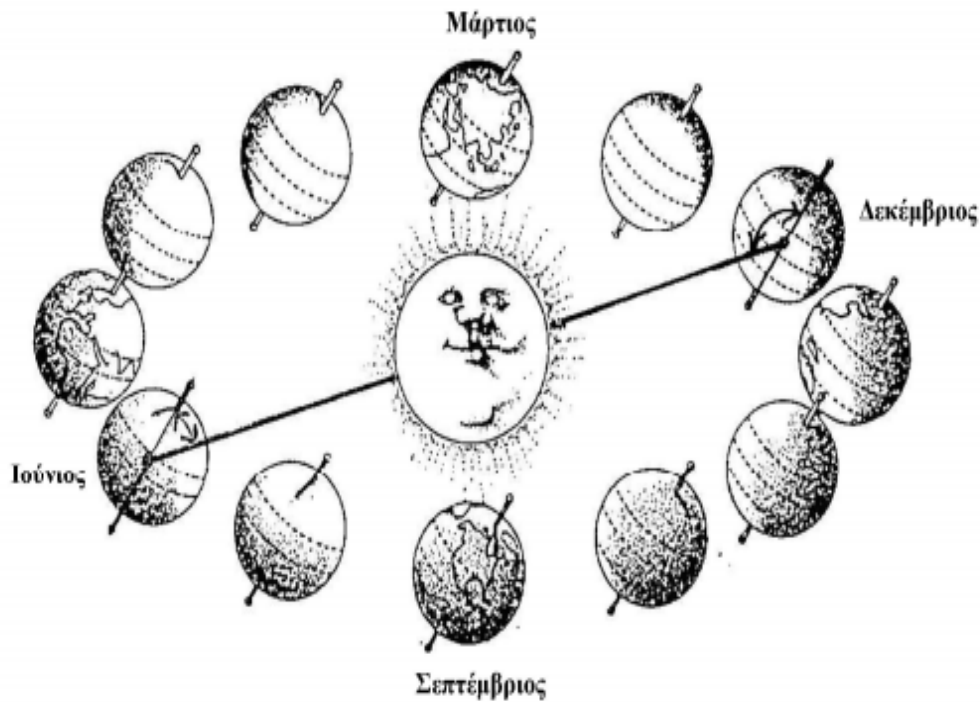


Σχήμα5: Απόκλιση άξονα γης ως προς το επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς.
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]



Σχήμα6: Ετήσια διακύμανση της απόκλισης του άξονα της γης
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Η αιτία που οφείλεται η μεταβολή της απόκλισης του άξονα της γης είναι ότι οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν σε διάφορα γεωγραφικά σημεία στην γης με διαφορετική γωνία, η οποία εξαρτάται από την σχετική θέση της γης ως προς τον ήλιο. Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώθηκε ότι πραγματικά η γωνία μεταξύ του άξονα βορρά – νότου και των ηλιακών ακτινών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους από μία ελάχιστη τιμή ίση με $90 - 23,45 = 66,55^\circ$, έως μία μέγιστη τιμή ίση με $90 + 23,45 = 113,45^\circ$. Η γωνία αυτή που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα της γης και της διεύθυνσης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών σε αυτή ονομάζεται απόκλιση ηλίου – γης (Σχήμα 7).



Σχήμα7: Εκλειπτική τροχιά και γωνίες απόκλισης ηλίου – γης
 [Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Η αυξομείωση της απόκλισης ηλίου – γης έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Ωστόσο, αυτό έχει σαν συνέπεια την αντίστροφη εναλλαγή των εποχών αλλά και των χρονικών διαστημάτων ημέρας και νύχτας εντός του έτους που παρουσιάζονται στο βόρειο και νότιο ημισφαίριο.

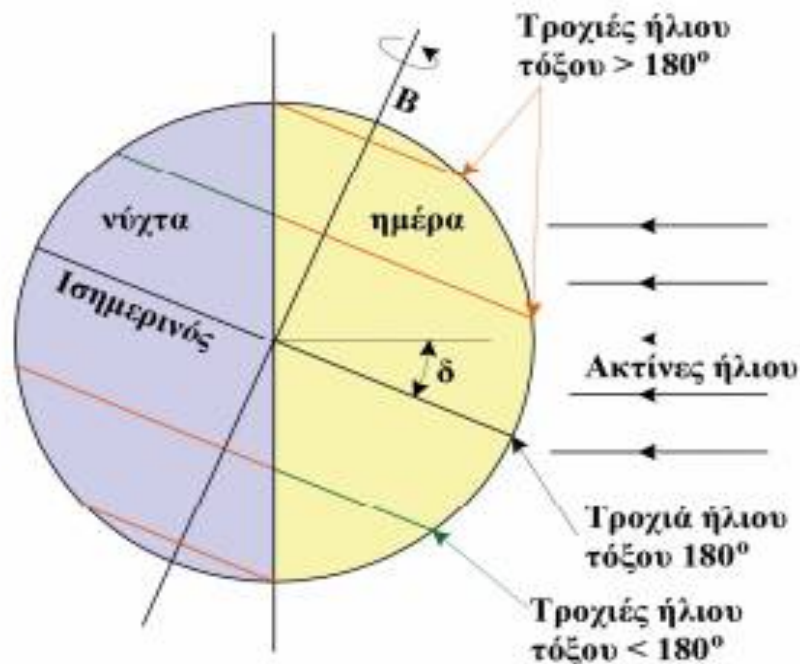
Όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν συγκεκριμένες μέρες του έτους που η απόκλιση ηλίου – γης έχει συγκεκριμένες τιμές, οι οποίες διαμορφώνονται με βάση τις τιμές της απόκλισης του άξονα της γης. Όμως στις μέρες αυτές παρουσιάζεται η εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία, όπου για το νότιο ημισφαίριο οι ισημερίες είναι ίδιες. Επιπλέον, τα ηλιοστάσιο για τα νότιο ημισφαίριο είναι αντίθετα συγκρινόμενα με αυτά του βόρειου ημισφαιρίου.

Αυτό που θα πρέπει να τονισθεί είναι ότι η απόκλιση του άξονα της γης και η απόκλιση ηλίου – γης καθορίζουν κάποιους γεωγραφικούς παράλληλους, οι οποίοι καθορίζονται σύμφωνα με τις τιμές της απόκλισης του άξονα της γης και της απόκλισης ηλίου – γης κατά τα δύο ηλιοστάσια (Ασημακόπουλος και συν., 2015 ; Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015).

1.2.3. Οριαία γωνία ήλιου

Σύμφωνα με τους Κατσαπάρκης και Μονιάκης (2015) η περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της γίνεται αντιληπτή από παρατηρητή που βρίσκεται σε κάποιο γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης με βάση τη σχετική κίνηση που διαγράφει ο ήλιος στον ορίζοντα της γης. Καθώς η γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της καλύπτοντας τόξο 360°, η σχετική κίνηση του ήλιου ως προς τη γη εκτελείται σε κυκλική τροχιά, καλύπτοντας αντίστοιχα τόξο 360°. Η σχετική κίνηση του ήλιου γύρω από τη γη γίνεται βέβαια αντιληπτή από κάθε γεωγραφικό σημείο μόνο από την ανατολή έως τη δύση του, δηλαδή μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τις ισημερίες, ο ήλιος γίνεται αντιληπτός από ένα γεωγραφικό σημείο για τόξο 180°.

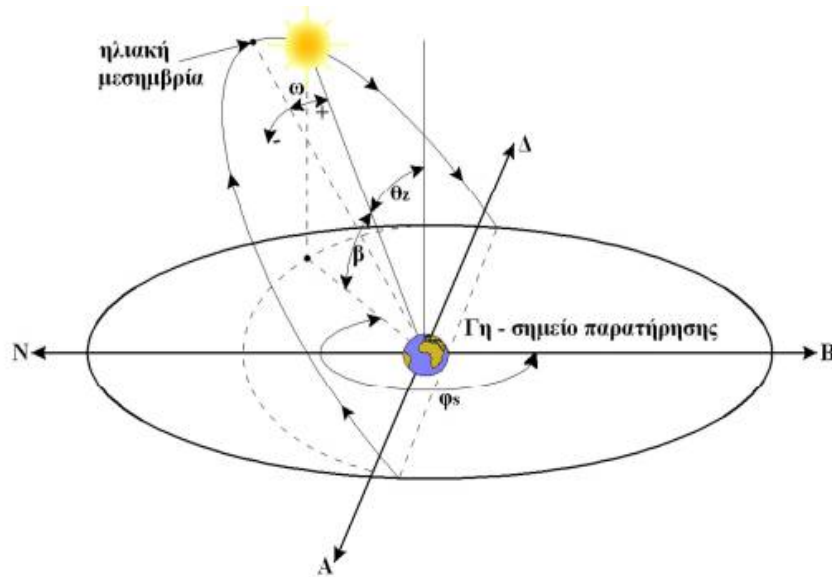
Στην περίπτωση που η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη από τη διάρκεια της νύχτας σε ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στην γη το τόξο της τροχιάς της σχετικής κίνησης του ήλιου ως προς τη γη σχηματίζει οξεία γωνία. Στην περίπτωση που η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη από τη διάρκεια της νύχτας σε ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στην γη το τόξο της τροχιάς της σχετικής κίνησης του ήλιου ως προς τη γη σχηματίζει αμβλεία γωνία. Επιπλέον, στην περίπτωση που το σημείο αυτό βρίσκεται πάνω στον ισημερινό, όπου υπάρχει πάντα ισημερία, η κίνηση του ήλιου στον ορίζοντα γίνεται πάντα αντιληπτή για τόξο 180° (Σχήμα 8).



Σχήμα8: Τροχιές ήλιου στον ορίζοντα συναρτήσει της διάρκειας της ημέρας
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Η ωριαία γωνία του ήλιου ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα από την ηλιακή μεσημβρία, μετρούμενη πάνω στο επίπεδο της τροχιάς του ήλιου και συμβολίζεται « ω » (Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015).

Και στην ωριαία γωνία παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές οι οποίες είναι κατά την ηλιακή μεσημβρία η ωριαία γωνία του ήλιου ισούται $\omega=0^\circ$. Αυτό συμβαίνει διότι η ωριαία γωνία παίρνει τιμές οι οποίες κυμαίνονται από το 0° που είναι η ηλιακή μεσημβρία έως 180° που είναι τα μεσάνυχτα, δηλαδή έχει την δυνατότητα να καλύπτει ένα φάσμα τιμών 360° σε χρονικό διάστημα 24 ωρών. Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα η ωριαία γωνία μεταβάλλεται για κάθε ώρα 15° και για τις πρώτες ώρες της ημέρας καθώς και για τις απογευματινές παίρνει αρνητικές τιμές ενώ στην ηλιακή μεσημβρία παίρνει θετικές τιμές (Καπλάνης, 2004). Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται η ωριαία γωνία του ήλιου, καθώς επίσης το ηλιακό ύψος β και η γωνία ζενίθ θ_z του ήλιου.



Σχήμα9: Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας ω του ήλιου
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

Συμπερασματικά λοιπόν η ωριαία γωνία του ήλιου περιγράφει τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα όμως αυτό το δεδομένο μπορεί να δοθεί και από τον ηλιακό χρόνο, με συνέπεια να απαιτείται ο συσχετισμός μεταξύ ωριαίας γωνίας ήλιου και ηλιακού χρόνου (Καπλάνης, 2004 ; Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015).

Για τον υπολογισμό της ωριαίας γωνίας χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή η οποία πραγματοποιείται ανάμεσα στην ωριαία γωνία του ήλιου και τον πραγματικό ηλιακό χρόνο. Όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για $t_{sol} = 12h$ θα πρέπει να είναι $\omega = 0^\circ$ και ότι για πεδίο τιμών $t_{sol} = 0 - 24h$ η ωριαία γωνία θα πρέπει να παίρνει τιμές από 0 έως $\pm 180^\circ$. Η ωριαία γωνία δίνεται από την σχέση:

$$\omega = \frac{(t_{sol}-12) \cdot h}{24h} \cdot 360^\circ \Leftrightarrow \omega = (t_{sol} - 12) \cdot 15^\circ \quad [1.2]$$

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι η ωριαία γωνία κατά την ανατολή του ήλιου δίνεται από την σχέση:

$$\omega_{sr} = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad [1.3]$$

Όπου:

φ = γεωγραφικό πλάτος της περιοχής της μελέτης

δ = απόκλιση του άξονα της γης

Ωστόσο, η ωριαία γωνία του ήλιου κατά την δύση είναι η αντίθετη της ωριαίας γωνίας κατά την ανατολή και δίνεται από την σχέση:

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} = -\cos^{-1}[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad [1.4]$$

Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες σχέσεις γίνεται κατανοητό ότι οι ωριαίες γωνίες είτε ανατολής είτε δύσης εξαρτώνται άμεσα από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που μελετάται καθώς και από την απόκλιση της γης, δηλαδή από το τρέχον 24ωρο εντός του έτους.

Οι ηλιακοί χρόνοι ανατολής και δύσης δίνονται συναρτήσει της ωριαίας γωνίας του ήλιου από τις ακόλουθες σχέσεις:

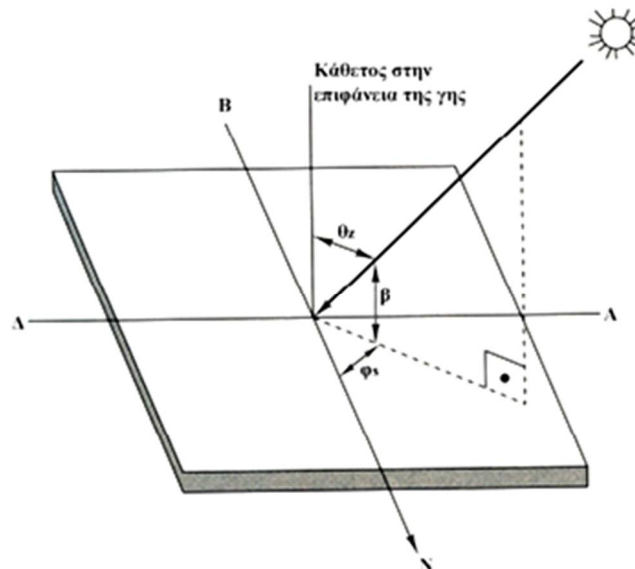
$$t_{sr} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{sr} \quad [1.5]$$

$$t_{ss} = 12 - \frac{24}{360} \cdot \omega_{ss} \quad [1.6]$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις γίνεται κατανοητό ότι η ωριαία γωνία εξαρτάται αποκλειστικά από το γεωγραφικό πλάτος μιας περιοχής και το τρέχον 24ωρο του έτους καθώς και για συγκεκριμένους χρόνους ανατολής και δύσης. Αυτό συμβαίνει διότι διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη έχουν διαφορετικούς χρόνους ανατολής και δύσης. Σημειώνεται ότι στον ισημερινό η διάρκεια της ημέρας είναι σταθερή και ίση με τη διάρκεια της νύχτας όλο το έτος (ισημερία) ενώ το αντίθετο συμβαίνει στους πόλους (Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015).

1.2.4. Βασικές γωνίες της τροχιάς του ήλιου

Η θέση του ήλιου στον ορίζοντα ως προς ένα γεωγραφικό σημείο στην επιφάνεια της γης μπορεί να προσδιοριστεί με το ηλιακό ύψος ή την γωνία ζενίθ, και το αζιμούθιο του ήλιου. Το Σχήμα 10 απεικονίζει τις προαναφερόμενες γωνίες και στην συνέχεια ακολουθούν οι ορισμοί καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αυτών (Καπλάνης 2004, Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015, Ασημακόπουλος και συν., 2015).



Σχήμα10: Ηλιακό ύψος, γωνία ζενίθ και αζιμούθιο του ήλιου
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

➤ Ηλιακό ύψος

Το ηλιακό ύψος «β» του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης. Το ηλιακό ύψος θεωρητικά παίρνει τιμές από 0 έως 90°.

Το ηλιακό ύψος β σε δεδομένη χρονική στιγμή και σε δεδομένο γεωγραφικό σημείο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin(\beta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad [1.7]$$

Όπου:

β = ηλιακό ύψος

φ = γεωγραφικό πλάτος του υπό μελέτη γεωγραφικού σημείου

δ = απόκλιση του άξονα της γης
 ω = ωριαία γωνία του ήλιου τη χρονική στιγμή μελέτης.

➤ Γωνία ζενίθ

Η γωνία ζενίθ θ_z του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην κατακόρυφη ως προς την επιφάνεια της γης από το εν λόγω σημείο. Η γωνία ζενίθ και το ηλιακό ύψος είναι συμπληρωματικές γωνίες και δίνονται από την σχέση:

$$\beta + \theta_z = 90 \quad [1.8]$$

Όπου:

β = ηλιακό ύψος
 θ_z = γωνία ζενίθ

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία ζενίθ σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρό παίρνει τιμές από 0 έως 90°.

➤ Αζιμούθιο του ήλιου

Το αζιμούθιο φ_s του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή στο οριζόντιο επίπεδο της ευθείας που ενώνει το εν λόγω σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στη διεύθυνση βορρά - νότου.

Το αζιμούθιο του ήλιου παίρνει κάποιες χαρακτηριστικές τιμές που είναι οι ακόλουθες:

- Για νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν: $\varphi_s = 0$
- Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές
- Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

Το αζιμούθιο του ήλιου φ_s σε δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από την ακόλουθη σχέση, συναρτήσει της απόκλισης του άξονα της γης δ , της ωριαίας γωνίας ω και του ηλιακού ύψους β :

$$\sin(\varphi_s) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(\beta)} \quad [1.9]$$

Όπου:

φ_s = αζιμούθιο του ήλιου
 β = ηλιακό ύψος
 δ = απόκλιση του άξονα της γης
 ω = ωριαία γωνία του ήλιου τη χρονική στιγμή μελέτης.

1.2.5. Γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια

Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια θεωρείται βασική για την μελέτη των φωτοβολταϊκών στοιχείων με στόχο την μέγιστη απόδοσή τους καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

Θεωρείται μια επιφάνεια η οποία είναι τοποθετημένη σε ένα γεωγραφικό σημείο με κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο θ_p . Το αζιμούθιο επιφάνειας συμβολίζεται με φ_p και ουσιαστικά περιγράφει τον προσανατολισμό της επιφάνειας. Οι τιμές του αζιμούθιου επιφάνειας είναι αντίστοιχες με αυτές του αζιμούθιου του ήλιου, δηλαδή το αζιμούθιο επιφάνειας:

- Με νότιο προσανατολισμό ισούται με μηδέν: $\varphi_p = 0$.
- Με προσανατολισμό προς τα δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
- Με προσανατολισμό προς τα ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

Αποδεικνύεται ότι το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης θ_i της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$\cos(\theta_i) = \cos(\beta) \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta_p) \quad [1.10]$$

Όπου:

θ_i = γωνίας πρόσπτωσης

β = ηλιακό ύψος

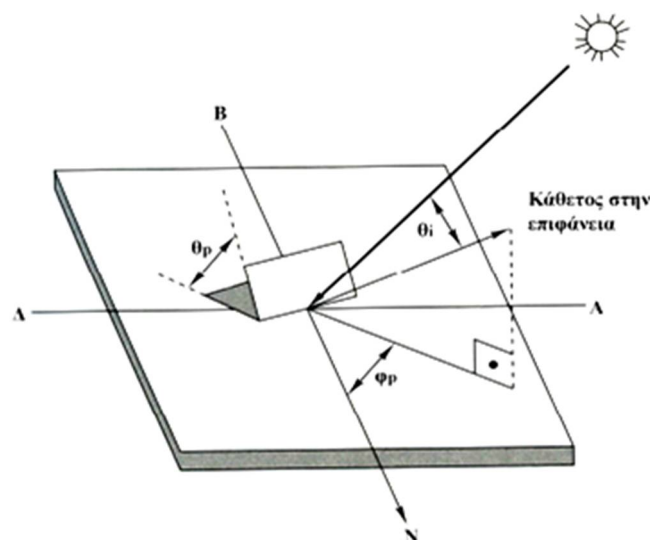
θ_p = κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο για ένα γεωγραφικό σημείο

γ = αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας.

Σημειώνεται ότι η γωνία γ που ονομάζεται αζιμούθιο ήλιου – επιφάνειας ισούται με τη διαφορά του αζιμούθιου του ήλιου μείον το αζιμούθιο της επιφάνειας και δίνεται από την σχέση:

$$\gamma = \varphi_s - \varphi_p \quad [1.11]$$

Στην συνέχεια ακολουθεί το Σχήμα 11 όπου απεικονίζονται οι προαναφερόμενες γωνίες με στόχο την κατανόηση της διαδικασίας υπολογισμού της γωνίας πρόσπτωσης.



Σχήμα11: Υπολογισμός γωνίας πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια
[Πηγή: Κατσαπάρκης & Μονιάκης, 2015]

1.3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Φωτοβολταϊκό στοιχείο ορίζεται μια διάταξη η οποία έχει δημιουργηθεί με στόχο να δίνεται η δυνατότητα να μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει πάνω της σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια διάταξη η οποία αποτελείται από κρυστάλλους, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύουν την ηλιακή ακτινοβολία και με την πραγματοποίηση συγκεκριμένων διαδικασιών γίνεται η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια (Θεοδώρου, 2013).

1.3.1. Ιστορική ανάδρομη

Η ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου πραγματοποιήθηκε από τον Γάλλο φυσικό A.E. Becquerel (1820-1891), ο οποίος κατά την εκτέλεση ενός πειράματος παρατήρησε την αύξηση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα ηλεκτρόδιο πλατίνας που βρισκόταν βυθισμένο σε ηλεκτρολύτη, όταν ήταν εκτεθειμένο στο ηλιακό φως.

Το 1877 δύο ερευνητές του Cambridge, οι Day και Adams έδωσαν ιδιαίτερη σημασία στις έντονες μεταβολές που παρουσιάζουν οι ηλεκτρικές ιδιότητες του σεληνίου όταν είναι εκτεθειμένο στο ηλιακό φως. Την παρατήρησή τους διαδέχτηκε η κατασκευή του πρώτου φωτοβολταϊκού στοιχείου το 1883, από τον ηλεκτρολόγο Charles Edgar Fritz. Την δομή του αποτελούσαν λεπτά στρώματα σεληνίου τα οποία ήταν καλυμμένα από ημιδιάφανα χρυσά σύρματα και ένα φύλλο γυαλιού. Η απόδοση του πρώτου φωτοβολταϊκού στοιχείου μόλις άγγιζε το 1%.

Βασική προϋπόθεση για να αυξηθεί η απόδοση του στοιχείου ήταν η πλήρης κατανόηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Ο Albert Einstein κατέγραψε την πιο σαφή και πλήρη θεωρία για την ερμηνεία του φαινομένου το 1904 και μερικά χρόνια μετά (1921) του αποδόθηκε το βραβείο Nobel για την θεωρητική εξήγησή του.

Ωστόσο, το 1930 ο Schottky ολοκλήρωσε την θεωρία που αφορά το ηλιακό φωτοβολταϊκό στοιχείο και κατασκεύασε μία συσκευή με ημιαγωγούς. Τον Schottky διαδέχτηκαν οι Chapin, Fuller και Pearson οι οποίοι βελτίωσαν ακόμα περισσότερο την απόδοση του στοιχείου με την χρήση ηλιακής κυψέλης πυριτίου (Si).

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών αρχίζει και εφαρμόζεται με την πάροδο των χρόνων. Χαρακτηριστικά, το 1958 στον τεχνητό δορυφόρο VanguardI οι Ηνωμένες Πολιτείες αποφάσισαν να τοποθετήσουν φωτοβολταϊκά πλαίσια για να καλύψουν τις επιπλέον ανάγκες του δορυφόρου σε ενέργεια. Η απόδοσή τους ήταν ικανοποιητική για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του δορυφόρου και η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων άγγιξε τα έξι χρόνια. Έπειτα από αυτή την δοκιμή καθιερώθηκε η χρήση των ηλιακών στοιχείων ως κύρια πηγή ενέργειας στους τεχνητούς δορυφόρους από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Την ίδια φιλοσοφία ακολούθησε και η πρώην Σοβιετική Ένωση.

Μία επιπλέον πειραματική δοκιμή πραγματοποιούν οι Wronski και Calsonτο 1976 οι οποίοι τολμούν την κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο πυρίτιο. Καταλήγουν ωστόσο σε ηλιακό στοιχείο πολύ μικρής απόδοσης της τάξης του 0,01%.

Η ArcoSolar τολμά την πρώτη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών το 1980 στην περιοχή της Καλιφόρνια με την χρήση συστήματος το οποίο είχε την δυνατότητα να παρακολουθεί την τροχιά του ηλίου σε 2 άξονες. Κατά την διάρκεια της επόμενης τριετίας η χρήση των φωτοβολταϊκών παρουσιάζει αλματώδη εξέλιξη. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων εκτινάσσεται στο 32,3% με την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου που προέκυψε από την συνεργασία της εταιρίας Spectrolab και του National Renewable Energy Laboratory (NREL) το 1999.

Η έναρξη της μαζικής παραγωγής των φωτοβολταϊκών στοιχείων έγινε το 2004 με την Γερμανία και την Ιαπωνία να πρωτοπορούν. Αρκετές χώρες κάνουν προσπάθειες να ακολουθήσουν τις χώρες που πρωτοπορούν επενδύοντας τεράστια κεφάλαια για την εκμετάλλευση των στοιχείων. Το γεγονός ότι η ηλιακή ενέργεια παρέχεται δωρεάν και σε αφθονία, και ταυτόχρονα η ποικίλη δυνατότητα των φωτοβολταϊκών εφαρμογών οδηγεί σε πολλά οικονομικά οφέλη και έτσι αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η χρήση των

φωτοβολταϊκών στοιχείων (Ματθαίου & Μιχαλοδημητρακάκης, 1991 ; Καγκαράκης, 1992 ; Καπλάνης, 2004; Πελέκης, 2013).

1.3.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Με τον όρο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζουμε την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η ονομασία φωτοβολταϊκό στοιχείο τους αποδόθηκε λόγω αρχικά της χρήσης της ηλιακής ενέργειας και επιπλέον λόγω του πρωτοπόρου όσον αφορά την μελέτη του ηλεκτρισμού, ιταλικής καταγωγής Alessandro Volta (1745-1827) ο οποίος εφηύρε την μπαταρία.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως (Πελέκης, 2013):

- Χρήση άμεσα ανανεώσιμης και δωρεάν ενέργειας
- Ικανοποιητική απόδοση
- Απλή τεχνολογία κατασκευής των ηλιακών κυττάρων
- Αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής (25 έτη κατά μέσο όρο)
- Η λειτουργία τους δεν επηρεάζει καθόλου το περιβάλλον
- Αφθονία των πρώτων υλών για την κατασκευή τους
- Σχεδόν αμελητέα η ανάγκη τους για συντήρηση και επίβλεψη
- Δυνατότητα λειτουργίας τους για πολύ μικρές τιμές ισχύος
- Ανεξαρτησία από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα
- Οικονομικό κόστος παροχής ενέργειας σε εγκαταστάσεις που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
- Μεγάλη αναλογία της ισχύος που παράγεται προς το βάρος της διάταξης (1000 W/kg)
- Λόγω της διαρκούς ανάπτυξης της τεχνολογίας τους έχουμε σταδιακή μείωση του κόστους παραγωγής τους.

Ωστόσο, εκτός από τα πλεονεκτήματα που όπως παρατηρείται είναι αρκετά, η χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα:

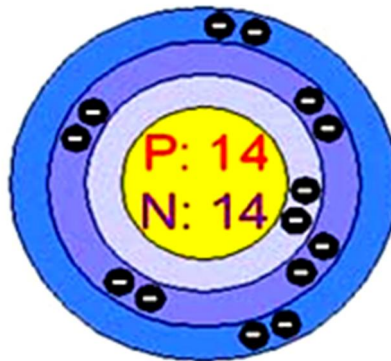
- Η λειτουργία τους είναι άμεσα εξαρτημένη από την ηλιακή ενέργεια
- Η τροφοδοσία τους από την ηλιακή ακτινοβολία είναι ασταθής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Κάλυψη μεγάλης έκτασης για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας
- Η παραγωγή συνεχούς ρεύματος οδηγεί στην απαίτηση ειδικών μετατροπών για την χρήση του.
- Απαραίτητες συσκευές για την αποθήκευση της ενέργειας.

1.3.3. Ημιαγωγός

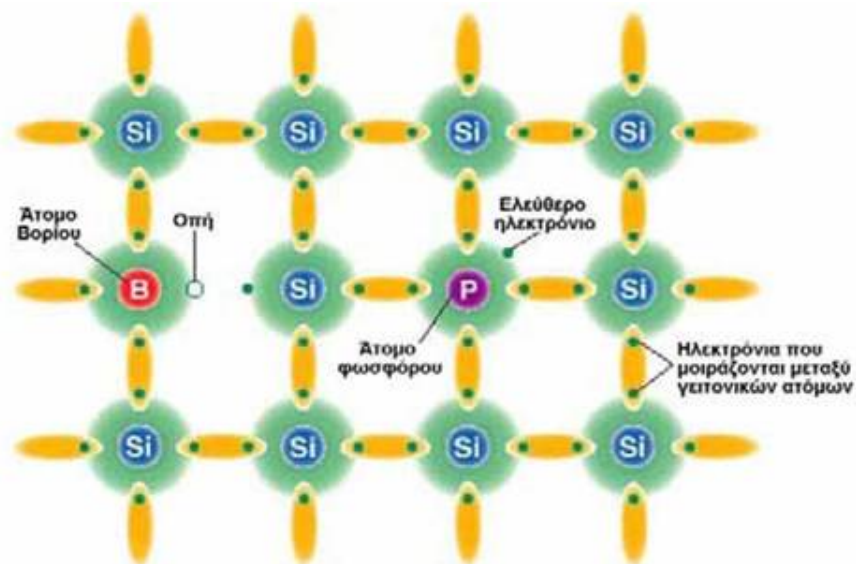
Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιούνται οι ημιαγωγοί. Με τον όρο ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται τα σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, δηλαδή με μέτριο βαθμό ευκολίας ενός στερεού να άγει ηλεκτρικό ρεύμα.

Το πυρίτιο ανήκει στο πλέον συνηθέστερο ημιαγωγικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυττάρων από το 1950. Ακόμα και σήμερα το 90% της παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι άμεσα εξαρτημένο από το πυρίτιο. Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης του πυριτίου είναι η αφθονία του, καθώς έρχεται δεύτερο σε

αφθονία στον πλανήτη μετά το οξυγόνο, αλλά και η τετραεδρική κρυσταλλική του δομή (Αντωνίου, 2014).



Σχήμα12: Άτομο πυριτίου



Σχήμα13:Κρυσταλλικός δεσμός πυριτίου (Si), φωσφόρου (P) και βορίου (B).
[Πηγή: Τετελένης, 2011]

Η προσπίπτουσα στο φωτοβολταϊκό κύτταρο ηλιακή ακτινοβολία, επηρεάζει την κίνηση των ηλεκτρονίων δίνοντας τους την ικανότητα της ελεύθερης κίνησης στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Για την παραγωγή ρεύματος απαραίτητη προϋπόθεση είναι η συγκεκριμένη κατεύθυνση των ηλεκτρονίων. Υπεύθυνο για την απόδοση συγκεκριμένης κατεύθυνσης στα ηλεκτρόνια είναι το ηλεκτρικό πεδίο καθορισμένης πάντα ισχύος η οποία είναι άμεσα εξαρτημένη από την τάση του φωτοβολταϊκού κυττάρου αλλά και την ροή των ηλεκτρονίων. Σε περίπτωση που χρειαστεί να αυξηθεί η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων, επιτυγχάνεται εύκολα με πρόσθεση προσμίξεων στο καθαρό πυρίτιο (φώσφορο, βόριο).

Το πυρίτιο ανήκει στους κακούς αγωγούς ηλεκτρισμού για αυτό τον λόγο είναι αναγκαίο να τους διοχετευθεί ενέργεια για να κινηθούν. Κατά την διέγερσή τους ωστόσο η δομή τους υπόκεινται σε αλλαγές αφού τα κινούμενα ηλεκτρόνια πλησιάζουν γειτονικά άτομα. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ανοικτών θετικά φορτισμένων οπών στην δομή του υλικού. Η κατάληψη των οπών αυτών από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ροής ηλεκτρονίων εντός του υλικού.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι αυστηρά περιορισμένος για να χρησιμεύει στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Αυτός εξάλλου είναι και ο λόγος πρόσθεσης προσμίξεων στο πυρίτιο.

Το φώσφορο έχει εξωτερική στοιβάδα η οποία αποτελείται από πέντε ηλεκτρόνια εκ των οποίων τα τέσσερα συμμετέχουν σε γειτονικά άτομα πυριτίου και το ένα που υπολείπεται συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια που είναι στο πυρήνα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ενέργεια που απαιτείται για την ενεργοποίηση της κίνησης στο κρυσταλλικό πλέγμα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Ακόμα, τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται φέρουν αρκετά μεγαλύτερο ηλεκτρικό ρεύμα από αυτό που φέρει το πυρίτιο.

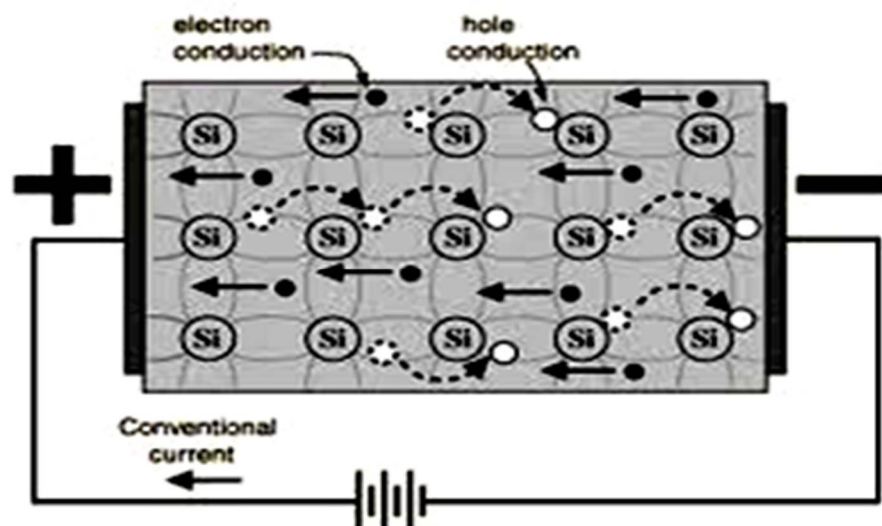
Η πρόσθεση στο καθαρό πυρίτιο προσμίξεων φωσφόρου έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ημιαγωγών τύπου n. Επιπλέον, η πρόσθεση στο καθαρό πυρίτιο προσμίξεων βορίου έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ημιαγωγών τύπου p (Τετελένης, 2011 ; Αντωνίου 2014).

1.3.4. Επαφή p-n

Η ένωση p-n ή αλλιώς επαφή p-n, είναι η επαφή των επιφανειών ενός ημιαγωγού p με έναν ημιαγωγό n. Εάν ωστόσο ενώσουμε έναν ημιαγωγό p με έναν ημιαγωγό n, τότε προκύπτει ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα που ονομάζεται κρυσταλλοδίοδος ή δίοδος p-n. Θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή και να εφαρμόζονται ειδικές μέθοδοι στα άκρα των ημιαγωγών για να αποφευχθούν ανεπιθύμητες συνέπειες κατά την ένωσή τους (Ανδρικόπουλος, 2014).

Οι ιδιότητες των κρυσταλλικών ημιαγωγών είναι άμεσα εξαρτημένη από την καθαρότητα που παρουσιάζουν, την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος καθώς και την ομαλότητα στην δομή τους. Στα ημιαγωγικά υλικά τα άτομα είναι συνδεδεμένα με ομοιοπολικούς δεσμούς. Οι ομοιοπολικοί αυτοί δεσμοί είναι πολύ εύκολο να σπάσουν λόγω ακτινοβολίας ή λόγω θερμότητας. Όταν οι δεσμοί σπάσουν απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και παραχωρούν άδειες θέσεις τις λεγόμενες οπές (θετικοί φορείς p).

Οι περιοχές p και n δεν είναι συμμετρικές ως προς τον αριθμό ηλεκτρονίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του φαινομένου της διάχυσης. Η μεταφορά λοιπόν των ηλεκτρονίων από την περιοχή n (περίσσεια) προς την περιοχή p έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μίας περιοχής στον ημιαγωγό n, η οποία βρίσκεται κοντά στην διεπαφή p-n, με θετικό φορτίο ιδιαίτερα αυξημένο (Αντωνίου, 2014 ; Ανδρικόπουλος, 2014).



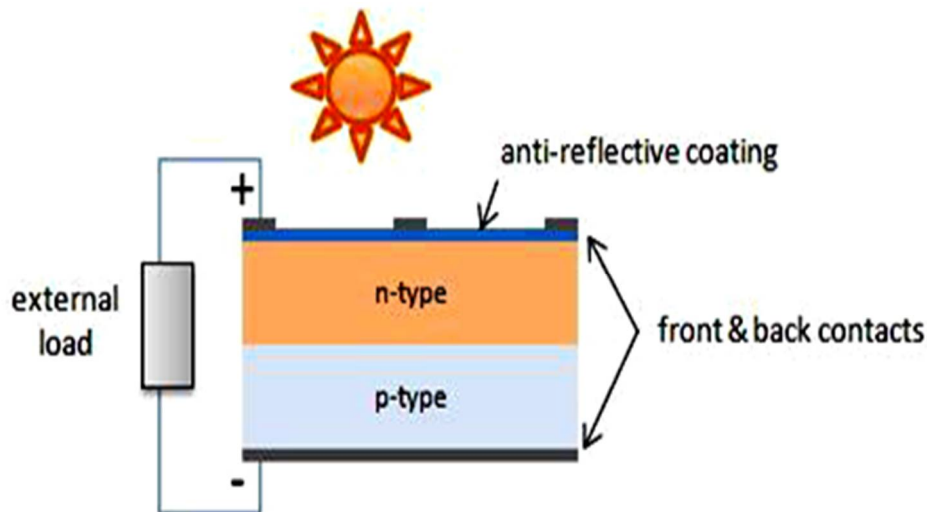
Σχήμα14: Επαφή p-n.

[Πηγή: Τετελένης, 2011)

Κάτι παραπλήσιο συμβαίνει στις οπές στην περιοχή p (περίσσεια) που οδηγεί στην μεταφορά τους στην περιοχή n. Έτσι δημιουργείται μία περιοχή στον ημιαγωγό p, η οποία βρίσκεται κοντά στην διεπαφή p-n, με αρνητικό φορτίο. Έτσι προκύπτει μία δυναμική

ισορροπία όσον αφορά την συγκέντρωση οπών και φορτίων ηλεκτρονίων στην περιοχή διεπαφής p-n.

Συμπερασματικά γίνεται κατανοητό ότι στην περιοχή διεπαφής p-n υπάρχει ανάπτυξη ηλεκτρικού πεδίου με κατεύθυνση από την n περιοχή στην περιοχή p. Επιπλέον, επειδή αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο παύει το φαινόμενο της διάχυσης. Αυτό οδηγεί σε μία κατάσταση δυναμικής ισορροπίας (Αντωνίου, 2014 ;Ανδρικόπουλος, 2014).



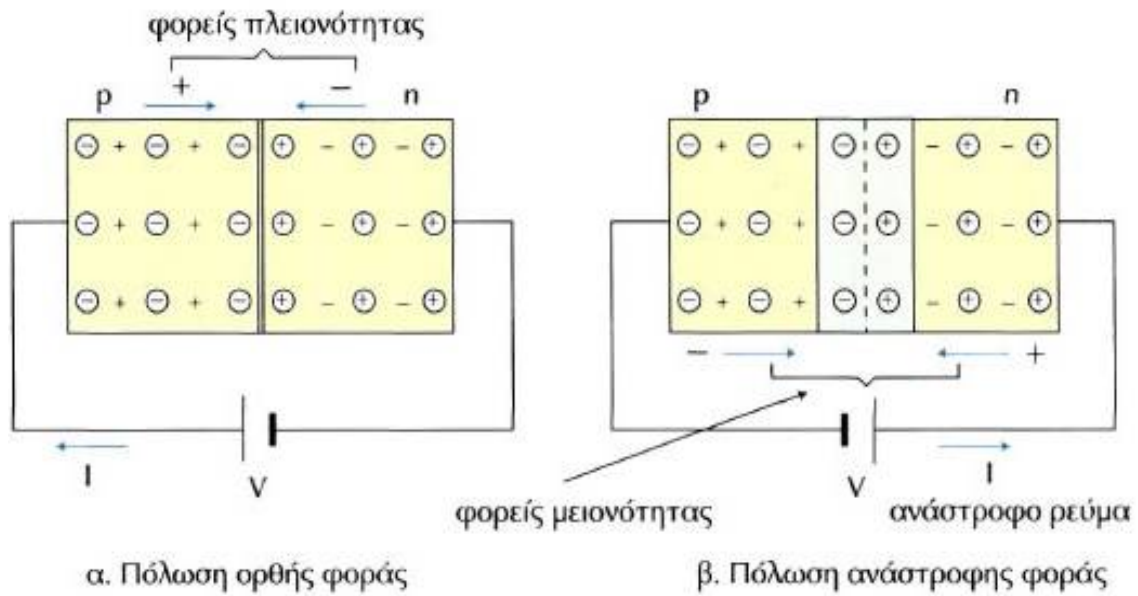
Σχήμα15: Διατομή του ηλιακού κυττάρου ενός φωτοβολταϊκού
[Πηγή: Πελέκης, 2013]

1.3.5. Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της Διόδου

Με την επιβολή ορθής πόλωσης στην διόδο p-n ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα τύπου n της διόδου και ο θετικός πόλος συνδέεται με το τμήμα p της διόδου. Κατά συνέπεια η ροή των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται ανεμπόδιστα διαμέσου του τμήματος τύπου n προς την περιοχή στην οποία πραγματοποιείται η ένωση. Εκεί πραγματοποιείται επανασύνδεση με τις οπές των οποίων η δημιουργία οφείλεται στην απομάκρυνση των ηλεκτρονίων προς τον θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του τμήματος p.

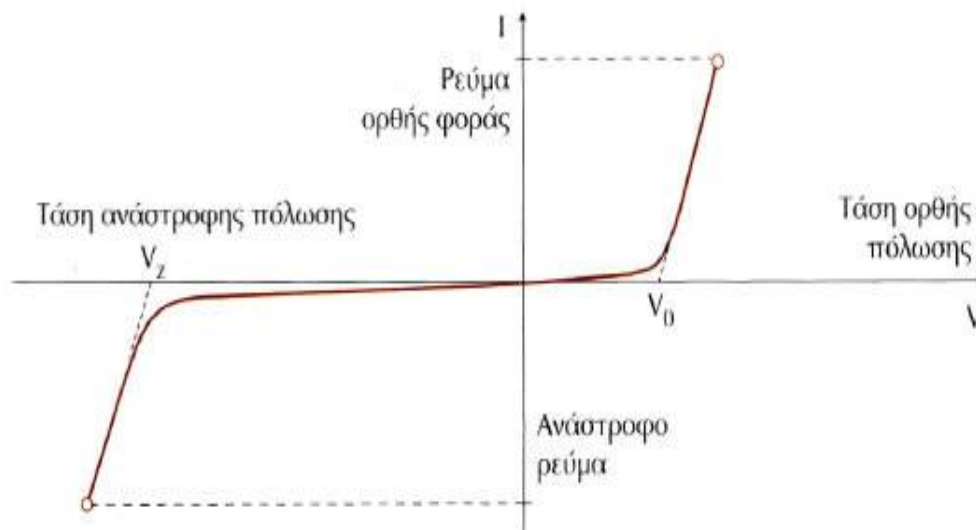
Στην περίπτωση που υπάρχει σύνδεση με τον αρνητικό πόλο της πηγής με το τμήμα του τύπου n, η πόλωση που δημιουργείται είναι αντίστροφη. Συνέπεια αυτού είναι να δίνεται η δυνατότητα επανασύνδεσης των οπών του τμήματος p με τα ηλεκτρόνια τα οποία προέρχονται από την πηγή. Ωστόσο, από το τμήμα n παρατηρείται απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία κατευθύνονται στον θετικό πόλο της πηγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται αύξηση του πάχους της ζώνης εξάντλησης και δημιουργείται ένα εσωτερικό ιδιαίτερα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο το οποίο είναι άκρως αντίθετο από το επιβαλλόμενο από την πηγή πεδίο.

Έτσι η διόδος προβάλλει έντονη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι μία διόδος με ορθή πόλωση η οποία έχει αντίσταση 10 Ω και όταν αντιστραφεί η πόλωση η αντίσταση αυξάνεται κατά δέκα εκατομμύρια φορές και παίρνει την τιμή των 100 MΩ (Τετελένης, 2011).



Σχήμα16: Ορθή και αντίστροφη πόλωση διόδου
[Πηγή: Βιδιαδάκης και συν., 1999]

Η μεταβολή της έντασης του ρεύματος από το οποίο διαρρέεται μία διόδος ένωσης p-n συναρτήσει της τιμής της τάσης και του είδους της πόλωσης που εφαρμόζεται είναι ιδιαίτερα ιδιόμορφη.



Σχήμα17: Χαρακτηριστική I-V διόδου.
[Πηγή: Βιδιαδάκης και συν., 1999]

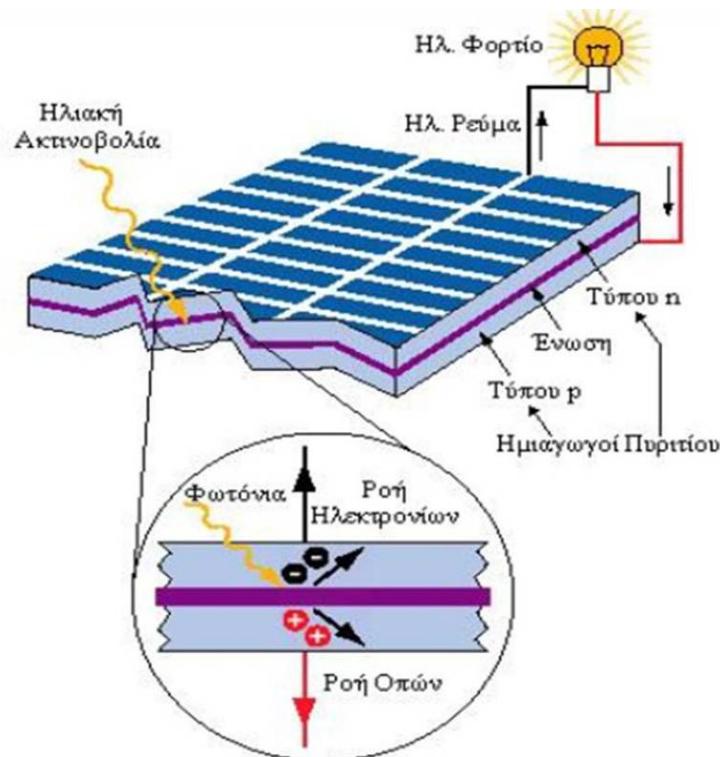
Από το Σχήμα 17 προκύπτει ότι στην περίπτωση που η επαφή πολωθεί ορθά ($V > 0$) τότε διαρρέεται από ρεύμα, εφόσον $V > V_0$. Ενώ στην περίπτωση που η επαφή πολωθεί ανάστροφα ($V < 0$), αρχικά παρατηρείται ότι δεν υπάρχει διαρροή ρεύματος. Αν όμως η τάση ξεπεράσει μια οριακή τιμή τότε το ρεύμα αυξάνεται απότομα και μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές. Αυτή η τάση με την απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος ονομάζεται τάση zener (V_z). Τονίζεται ότι θα πρέπει οι κοινές διόδους να πολώνονται σε ανάστροφες τάσεις οι οποίες θα είναι μικρότερες από τη τάση zener (Βιδιαδάκης και συν., 1999).

1.3.6. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η επαφή των ημιαγωγών τύπου p με τους ημιαγωγούς τύπου n, είναι η αιτία δημιουργίας ηλεκτρικού πεδίου. Οι κενές θέσεις του πυριτίου τύπου p καταλαμβάνονται από τα κινούμενα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου n. Στην πλευρά επαφής των δύο τύπων ημιαγωγών υπάρχει δυναμική ισορροπία. Η ύπαρξη του ηλεκτρικού πεδίου κάνει εφικτή την μετάβαση των ηλεκτρονίων από την περιοχή p στην περιοχή n, πράγμα που δεν μπορεί να αντιστραφεί.

Η ηλιακή ακτινοβολία περιέχει φωτόνια τα οποία όταν έχουν το κατάλληλο μήκος και προσπέσουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο έχουν την ικανότητα να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο σπές και έπειτα το πεδίο αναγκάζει ένα ηλεκτρόνιο να κινηθεί προς τον ημιαγωγό n και να καλύψει την σπή p που δημιουργήθηκε.

Έτσι προκύπτει ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα. Στην περίπτωση που γίνει χρήση μίας εξωτερικής αγωγικής οδού τότε παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόνια περνούν μέσα από αυτή με στόχο να επανέλθουν στην θέση όπου βρίσκονταν αρχικά. Η απομάκρυνση αυτή οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που επικρατεί. Η ροή των ηλεκτρονίων δημιουργεί ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί τάση του ρεύματος (Αντωνίου 2014 ;Ταταρίδη,2014 ; Τετελένης, 2011).

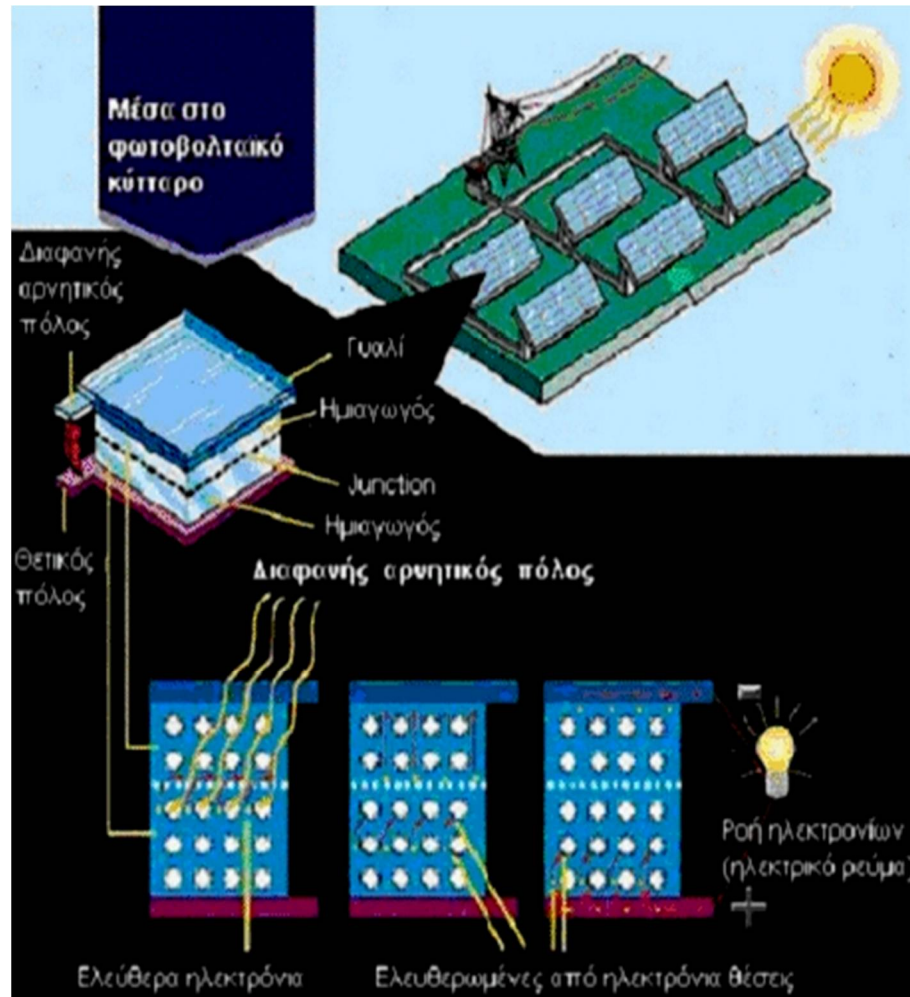


Σχήμα18: Λειτουργία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στηριζόμενη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο

[Πηγή: Τετελένης, 2011]

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα απορροφούν κατά μέσο όρο περίπου το 25% της διαθέσιμης ενέργειας ενώ η απόδοσή τους μόλις που πλησιάζει το 15%. Τα φωτόνια έχουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας λόγω του φάσματος διαφορετικών μηκών από τα οποία αποτελείται η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Απαραίτητη προϋπόθεση για την διέγερση και κατ' επέκταση τη απελευθέρωση των ηλεκτρονίων του ημιαγωγού είναι το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο των φωτονίων. Σε διαφορετική περίπτωση δεν επιτυγχάνεται η διέγερσή τους παρά μόνο διέρχονται από το φωτοβολταϊκό κύτταρο.

Η χρήση ημιαγωγικών υλικών λόγω της τεχνολογίας τους οδήγησε στην επίτευξη της αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε περίπτωση χρήσης αγωγικών υλικών (π.χ. μέταλλα), η ροή των ηλεκτρονίων θα ήταν σαφώς μεγαλύτερη αλλά θα είχε σαν βασικό μειονέκτημα την χαμηλή τάση του πεδίου (Ταταρίδη, 2014 ; Τετελένης, 2011).



Σχήμα19: Διαδικασία μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια [Πηγή: Αντωνίου, 2014)

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

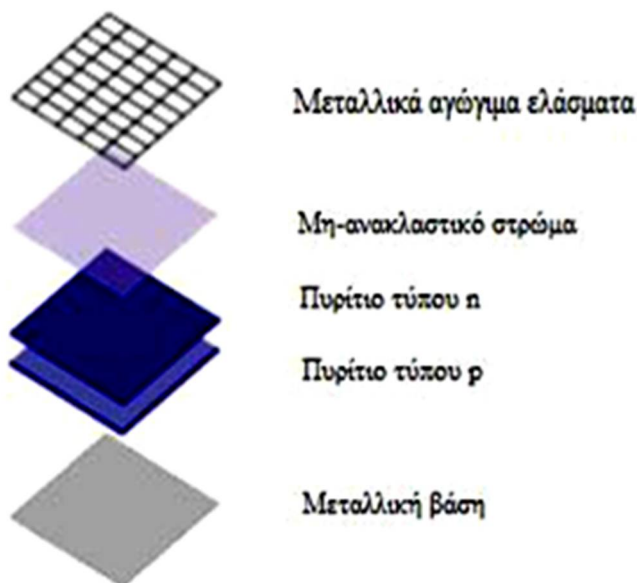
2.1. ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο πρέπει να έχει συγκεκριμένη μηχανική αντοχή. Για αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες όσον αφορά την δομή του. Στο περίγραμμα κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκονται ενσωματωμένα μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου τα οποία καλύπτει ειδικό γυαλί και ειδικά μονωτικά πλαστικά. Αυτό συμβαίνει διότι τα ελάσματα πρέπει να έχουν αεροστεγή και υδατοστεγή προστασία.

Την δομή κάθε φωτοβολταϊκού αποτελούν τα ακόλουθα:

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου p
- Πυρίτιο τύπου n
- Μεταλλικά αγωγή ελάσματα
- Μη ανακλαστικό στρώμα

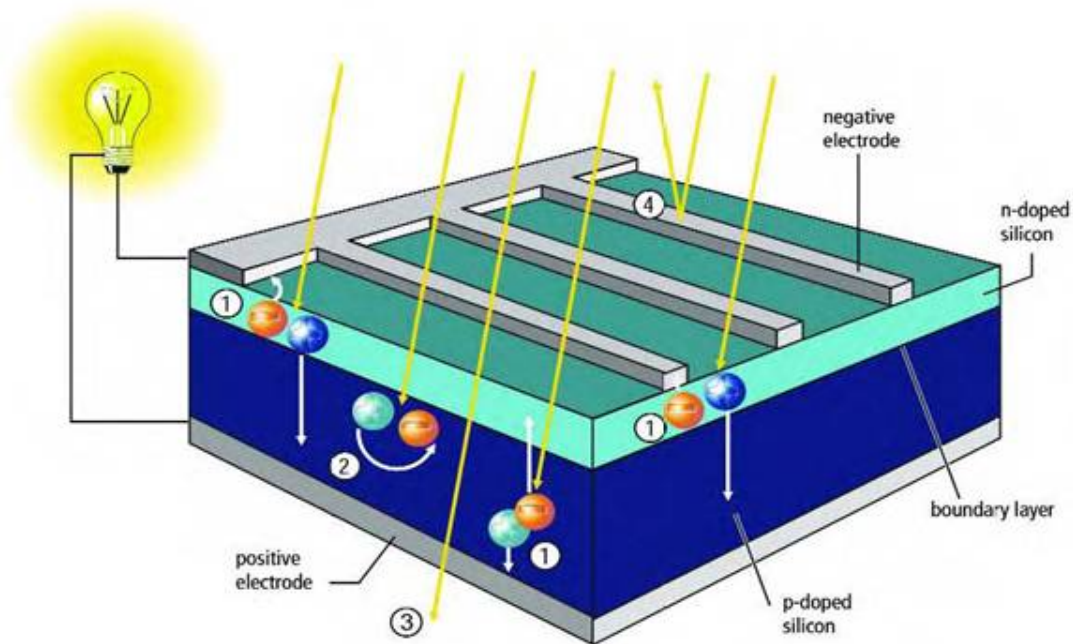
Στο Σχήμα 20 απεικονίζεται η μορφή κάθε τμήματος της δομής του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα20: Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου
[Ανδρικόπουλος, 2014]

Τα μεταλλικά αγωγή ελάσματα τα οποία αποτελούν την δομή των φωτοβολταϊκών είναι τοποθετημένα οριζόντια και κάθετα, με τα οριζόντια να πλεονεκτούν σε αριθμό διότι εκεί συγκεντρώνονται τα ηλεκτρόνια από τα οποία παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Τα κάθετα ελάσματα τα οποία έχουν μεγαλύτερο πάχος από τα οριζόντια ονομάζονται ζυγοί (busbars). Με την ένωση των ζυγών προκύπτουν πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία και έτσι δημιουργείται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο έχει δύο ακροδέκτες (έναν θετικό και έναν αρνητικό)

(Σταθόπουλος & Σταθόπουλος, 2015 ; Ανδρικόπουλος, 2014 ; Αντωνίου 2014; Ταταρίδη, 2014 ; Τετελένης, 2011).



Σχήμα21: Πλάγια όψη φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου 1) διαχωρισμός φορτίου, 2) επανασύνδεση, 3) αξιοποίηση φωτεινής ενέργειας και 4) αγωγή ελάσματα. [Πηγή: <http://www.selasenergy.gr>]

2.2. ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σύμφωνα με τον Τετελένη (2011), η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Σε μία απλή σειρά.
- Σε απλές παράλληλες σειρές (Series – Parallel, SP). Σε αυτήν την περίπτωση τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και στην συνέχεια αυτή η σειρά συνδέεται παράλληλα με άλλες σειρές. Κατά γενική ομολογία, 9 στοιχεία αποτελούν την κάθε σειρά και 4 σειρές αποτελούν κάθε πλαίσιο.
- Σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (Total – Crossed – Tied, TCT). Σε αυτήν την περίπτωση συνδέονται η διάταξη SP σταυρωτά με τα ηλεκτρικά συστήματα σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης.
- Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked). Σε αυτήν την περίπτωση τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται όλα μεταξύ τους με γεφυρωτή σύνδεση.
- Σε διάταξη κυψέλης (honeycomb).

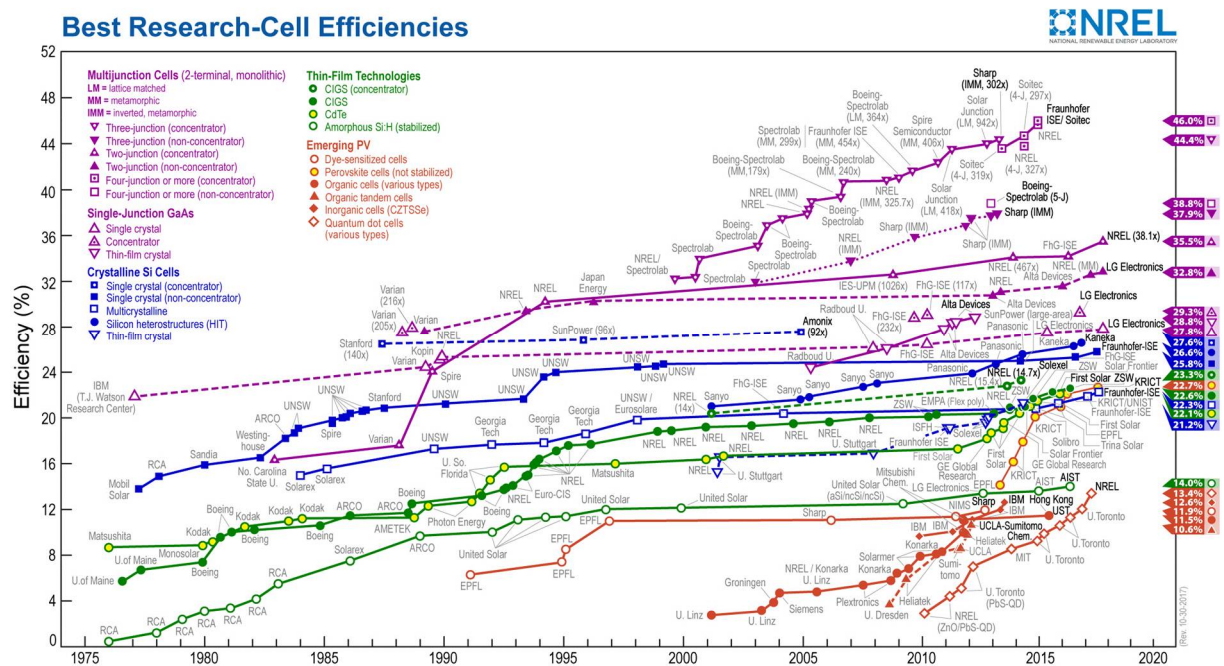
2.3. ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων πραγματοποιείται με βασικά κριτήρια όπως είναι το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα, την τεχνολογία κατασκευής τους καθώς και την δομή του βασικού υλικού τους (Ζαφειράκης, 2014).



Εικόνα 3:Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων.
[Πηγή: Πελέκη, 2013]

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών καθώς και της τεχνολογίας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εξελίσσονται με στόχο την βελτίωση των χαρακτηριστικών τους (Σχήμα 22).



Σχήμα22: Εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών
[Πηγή: National Renewable Energy Laboratory, 2017]

2.3.1. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου μεγάλου πάχους

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους διακρίνονται στα εξής (Σταθόπουλος & Σταθόπουλος, 2015 ; Αντωνίου, 2014 ; Πέλεκης, 2013):

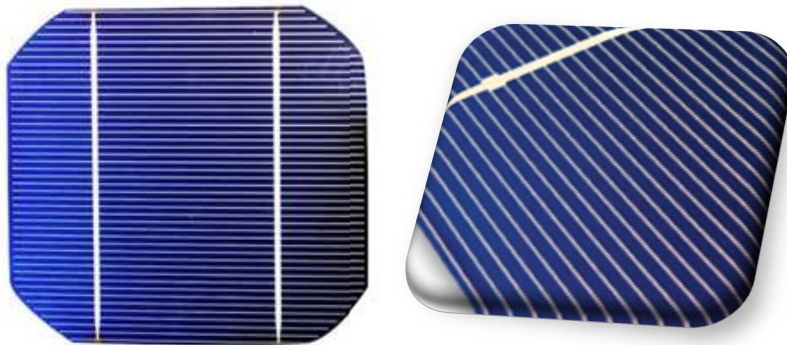
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystallineSilicon, sc – Si).
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystallineSilicon, mc – Si).
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (RibbonSilicon).

Στην συνέχεια του εδαφίου πραγματοποιείται η ανάλυση των προαναφερόμενων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

➤ *Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystallineSilicon, sc – Si)*

Οι κύριες τεχνολογίες όσον αφορά την κατασκευή μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων έχουν ως βάση την ανάπτυξη ράβδου πυριτίου και είναι η CZ (Czochralski) και η FZ (floatzone).

Γενικότερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι πάχους περίπου 0,3 mm. Η βιομηχανική τους απόδοση ξεκινά από 15% και πολλές φορές μπορεί να αγγίξει και το 18%, ενώ η πειραματική απόδοση του πλαισίου είναι της τάξης του 24,7%. Η μεγάλη τους απόδοση, που είναι και το βασικό τους πλεονέκτημα οφείλεται στην ύπαρξη μεταλλικών επαφών στο πίσω μέρος του πλαισίου εξαιτίας των οποίων αποκομίζεται μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο, συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μειονεκτούν όσον αφορά το κόστος κατασκευής που στην περίπτωση των μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι αρκετά υψηλό.



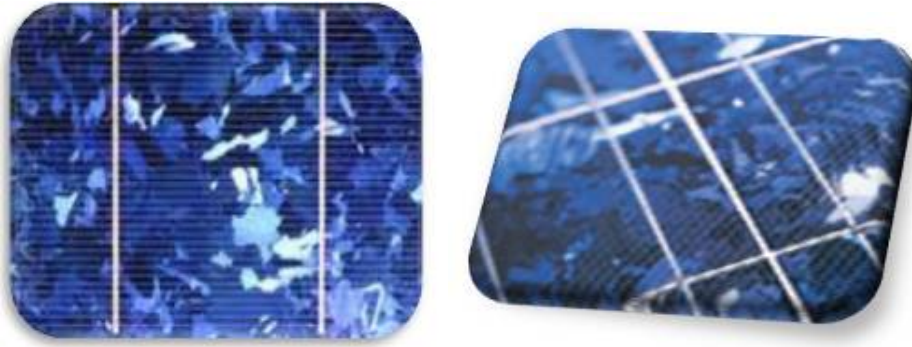
Εικόνα 4: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

➤ *Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystallineSilicon, mc – Si)*

Οι κύριες τεχνολογίες όσον αφορά την κατασκευή των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι οι ακόλουθες (Τετελένης, 2011):

- Η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directionalsolidification).
- Η μέθοδος ανάπτυξης λιωμένου πυριτίου (χύτευση).
- Η μέθοδος ηλεκτρομαγνητικής χύτευσης EMC.

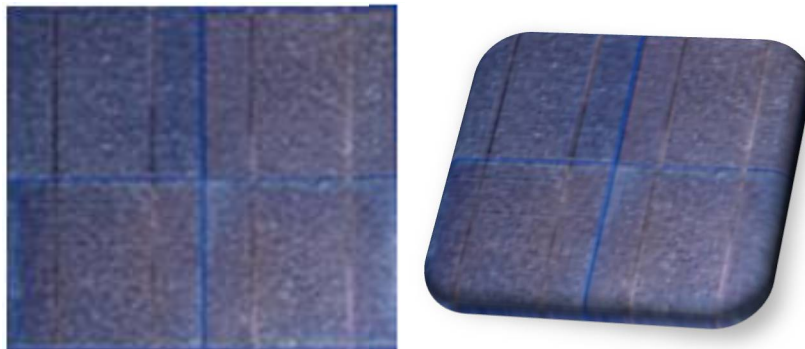
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν ίδιο πάχος με αυτό των μονοκρυσταλλικών (0,3 mm). Η βιομηχανική απόδοσή τους είναι σαφώς μικρότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών καθώς κυμαίνεται από 13% έως και 15%, ενώ η πειραματική τους απόδοση μόλις που αγγίζει το 20%. Ωστόσο υπερτερούν των μονοκρυσταλλικών στο κόστος κατασκευής. Το κόστος κατασκευής τους λοιπόν είναι πολύ μικρότερο από αυτό των μονοκρυσταλλικών και κατ' επέκταση έχουν και πολύ μικρότερο κόστος πώλησης.



Εικόνα 5: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

➤ *Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)*

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου έχουν και αυτά πάχος 0,3 mm ομοίως με τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά. Ενώ ανήκουν στα φωτοβολταϊκά στοιχεία νέας τεχνολογίας η βιομηχανική τους απόδοση δεν ξεπερνά το 12% με 13%. Η πειραματική τους απόδοση είναι της τάξης του 18%. Η βασική τους διαφορά από τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά είναι ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου χρησιμοποιούνται έως και 50% λιγότερο.



Εικόνα 6: Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

2.3.2. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών υμενίων (ThinFilm)

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων είναι οι εξής (Σταθόπουλος & Σταθόπουλος, 2015 ; Αντωνίου, 2014):

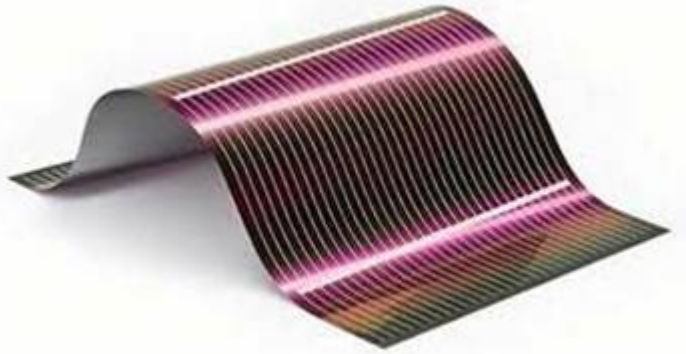
- Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS).
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thinfilm Silicon, A-Si).
- Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).
- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Στην συνέχεια του εδαφίου πραγματοποιείται η ανάλυση των τύπων των φωτοβολταϊκών που είναι κατασκευασμένα με υλικά λεπτών υμενίων.

➤ *Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS)*

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός είναι ένα στοιχείο άκρως απορροφητικό όσον αφορά το φως που προσπίπτει σε αυτό. Παρά την απορροφητικότητά του όμως η βιομηχανική απόδοσή του δεν ξεπερνά το 11%, ενώ παρατηρείται μεγάλη αύξηση της απόδοσης σε πειραματικό επίπεδο με τιμή που κυμαίνεται έως και 18,8%. Η απόδοση αυτή είναι η μέγιστη που παρουσιάζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία τεχνολογίας λεπτής επιστρώσεως.

Η προσθήκη γαλλίου αποτελεί τρόπο βελτίωσης της απόδοσης, όμως η περιορισμένη ποσότητά του στην φύση είναι πρόβλημα. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα μείωσης του κόστους του τα αμέσως επόμενα χρόνια.



Εικόνα 7: Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

➤ *Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thinfilm Silicon, a-Si)*

Η ονομασία φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου τους αποδόθηκε λόγω της τυχαίας διάταξης των ατόμων πυριτίου. Την δομή τους αποτελούν ταινίες λεπτών επιστρώσεων και η κατασκευή τους στηρίζεται στην εναπόθεση ημιαγωγικού υλικού πάνω σε υποστρώματα υποστήριξης σχετικά οικονομικά (αλουμίνιο ή γυαλί).

Το πυρίτιο έχει πάχος περίπου 0,0001mm, ενώ το υπόστρωμα κυμαίνεται από 1 έως και 3 mm. Η απόδοσή τους σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες είναι πολύ χαμηλότερη και κυμαίνεται από 6% και 8%, ενώ η πειραματική τους απόδοση μόλις που αγγίζει το 14%.

Βασικό πλεονέκτημα του φωτοβολταϊκού στοιχείου a-Si είναι ότι οι υψηλές θερμοκρασίες δεν επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοσή του. Επιπλέον, σε περιπτώσεις συννεφιάς δηλαδή όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία αποδίδει περισσότερο από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά. Παράλληλα, διαθέτουν πολύ μικρότερη ποσότητα πυριτίου από ότι τα κρυσταλλικά γεγονός που έχει ως συνέπεια την μείωση του κόστους. Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι ότι την ενέργεια που παράγεται από τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία για να την παράγει ένα άμορφο φωτοβολταϊκό στοιχείο θα απαιτήσει σχεδόν διπλάσια επιφάνεια (χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα). Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι αποτελεί σχετικά νέα τεχνολογία η διάρκεια ζωής του δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς. Ωστόσο, οι κατασκευαστές υποστηρίζουν και δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών.

➤ *Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).*

Το ενεργειακό διάκενο του τελουριούχου καδμίου είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα γεγονός που το κάνει ικανό να απορροφήσει το 99% της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό. Παρόλα αυτά, η απόδοσή του κυμαίνεται από 6% έως 8%, ενώ πειραματικά μπορεί να φτάσει και το 16%.

Βασικά μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η καρκινογόνα δράση του καδμίου και ταυτόχρονα η έλλειψη του τελουρίου. Η βασικότερη χρήση του τελουρίου αφορά την

ενθυλήκωσή του ως δομικό υλικό στο γυαλί, το οποίο είναι ιδανικό για ενσωμάτωση στα κτίρια. (Building Integrated Photovoltaic, BIPV).



Εικόνα 8: Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου
[Πηγή: Αντωνίου, 2014]



Εικόνα 9: Φωτοβολταϊκό στοιχείο CdTe
[Πηγή: Αντωνίου, 2014]

➤ Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).

Το γάλλιο είναι ευρέως γνωστό για την σπανιότητά του. Η δημιουργία του προκύπτει από την ρευστοποίηση διάφορων μετάλλων όπως είναι ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο. Αντιθέτως το αρσενικό είναι συνηθισμένο αλλά παράλληλα χαρακτηρίζεται από την δηλητηριώδη δράση του. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ιδανικό ενεργειακό διάκενο για την απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

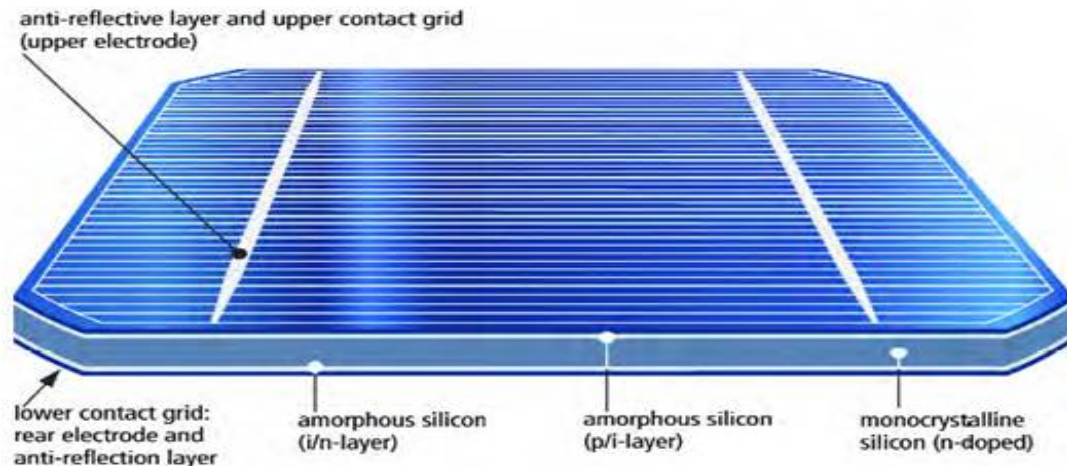
Ο τύπος των φωτοβολταϊκών στοιχείων GaAs παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά αυτός ο τύπος των φωτοβολταϊκών είναι ανθεκτικός σε υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, είναι ανθεκτικός σε ιδιαίτερα υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Θεωρείται ιδανικός τύπος για εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solarconcentrators) καθώς και για διαστημικές εφαρμογές. Ωστόσο, το πιο βασικό είναι η υψηλή απόδοση στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) η οποία αγγίζει το 29%. Όμως έχει και ένα μειονέκτημα το οποίο είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs.



Εικόνα 10: Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

2.3.3. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Την ονομασία τους την οφείλουν στην δομή τους την οποία αποτελούν στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer – Ετεροενώσεις με ενδογενή λεπτά στρώματα). Τα πιο γνωστά στο εμπόριο είναι εκείνα των οποίων η δομή περιλαμβάνει δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου και ενδιάμεσα σε αυτές τις δύο στρώσεις υπάρχει μία στρώση από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



Εικόνα 11: Πολυστρωματικό φωτοβολταϊκό στοιχείο
[Πηγή: <http://www.energotechniki.gr/>]

Η χρήση πολυστρωματικών φωτοβολταϊκών συνιστάται διότι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως η υψηλή απόδοση του πλαισίου που φτάνει το 17,2% και αυτό έχει σαν συνέπεια η απαίτηση της έκτασης να μειώνεται αισθητά. Η απόδοση αυτή όμως μπορεί να δοθεί και σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σε διαχεόμενη ακτινοβολία. Όπως είναι λογικό λόγω των υψηλών προδιαγραφών τους είναι και ακριβότερα από τα κοινά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Σταθόπουλος & Σταθόπουλος, 2015 ; Αντωνίου 2014).

2.3.4. Οργανικά φωτοβολταϊκά

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τύπου οργανικών φωτοβολταϊκών είναι τα πολυμερή ηλιακά κύτταρα. Η μορφή τους μοιάζει με λεπτό φιλμ και ενώ στην αρχή βρίσκονταν σε υγρή μορφή πλέον τα συναντώνται σε παχύρρευστη μορφή. Η επιθυμητή ωστόσο μορφή των οργανικών στοιχείων θα ήταν η στέρεα μορφή έτσι ώστε να σχηματίσουν πάνελ.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των οργανικών φωτοβολταϊκών είναι τα ακόλουθα:

- Παρουσιάζουν ευκαμψία.
- Είναι πολύχρωμα λόγω των χρωστικών ουσιών.
- Παρουσιάζουν απόδοση 2,5%.

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά πλεονεκτούν στο γεγονός ότι έχουν ιδιαίτερα χαμηλό κόστος, ενώ μειονεκτούν λόγω του χαμηλού ποσοστού απόδοσης και της μικρής διάρκειας ζωής τους (Αντωνίου, 2014).

2.3.5. Άλλες τεχνολογίες

Οι επιστήμονες πραγματοποιούν καθημερινά μελέτες με στόχο την εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών. Τα συστήματα βελτιώνονται συνεχώς με ραγδαίους ρυθμούς. Μία τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων που από ότι φαίνεται θα ξεχωρίσει και θα εφαρμοστεί μελλοντικά είναι τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριπίου (nc – Si) (Πελέκης, 2013).

3. ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας κτιριακής εγκατάστασης όπως θέρμανση και ψύξη των χώρων και θέρμανση ζεστού νερού χρήσης είναι τομείς που χρησιμοποιούν τους ηλιακούς συλλέκτες. Ωστόσο, χρήση των ηλιακών συλλεκτών γίνεται και στην βιομηχανία με στόχο την κάλυψη των αναγκών στη διεργασία θερμού νερού και αέρα καθώς και στην αξιοποίηση για την θέρμανση και ψύξη είτε των χώρων είτε προϊόντων. Επιπλέον, με την βοήθεια των φωτοβολταϊκών πραγματοποιείται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών αναγκών μιας κτιριακής εγκατάστασης.

Οι εγκαταστάσεις όμως των ηλιακών συλλεκτών και φωτοβολταϊκών με στόχο την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας πραγματοποιούνται σε χώρες που έχουν μικρό ή μεγάλο γεωγραφικό πλάτος. Στη περίπτωση που εγκαθίστανται σε περιοχές με μικρό γεωγραφικό πλάτος τοποθετούνται συνήθως σε οριζόντιες οροφές στις οποίες θεωρείται ότι η εγκατάσταση των διατάξεων γίνεται με σχετική ευκολία. Όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση των ηλιακών συσκευών μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε επικλινείς οροφές ή σε προσόψεις κτιρίων μελετώντας ωστόσο με ιδιαίτερη έμφαση την επίτευξη του καλού ενεργειακού προσανατολισμού καθώς και την διαφορά που παρουσιάζεται στο ύψος του ηλίου ανά εποχή με στόχο την αποφυγή της σκίασης. Στην περίπτωση που η εγκατάσταση των ηλιακών συστημάτων πραγματοποιείται σε χώρες με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος προτείνεται να κατασκευάζονται συνήθως σε επικλινή οροφή ή σε πρόσοψη κτιρίων διότι ο ήλιος βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα ύψους.

Η τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών πραγματοποιείται με σκοπό την αξιοποίηση της μέγιστης επιφάνειας που δίνεται για εγκατάσταση. Επιπλέον, για την σωστή εγκατάσταση των ηλιακών συστημάτων, μελετάτε προσεκτικά το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, η γωνία κλίσης των συλλεκτών, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το φαινόμενο σκίασης θα πρέπει να αποφεύγεται διότι μειώνεται αισθητά ο βαθμός απόδοσής των ηλιακών συλλεκτών αλλά και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Προτείνεται να αποφεύγεται η διάταξη των πλαισίων σε σειρά και να προτιμάται η παράλληλη με στόχο την διατήρησή της χαμηλής θερμοκρασίας και την ικανοποιητική ηλεκτρική τους απόδοση.

Ακόμα, οι επιφάνειες των φωτοβολταϊκών είναι εκτεθειμένες στο περιβάλλον ανάλογα με τον τρόπο που τοποθετούνται, δηλαδή στην περίπτωση που είναι τοποθετημένα σε επικλινείς οροφές ή προσόψεις κτιρίων έχουν καλυμμένη την πίσω πλευρά τους. Όμως η αξιοποίηση της επιφάνειας σε ποσοστό που αγγίζει το 100% δίνεται με την χρήση των ακίνητων επιπέδων κατόπτρων που τοποθετούνται μεταξύ των παραλλήλων σειρών συλλεκτών. Οι δυνατότητες που παρέχουν τα κάτοπτρα είναι η αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας της ηλιακής εγκατάστασης με την εκμετάλλευση της πρόσθετης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας η οποία ανακλάται στα κάτοπτρα και η διεύθυνσή της είναι προς την απορροφητική επιφάνεια των ηλιακών συσκευών (Τρυπαναγνωστόπουλος& Σουλιώτης, 2001 ; Τρυπαναγνωστόπουλος και συν., 2002).

3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η πρώτη εμφάνιση των ηλιακών συλλεκτών με επίπεδα κάτοπτρα καταγράφεται το 1911 με κατασκευαστή τον Shuman, ο οποίος έκανε χρήση των κατόπτρων στην άνω και κάτω πλευρά επίπεδων συλλεκτών με στόχο την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας και κατ' επέκταση της λειτουργίας μιας αντλίας νερού. Το 1966 ο Tabor μελετά την χρήση πλευρικών κατόπτρων σε επίπεδους συλλέκτες και δίνει την συμβουλή τα κάτοπτρα να τοποθετούνται στην δυτική και την ανατολική πλευρά του επίπεδου συλλέκτη. Τα αποτελέσματα του ηλιακού συστήματος του Tabor είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Με το πέρασμα των χρόνων και φτάνοντας στο 1975 οι McDaniels και Seitel πραγματοποιούν τους πρώτους υπολογισμούς για την «ποσότητα» της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο συλλέκτη κάνοντας χρήση των επίπεδων κατόπτρων. Τα αποτελέσματα και σε αυτή την περίπτωση ήταν ικανοποιητικά αφού παρατηρήθηκε αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, το ίδιο έτος οι Bannerot και Howell υπολογίζουν την αύξηση της απόδοσης ηλιακών συλλεκτών με πλευρικά κάτοπτρα. Μέτα από τα δύο έτη (1977) οι Grassie και Sheridan δημιουργούν ένα μαθηματικό μοντέλο εξομοίωσης διατάξεων επίπεδων συλλεκτών – κατόπτρων και καταγράφουν την επιτυγχανόμενη βελτίωση στην αποδιδόμενη θερμότητα.

Την συνέχεια την κάνουν ο Grimmer και οι συνεργάτες του (1978) όπου παρουσιάζουν τα πειραματικά και θεωρικά αποτελέσματα από την μελέτη ανακλαστήρων και την επίδρασή τους στην συλλογή της ηλιακής ενέργειας. Την ίδια χρονιά ο Baker και οι συνεργάτες του καταγράφουν τα αποτελέσματα ενός συστήματος επίπεδου συλλέκτη και κατόπτρου εντός μιας ημερήσιας λειτουργίας. Αυτή η ενεργειακή συμπεριφορά του προαναφερόμενου συστήματος υπολογίζεται σε σχέση με τον λόγο του πλάτους τους. Συγκρινόμενη πειραματική μελέτη πραγματοποιούν οι Mannan και Bannerot σε δύο συστήματα εκ των οποίων το ένα έχει μονό πλευρικό κάτοπτρο και το δεύτερο διπλά πλευρικά κάτοπτρα. Με αυτή την πειραματική μελέτη προσδιορίστηκε η πρακτική μέγιστη συγκέντρωση για κάθε περίπτωση που ήταν 2.0 και 2.6 αντίστοιχα.

Ο Rudloff και οι συνεργάτες του (1979) πραγματοποιούν βελτιώσεις στις γωνίες των επιπέδων ηλιακών συλλεκτών και κατόπτρων αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά αφού κατορθώνεται η επίτευξη της αύξηση της επιταχυνόμενης αποδιδόμενης θερμότητας, η οποία ισοδυναμεί με το κόστος της βελτιωμένης εγκατάστασης. Το 1980 ο Larson κάνει πειραματικές μελέτες για τη συμβολή επίπεδου κατόπτρου το οποίο τοποθετείται είτε πάνω και κάτω είτε στις δύο πλευρές του ηλιακού συλλέκτη. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών έδειξαν ότι η ρύθμιση της κλίσης των κατόπτρων αυξάνει την συγκέντρωση της διάταξης. Το ίδιο έτος οι Taha και Eldighidy πειραματίζονται για την διόρθωση της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην περίπτωση που οι συλλέκτες και τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούν να μην έχουν πλήρη προσανατολισμό προς το νότο.

Με το πέρασμα των χρόνων ο Chiam ασχολείται αποκλειστικά με την τοποθέτηση των επιπέδων κατόπτρων είτε πάνω και κάτω είτε στα δύο πλευρές του ηλιακού συλλέκτη και ο Jones ασχολείται με την τοποθέτηση κατόπτρων ανάμεσα σε παράλληλες σειρές επιπέδων ηλιακών συλλεκτών. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα του Jones είναι θετικά αφού συμβάλλουν σε ικανοποιητικό βαθμό στην συλλεγόμενη ενέργεια της διάταξης από την άνοιξη έως το φθινόπωρο.

Οι Garg και Hrishikesan (1988) καταγράφουν τις αναλυτικές σχέσεις με στόχο την πρόβλεψη της ηλιακής ενέργειας από ανάκλαση. Επιπλέον, για την καλύτερη προσέγγιση πραγματοποιούν πείραμα και παρουσιάζουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τρεις τοποθεσίες. Ωστόσο, την συνέχεια αυτής της ιδέας την αναλαμβάνουν οι Faiman και Zemel που κάνουν χρήση του επίπεδου κατόπτρου σε θερμοσιφωνική συσκευή με στόχο την αύξηση της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας τους χειμερινούς μήνες. Όμως το ίδιο έτος ο Perers και οι συνεργάτες του καθώς και οι Brunstrom και Karlsson κάνουν παρουσίαση αποτελεσμάτων από τις πρώτες διατάξεις σύζευξης επιπέδων συλλεκτών – κατόπτρων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει η βελτίωση της αποδιδόμενης θερμότητας έως και 30% για σύστημα που λειτουργεί στους 50°C.

Όμως οι Perers και Karlsson το 1993 παρουσιάζουν θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες με κάτοπτρα και μη. Σημειώνεται ότι τα θεωρητικά μοντέλα είναι γεωμετρίας 2-D και 3-D. Ακόμα, παρουσιάζουν αποτελέσματα από διάφορους τύπους ανακλαστήρες διεξάγοντας πάλι την βελτιωμένη επιταχυνόμενη ηλιακή ενέργεια σε ποσοστό 30% ανά έτος. Όμως το ίδιο έτος ο NarashimaRao και οι συνεργάτες του δημιουργούν έναν αλγόριθμο με στόχο τους θεωρητικούς υπολογισμούς της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών.

Ο Perers και οι συνεργάτες του το 1994 καταφέρνουν να δώσουν θεωρητικά αλλά και πειραματικά αποτελέσματα με την χρήση συγκεκριμένων τύπων ανακλαστήρων. Τα αποτελέσματα αυτά είναι θετικά στην αύξηση της αποδιδόμενης θερμότητας. Μετά από ένα έτος (1995) ο Kumar και οι συνεργάτες του πραγματοποιούν πειράματα με συσκευές σύζευξης κατόπτρων και στις τέσσερις πλευρές επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και διεξάγουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Ωστόσο, οι Ballentin και Wilk πραγματοποιούν παρόμοιο πείραμα με την διάφορα ότι το κάτοπτρο στην κάτω οριζόντια πλευρά έχει συγκεκριμένες διαστάσεις.

Οι Ronnelid και Karlsson το 1999 πραγματοποιούν υπολογισμούς για την επιπλέον ηλιακή ακτινοβολία από κάτοπτρα με ορθογώνιες αυλακώσεις οι οποίες δίνουν την δυνατότητα να βελτιώσουν κατά 10% την απόδοση του συστήματος. Μετά από ένα έτος (2000) ο Hussein και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν υπολογισμούς με συγκεκριμένες σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες συναρτήσε της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας επέδειξαν την βελτιωμένη απόδοση. Το ίδιο έτος ο Aziz-ul Haq μελετά την επίδραση κατόπτρων αλουμινίου σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο 40W. Ακόμα, οι Rizk και Nagrial το 2008 πραγματοποίησαν πείραμα με φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου ισχύος 4W τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν η αύξηση της ηλιακής ενέργειας σε ποσοστό 40%. Οι Tabaei και Ameri το 2012, μελέτησαν τους ανακλαστήρες αλουμινίου και ανοξειδωτου ατσάλιου με στόχο να αυξήσουν την ισχύ ενός πολυκρυσταλλικού πλαισίου γύρω στο 8,5% - 14%.

Το εργαστήριο ηλιακής ενέργειας κατά τα έτη 1994 έως 1996 δημοσίευσε εργασίες όπου πρότειναν την σύζευξη κατόπτρων με συλλέκτες θερμοσιφωνικών συσκευών θέρμανσης νερού. Επιπλέον, το 1998 δίνονται πειραματικά αποτελέσματα και το 2000 εκτενής ανάλυση ως προς την σύζευξη κατόπτρων με καλυμμένους καθώς και ακάλυπτους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες με χρωματιστό απορροφητή. Ωστόσο, το 1999 και το 2001 πραγματοποιείται αναφορά στη σύζευξη επιπέδων συλλεκτών – κατόπτρων με την εφαρμογή τους σε ηλιακά συστήματα στις οριζόντιες οροφές των κτιρίων.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν γίνεται κατανοητό ότι έχει πραγματοποιηθεί πληθώρα ερευνών καθώς επίσης με το πέρασμα των χρόνων χρησιμοποιούνται αυτές οι εργασίες ως βάση για την πραγματοποίηση νέων πειραματικών ερευνών (Τρυπαναγνωστόπουλοςetal, 2002 ; Rönnelidetal., 2000 ; Ζαφειράκης, 2014).

3.3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΗ - ΚΑΤΟΠΤΡΟΥ

3.3.1. Θερμικά ηλιακά συστήματα

Τα κατοπτρικά επίπεδα συνδυαζόμενα με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες δίνουν αποδοτικά αποτελέσματα με μειωμένο οικονομικό κόστος. Ο προαναφερόμενος συνδυασμός θεωρείται κατάλληλος για ηλιακές εγκαταστάσεις που βρίσκονται είτε εδάφους είτε σε οριζόντια οροφή κτιρίων. Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι η σύζευξη συλλεκτών και κατόπτρων έχει την δυνατότητα βελτίωσης της ετήσιας προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας έως και 30% για τυπικές εγκαταστάσεις επιπέδων ηλιακών συλλεκτών που λειτουργούν στους 50°C.

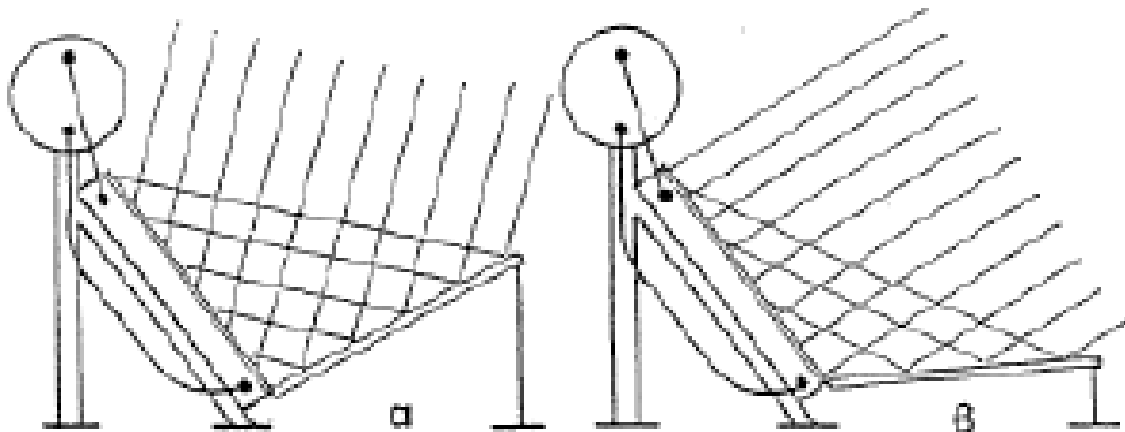
Όπως έχει προαναφερθεί τα κατοπτρικά συστήματα χρησιμοποιούνται και σε θερμοσιφωνικές συσκευές οι οποίες είναι είτε επίπεδοι συλλέκτες είτε ολοκληρωμένες

συσκευές συλλέκτη, με στόχο την αποθήκευση θερμότητας. Οι συλλέκτες αυτοί έχουν επιφάνεια που κυμαίνεται από 2 m² έως 4 m². Επιπλέον, αποτελούνται από δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού με όγκο που κυμαίνεται από 100 lit έως 200 lit. Αυτές οι θερμοσιφωνικές συσκευές χρησιμοποιούνται επί το πλείστον σε οικίες για την κάλυψη των αναγκών του ζεστού νερού χρήσης.

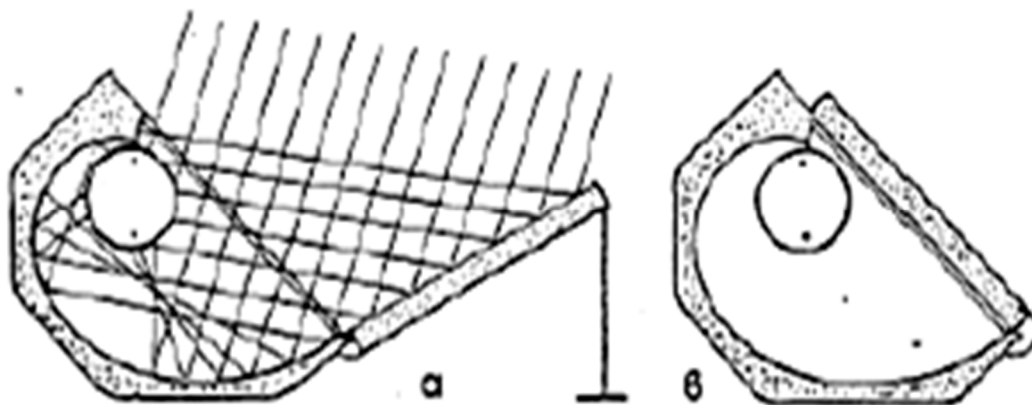
Ωστόσο, αυτό που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι με την πάροδο του χρόνου η απόδοση των θερμοσιφωνικών συσκευών που αποτελούνται από επίπεδους συλλέκτες μειώνεται για λόγους όπως η αυξομείωση των θερμοκρασιών περιβάλλοντος, τα άλατα που καθιζάνουν στο σύστημα κ.ά.. Η μείωση αυτή της απόδοσης λειτουργεί αρνητικά διότι δεν καλύπτονται οι ανάγκες για το ζεστό νερό χρήσης και οι συσκευές χαρακτηρίζονται ανεπαρκείς.

Οι λύσεις των προβλημάτων αυτών δίνονται από τα κάτοπτρα στο κάτω μέρος του ηλιακού συλλέκτη όπου δίνουν την δυνατότητα της αύξησης της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες. Η τοποθέτηση των κατόπτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 23, η οποία θεωρείται βατή αφού η κλίση τους ρυθμίζεται εύκολα ανάλογα με την εποχή και με τις ανάγκες που παρουσιάζονται για το ζεστό νερό χρήσης (Τρυπαναγνωστόπουλος, 1996).

Το κατοπτρικό σύστημα είναι η οικονομικότερη λύση συγκρινόμενη με την τοποθέτηση ενός επιπλέον επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην θερμοσιφωνική συσκευή. Ακόμα, το κατοπτρικό σύστημα θεωρείται κατάλληλη λύση για την ολοκληρωμένη συσκευή συλλέκτη για την αποθήκη θερμού νερού (Σχήμα 24). Ωστόσο, έχει προταθεί το κατοπτρικό σύστημα να τοποθετείται στο πάνω μέρος του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη με αποτέλεσμα να υπάρχει ενεργειακή συνεισφορά κατά την χρονική περίοδο του φθινοπώρου και της άνοιξης (Faiman&Zemel, 1988).

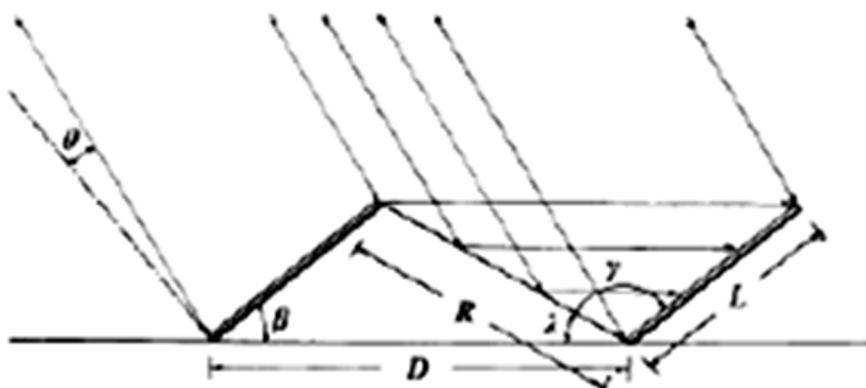


Σχήμα23: Θερμοσιφωνική συσκευή με ενισχυτικό κάτοπτρο (α) Διάταξη για λειτουργία το καλοκαίρι (β) Διάταξη για λειτουργία το χειμώνα
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]



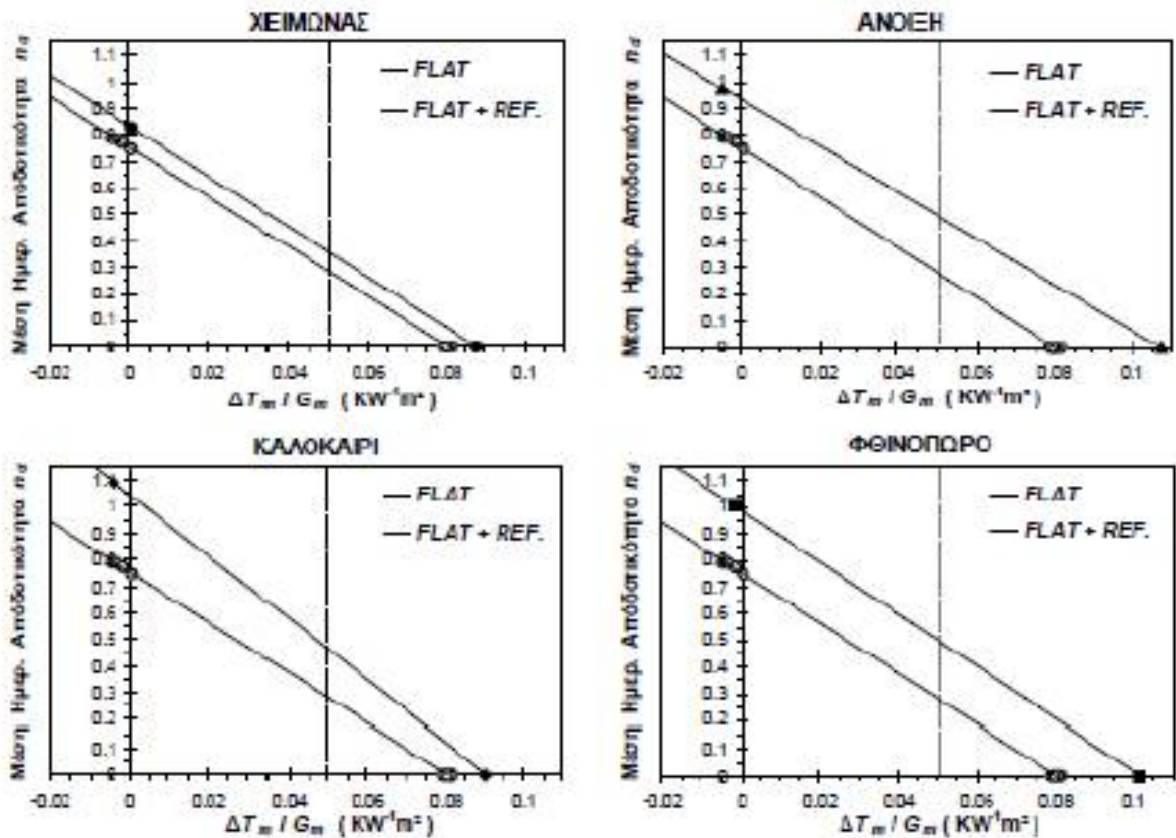
Σχήμα24: Συσκευή Integrated Collector Storage (ICS) με ενισχυτικό κάτοπτρο (α) Διάταξη για λειτουργία το καλοκαίρι (β) Διάταξη για περιορισμό των θερμικών απωλειών κατά τη διάρκεια της νύχτας
 [Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε οριζόντιες επιφάνειες που είναι τοποθετημένοι, σε διαδοχικές σειρές, επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να τοποθετηθούν επίπεδα κάτοπτρα στον χώρο που υπάρχει μεταξύ αυτών (Σχήμα 25). Τα κάτοπτρα αυτά τοποθετούνται συνήθως στο επάνω μέρος του ηλιακού συλλέκτη της αρχικής σειράς και στο κάτω μέρος της σειρά που βρίσκεται στο πίσω μέρος (Tripanagnostopoulos & Souliotis, 2005).



Σχήμα25: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών σε διαδοχικές σειρές με κατοπτρικό σύστημα
 [Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

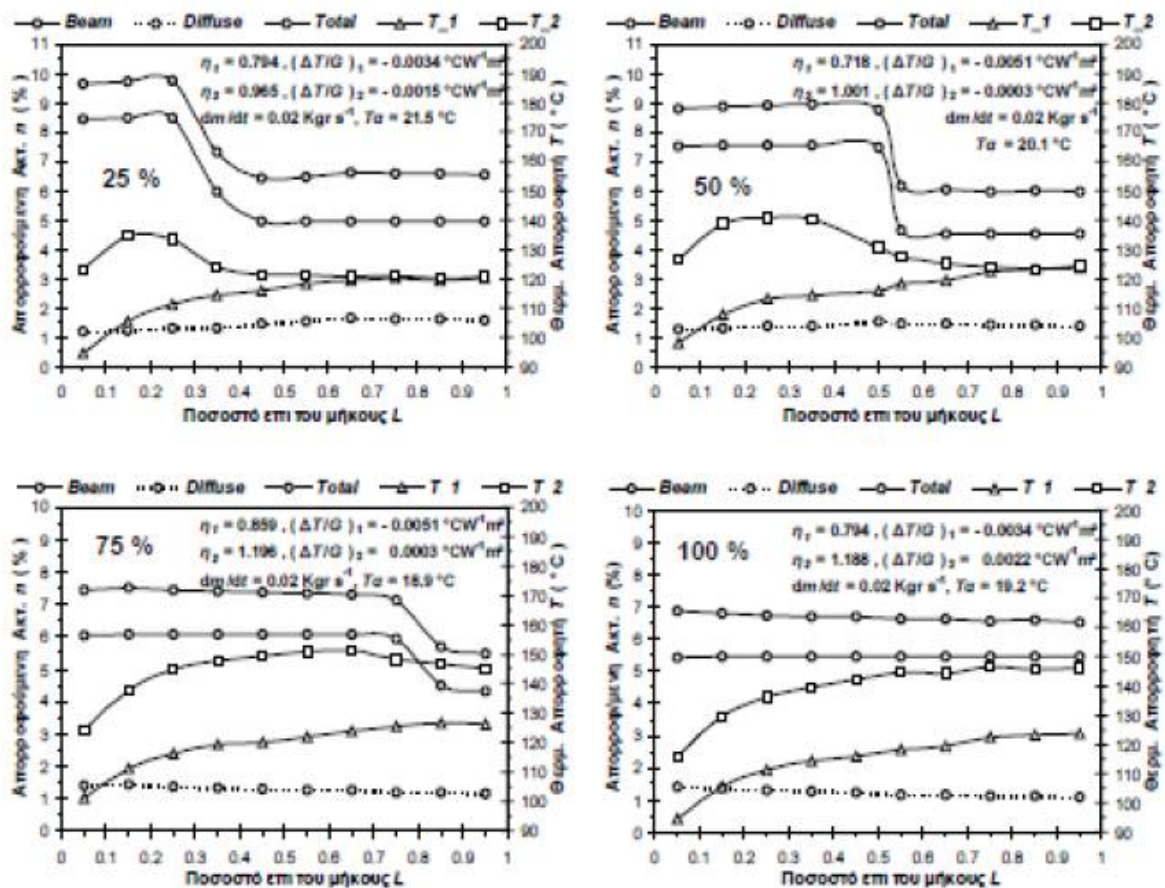
Με την προαναφερόμενη διάταξη η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους επίπεδους συλλέκτες καταγράφεται σε υψηλότερα επίπεδα σε όλες τις εποχές του χρόνου με συνέπεια την αύξηση της αποδιδόμενης ενέργειας. Στην Εικόνα 12 απεικονίζονται τα διαγράμματα μέσης ημερήσιας αποδοτικότητας για σύστημα επίπεδου συλλέκτη και κατόπτρου για όλες τις εποχές του χρόνου (Tripanagnostopoulos & Souliotis, 2005 ; Ζαφειράκης, 2014).



Εικόνα 12: Διαγράμματα Μέσης Ημερήσιας Αποδοτικότητας για επίπεδο συλλέκτη – και κατόπτρου για τις εποχές του χρόνου [Πηγή: Tripanagnostopoulos & Souliotis, 2005]

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν σε συνδυασμό των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και κατοπτρικών επιπέδων διαπιστώθηκε ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας παρουσιάζουν ικανοποιητική δέσμευση ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό συνεπάγεται ότι την ίδια καλή συμπεριφορά τείνουν να έχουν και σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας (Εικόνα 13).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν οφείλονται στην αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Όμως είναι αξιοσημείωτα δύο στοιχεία, τα οποία είναι οι θερμικές απώλειες των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών κατά την λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και η ικανοποιητική ταύτιση υπολογισθείσας κατανομής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια απορρόφησης και αύξησης της θερμοκρασίας του συστήματος (Τρυπαναγνωστόπουλος et al, 2002).



Εικόνα 13: Διαγράμματα κατανομής ποσοστού δεσμευόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας επιφάνειας απορρόφησης σε κατάσταση στασιμότητας [Πηγή: Τρυπαναγνωστόπουλος et al., 2002]

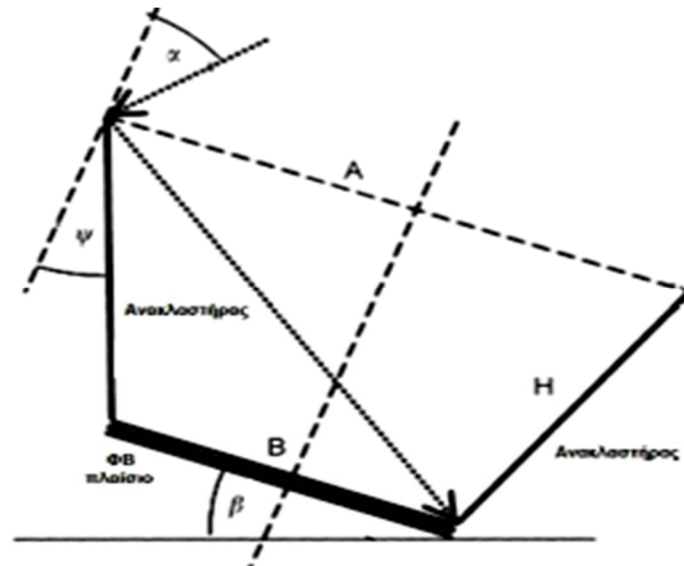
Τα κάτοπτρα που τοποθετούνται σε ηλιακούς συλλέκτες παρουσιάζουν θετικά αποτελέσματα αφού αυξάνεται η θερμότητα του συστήματος. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο παίζουν η θερμοκρασία και οι συνθήκες λειτουργίας. Όσο αφορά το κόστος των κατοπτρικών συστημάτων, επιβαρύνει την απλή εγκατάσταση των επιπέδων ηλιακών συλλεκτών σε ποσοστό 20% με αποτέλεσμα η χρήση να θεωρείται ως οικονομικά αποδεκτή ιδιαίτερα σε εφαρμογές που η θερμοκρασία κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα (40°C– 50°C). Επιπλέον, όταν απαιτείται συγκεκριμένη απόδοση, ιδιαίτερα σε περιόδους όπως άνοιξη και φθινόπωρο, προτείνεται να χρησιμοποιούνται αποδοτικότεροι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με στόχο την κάλυψη των αναγκών (Τρυπαναγνωστόπουλος et al, 2002).

3.3.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα – Υβριδικά θερμικά φωτοβολταϊκά συστήματα

Οι τεχνολογίες των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV) παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον με το πέρασμα των χρόνων. Ο λόγος είναι οι δυνατότητες που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε αρκετά χαμηλό κόστος. Η βασική ιδέα των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών είναι να γίνει χρήση οπτικών υλικών, για το λόγο ότι αυτά έχουν την δυνατότητα να αυξήσουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αποτέλεσμα αυτής της δυνατότητας είναι η μείωση της επίπεδης επιφάνειας των συλλεκτών έχοντας ως πλεονέκτημα την παραγωγή της ίδια ποσότητας ενέργειας.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας δίνεται ένα πλήθος διατάξεων συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Μια από τις βασικές διατάξεις είναι η V-trough (Σχήμα 26) όπου με την

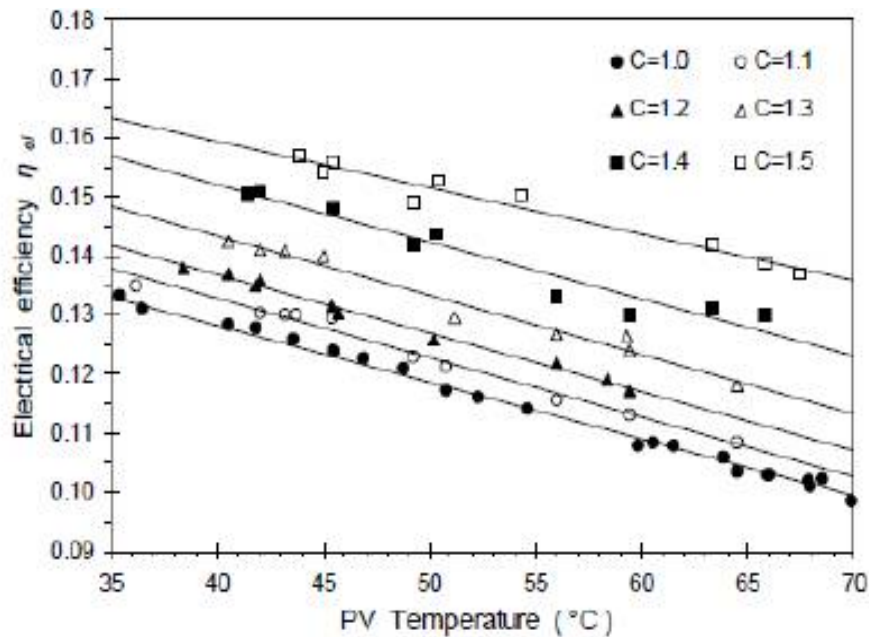
βοήθεια κατοπτρικών ανακλαστήρων πραγματοποιείται η οπτική διαμόρφωση όπου επιτρέπεται μεγάλος βαθμός ομοιογένειας με μέση ακρίβεια παρακολούθησης της κατεύθυνσης του ήλιου. Τα προαναφερόμενα σε συνδυασμό με την τεχνολογία φωτοβολταϊκών πυριτίου οδηγούν σε χαμηλό κόστος διάταξης με αξιόπιστα αποτελέσματα (Filipa Reisetal., 2010).



Σχήμα26: Διάταξη τύπου V-trough
[Πηγή: Sangani & Solanki, 2006]

Έχοντας ως βασικό σκοπό την βελτίωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πραγματοποιείται μια σύζευξη αυτών με διάχυτους ανακλαστήρες. Η προσθήκη αυτών των ανακλαστήρων με τον συνδυασμό της παράλληλης διάταξης σειρών των φωτοβολταϊκών πλαισίων δίνει μια αύξηση της τάξης του 5%. Το ποσοστό αυτό είναι περίπου το επιπλέον κόστος της εγκατάστασης, αλλά το πραγματικό όφελος είναι ότι η αυξημένη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αγγίξει ακόμα και το 30%. Όπως είναι λογικό η διαφορά αυτή είναι αξιοσημείωτη διότι όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 2, οι τύποι των φωτοβολταϊκών παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές αποδόσεις.

Στο Σχήμα 27 απεικονίζονται οι τιμές διάφορων δοκιμών από φωτοβολταϊκά πλαίσια pc-Si με πρόσθεση ηλιακής ακτινοβολίας από διάχυτο ανακλαστήρα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από φύλλο αλουμινίου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι η επίδραση του διάχυτου ανακλαστήρα στον λόγο C. Συγκεκριμένα με την βοήθεια του ανακλαστήρα δίνεται η δυνατότητα επιτάχυνσης και αύξησης της μέγιστης επιτυγχανόμενης συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ποσοστό που αγγίζει το 30% και λόγο C που φτάνει στο 1.5 (Ζαφειράκης 2014 ; Τρυπαναγνωστόπουλος etal, 2005)



Σχήμα 27: Επιτυγχανόμενη ηλεκτρική απόδοση η_{el} φωτοβολταϊκού pc-Si με διάχυτους ανακλαστήρες για 1.0≤C≤1.5.
[Πηγή: Τρυπαναγνωστόπουλος & Σουλιώτης, 2001]

Για την επίτευξη μιας αποδοτικής διάταξης φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συγκεντρωτικά συστήματα αρκεί μερική συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ενισχύεται με αυτό τον τρόπο. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος με συνέπεια την μεγιστοποίηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ωστόσο, με την αυξημένη ακτινοβολία προκαλούνται τα ακόλουθα (Ζαφειράκης 2014 ; Τρυπαναγνωστόπουλος et al, 2005):

- Υψηλές θερμοκρασίας λειτουργίας με συνέπεια την μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος (V_{oc})
- Αυξημένες απώλειες αντίστασης σε σειρά αφού υπάρχει αυξημένη ροή ρεύματος από τον emitter προς το frontgrid
- Επιτάχυνση του ρυθμού γήρανσης των φωτοβολταϊκών που προέρχεται από υψηλότερη έκθεση σε ακτινοβολία.

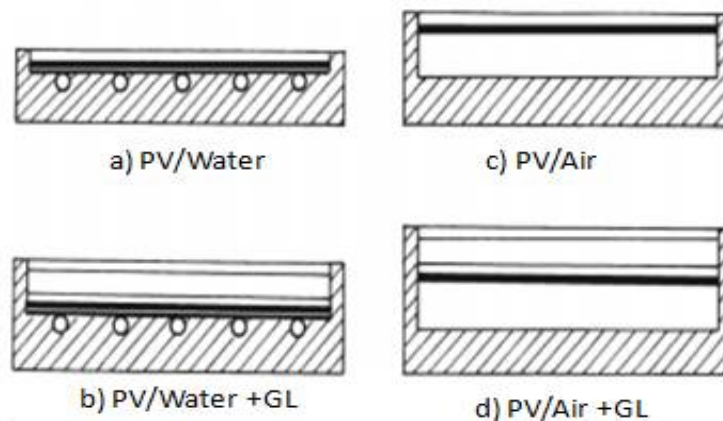
Το μείζον θέμα των φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι ότι δεν δίνεται η δυνατότητα να μετατραπεί όλη από απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα μεγάλο ποσοστό μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία επηρεάζει αρνητικά το σύστημα αφού αυξάνεται η θερμοκρασία και μειώνεται η ηλεκτρική απόδοση. Η απομάκρυνση της θερμοκρασίας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν μειώνει μόνο αισθητά την θερμοκρασία λειτουργίας τους αλλά δίνεται και η δυνατότητα αύξησης της συνολικής ενεργειακής του απόδοσης. Τα ηλιακά συστήματα τα οποία παρέχουν θερμική και ηλιακή ενέργεια ονομάζονται υβριδικά φωτοβολταϊκά /θερμικά (φβ/θ ή PV/T) συστήματα.

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία έχουν σαν ιδιαιτερότητα μια ενσωματωμένη θερμική μονάδα αποβολής της θερμοκρασίας τους. Η θερμοκρασία επάγεται με την βοήθεια ενός κυκλοφορούντος ρευστού με θερμοκρασία που κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα με συνέπεια να πραγματοποιείται η μετάδοση της θερμότητας και ταυτόχρονα να ψύχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Το ρευστό που χρησιμοποιείται για την απολαβή της θερμοκρασίας είναι συνήθως το νερό και θεωρείται αρκετά αποδοτικά καθ' όλη την διάρκεια του έτους, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται είτε ήπιο, είτε θερμό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι

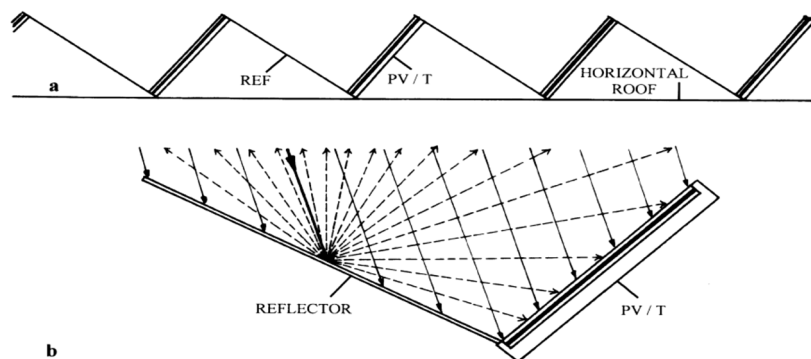
προαναφερόμενες διατάξεις έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για την θέρμανση νερού σε θερμοκρασίες που δεν ξεπερνούν του 40°C με συνέπεια την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ωστόσο, η απαγωγή της θερμοκρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας ως ρευστό και τον αέρα. Η επιλογή αυτή θεωρείται απλούστερη και φθηνότερη διάταξη αλλά έχει ως βασικό μειονέκτημα την μη αποδοτική ψύξη του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην περάτωση που η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπερνά τους 20°C τα υβριδικά φωτοβολταϊκά / θερμικά συστήματα αέρα μπορούν να εφαρμοστούν περιορισμένα (Τρυπαναγνωστόπουλος etal, 2005).



Σχήμα28: Τύποι υβριδικών φωτοβολταϊκών / θερμικών συλλεκτών
[Πηγή: Tonui & Tripanagnostopoulos, 2007]

Σύμφωνα με τον Ζαφειράκη (2014) στην περίπτωση που συνδυάζονται τα φωτοβολταϊκά με ακίνητα κάτοπτρα προτείνεται η χρήση διάχυτων ανακλαστήρων. Με τους ανακλαστήρες αυτούς εξασφαλίζεται μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Σχήμα 29). Οι διάχυτοι ανακλαστήρες παρέχουν λιγότερη πρόσθετη ενέργεια σε σύγκριση με τις συνήθεις κατοπτρικές διατάξεις, αλλά αυτές προκαλούν έντονες διαφορές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, που οδηγεί στη μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης (Ζαφειράκης 2014 ;Τρυπαναγνωστόπουλος etal, 2005).



Σχήμα29: Συνδυασμός φωτοβολταϊκών θερμικών συσκευών με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες σε διάταξη οριζόντιας οροφής κτιρίου
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Η τοποθέτηση των διάχυτων ανακλαστήρων πραγματοποιείται σε διαφορετικά σημεία ανάλογα με το αν βρίσκονται την μπροστά η στην πίσω σειρά. Συγκεκριμένα στο πάνω μέρος

των φωτοβολταϊκών θερμικών συσκευών τοποθετούνται οι διάχυτοι ανακλαστήρες της αρχικής σειράς ενώ στο κάτω μέρος αυτών της πίσω σειράς. Αυτή η διάταξη αυξάνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά στοιχεία καθ' όλη την διάρκεια του έτους με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αποδιδόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του συστήματος.

Οι κατοπτρικές επιφάνειες που προτιμούνται είναι οι διάχυτοι ανακλαστήρες διότι εξασφαλίζουν σε μεγάλο βαθμό την ομοιόμορφη κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το αποτέλεσμα αυτής της ομοιόμορφης κατανομής είναι αποφυγή της μείωσης της ηλεκτρικής απόδοσης λόγω διαφορετικής έντασης φωτός στην επιφάνειά τους. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται σε θερμοσιφωνικές συσκευές είναι αποτελεσματικότεροι διότι μπορούν να ρυθμίζονται με στόχο την βέλτιστη συλλογή ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι η προαναφερόμενη διάταξη είναι λειτουργική και αποδοτικότερη ακόμα και στη ρύθμιση των ανακλαστήρων μόνο μερικές φορές (4-6) κατά την διάρκεια ενός έτους.

3.3.3. Γενική περιγραφή συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι στην ουσία συστήματα τα οποία συγκεντρώνουν είτε ηλιακή είτε θερμική ηλιακή ενέργεια. Χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι η χρήση κατόπτρων ή μεγεθυντικών φακών με στόχο την συγκέντρωση μεγαλύτερου ποσοστού ακτινοβολία σε μικρότερες επιφάνειες. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται όταν συγκεντρώνεται το φως και στην συνέχεια με την βοήθεια ενός θερμικού κινητήρα (ατμοστρόβιλου) μετατρέπει την θερμότητα αυτή και την οδηγεί σε μια γεννήτρια ηλεκτρικής ισχύος (Παυλίδης, 2014 ; Αραπόγλου, 2016).

Σύμφωνα με τον Αραπόγλου (2016) τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα είναι ευρέως γνωστά και μέσω αυτών η αγορά είδε περίπου 740 MW ηλεκτρικής ενέργειας να προστίθενται μεταξύ του 2007 και τέλη του 2010. Περισσότερη από την μισή ενέργεια (περίπου 478 MW) παράχθηκε κατά τη διάρκεια του 2010, φέρνοντας το τελικό σύνολο της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας στα 1.220 MW. Επίσης η Ισπανία πρόσθεσε ένα ποσό της τάξεως των 400 MW κατά την περίοδο του 2010 ενώ η Αμερική την ίδια περίοδο πρόσθεσε 78 MW στο παγκόσμιο σύνολο. Το μεγαλύτερο σχέδιο εγκατάστασης συγκεντρωτικών συστημάτων στον κόσμο μέχρι τον Ιανουάριο του 2016 βρίσκεται στο Μαρόκο ανεβάζοντας τον βαθμό τελικής παγκόσμια παραγωγής ενέργειας στα 4.705 MW.

Ωστόσο, η εξέλιξη των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων «οδηγεί» σε μια νέα τεχνολογία η οποία ονομάζεται STEM και έχει την δυνατότητα εφαρμογής της για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας σε περιοχές που δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο όπως βιομηχανικές περιοχές ή απομακρυσμένες κοινότητες. Η τεχνολογία STEM έχει αναπτυχθεί από τη βιομηχανία με βάση το Salerno Magaldi Industries. Για να επίτευξη της βέλτιστης μεταφοράς θερμότητας και αποθήκευσής της η τεχνολογία STEM χρησιμοποιεί ρευστοποιημένη άμμο πυριτίου. Ωστόσο, η τεχνολογία STEM εφαρμόστηκε πρώτη φορά στην Σικελία το 2015.

Η ανάπτυξη των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων τείνει να πραγματοποιηθεί με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Σύμφωνα με μια σύντομη ανασκόπηση το 2014 η Ισπανία είχε συνολική παραγωγή που άγγιζε τα 2.300 MW με συνέπεια η χώρα να κατακτήσει την πρώτη θέση με την χρήση συστημάτων ηλιακής συγκέντρωσης. Ακολουθούν οι Ηνωμένες Πολιτείες που η παραγωγή τους φτάνουν στα 1.740 MW. Ωστόσο, η Βόρεια Αφρική, η Μέση Ανατολή, η Ινδία και η Κίνα παρουσιάζουν εξίσου σημαντικά ποσά ενέργειας. Αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι μεγάλη ομάδα εταιριών στην Ιταλία προσπαθεί να αδειοδοτήσει 14 μονάδες, παρά την αντίθεση της πολιτικής και τοπικής κοινωνίας, με παραγωγικότητα 392 MW.

Αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι η τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων δεν θα πρέπει να ταυτίζεται με τα φωτοβολταϊκά συγκέντρωσης (CPV) διότι τα τελευταία μετατρέπουν την ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου (Αραπόγλου, 2016).

3.3.3.1. Τεχνολογίες συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων

Οι τεχνολογίες των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων είναι τέσσερις και είναι οι ακόλουθες (Παυλίδης, 2014):

- Παραβολικού τύπου
- Πιάτο sterling
- Ανακλαστήρας γραμμικής συγκέντρωσης fresnel
- Ηλιακούς πύργους ισχύος

Η δομή τους θεωρείται αρκετά απλή, αλλά σε αυτό που πρέπει να δοθεί έμφαση είναι η πραγματική απόδοση συγκρινόμενη με την θεωρητική απόδοση των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πραγματική απόδοση παραβολικού κατόπτρου που φτάνει στο $\frac{1}{3}$ της θεωρητικής μέγιστης με την βέλτιστη γωνία σχεδιασμού. Η προσέγγιση των θεωρητικών μέγιστων μετρήσεων πραγματοποιούνται με πολύπλοκες κατεργασίες βασισμένες σε μη απεικονιστικά οπτικά μέσα (Παυλίδης, 2014 ; Αραπόγλου, 2016).

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των προαναφερόμενων τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας.

➤ Συλλέκτες Παραβολικού Τύπου

Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες παραβολικού τύπου είναι πιο διαδεδομένοι διότι κατέχουν την πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία από τους άλλους τύπους των συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Αποτελούνται από κοίλους ανακλαστήρες, οι οποίοι τοποθετούνται γραμμικά και συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ο οποίος είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής των ανακλαστήρων. Ο συλλέκτης είναι ένας γραμμικός σωληνοειδής δείκτης που είναι τοποθετημένος ακριβώς στο κέντρο του παραβολικού κατόπτρου. Εντός του συλλέκτη κυκλοφορεί συγκεκριμένος τύπος ρευστού, το οποίο ρέει μέσα από το σωλήνα του συλλέκτη και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, για την μείωση των απωλειών του απορροφητή προτείνεται ο συλλέκτης να είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό διάφανου - γυάλινου σωλήνα. Οι ανακλαστήρες που αποτελούν αυτόν τον τύπο συγκεντρωτικών συλλεκτών τοποθετούνται σε ιχνηλάτες (tracker) περιστρεφόμενους από έναν άξονα με στόχο να δίνεται η δυνατότητα να ελέγχεται ο ήλιος καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας (Παυλίδης, 2014 ; Αραπόγλου, 2016).



Εικόνα 14: Παραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα
[Πηγή: Αραπόγλου, 2016]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία των συλλεκτών παραβολικού κατόπτρου μπορεί να είναι της τάξης των 400°C, ενώ η θερμική απόδοση κυμαίνεται από 60 έως 80%. (Παυλίδης, 2014).

➤ *Πιάτο Sterling*

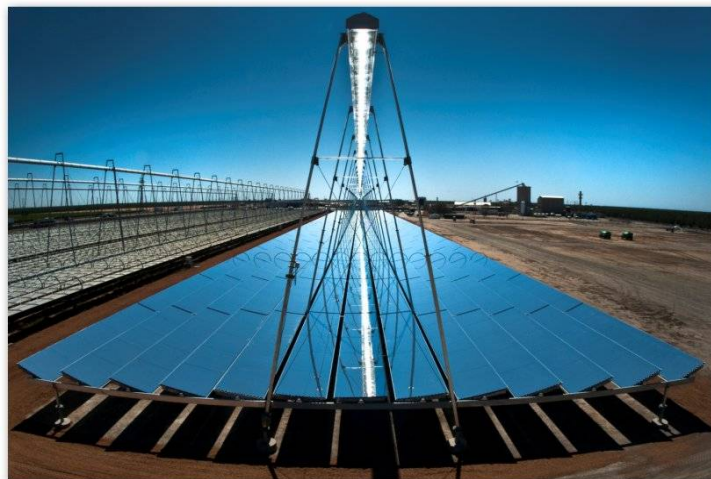
Το πιάτο Sterling είναι ακόμα ένας τύπος συγκέντρωσης ηλιακών συστημάτων. Αποτελείται από παραβολικό ανακλαστήρα, τύπου καθρέπτη, ο οποίος συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη που βρίσκεται στο εστιακό σημείο του ανακλαστήρα. Το ρευστό του δέκτη θερμαίνεται στους 250 – 700 °C και η εκμετάλλευσή του γίνεται από έναν κινητήρα Stirling με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την βέλτιστη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται ιχνηλάτες (tracker) δύο αξόνων με στόχο την παρακολούθηση της πορείας του ήλιου. Επιπλέον η δομή τους παρέχει πολλές δυνατότητας επέκτασης. Τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα παραβολικού κατόπτρου παρέχουν βαθμό απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 31% και 32% (Παυλίδης, 2014 ; Αραπόγλου, 2016).



Εικόνα 15: Πιάτο Sterling
[Πηγή: Αραπόγλου, 2016]

➤ *Ανακλαστήρας τύπου Fresnel*

Οι ανακλαστήρες Fresnel αποτελούνται από πολλές λεπτές επίπεδες λωρίδες καθρέπτη με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται οι ακτίνες του ήλιου πάνω σε σωλήνες. Στο εσωτερικό των σωλήνων κυκλοφορεί ρευστό με στόχο την μεταφορά θερμότητας.



Εικόνα 16: Ανακλαστήρες Fresnel
[Πηγή: Αραπόγλου, 2016]

Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι επίπεδοι καθρέπτες είναι ότι παρέχουν μεγαλύτερη ανακλαστική επιφάνεια, ενώ κατέχουν τον ίδιο χώρο με τους παραβολικούς ανακλαστήρες, άρα συλλέγουν μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακών ακτινοβολιών. Επιπλέον, το

κόστος εγκατάστασης των ανακλαστήρων Fresnel είναι αρκετά πιο οικονομικό συγκρινόμενοι με τους παραβολικούς ανακλαστήρες. Οι ανακλαστήρες Fresnel έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές με διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις (Αραπόγλου, 2016).

➤ *Ηλιακοί Πύργοι Ισχύος*

Οι ηλιακοί πύργοι ισχύος αποτελούνται από μια σειρά ανακλαστήρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ιχνηλάτες (tracker) δύο αξόνων με στόχο την ακολουθία της πορείας του ήλιου και των ακτινών του. Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται σε έναν δέκτη ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου. Ο δέκτης περιλαμβάνει ένα υγρό μέσο, το οποίο έχει θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται από 500 έως και 1000°C και χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας με στόχο την τροφοδοσία είτε μίας γεννήτριας είτε της αποθήκευσής της ως μέσω αποθήκευσης.

Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν οι ηλιακοί πύργοι ισχύος είναι ότι οι ανακλαστήρες έχουν την δυνατότητα να προσαρμοστούν αντί του πύργου. Ωστόσο ως τεχνολογία δεν παρουσιάζει μεγάλο ρυθμό ανάπτυξης αν και παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό απόδοσης καθώς και πιο καλή ικανότητα αποθήκευσης της ενέργειας (Παυλίδης, 2014 ; Αραπόγλου, 2016).



Εικόνα 17: Ηλιακός Πύργος Ισχύος
[Πηγή: Αραπόγλου, 2016]

3.3.4. Τοποθέτηση και αξιοποίηση επιφάνειας ενισχυτικών ανακλαστήρων

Τα συγκεντρωτικά υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας εξελίσσονται καθημερινά επιδιώκοντας βελτιωμένα χαρακτηριστικά, μεγαλύτερη απόδοση και μικρότερο κόστος. Ωστόσο, σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση μεγαλύτερες εξελίξεις παρουσιάζονται σε εγκαταστάσεις που βρίσκουν εφαρμογή στον κτηριακό τομέα (Σταθόπουλος και Σταθόπουλος, 2015).

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί η περιγραφή της αξιοποίησης της διαθέσιμης επιφάνειας σε οριζόντια οροφή καθώς επίσης και την απαραίτητη αρμονία των ενισχυτικών ανακλαστήρων με την αρχιτεκτονική των κτιρίων που πρόκειται να ενσωματωθούν.

3.3.4.1. Αξιοποίηση διαθέσιμης επιφάνειας οριζόντιας οροφής κτιρίων

Για την τοποθέτηση ηλιακών συσκευών σε μια οριζόντια οροφή ενός κτιρίου παίζουν ρόλο παράγοντες όπως το εμβαδόν, το σχήμα καθώς και ο προσανατολισμός της επιφάνειας, η ύπαρξη εμποδίων και η πιθανή σκίαση μέρους της επιφάνειας. Θέτοντας ότι οι σειρές των ηλιακών συλλεκτών είναι παράλληλες, η απόσταση που θα πρέπει να τοποθετηθούν, καθορίζεται από το μήκος της μονάδας του ηλιακού συλλέκτη καθώς και από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που πραγματοποιείται η εγκατάσταση (Τρυπαναγνωστόπουλος & Σουλιώτης, 2001).

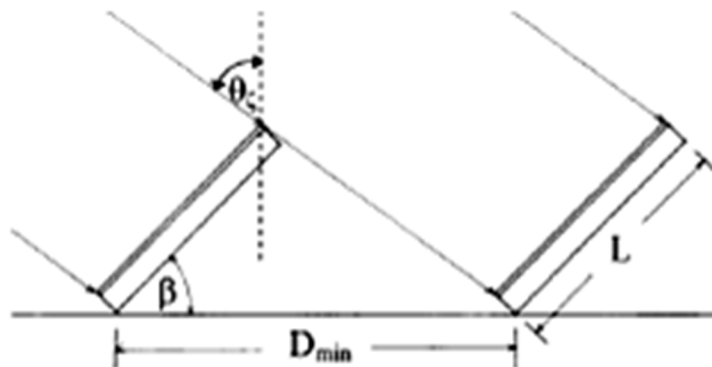
Στο Σχήμα 30 απεικονίζεται η γεωμετρία δύο ηλιακών συλλεκτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε διαδοχικές σειρές. Επιπλέον, οι συλλέκτες σχηματίζουν γωνία β με το οριζόντιο επίπεδο και η απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους είναι D_{min} , στην περίπτωση που ο ήλιος βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα ύψους του για τον συγκεκριμένο τόπο της ηλιακής εγκατάστασης και υπάρχει οριακή αποφυγή σκίασης το μεσημέρι. Η ελάχιστη απόσταση D_{min} υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D_{min} = L \cdot \frac{\cos(\beta - \theta_z)}{\cos \theta_z} \quad [3.1]$$

Όπου:

θ_z = ζενίθεια γωνία του ήλιου για το γεωγραφικό πλάτος

L = τοποθεσία εγκατάστασης στο χειμερινό ηλιοστάσιο και είναι καθοριστική για τις διατάξεις φωτοβολταϊκών



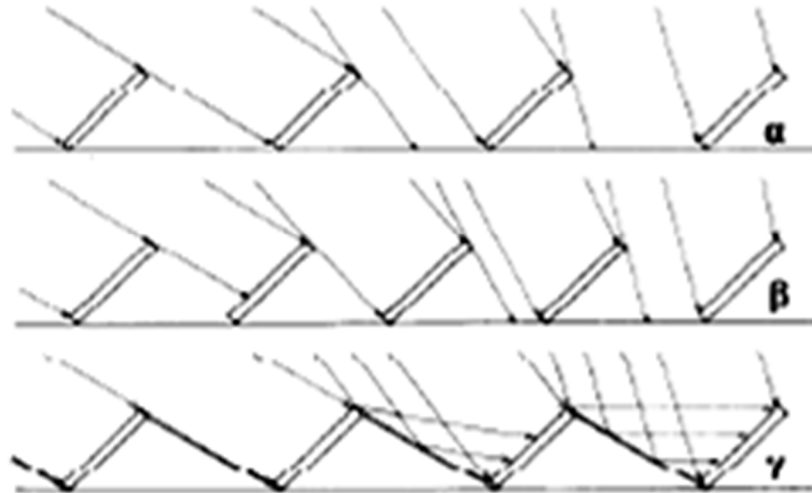
Σχήμα30: Δύο διαδοχικές σειρές ηλιακών συσκευών στην ελάχιστη απόσταση για την αποφυγή σκίασης

[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Σημειώνεται, ότι για τις διατάξεις των θερμικών συλλεκτών δεν θεωρείται υποχρεωτική η απόσταση D_{min} μεταξύ των διαδοχικών σειρών διότι το φαινόμενο της σκίασης μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρή αρνητική επίδραση στην αποδοτική λειτουργία των συσκευών, ειδικά στην περίπτωση που η θερμοκρασία κατά την είσοδο (T_i) του ρευστού είναι περίπου ίση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a). Όμως αυτό δεν ισχύει για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αφού μια μικρή σκίαση του συστήματος μειώνει αισθητά την απόδοσή του. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία της εισόδου (T_i) είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a) το σκιασμένο τμήμα του ηλιακού συλλέκτη έχει θερμικές απώλειες ανάλογα του ποσοστού σκίασης.

Όταν η τοποθέτηση των θερμικών συλλεκτών γίνεται σε σειρές παράλληλες τότε η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη και επιτυγχάνεται μεγαλύτερο ποσοστό προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην οριζόντια επιφάνεια κατά την περίοδο άνοιξη έως φθινόπωρο, με αποτέλεσμα την αξιοποίηση της δεδομένης διαθέσιμης επιφάνειας του κτιρίου. Όπως προαναφέρθηκε για την μέγιστη αξιοποίηση της επιφάνειας προτείνεται η τοποθέτηση

ανακλαστήρων στο πάνω μέρος της πρώτης σειράς και στο κάτω μέρος της επόμενης. Αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης είναι η επίτευξη της χρήσης του ίδιου αριθμού συλλεκτών συγκρινόμενη με την αρχική διάταξη με το πλεονέκτημα της μεγιστοποίησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Σχήμα31: Εναλλακτικοί τρόποι τοποθέτησης παράλληλων σειρών ηλιακών συσκευών στην οριζόντια οροφή κτιρίων
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Όμως η χρήση των ανακλαστήρων δεν βοηθά μόνο στην μεγιστοποίησης της συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά αυξάνει την απόδοση των ηλιακών συστημάτων που χρησιμοποιούνται. Η δυνατότητα αυτή προκύπτει από την αυξημένη πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στην απορροφητική επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών. Η αυξημένη αυτή ηλιακή ακτινοβολία έχει βασικό πλεονέκτημα να μπορεί να αντισταθμίσει τις θερμικές απώλειες του συστήματος με πιο αποδοτική λειτουργία σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες.

Ένας διαφορετικός τρόπος τοποθέτησης των ηλιακών συλλεκτών σε παράλληλη σειρά είναι η προσθήκη των ανακλαστήρων και ως δημιουργείται κάποιο ποσοστό σκίασης λόγω του χαμηλού ύψους του ήλιου για τον χειμώνα, όμως αυτή η μειωμένη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας υπερκαλύπτεται το υπόλοιπο χρονικό διάστημα του έτους που είναι η άνοιξη έως το φθινόπωρο.

Όσο αφορά την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε παράλληλη σειρά είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η ελάχιστη απόσταση με στόχο να αποφεύγεται οποιαδήποτε περίπτωση έστω και μερικής σκίασης. Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδυάζονται με ακίνητα κάτοπτρα τότε προτείνεται η χρήση διάχυτων ανακλαστήρων για την ομοιόμορφη κατανομή, πάνω στην επιφάνειά τους, της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας.

Σύμφωνα με πειραματικές μελέτες οι κατοπτρικές διατάξεις παρέχουν μεγαλύτερη πρόσθετη ενέργεια αλλά μειονεκτούν συγκρινόμενες με τους διάχυτους ανακλαστήρες αφού παρουσιάζουν διαφορές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης (Ζαφειράκης, 2014 ; Τρυπαναγνωστόπουλος & Σουλιώτης, 2001).

3.3.4.2. Αισθητική ενσωμάτωση ενισχυτικών ανακλαστήρων σε κτήρια

Η τοποθέτηση των ηλιακών συλλεκτών σε μια κτηριακή εγκατάσταση πραγματοποιείται εφόσον μπορούν να εναρμονιστούν με την αρχιτεκτονική του καθώς και με την αισθητική του. Σε καμιά περίπτωση δεν θα πρέπει να «προσβάλλονται» αυτά τα στοιχεία της κτηριακής εγκατάστασης και απαιτείται η κάθε παρεμβολή να γίνεται σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο.

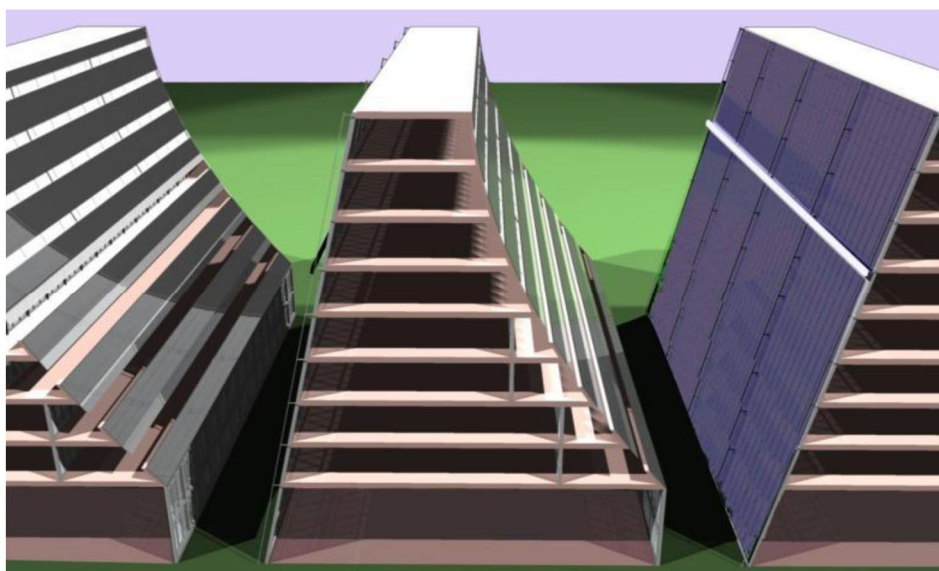
Στην περίπτωση που η εγκατάσταση των ηλιακών συστημάτων πραγματοποιείται σε παράλληλες σειρές οι παράγοντες που επηρεάζουν την εναρμόνιση με την αισθητική του κτηρίου είναι οι ακόλουθοι:

- Σχετικό ύψος εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων
- Χρωματισμός των απορροφητικών επιφανειών
- Οπτική όχληση η οποία οφείλεται στην ανάκλαση του φωτός.

Ωστόσο, οι προαναφερόμενοι παράγοντες, τις περισσότερες φορές, δεν λαμβάνονται υπόψη στα κύρια κριτήρια όταν πρέπει να ληφθεί η απόφαση για την υλοποίηση της τοποθέτησης των ηλιακών συλλεκτών διότι λόγω ότι έχει υιοθετηθεί μια αρνητική άποψη για την ενσωμάτωση ηλιακών συλλεκτών οι αρχιτέκτονες έχουν αποθαρρυνθεί με συνέπεια να μην πραγματοποιείται συχνή διερεύνηση για τοποθέτηση ηλιακών εγκαταστάσεων σε κτήρια (Ζαφειράκης, 2014 ; Τριπαναγνωστόπουλος & Σουλιώτης, 2001).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους είτε σε τοίχους είτε σε προσόψεις κτηρίων. Επιπλέον, η δυνατότητα να συνδυάζονται με διάφορα υλικά τα κάνουν να εναρμονίζονται με μεγάλη ευκολία με το γύρω περιβάλλον που πρόκειται να τοποθετηθούν. Ωστόσο, πολυάριθμες λύσεις δίνονται και για την τοποθέτηση ενισχυτικών ανακλαστήρων με στόχο την πλήρη εναρμόνιση τους με την αισθητική του κτηρίου καθώς και του περιβάλλοντα χώρου.

Σε μια πιο ιδιαίτερη περίπτωση των συγκροτημάτων κτηρίων δίνεται η λύση οι ανακλαστήρες να τοποθετούνται στα μπαλκόνια με σκοπό την συγκέντρωση της ανακλώμενης ακτινοβολίας στην πίσω πλευρά του γειτονικού κτηρίου. Σε αυτό το σημείο είναι φωτοβολταϊκός απορροφητής που έχει την δυνατότητα να μετακινείται σ' ανακλαστήρας και να ακολουθεί τη συγκλίνουσα δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας (Τριπαναγνωστόπουλος, 2008).

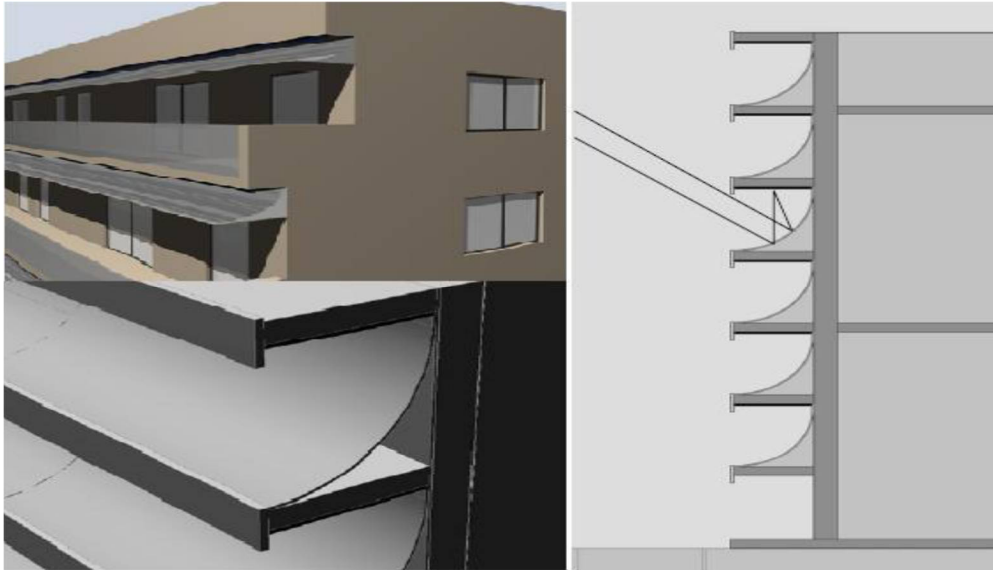


Εικόνα 18: Παράδειγμα ενσωμάτωσης ανακλαστήρων στην πρόσοψη, με κινούμενο απορροφητή στο απέναντι κτήριο

[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Μια λύση για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων πάνω σε κτήριο είναι στην πρόσοψή του. Η λύση αυτή έχει τη δυνατότητα να μην γίνει ορατή αφού τοποθετούνται στο

κάτω μέρος των μπαλκονιών με παράλληλη χρήση καμπύλων ανακλαστήρων με στόχο την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων.



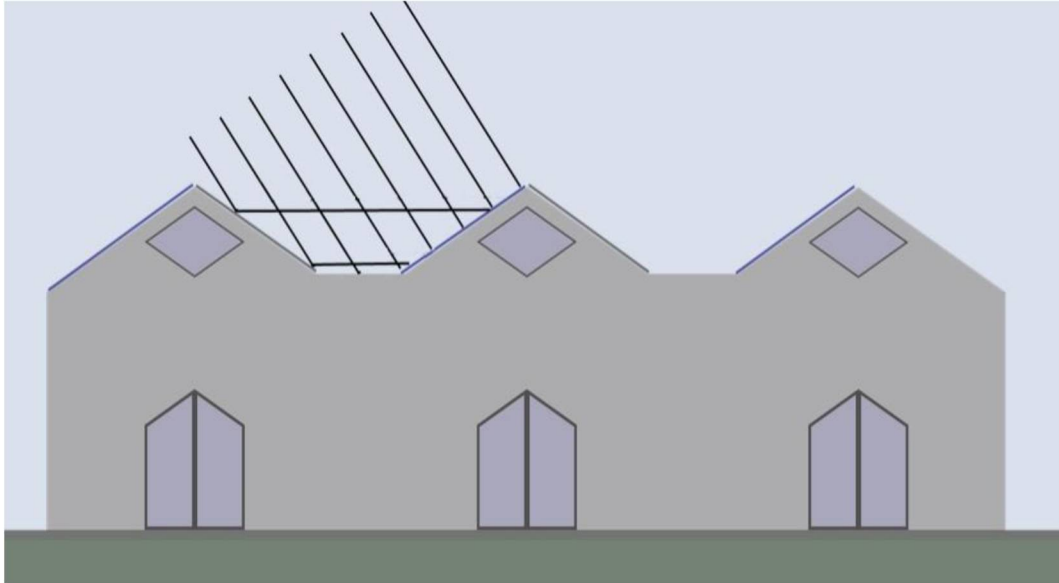
Εικόνα 19: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων ανάποδα κάτω από τα μπαλκόνια κτιρίου σε συνδυασμό με καμπύλους ανακλαστήρες για αύξηση της προσπίπτουσας στο φβ ηλιακής ακτινοβολίας
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Όμως αυτή η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν θεωρείται και η καταλληλότερη αφού παράγει μικρότερο ποσοστό ενέργειας λόγω ότι δεν έχει ούτε την βέλτιστη λύση ούτε τον σωστό προσανατολισμό. Άρα σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, γίνεται σαφές ότι μια πανομοιότυπη εγκατάσταση έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης και το πλεονέκτημα ότι το αισθητικό αποτέλεσμα θεωρείται άρτιο (Tripanagnostopoulos et al, 2010).

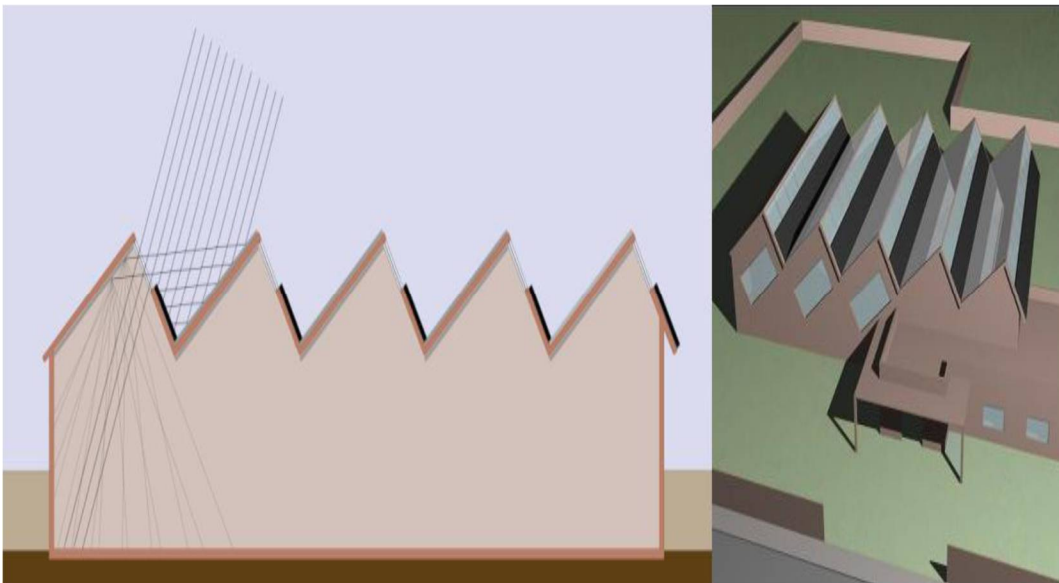
Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε στέγες κτηρίων μπορεί να συνδυαστεί με ενισχυτικά κάτοπτρα με συνέπεια να μπορούν να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες. Η ενίσχυση της ακτινοβολίας με διάχυτους ανακλαστήρες μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιτυχία από την ανοιξιάτικη έως την φθινοπωρινή περίοδο του έτους. Στην περίπτωση που οι ανακλαστήρες έχουν κατάλληλη γεωμετρία μόνο τότε δίνεται η δυνατότητα της ομοιόμορφης κατανομής της επιπρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στην Εικόνα 20.

Η βέλτιστη λύση όμως για την συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας δεν δίνεται από τους διάχυτους ανακλαστήρες αλλά από τους κατοπτρικούς, οι οποίοι έχουν υψηλότερο κόστος. Όμως τονίζεται ότι λόγω της κατεύθυνσης των κατόπτρων μπορεί να φωτίζουν κάποια τμήματα ή κύτταρα των πλαισίων, με συνέπεια να παρουσιάζουν συμπεριφορά όπως αυτής όταν σκιάζονται μερικώς, δηλαδή αισθητή μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Ζαφειράκης, 2014 ; Tripanagnostopoulos et al, 2002).

Όταν η κτηριακή εγκατάσταση έχει προιωντό προφίλ στέγης, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να τοποθετηθούν μόνο σε ένα τμήμα της μια πλευράς με συνέπεια να αφήνεται ακάλυπτο το υπόλοιπο τμήμα της στέγης. Επίσης, η αντίθετη πλευρά της στέγης μπορεί να καλυφθεί με ανακλαστήρες όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Για το ελεύθερο τμήμα της στέγης δίνεται η λύση της τοποθέτησης υαλοπινάκων, οι οποίοι επιτρέπουν κάποιο τμήμα της ανακλώμενης ακτινοβολίας να εισέρχεται στο εσωτερικό του κτηρίου και να καλύπτει ένα μέρος από τις ανάγκες του φωτισμού (Tripanagnostopoulos, 2009).

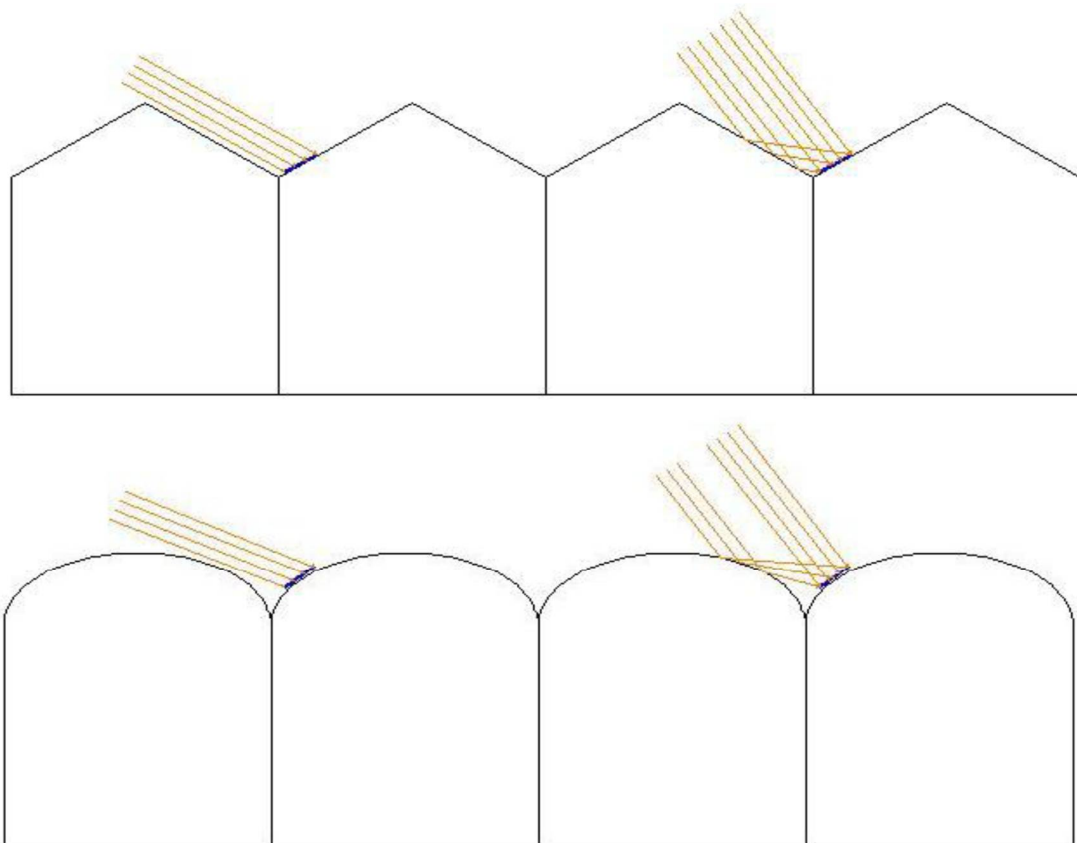


Εικόνα 20: Κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων
 [Πηγή: Tripanagnostopoulos, 2008]



Εικόνα 21: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων με ενισχυτικούς ανακλαστήρες σε στέγη βιομηχανικού κτηρίου και κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων.
 [Πηγή: Tripanagnostopoulos, 2009]

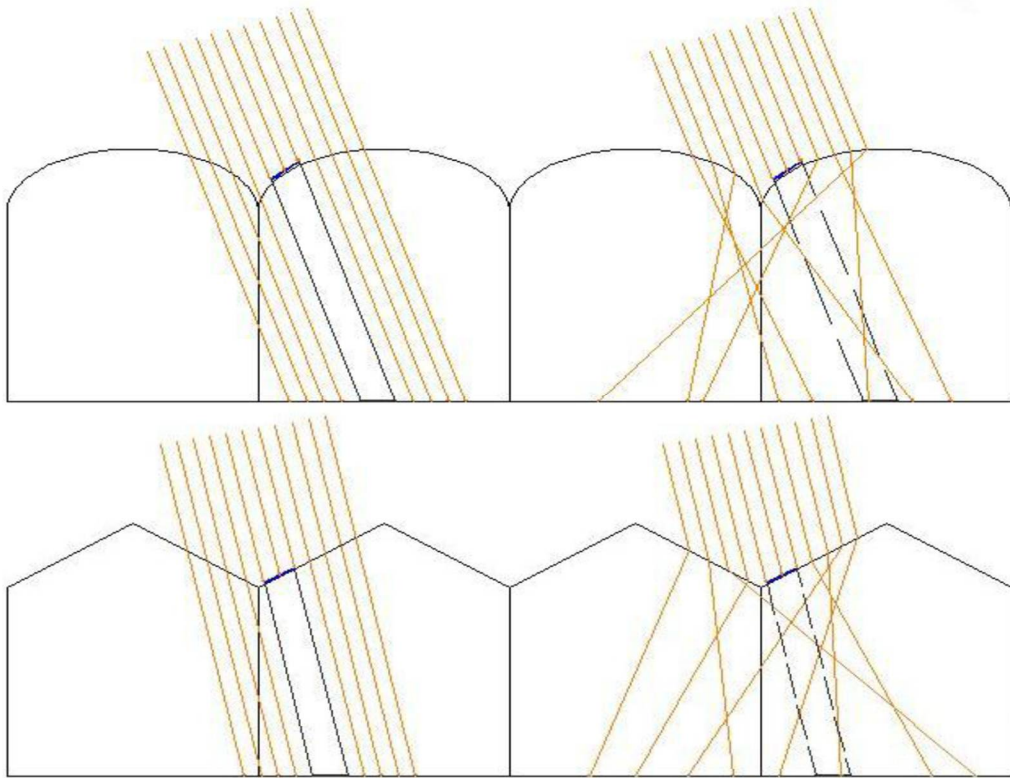
Η κατασκευή των περισσότερων θερμοκηπίων δίνει την δυνατότητα της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων στην στέγη όπου η μία πλευρά χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των πλαισίων και η άλλη πλευρά για την τοποθέτηση των ανακλαστήρων (Σχήμα 32). Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια (Tripanagnostopoulos, 2012).



Σχήμα32: Κατεύθυνση ανακλώμενων ακτίνων σε διαδοχικά θερμοκήπια με ενσωματωμένα φβ σε τμήμα της μιας στέγης, με δίριχτη ή τοξωτή στέγη.
[Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

Όπως έχει προαναφερθεί βασικό πρόβλημα είναι ο τρόπος που προσπίπτει η επιπρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Απαιτείται ομοιόμορφη κατανομή αυτής διότι όταν δεν κατανέμεται σωστά τότε μειώνεται αισθητά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια καθώς και το σύστημα ανακλαστήρων είναι σταθερά τότε απαιτείται οι ανακλαστήρες να είναι διάχυτοι με στόχο την επίτευξη της ομοιόμορφης κατανομής, πάνω στην επιφάνεια των πλαισίων, της επιπρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας, όσο βέβαια αυτό είναι δυνατό. Το αποτέλεσμα της χρήσης διάχυτου καλύμματος είναι η επίτευξη της επιθυμητή διάχυσης της ανάκλασης. Ωστόσο, αποφεύγεται το φαινόμενο σκίασης από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στο εσωτερικό τμήμα του θερμοκηπίου (Σχήμα 33).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με παρόμοια μορφή κατασκευάζονται και αίθρια κτηρίων με τοξωτή ή δίριχτη στέγη. Γίνεται κατανοητό ότι κατά την κατασκευή δημιουργούνται παρόμοιες απαιτήσεις στην τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων στις στέγες κτηρίων, όπως και στα θερμοκήπια. Οι ομοιόμορφη κατανομή του φωτισμού στο εσωτερικό του κτηρίου θεωρείται απαραίτητη για την οπτική άνεση των ανθρώπων που βρίσκονται εντός αυτού (Ζαφειράκης, 2014 ; Τρυπαναγωνστόπουλος et al., 2013).



Σχήμα33: Κατεύθυνση διαχεόμενων ακτίνων σε διαδοχικά θερμοκήπια με ενσωματωμένα φβ σε τμήμα της μιας στέγης, με δίριχτη ή τοξωτή στέγη [Πηγή: Ζαφειράκης, 2014]

4. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το σημείο της παρούσας πτυχιακής εργασίας θα αναλυθούν και θα περιγραφούν οι βασικές αρχές σχεδίασης της συγκεντρωτικής φωτοβολταϊκής διάταξης. Στόχος είναι να αποτυπωθούν τα γεωμετρικά της στοιχεία τα οποία θα προκύψουν από τους υπολογισμούς σύμφωνα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής που θα τοποθετηθεί η προαναφερόμενη φωτοβολταϊκή διάταξη. Η αποτύπωση αυτή θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks που δίνει την δυνατότητα δισδιάστατης και τρισδιάστατης σχεδίαση (2D και 3D sketch). Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί ανάλυση της πορείας των ακτινών (RayTracing) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου τόσο από την άμεση προσπίπτουσα όσο και από την ανάκλαση στην πρόσθετη συγκεντρωτική διάταξη. Η πορεία παρακολούθησης των ακτινών θα πραγματοποιηθεί με το πρόγραμμα RayOptics όπου δίνεται η δυνατότητα προσέγγισης των ακτινών γύρω από αντικείμενα που έχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές (διαστάσεις, υλικά).

Στόχος είναι να υπολογισθεί και να αναλυθεί η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης ενός συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού συστήματος τύπου Fresnel κατά την διάρκεια ενός έτους για τη μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που θα απορροφάται στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Για τον ακριβή υπολογισμό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα σχεδιαστικά δεδομένα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης για να γίνει δυνατός ο ορισμός των διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος, εφόσον έχει ληφθεί αρχικά υπόψη ο περιορισμένος χώρος που διατίθεται. Ωστόσο, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν θα επαληθευτούν από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks καθώς και από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν σε οπτικό επίπεδο από το πρόγραμμα παρακολούθησης ακτινών RayOptics αφού πραγματοποιηθεί μελέτη καινοτόμου κατασκευής.

Η προαναφερόμενη διαδικασία θα πραγματοποιηθεί για την ίδια διάταξη τοποθετημένη σε δύο πόλεις της Ελλάδας, όπου η μία βρίσκεται στον Βορρά και είναι η Κοζάνη, και η άλλη βρίσκεται στον Νότο και είναι η Πάτρα.

4.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΚΟΖΑΝΗ

4.2.1. Υπολογισμούς γεωμετρικών στοιχείων

Για τον υπολογισμό των γεωμετρικών στοιχείων παίζει σημαντικό ρόλο η τοποθεσία των φωτοβολταϊκών πλαισίων αφού για τους υπολογισμούς απαιτείται το μήκος και πλάτος της περιοχής. Ο πίνακας 2 καταγράφει τα μήκη και πλάτη στα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας.

Πίνακας 2: Γεωγραφικά μήκη και πλάτη αστικών κέντρων την Ελλάδα
[Πηγή: Καπλάνης 2004]

Πόλη	Πλάτος (φ)	Μήκος (L)	Πόλη	Πλάτος(φ)	Μήκος(L)
Αμαλιάδα	37,80	21,35	Κως	36,80	27,09
Αρχάγγελος	36,20	28,13	Λαμία	38,90	22,43
Αγ. Νικόλαος	35,18	25,72	Λάρισα	39,63	22,42
Αγρίνιο	38,63	21,42	Λέρος	37,19	26,80
Αθήνα	Αγ. Παρασκευή	37,99	Λευκάδα	38,83	20,71
	Νέο Ψυχικό	38,00	Λεχαιόν	37,92	22,86
	Φάληρο	37,93	Λήμνος	39,92	25,24
	Ρέντη	37,96	Ληξούρι	38,20	20,44
Αίγιο	38,25	22,08	Λιβαδειά	38,43	22,88
Αλεξάνδρεια	40,66	22,49	Μάραθος	35,53	23,84
Αλεξανδρούπολη	40,86	25,96	Μέγαρα	37,98	23,37
Άμφισσα	38,53	22,38	Μεσολόγγι	38,36	21,43
Ανδραβίδα	37,92	21,29	Μύκονος	37,44	25,35
Άραξος	38,15	21,42	Μήλος	36,70	24,48
Αργοστόλι	38,17	20,47	Μόρνος	38,53	22,12
Άργος	37,38	22,44	Μυτιλήνη	39,10	26,55
Άρτα	39,03	20,99	Νάξος	37,08	25,38
Αστυπάλαια	36,58	26,39	Ναύπακτος	38,40	21,83
Αταλάντη	38,65	23,00	Ξάνθη	41,90	24,54
Βενιζέλος (Σπάτα)	37,92	23,94	Ξυλόκαστρο	38,08	22,63
Βέροια	40,32	22,13	Ορεστιάδα	41,31	26,32
Βόλος	39,37	22,93	Πάρος	37,01	25,13
Γρεβενά	40,08	21,42	Πάτρα	38,25	21,73
Δράμα	41,90	24,10	Πόρτο Χέλι	37,30	23,15
Έδεσσα	40,85	21,83	Πρέβεζα	38,95	20,75
Ελευσίνα	38,06	21,50	Πύλος	36,92	21,70
Ζάκυνθος	37,78	20,90	Πύργος	37,67	21,43
Ηράκλειο	35,34	25,09	Ραφήνα	38,06	23,98
Θεσσαλονίκη	40,68	23,08	Ρέθυμνο	35,37	24,47
Θήβα	38,32	23,32	Ρόδος	36,43	28,22
Ικαρία	37,85	26,35	Σάμος	37,69	26,91
Ιστιαία	38,95	23,15	Σαντορίνη	36,40	25,48
Ιωάννινα	39,70	20,82	Σέρρες	41,01	23,55
Καβάλα	40,90	24,63	Σητεία	35,22	26,01
Καλαμάτα	37,03	22,12	Σκιάθος	39,18	23,51
Καρδίτσα	39,22	21,55	Σκύρος	38,97	24,49
Κάρπαθος	35,70	27,15	Σούδα	35,53	24,15
Κάσος	35,42	26,92	Σπάρτη	37,08	22,43
Καστέλι	35,19	25,33	Σύρος	37,41	24,95
Καστελόριζο	36,13	29,57	Τανάγρα	38,34	23,55
Καστοριά	40,45	21,28	Τρίκαλα	39,33	21,46
Κατερίνη	40,17	22,31	Τρίπολι	37,52	22,37
Κεφαλονιά	39,60	20,50	Τυμπάκι	35,01	24,76
Κιλκίς	40,99	22,62	Φλώρινα	40,81	21,44
Κοζάνη	40,28	21,84	Χαλκίδα	38,47	23,60
Κόρινθος	37,93	22,93	Χάνια	35,51	24,02
Κύθηρα	36,29	23,03	Χίος	38,37	26,13

Ωστόσο, σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό των γεωμετρικών στοιχείων είναι η επιλογή του συστήματος που θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είτε είναι σταθερά έχοντας συγκεκριμένη κλίση και σταθερό προσανατολισμό, είτε έχουν την δυνατότητα παρακολούθησης ηλιακών ακτινών (tracking).

Στην παρούσα μελέτη τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα είναι τοποθετημένα στην περιοχή της Κοζάνης όπου σύμφωνα με τον πίνακα 2 το πλάτος της περιοχής είναι $\varphi=40,28$ και το μήκος αυτής $L=21,84$ (Καπλάνης, 2004). Επιπλέον, επιλέχθηκε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να τοποθετηθούν σε σταθερές βάσεις με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Στόχος είναι ο υπολογισμός των γεωμετρικών στοιχείων για την αποφυγή του παράγοντα σκίασης μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αρχικά υπολογίζεται η βέλτιστη γωνία κλίσης (φ_1) των φωτοβολταϊκών πλαισίων από την σχέση:

$$\varphi_1 = \varphi - 10^\circ \quad [4.1]$$

όπου:

φ = γεωγραφικό πλάτος περιοχής (μοίρες)

Άρα πραγματοποιώντας αντικατάσταση στην σχέση (4.1) για την Κοζάνη προκύπτει ότι το $\varphi_1 = 30,28^\circ$. Σημειώνεται ότι αυτή είναι η βέλτιστη γωνία κλίσης σε ετήσια βάση.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης του ηλίου (α), η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\alpha = 90 - \varphi + \delta_n \quad [4.2]$$

όπου:

φ = γεωγραφικό πλάτος περιοχής (μοίρες)

δ_n = απόκλιση του ηλίου σε μηνιαία βάση στη διάρκεια του έτους (μοίρες)

Η γωνία απόκλισης ή ηλιακή απόκλιση θα ληφθεί σύμφωνα με τις τέσσερις (4) εποχές του χρόνου, όπου δίνονται και οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της. Όπως προαναφέρθηκε και στο θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας πτυχιακής εργασίας η ηλιακή απόκλιση (δ_n) είναι η γωνία ανάμεσα στην ευθεία ήλιου - γης και την προβολή της στο επίπεδο του ισημερινού και οι τιμές που λαμβάνει για συγκεκριμένες θέσεις καταγράφονται στο πίνακα 3.

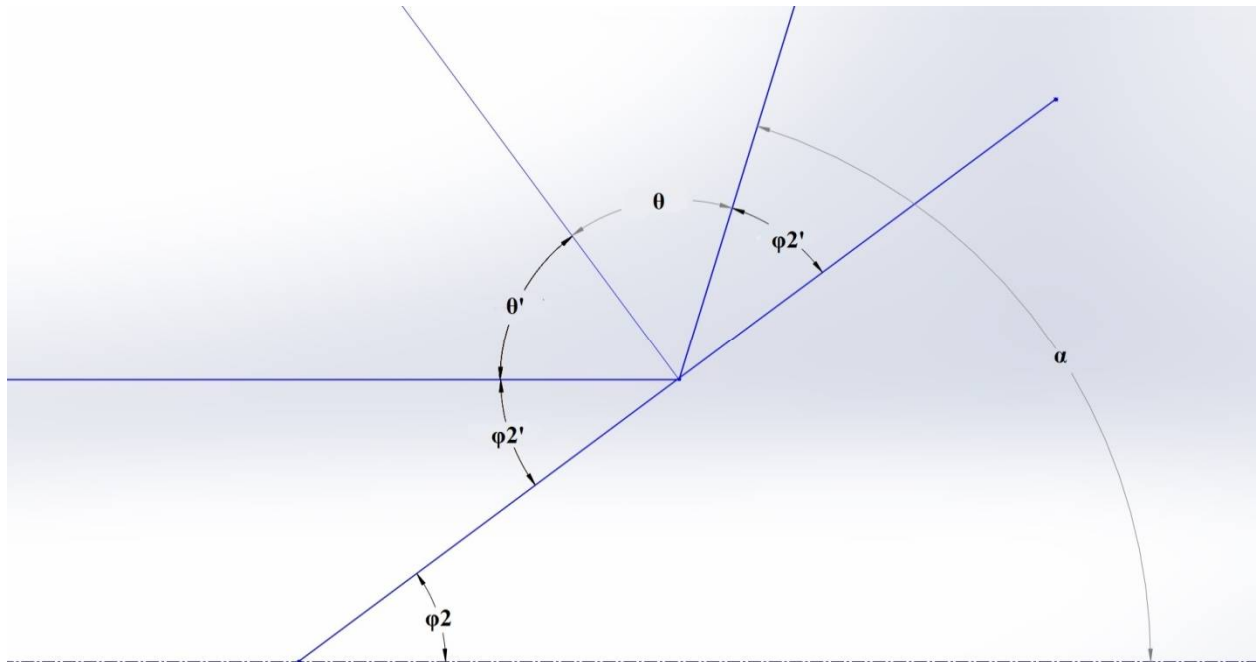
Πίνακας 3: Εποχιακές αλλαγές ηλιακής ακτινοβολίας
[Πηγή: Ασημακόπουλος και συν., 2015]

ΘΕΣΗ ΓΗΣ - ΗΛΙΟΥ	ΓΩΝΙΑ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ (δ)
Εαρινή ισημερία	0°
Θερινό ηλιοστάσιο	$23,45^\circ$
Φθινοπωρινή ισημερία	0°
Χειμερινό ηλιοστάσιο	$- 23,45^\circ$

Ωστόσο, κατά την εκπόνηση της μελέτης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η παράμετρος ότι η πρώτη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να προσπίπτει στο πάνω μέρος του κατόπτρου για να αντανακλάται στο πάνω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Για την επίτευξη αυτού απαιτείται οι ανακλώμενες ακτίνες από το κάτοπτρο να είναι παράλληλες με το επίπεδο.

Ωστόσο, η επίτευξη των προαναφερόμενων βασίζεται στον νόμο της ανάκλασης όπου ορίζει η γωνία πρόσπτωσης να είναι ίση με την γωνία ανάκλασης συγκεκριμένα αν η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετη στην ανακλώμενη επιφάνεια (γωνία = 0), τότε η ανακλώμενη (επίσης γωνία = 0), θα ταυτίζεται με την προσπίπτουσα.

Στην περίπτωση της φωτοβολταϊκής διάταξης που μελετάται ο σχηματισμός γωνιών απεικονίζεται στο Σχήμα34. Η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι ίση με την γωνία ανάκλασης (θ') δηλαδή $\theta=\theta'$. Επιπλέον, οι γωνίες που σχηματίζονται από την προσπίπτουσα (φ_2) και ανακλώμενη (φ_2') ακτινοβολία με το επίπεδο είναι ίσες μεταξύ τους ως εντός εναλλάξ δηλαδή $\varphi_2=\varphi_2'$. Ακόμα η γωνία (α) που σχηματίζεται με το επίπεδο είναι ίση με το άθροισμα αυτών, δηλαδή $\varphi_2+\varphi_2'=\alpha$ και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η γωνία που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του συγκεντρωτικού συστήματος θα είναι ίση με $\varphi_2 = \frac{\alpha}{2}$.



Σχήμα 34: Γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης του κατοπτρικού συστήματος

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν και από την αντικατάσταση των σχέσεων 4.1. και 4.2. προέκυψαν τα αποτελέσματα του πίνακα 3 όπου αφορούν τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης για ολόκληρο το έτος.

Πίνακας 4: Γωνία πρόσπτωσης (α) της ηλιακής ακτινοβολίας και γωνία του συγκεντρωτικού συστήματος φ_2 για όλο το έτος στην περιοχή της Κοζάνης

Μήνας	Ημέρα έτους	Γωνία απόκλισης δ_n (°)	Γωνία πρόσπτωσης α (°)	Γωνία συστήματος φ_2 (°)
Ιανουάριος	17	-20,92	28,80	14,40
Φεβρουάριος	47	-12,95	36,77	18,38
Μάρτιος	75	-2,42	47,30	23,65
Απρίλιος	105	9,41	59,13	29,57
Μάιος	135	18,79	68,51	34,26
Ιούνιος	163	23,15	72,87	36,44
Ιούλιος	197	21,35	71,07	35,54
Αύγουστος	228	13,46	63,18	31,59
Σεπτέμβριος	258	2,22	51,94	25,97
Οκτώβριος	288	-9,60	40,12	20,06
Νοέμβριος	318	-18,91	30,81	15,40
Δεκέμβριος	343	-22,97	26,75	13,37

Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές, με συνέπεια να απαιτείται να υπολογισθεί η ελάχιστη απόσταση που θα πρέπει να έχουν οι σειρές μεταξύ τους με στόχο την αποφυγή του φαινομένου σκίασης. Το μήκος του φωτοβολταϊκού πλαισίου λαμβάνεται ίσο με **L=1m**.

Ο υπολογισμός του κενού μέρους ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιείται από την σχέση:

$$D = \frac{L \cdot \cos \varphi_1}{\tan \varphi_1} \quad [4.3]$$

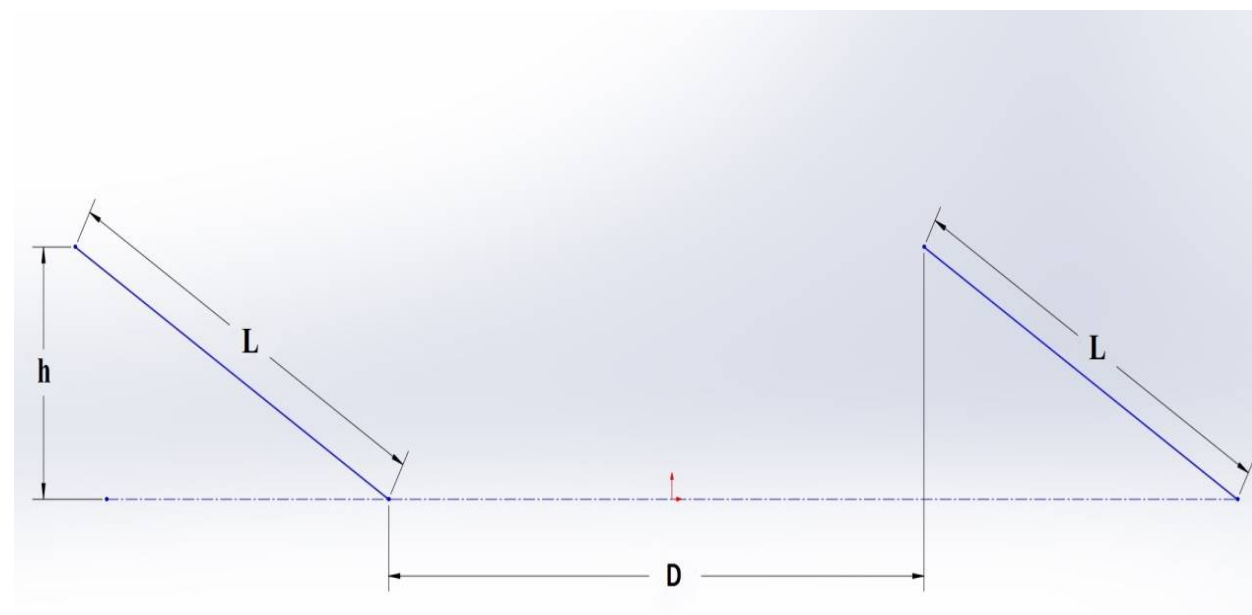
Όπου:

L = μήκος του φωτοβολταϊκού (m)

φ_1 = βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού (μοίρες)

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα δεδομένα γίνεται αντικατάσταση της σχέσης (4.3) όπου το μήκος του φωτοβολταϊκού είναι L=1m και όπου η βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού είναι $\varphi_1=30,28^\circ$ με αποτέλεσμα το κενό μέρος στις παράλληλες σειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων να είναι **D=1,48m**.

Ακολουθεί ο σχεδιασμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των διαστάσεων του χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος σε σχέση με την φωτοβολταϊκή διάταξη (Σχήμα 35).



Σχήμα 35: Διαστασιολόγηση του περιβάλλοντα χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος σύμφωνα με την φωτοβολταϊκή διάταξη.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός του κατόπτρου τύπου Fresnel. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι απαιτείται ο χώρος γύρω από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να είναι επαρκής για να την πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης και επισκευής. Ο χώρος αυτός θα πρέπει να έχει συγκεκριμένο πλάτος που υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_{min} = \frac{2}{3} \cdot D \quad [4.4]$$

Όπου:

D = μήκος διάκενου (m)

Το μήκος του διάκενου υπολογίστηκε $D=1,48\text{m}$, πραγματοποιώντας αντικατάσταση της σχέσης (4.4) το μήκος εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι $D_{min}=0,987\text{m}$. Άρα ο ελεύθερος χώρος που απομένει με στόχο την πραγματοποίηση συντηρήσεων και εργασιών επισκευής υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_{serv}=D - D_{min} \quad [4.5]$$

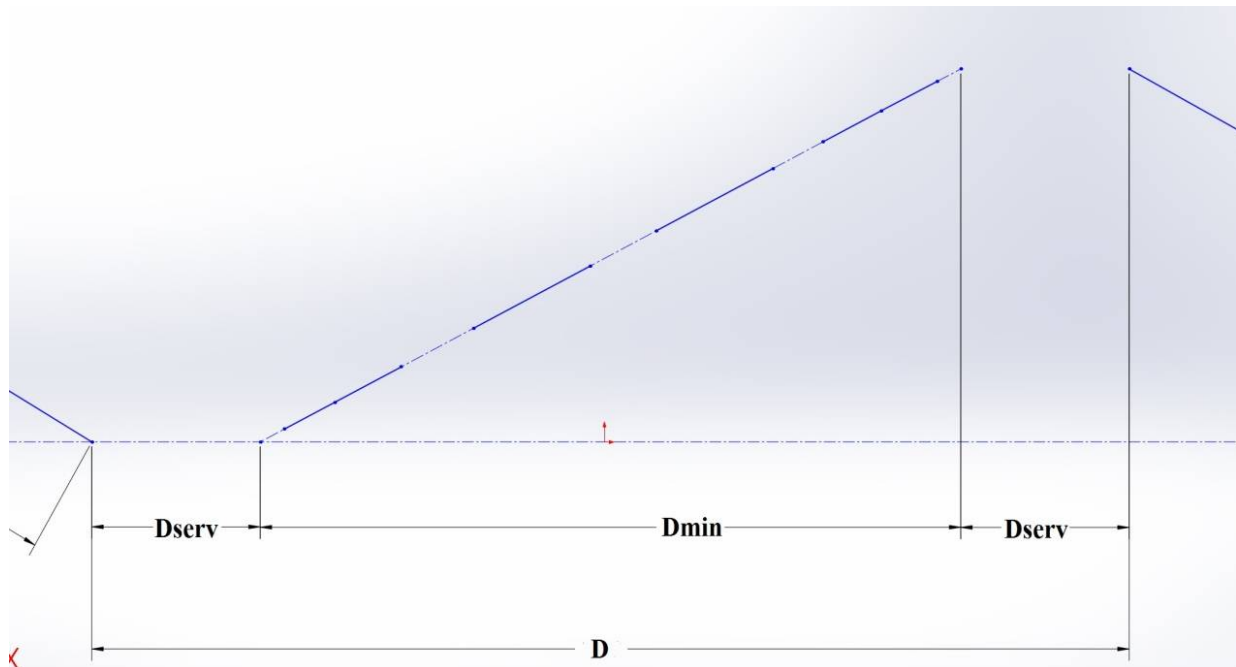
Όπου:

D = μήκος διάκενου (m)

D_{min} = μήκος εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου (m)

Άρα σύμφωνα με τα δεδομένα, όπου το μήκος του διάκενου είναι $D= 1,48\text{m}$ και το μήκος εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι $D_{min}=0,987\text{m}$, κάνοντας αντικατάσταση της σχέσης (4.5), ο χώρος που απομένει για συντήρηση και ολοκλήρωση εργασιών είναι $D_{serv}=0,493\text{m}$, δηλαδή $0,246\text{m}$ από την κάθε πλευρά.

Ακολουθεί ο σχεδιασμός του χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος και απεικονίζονται το μήκος και πλάτος των διάκενων καθώς και ο ελεύθερος χώρος για την πραγματοποίηση συντήρησης και υλοποίησης εργασιών επισκευής (Σχήμα 36).



Σχήμα 36: Διαστασιολόγηση του περιβάλλοντα χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος σύμφωνα με την φωτοβολταϊκή διάταξη.

Στην συνέχεια υπολογίζεται το ύψος του κατόπτρου. Το ύψος θα πρέπει να υπολογισθεί όταν η κλίση των κατοπτρικών τμημάτων δίνει την δυνατότητα της ανάκλασης στο πάνω μέρος κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά την διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μέγιστό ύψος. Επιπλέον, το ύψος ορίζεται ίσο με το ύψος που έχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα και υπολογίζεται από την σχέση:

$$h = L \cdot \sin(\varphi_1) \quad [4.6]$$

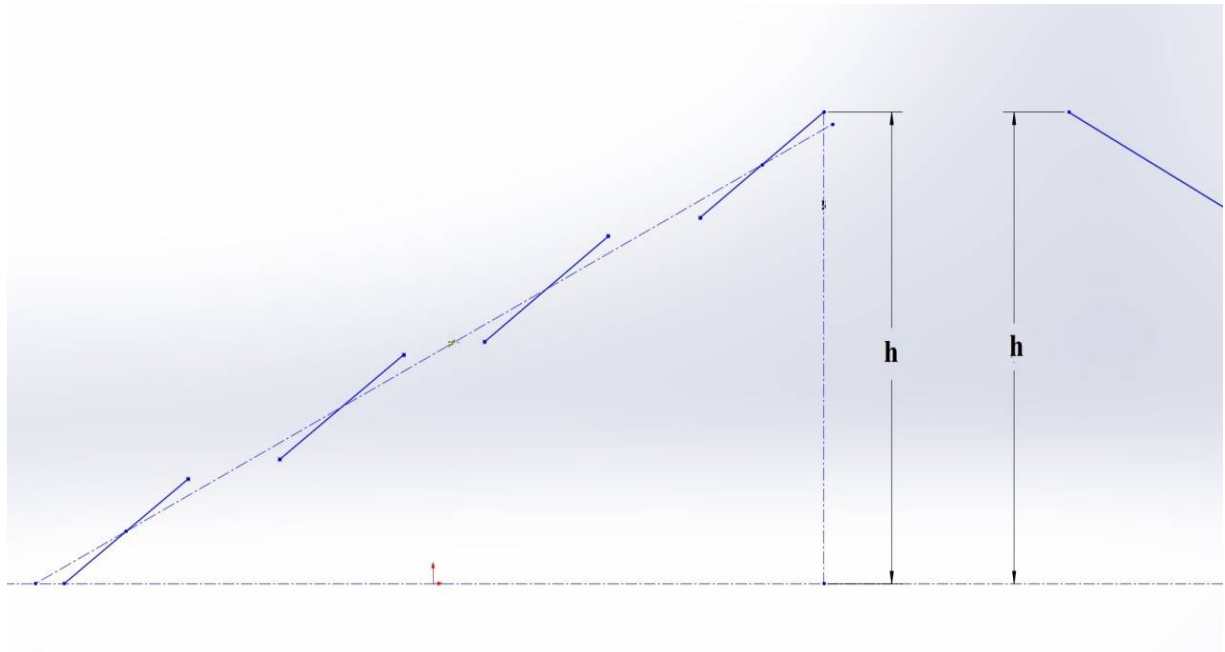
Όπου:

L = μήκος του φωτοβολταϊκού

φ_1 = βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού

Σύμφωνα με τα δεδομένα το μήκος του φωτοβολταϊκού λαμβάνεται $L=1(m)$, όσο της υπάρχουσας κατασκευής, και η βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού έχει υπολογιστεί $\varphi_1=30,28^\circ$, έτσι κάνοντας αντικατάσταση στην σχέση (4.6) προκύπτει ότι το ύψος είναι $h=0,504m$.

Έπειτα, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του προαναφερόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος και απεικονίζεται το ύψος που θα πρέπει να έχει το συγκεντρωτικό σύστημα τύπου Fresnel (Σχήμα 36).



Σχήμα 37: Απεικόνιση του ύψους (h) του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel

Τα επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του μήκους της επιφάνειας του συγκεντρωτικού συστήματος. Στόχος είναι η επιφάνεια του συστήματος να διαχωριστεί σε τέσσερα ίσα τμήματα, αφού αρχικά έχει ληφθεί υπόψη το κενό που θα πρέπει να υπάρχει μεταξύ αυτών. Ο υπολογισμός της επιφάνειας πρέπει να πραγματοποιηθεί για την μικρότερη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή όταν βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 4 η μικρότερη γωνία πρόσπτωσης είναι $\alpha = 26,75^\circ$

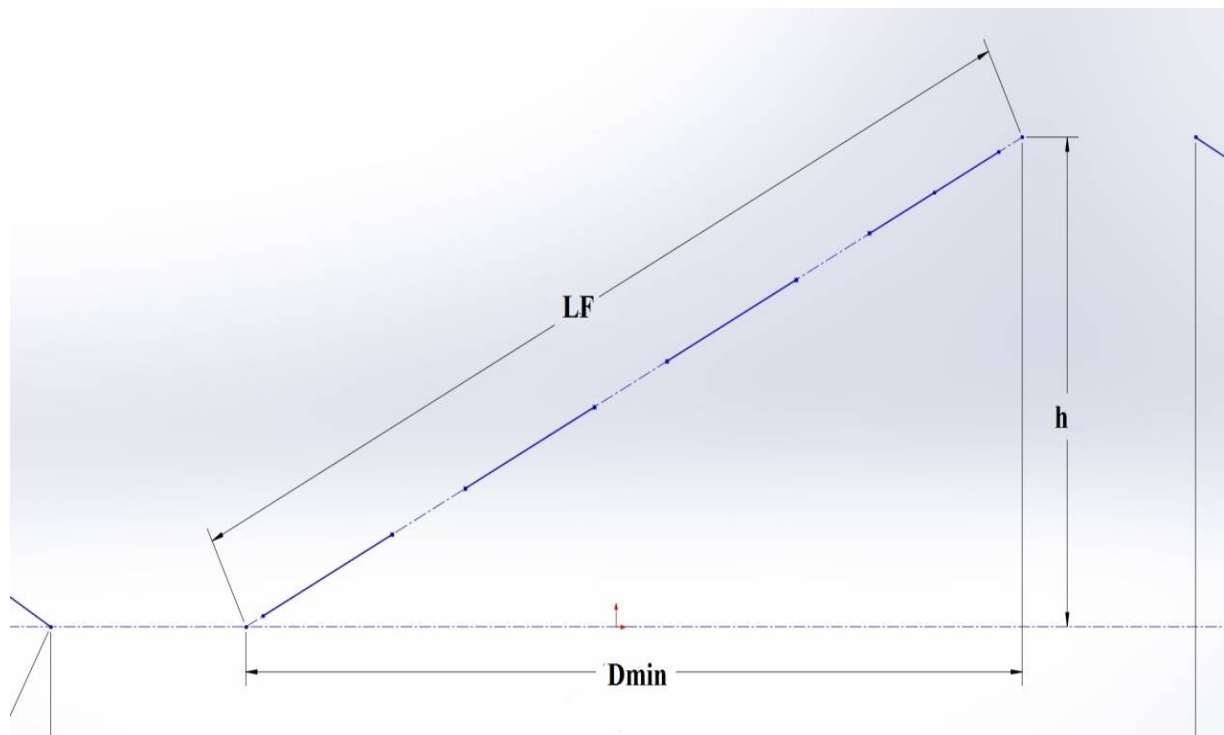
Η συνολική επιφάνεια (L_F) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_F = \frac{D_{min}}{\cos(\alpha)} \quad [4.7]$$

Όπου:

D_{min} = πλάτος συγκεντρωτικού συστήματος
 α = ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης

Πραγματοποιώντας αντικατάσταση της σχέσης (4.7) όπου το πλάτος του συγκεντρωτικού συστήματος $D_{min}=0,987$ και η ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης $\alpha=26,75^\circ$ το μήκος της συνολικής επιφάνειας θα είναι ίσο με $L_F = 1,106m$. Ακολουθεί ο σχεδιασμός του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel και απεικονίζονται οι διαστάσεις της συνολικής επιφάνειας L_F , το ύψος (h) του συστήματος καθώς επίσης και η ελάχιστη απόσταση του μήκους εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 38: Απεικόνιση διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel

Επιπλέον, αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι τα επιμέρους κάτοπτρα έχουν κέντρο το οποίο σχηματίζει την ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης α ($26,8^\circ$) με το επίπεδο και η οποία παραμένει σταθερή κατά το εύρος κλίσης που έχουμε υπολογίσει.

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι βασικοί υπολογισμοί των διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος ακολουθεί ο διαχωρισμός των ανακλώμενων επιφανειών με στόχο όταν βρίσκονται στη μέγιστη και στην ελάχιστη γωνία τοποθέτησής τους να μη παρουσιάζεται το φαινόμενο σκίασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι η *trialerror*, όπου αρχικά τοποθετούνται συγκεκριμένες διαστάσεις και στην συνέχεια παραμετρικά και με την βοήθεια του προγράμματος SolidWorks δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των δύο κατοπτρικών επιφανειών (d_s). Η επιφάνεια της απόστασης των δύο κατοπτρικών επιφανειών (d_s) που βρίσκονται στην υπό γωνία ίση με την ελάχιστη γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς και το πλάτος της κάθε επιμέρους επιφάνειας (d) δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα:

$$d_s = \frac{L_f}{10} \quad [4.8]$$

και

$$d = \frac{L_f}{6} \quad [4.9]$$

Όπου:

L_f : Το μήκος ολόκληρης της επιφάνειας για το σύστημα τύπου Fresnel.

Πραγματοποιώντας αντικατάσταση στην σχέση (4.8) η απόσταση των δύο κατοπτρικών επιφανειών είναι $d_s=0,111\text{m}$, η διαδικασία πραγματοποιείται και για το πλάτος της κάθε επιμέρους επιφάνειας και είναι $d = 0,184\text{m}$.

Ακόμα, στην μικρότερη γωνία κλίσης των επιμέρους κατόπτρων προκύπτει μία απόσταση, από το επίπεδο αναφοράς μέχρι το πάνω ή το κάτω μέρος των κατοπτρικών

επιφανειών συνευθειακά στην κλίση $\varphi_2 = 26,75^\circ$. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

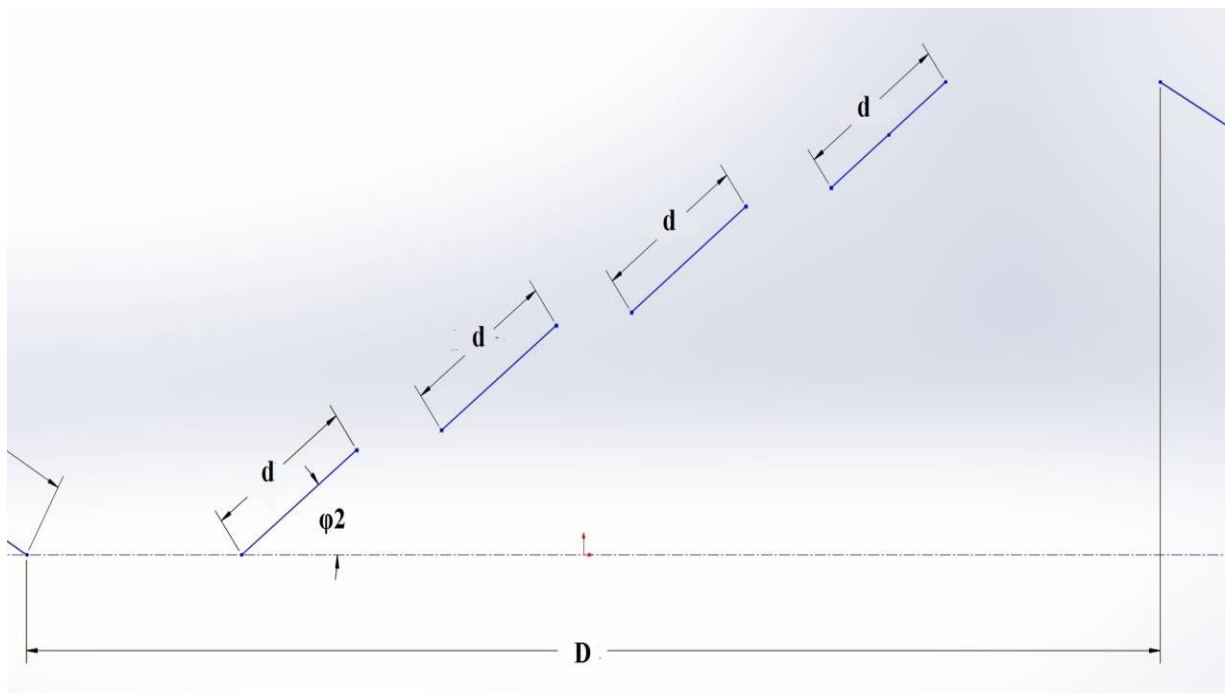
$$d_m = \frac{ds}{4} \quad [4.10]$$

Όπου:

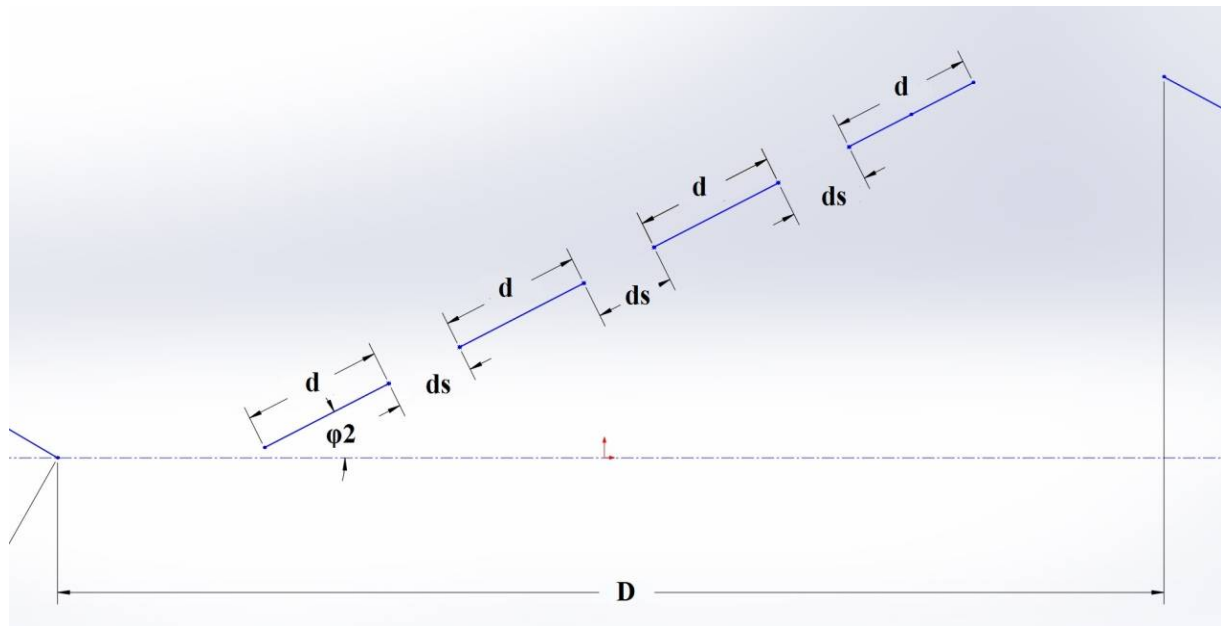
d_s = απόσταση μεταξύ δύο κατοπτρικών επιφανειών υπό γωνία τοποθέτησης $\varphi_2 = 26,75^\circ$

Από την στιγμή που ολοκληρώνεται ο υπολογισμός των διαστάσεων για το μέρος της εγκατάστασης και αφού υπολογίστηκαν οι παράμετροι του συγκεντρωτικού συστήματος δίνεται η δυνατότητα της απεικόνισης σε δισδιάστατη μορφή με την βοήθεια του προγράμματος τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks. Στην συνέχεια παρατίθενται τα Σχήματα 39 και 40 όπου απεικονίζονται τα ολοκληρωμένα σχέδια για τα κατοπτρικά συστήματα των οποίων οι επιμέρους ανακλώμενες επιφάνειες βρίσκονται στην μέγιστη ($\varphi_2 = 36,44^\circ$) και στην ελάχιστη ($\varphi_2 = 26,75^\circ$) κλίση αντίστοιχα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι προαναφερόμενοι υπολογισμοί και ο αντίστοιχος σχεδιασμός τους, αφορούν το συγκεκριμένο συγκεντρωτικό σύστημα που θα τοποθετηθεί στην Κοζάνη. Σε περίπτωση που αλλάξει ο τόπος εγκατάσταση τους, οι υπολογισμοί και ο αντίστοιχος σχεδιασμός θα τροποποιηθεί σύμφωνα με τα δεδομένα της περιοχής που θα επιλεγεί και θα απαιτείται η διαδικασία να πραγματοποιηθεί από την αρχή.



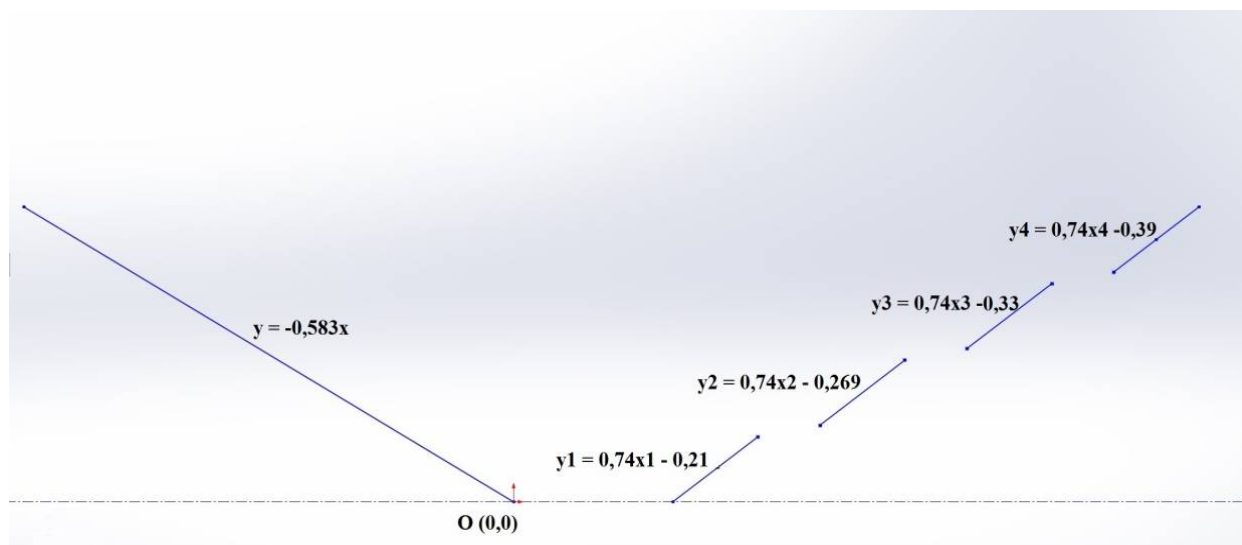
Σχήμα 39: Απεικόνιση διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος στην μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 36,44^\circ$)



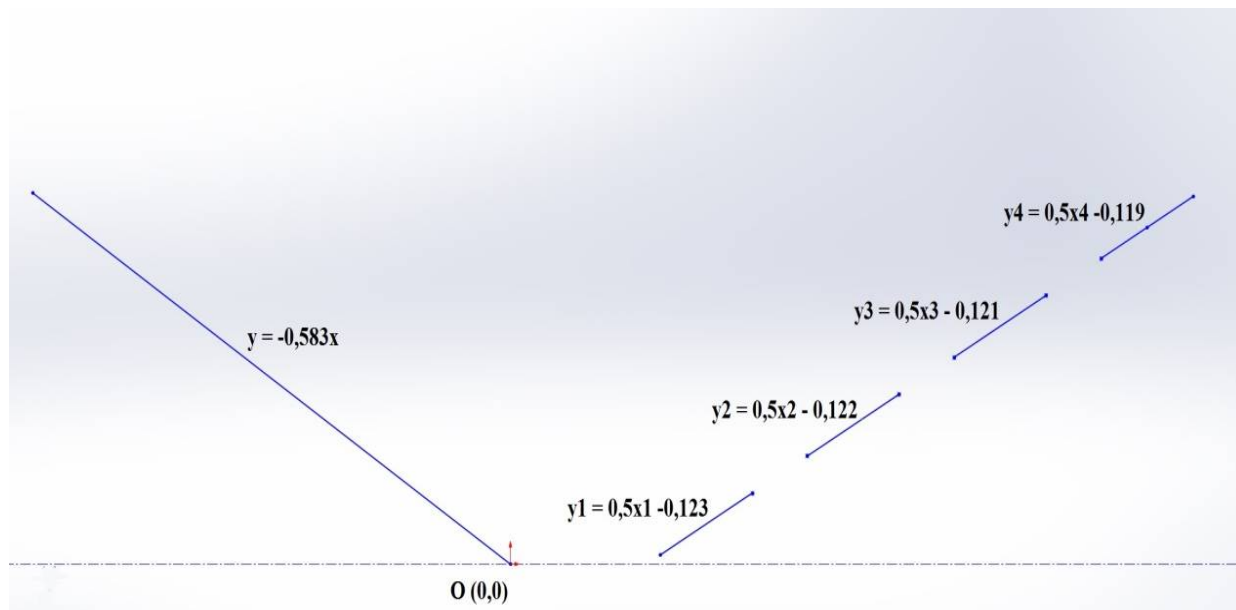
Σχήμα 40: Απεικόνιση διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος στην ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 26,75^\circ$).

4.2.2. Υπολογισμός εξισώσεων ευθείας

Ο υπολογισμός της επιπλέον προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί οι επιμέρους κατοπτρικές επιφάνειες να εκφραστούν και με την μορφή των εξισώσεων ευθείας με στόχο να δίνεται η δυνατότητα της οπτικής απεικόνισής τους. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα δισδιάστατης και τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks βασιζόμενοι στους προαναφερόμενους υπολογισμούς. Επιπλέον, οι εξισώσεις προέκυψαν από συντεταγμένες δύο σημείων σε σχέση με την γραμμή των αξόνων και ακολούθησε η ολοκλήρωση των πράξεων που οδήγησε στον σχεδιασμό των σχημάτων 41 και 42 για μέγιστη και ελάχιστη γωνία κλίσης αντίστοιχα.



Σχήμα 41: Απεικόνιση εξισώσεων ευθείας για την μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 36,44^\circ$)



Σχήμα 42: Απεικόνιση εξισώσεων ευθείας για την ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 26,75^\circ$)

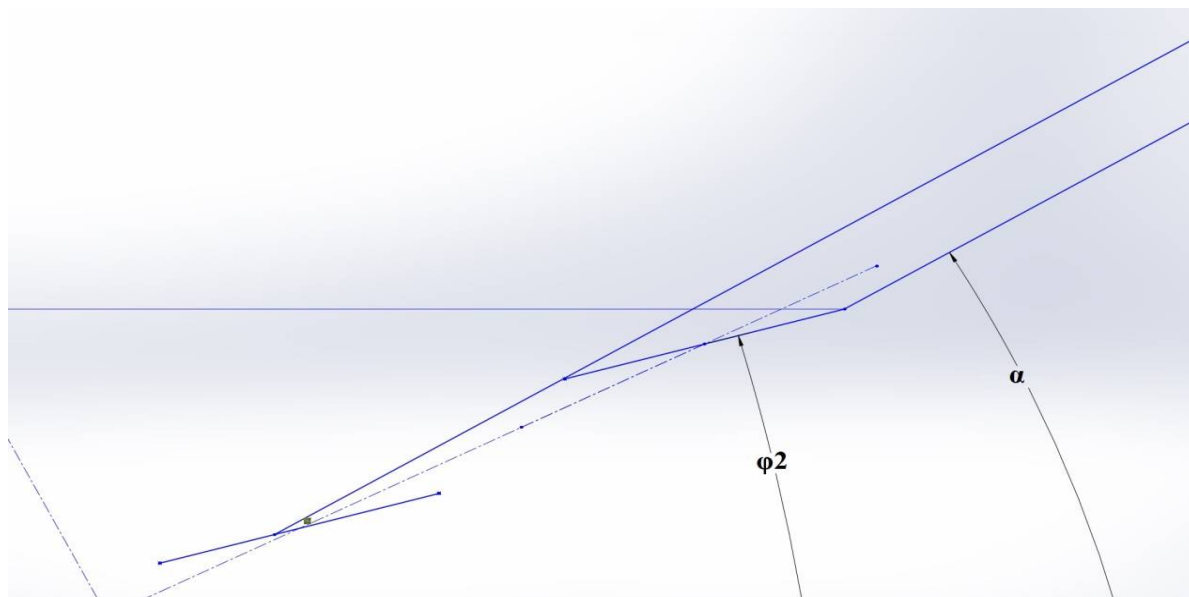
4.2.3. Παρακολούθηση ηλιακών ακτινών (RayTracing)

Η οπτική απεικόνιση της πορείας των ανακλώμενων ηλιακών ακτινών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών αλλά και με τον ορισμό των απαραίτητων παραμέτρων για το συγκεντρωτικό σύστημα τύπου Fresnel. Συνοψίζοντας η διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς και του συγκεντρωτικού συστήματος που πραγματοποιήθηκε στο SolidWorks, μεταφέρεται με τα αντίστοιχα δεδομένα στο πρόγραμμα RayOptics με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος. Με αυτή την διαδικασία δίνεται η δυνατότητα της κατανόησης και του υπολογισμού της συνολικής ενέργειας που θα προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου

4.2.3.1. Προσομοίωση

Σύμφωνα με το πίνακα 4 διαπιστώθηκε ότι η ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης είναι $\alpha=26,75^\circ$, ωστόσο η γωνία ανάκλασης μπορεί να φτάσει έως και $\varphi_2 = 13,37^\circ$. Στην παρούσα μελέτη του συγκεντρωτικού συστήματος η γωνία ανάκλασης θα θεωρηθεί ίση με $\varphi_2 = 18,4^\circ$ και αυτό γιατί διαπιστώθηκε ότι πέρα από αυτή την κλίση το επιμέρους κάτοπτρο που βρίσκεται στην επόμενη κάτω σειρά σκιάζεται από το προηγούμενο. Η διαπίστωση αυτή αποδείχθηκε με την μέθοδο της άτοπου απαγωγής. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας την γωνία τοποθέτησης για τον μήνα Νοέμβριο $\varphi_2 = 15,40^\circ$ η γωνία πρόσπτωσης είναι $\alpha=31,81^\circ$, με την βοήθεια του προγράμματος SolidWorks (Σχήμα 43) διακρίνεται ξεκάθαρα ότι το επόμενο στην σειρά κάτοπτρο σκιάζεται σε μέρος που ξεπερνάει το μισό πλάτος από το προηγούμενο.

Με τα δεδομένα που προέκυψαν η μελέτη της προσομοίωσης πραγματοποιείται για τρεις (3) θέσεις τοποθέτησης, όπου καμία δεν είναι για τον μήνα Δεκέμβριο αφού παρουσιάστηκε το φαινόμενο σκίασης σε μεγάλο βαθμό λόγω της μικρής κλίσης της πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.



Σχήμα 43: Απεικόνιση βαθμού σκίασης επιμέρους κατοπτρικού τμήματος για τον μήνα Νοέμβριο ($\alpha = 30,9^\circ$ και $\varphi_2 = 15,5^\circ$).

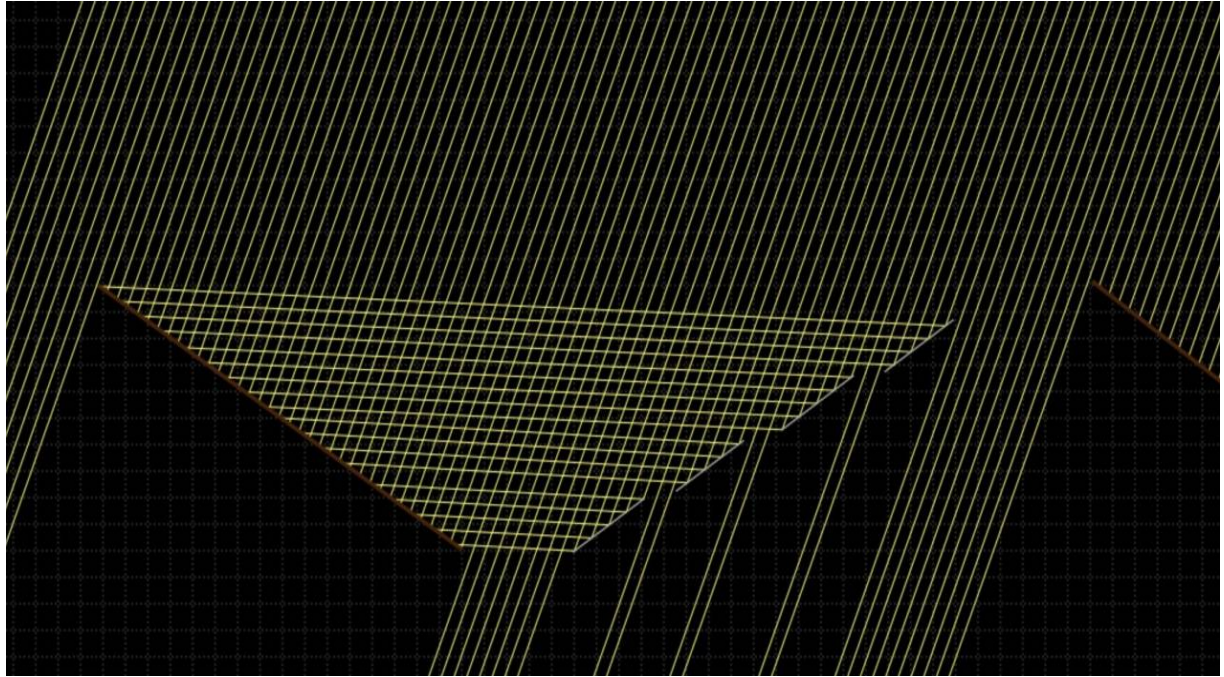
Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης πραγματοποιείται με την επιλογή των τοποθεσιών όπως αυτές καταγράφονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5: Επιλεγμένη θέση τοποθέτησης πραγματοποίησης προσομοίωσης

	Μήνας	Γωνία πρόσπτωσης α ($^\circ$)	Γωνία συστήματος φ_2 ($^\circ$)
Εαρινή ισημερία	Μάρτιο	47,30	23,65
Θερινό ηλιοστάσιο	Ιούνιο	72,87	36,44
Φθινοπωρινή ισημερία	Σεπτέμβριο	51,94	25,97

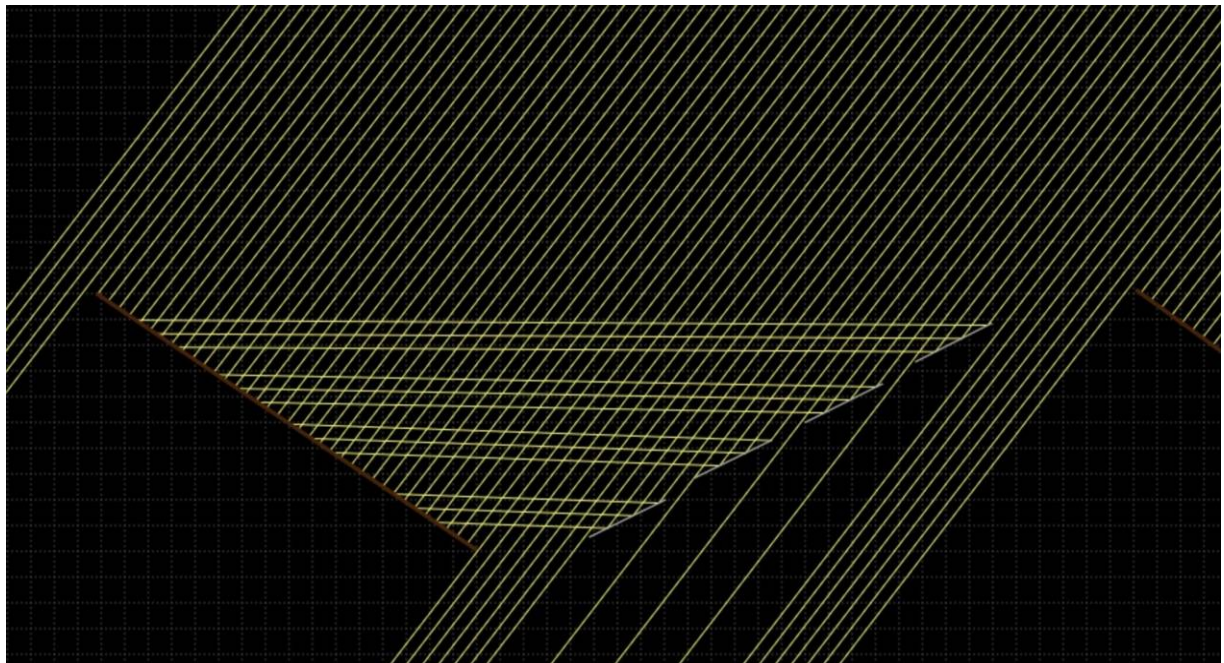
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν θα ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ανάκλασης και διάθλασης διότι δεν δίνεται η δυνατότητα στο πρόγραμμα να υπάρξουν τέτοιου είδους περιορισμοί. Η παρούσα πτυχιακή εργασία λαμβάνει αποτελέσματα απεικόνισης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα για το θερινό ηλιοστάσιο και για τον μήνα Ιούνιο παρουσιάζεται η μέγιστη κλίση ($\varphi_2 = 36,44^\circ$). Επιπλέον, σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο θα πρέπει να υπάρχει και η μέγιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο Σχήμα 44.



Σχήμα 44: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για το θερινό ηλιοστάσιο ($\varphi_2 = 36,44^\circ$).

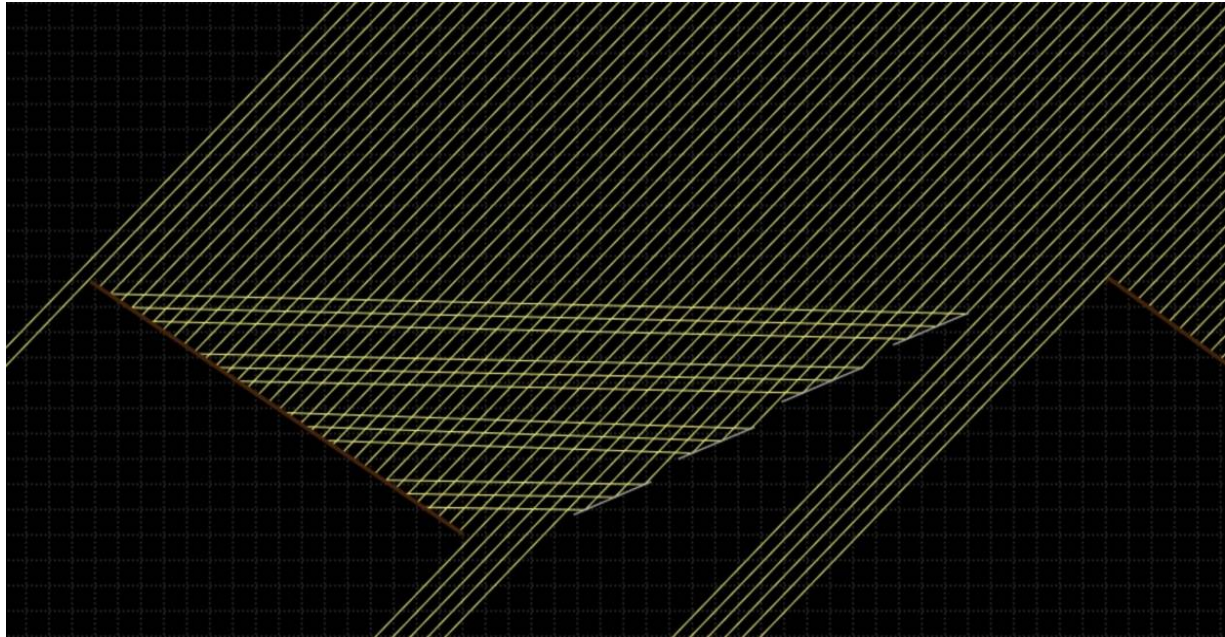
Ακολουθεί η ίδια διαδικασία για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης κατά την φθινοπωρινή ισημερία και τον μήνα Σεπτέμβριο με γωνία πρόσπτωσης $\alpha=51,94^\circ$ και γωνία ανάκλασης του συγκεντρωτικού συστήματος $\varphi_2 = 25,97^\circ$. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο Σχήμα45.



Σχήμα 45: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την φθινοπωρινή ισημερία($\varphi_2 = 25,97^\circ$)

Ακολουθεί και η προσομοίωση για την τελευταία θέση τοποθέτησης που είναι για την

εαρινή ισημερία και για τον μήνα Μάρτιο με γωνία πρόσπτωσης $\alpha=47,30^\circ$ και γωνία ανάκλασης του συγκεντρωτικού συστήματος $\varphi_2 = 23,65^\circ$. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο Σχήμα 46.



Σχήμα 46: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την εαρινή ισημερία($\varphi_2 = 23,65^\circ$).

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι οι ηλιακές ακτίνες που φτάνουν στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με το συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel κατά την θερινή περίοδο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία συγκρινόμενες με αυτές των άλλων δύο περιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πραγματοποίηση και υλοποίηση της μελέτης κατασκευής βασίστηκε πάνω στα δεδομένα αυτής της περιόδου με συνέπεια να προκύπτει η μέγιστη απόδοση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα, απεικονίζουν ότι η κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη θα μπορούσε να δώσει σημαντικά αποτελέσματα για την ποσότητα των ηλιακών ακτίνων αφού παρουσιάζεται σχετικά μεγάλη αύξηση της ποσότητας τους.

4.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΠΑΤΡΑ

Η ίδια διαδικασία θα πραγματοποιηθεί αλλάζοντας την τοποθεσία της συγκεντρωτικής διάταξης από το βόρειο τμήμα της Ελλάδας (Κοζάνη) στο νότιο τμήμα της την Πάτρα. Επιπλέον, το συγκεντρωτικό σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση της μελέτης θα είναι το ίδιο με το ήδη υπάρχον.

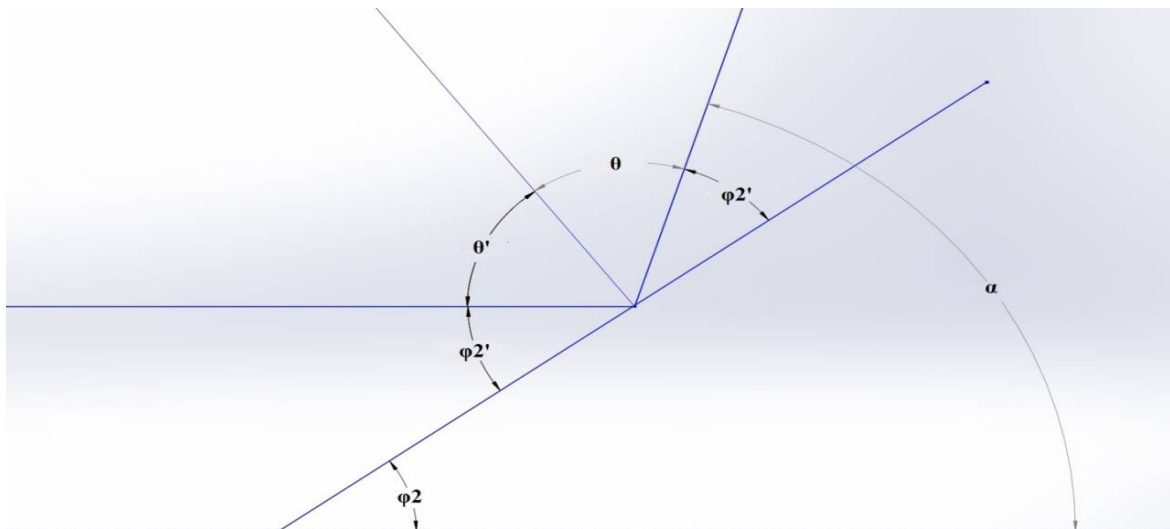
4.3.1. Υπολογισμούς γεωμετρικών στοιχείων

Για τον υπολογισμό των γεωμετρικών στοιχείων, όπως προαναφέρθηκε παίζει σημαντικό ρόλο η τοποθεσία των φωτοβολταϊκών πλαισίων αφού για τους υπολογισμούς απαιτείται το μήκος και πλάτος της περιοχής. Ο πίνακας 2 καταγράφει τα μήκη και πλάτη στα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας.

Στην παρούσα μελέτη τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα είναι τοποθετημένα στην περιοχή της Πάτρας όπου το πλάτος της περιοχής είναι $\varphi=38,25$ και το μήκος αυτής $L=21,73$ (Καπλάνης, 2004). Επιπλέον, επιλέχθηκε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να τοποθετηθούν σε σταθερές βάσεις με συγκεκριμένο προσανατολισμό. Στόχος είναι ο υπολογισμός των γεωμετρικών στοιχείων για την αποφυγή του παράγοντα σκίασης μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αρχικά υπολογίζεται η βέλτιστη γωνία κλίσης (φ_1) των φωτοβολταϊκών πλαισίων από την σχέση (4.1), άρα πραγματοποιώντας αντικατάσταση προκύπτει ότι το $\varphi_1= 28,25^\circ$. Στην συνέχεια υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης του ηλίου (α), τονίζοντας ότι λαμβάνονται οι παράμετροι που δόθηκαν και στην περίπτωση της Κοζάνης δηλαδή ότι θα πρέπει η πρώτη ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει στο πάνω μέρος του κατόπτρου για να αντανakλάται στο πάνω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Για την επίτευξη αυτού απαιτείται οι ανακλώμενες ακτίνες από το κατόπτρο να είναι παράλληλες με το επίπεδο.

Στην περίπτωση της φωτοβολταϊκής διάταξης που μελετάται ο σχηματισμός γωνιών απεικονίζεται στο Σχήμα 47. Η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι ίση με την γωνία ανάκλασης (θ') δηλαδή $\theta=\theta'$. Επιπλέον, οι γωνίες που σχηματίζονται από την προσπίπτουσα (φ_2) και ανακλώμενη (φ_2') ακτινοβολία με το επίπεδο είναι ίσες μεταξύ τους ως εντός εναλλάξ δηλαδή $\varphi_2=\varphi_2'$. Ακόμα η γωνία (α) που σχηματίζεται με το επίπεδο είναι ίση με το άθροισμα αυτών, δηλαδή $\varphi_2+\varphi_2'=\alpha$ και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η γωνία που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του συγκεντρωτικού συστήματος θα είναι ίση με $\varphi_2 = \frac{\alpha}{2}$.



Σχήμα 47: Απεικόνιση γωνιών πρόσπτωσης και ανάκλασης του κατοπτρικού συστήματος

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν και από την αντικατάσταση των σχέσεων προέκυψαν τα αποτελέσματα του πίνακα 6 όπου αφορούν τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης για ολόκληρο το έτος για την τοποθέτηση του συγκεντρωτικού συστήματος στην περιοχή της Πάτρας.

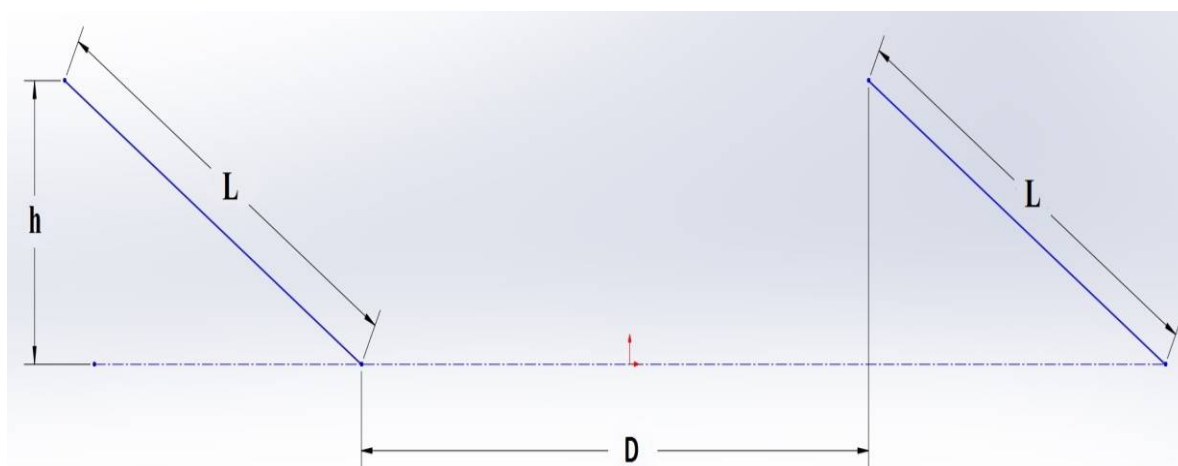
Πίνακας 6: Γωνία πρόσπτωσης (α) της ηλιακής ακτινοβολίας και γωνία του συγκεντρωτικού συστήματος φ_2 για όλο το έτος στην περιοχή της Πάτρας

Μήνας	Ημέρα έτους	Γωνία απόκλισης δ_n (°)	Γωνία πρόσπτωσης α (°)	Γωνία συστήματος φ_2 (°)
Ιανουάριος	17	-20,92	30,83	15,42
Φεβρουάριος	47	-12,95	38,80	19,40
Μάρτιος	75	-2,42	49,33	24,67
Απρίλιος	105	9,41	61,16	30,58
Μάιος	135	18,79	70,54	35,27
Ιούνιος	163	23,15	74,90	37,45
Ιούλιος	197	21,35	73,10	36,55
Αύγουστος	228	13,46	65,21	32,60
Σεπτέμβριος	258	2,22	53,97	26,98
Οκτώβριος	288	-9,60	42,15	21,08
Νοέμβριος	318	-18,91	32,84	16,42
Δεκέμβριος	343	-22,97	28,78	14,39

Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε παράλληλες σειρές, με συνέπεια να απαιτείται να υπολογισθεί η ελάχιστη απόσταση που θα πρέπει να έχουν οι σειρές μεταξύ τους με στόχο την αποφυγή του φαινομένου σκίασης. Το μήκος του φωτοβολταϊκού πλαισίου λαμβάνεται ίσο με $L=1m$.

Ο υπολογισμός του κενού μέρους ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιείται από την σχέση (4.3) και όπου το μήκος του φωτοβολταϊκού είναι $L=1m$ και όπου η βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού είναι $\varphi_1=28,25^\circ$ με αποτέλεσμα το κενό μέρος στις παράλληλες σειρές των φωτοβολταϊκών πλαισίων να είναι $D=1,639m$.

Ακολουθεί ο σχεδιασμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των διαστάσεων του χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος σε σχέση με την φωτοβολταϊκή διάταξη (Σχήμα 48).

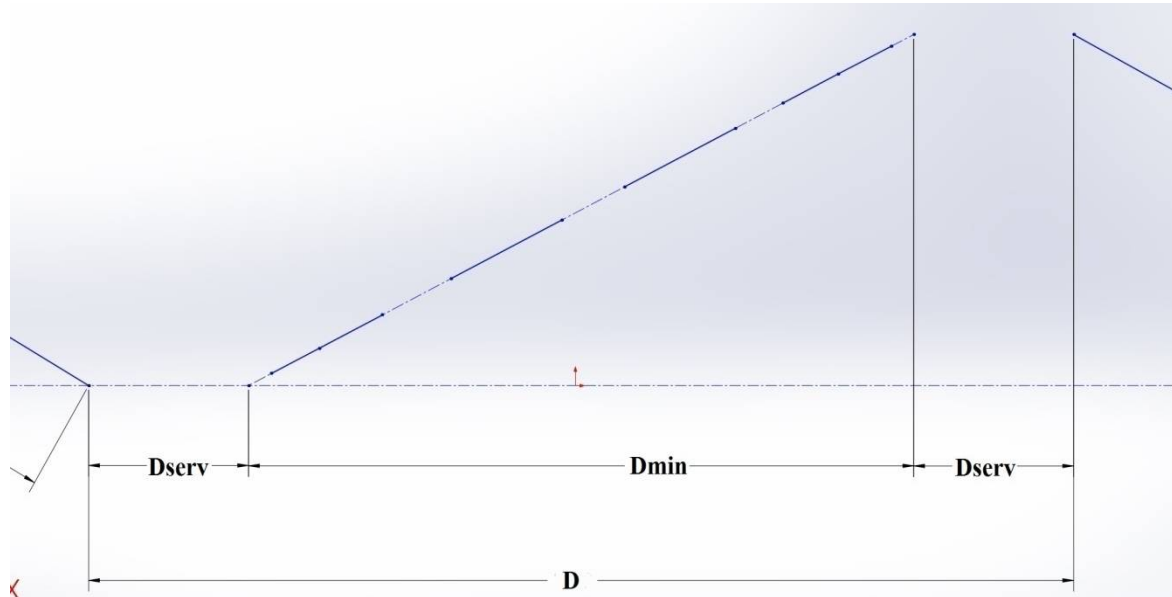


Σχήμα 48: Απεικόνιση διαστάσεων του χώρου τοποθέτησης για το κατοπτρικό σύστημα σε σχέση με την φωτοβολταϊκή διάταξη

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός του κατόπτρου τύπου Fresnel. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι απαιτείται ο χώρος γύρω από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να είναι επαρκής για να την πραγματοποίηση εργασιών συντήρησης και επισκευής. Το μήκος του διάκενου υπολογίστηκε $D=1,64m$, πραγματοποιώντας αντικατάσταση της σχέσης (4.4) το

μήκος εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι $D_{min}=1,092m$. Άρα, σύμφωνα με τα δεδομένα κάνοντας αντικατάσταση της σχέσης (4.5), ο χώρος που απομένει για συντήρηση και ολοκλήρωση εργασιών είναι $D_{serv}=0,55m$, δηλαδή 0,275m από την κάθε πλευρά.

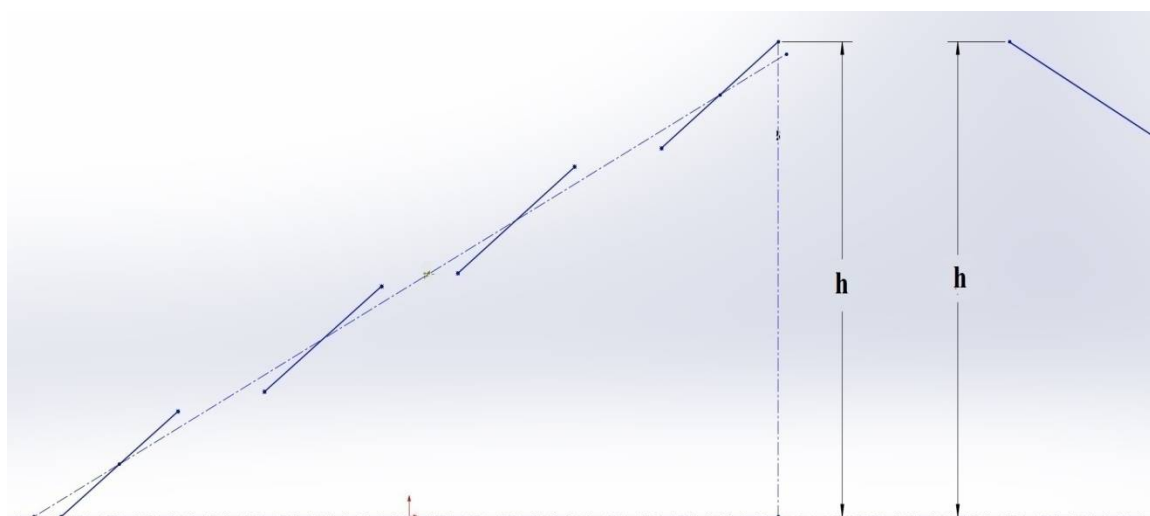
Ακολουθεί ο σχεδιασμός του χώρου τοποθέτησης του κατοπτρικού συστήματος και απεικονίζονται το μήκος και πλάτος των διάκενων καθώς και ο ελεύθερος χώρος για την πραγματοποίηση συντήρησης και υλοποίησης εργασιών επισκευής (Σχήμα 49).



Σχήμα 48: Απεικόνιση διαστάσεων του χώρου τοποθέτησης κατοπτρικού συστήματος

Στην συνέχεια υπολογίζεται το ύψος του κατόπτρου. Το ύψος θα πρέπει να υπολογισθεί όταν η κλίση των κατοπτρικών τμημάτων δίνει την δυνατότητα της ανάκλασης στο πάνω μέρος κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά την διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μέγιστό ύψος. Για μήκος του φωτοβολταϊκού πλαισίου $L=1(m)$ και βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού ίση με $\varphi_1=28,25^\circ$, έτσι κάνοντας αντικατάσταση στην σχέση (4.6) προκύπτει ότι το ύψος είναι $h=0,473m$.

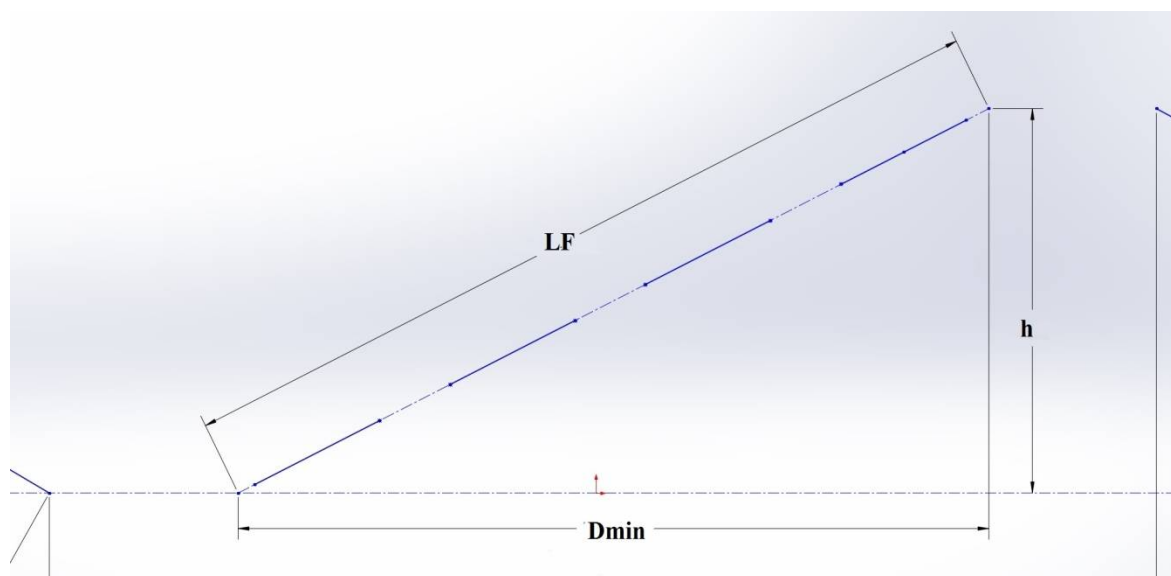
Έπειτα, πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του προαναφερόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος και απεικονίζεται το ύψος που θα πρέπει να έχει το συγκεντρωτικό σύστημα τύπου Fresnel (Σχήμα 49).



Σχήμα 49: Απεικόνιση του ύψους (h) του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel

Τα επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του μήκους της επιφάνειας του συγκεντρωτικού συστήματος. Στόχος είναι η επιφάνεια του συστήματος να διαχωριστεί σε τέσσερα ίσα τμήματα, αφού αρχικά έχει ληφθεί υπόψη το κενό που θα πρέπει να υπάρχει μεταξύ αυτών. Ο υπολογισμός της επιφάνειας πρέπει να πραγματοποιηθεί για την μικρότερη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή όταν βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 6 η μικρότερη γωνία πρόσπτωσης είναι $\alpha = 28,78^\circ$. Άρα, πραγματοποιώντας αντικατάσταση της σχέσης (4.7) και όπου το πλάτος του συγκεντρωτικού συστήματος $D_{\min}=1,09$ και η ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης $\alpha=28,78^\circ$ το μήκος της συνολικής επιφάνειας θα είναι ίσο με $L_F=1,244m$.

Ακολουθεί ο σχεδιασμός του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel και απεικονίζονται οι διαστάσεις της συνολικής επιφάνειας L_F , το ύψος (h) του συστήματος καθώς επίσης και η ελάχιστη απόσταση του μήκους εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πλαισίου (Σχήμα 50).



Σχήμα 50: Απεικόνιση διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel

Επιπλέον, αυτό που θα πρέπει να σημειωθεί είναι ότι τα επιμέρους κάτοπτρα έχουν κέντρο το οποίο σχηματίζει την ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης α ($28,78^\circ$) με το επίπεδο και η οποία παραμένει σταθερή κατά το εύρος κλίσης που έχουμε υπολογίσει.

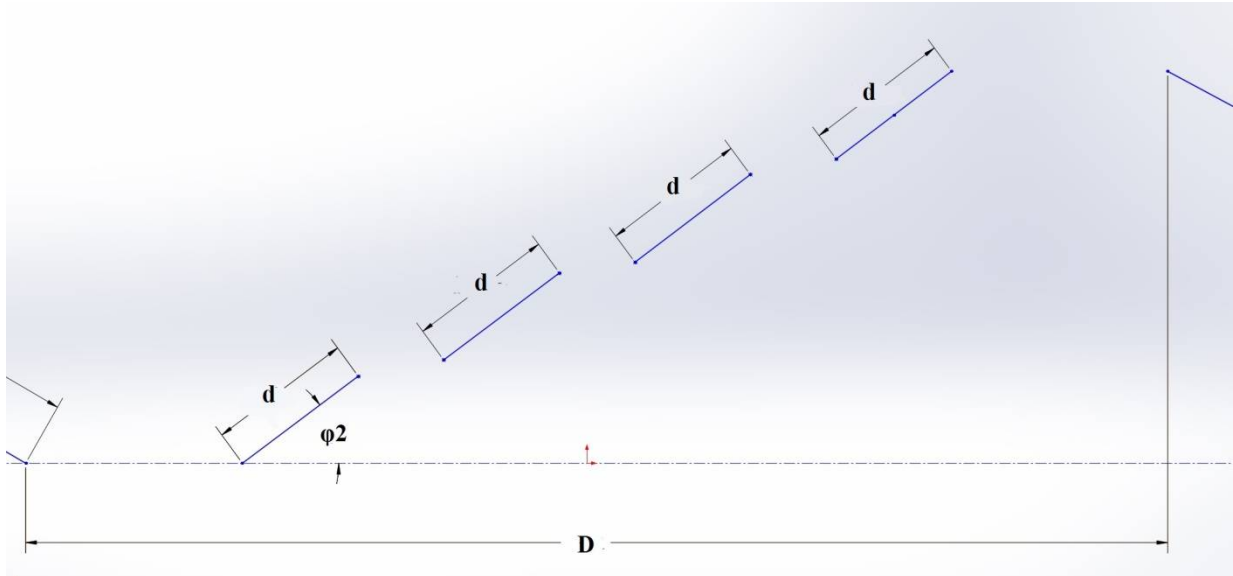
Αφού πραγματοποιήθηκαν οι βασικοί υπολογισμοί των διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος ακολουθεί ο διαχωρισμός των ανακλώμενων επιφανειών με στόχο όταν βρίσκονται στη μέγιστη και στην ελάχιστη γωνία τοποθέτησής τους να μη παρουσιάζεται το φαινόμενο σκίασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι η trialerror, όπου αρχικά τοποθετούνται συγκεκριμένες διαστάσεις και στην συνέχεια παραμετρικά και με την βοήθεια του προγράμματος SolidWorks δίνεται η δυνατότητα του υπολογισμού της βέλτιστης απόστασης μεταξύ των δύο κατοπτρικών επιφανειών (d_s).

Η επιφάνεια της απόσταση των δύο κατοπτρικών επιφανειών (d_s) που βρίσκονται στην υπό γωνία ίση με την ελάχιστη γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, υπολογίζεται από την σχέση (4.8) και κάνοντας αντικατάσταση του μήκους της επιφάνειας του συστήματος τύπου Fresnel $L_F=1,244m$ η επιφάνεια της απόστασης των δύο κατοπτρικών επιφανειών είναι $d_s=0,124m$ και το πλάτος της κάθε επιμέρους επιφάνειας (d) δίνεται από την σχέση (4.9) και είναι $d=0,207m$.

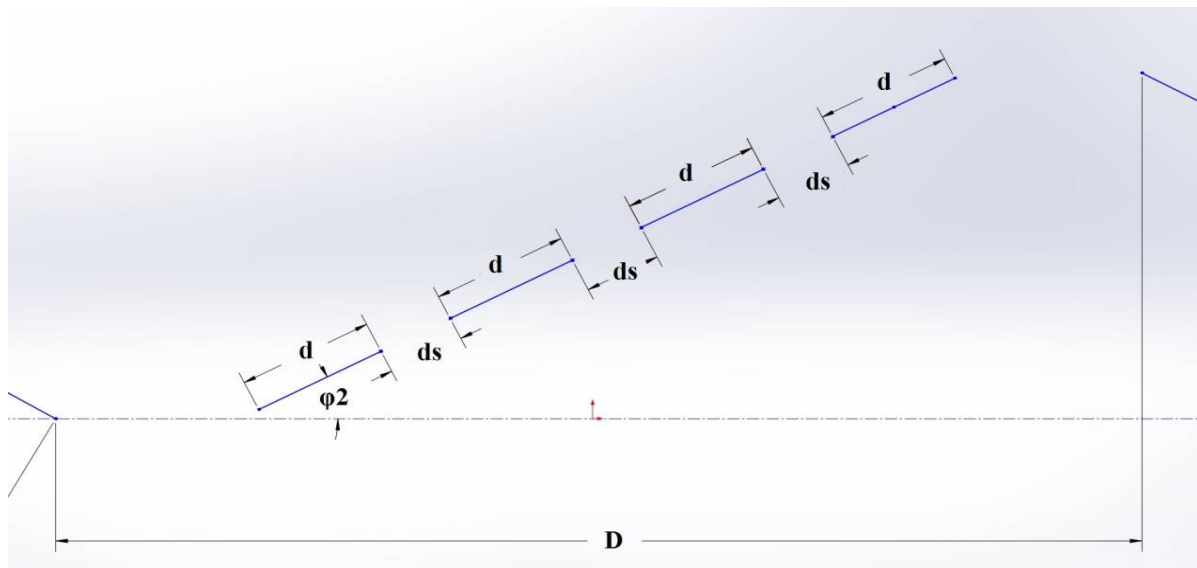
Ακόμα, στην μικρότερη γωνία κλίσης των επιμέρους κατόπτρων προκύπτει μία απόσταση, από το επίπεδο αναφοράς μέχρι το πάνω ή το κάτω μέρος των κατοπτρικών επιφανειών συνευθειακά στην κλίση $\varphi_2 = 28,78^\circ$. Η απόσταση αυτή υπολογίζεται σύμφωνα με

την σχέση (4.10) και υπολογίζεται $d_m=0,031m$.

Από την στιγμή που ολοκληρώνεται ο υπολογισμός των διαστάσεων για το μέρος της εγκατάστασης και αφού υπολογίστηκαν οι παράμετροι του συγκεντρωτικού συστήματος δίνεται η δυνατότητα της απεικόνισης σε δισδιάστατη μορφή με την βοήθεια του προγράμματος τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks. Στην συνέχεια παρατίθενται τα Σχήματα 51 και 52 όπου απεικονίζονται τα ολοκληρωμένα σχέδια για τα κατοπτρικά συστήματα των οποίων οι επιμέρους ανακλώμενες επιφάνειες βρίσκονται στην μέγιστη ($\varphi_2 = 37,45^\circ$) και στην ελάχιστη ($\varphi_2 = 28,78^\circ$) κλίση αντίστοιχα.



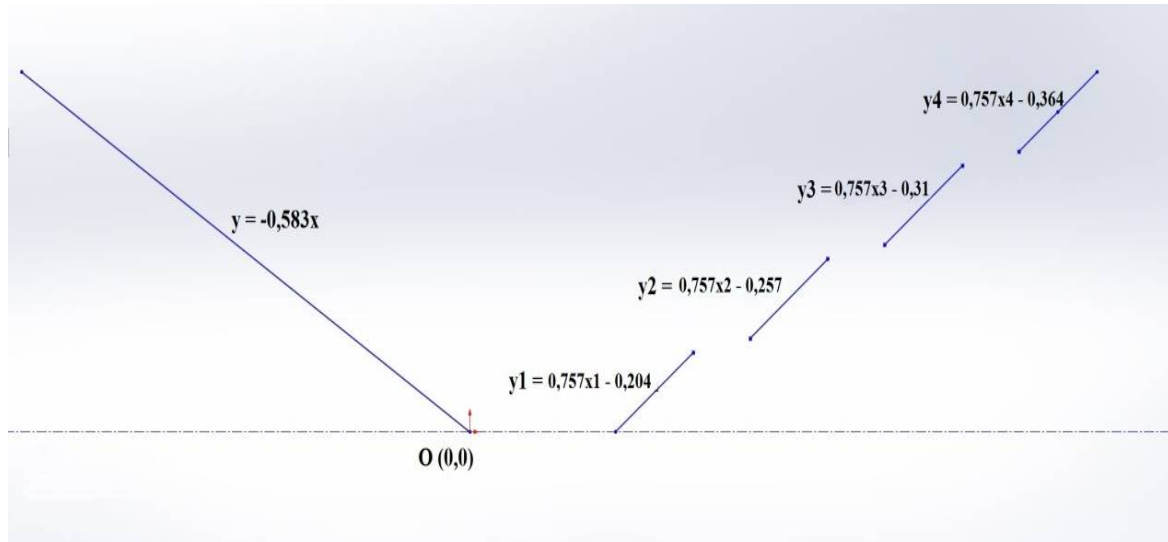
Σχήμα 51: Απεικόνιση διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος στην μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 37,45^\circ$)



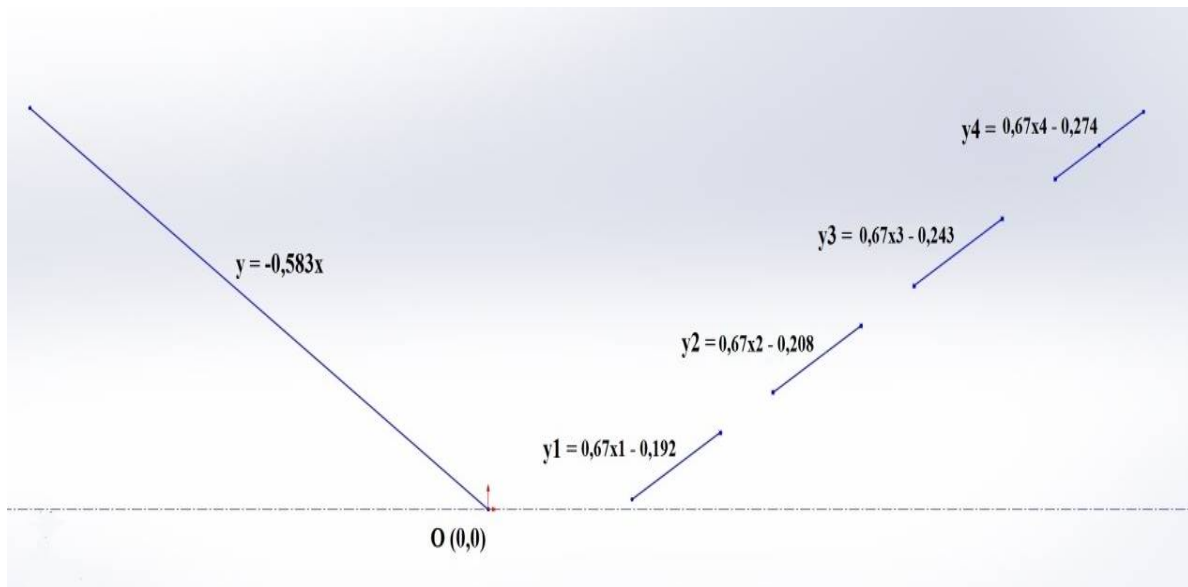
Σχήμα 52: Απεικόνιση των διαστάσεων του συγκεντρωτικού συστήματος στην ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 28,25^\circ$).

4.3.2. Υπολογισμός εξισώσεων ευθείας

Ο υπολογισμός της επιπλέον προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί οι επιμέρους κατοπτρικές επιφάνειες να εκφραστούν και με την μορφή των εξισώσεων ευθείας με στόχο να δίνεται η δυνατότητα της οπτικής απεικόνισής τους. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα δισδιάστατης και τρισδιάστατης σχεδίασης SolidWorks βασιζόμενοι στους προαναφερόμενους υπολογισμούς. Επιπλέον, οι εξισώσεις προέκυψαν από συντεταγμένες δύο σημείων σε σχέση με την γραμμή των αξόνων και ακολούθησε η ολοκλήρωση των πράξεων που οδήγησε στον σχεδιασμό των Σχημάτων 53 και 54 για μέγιστη και ελάχιστη γωνία κλίσης αντίστοιχα.



Σχήμα 53: Απεικόνιση εξισώσεων ευθείας για την μέγιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 37,45^\circ$)



Σχήμα 54: Απεικόνιση εξισώσεων ευθείας για την ελάχιστη κλίση τοποθέτησης ($\varphi_2 = 28,78^\circ$)

4.3.3. Παρακολούθηση ηλιακών ακτινών (RayTracing)

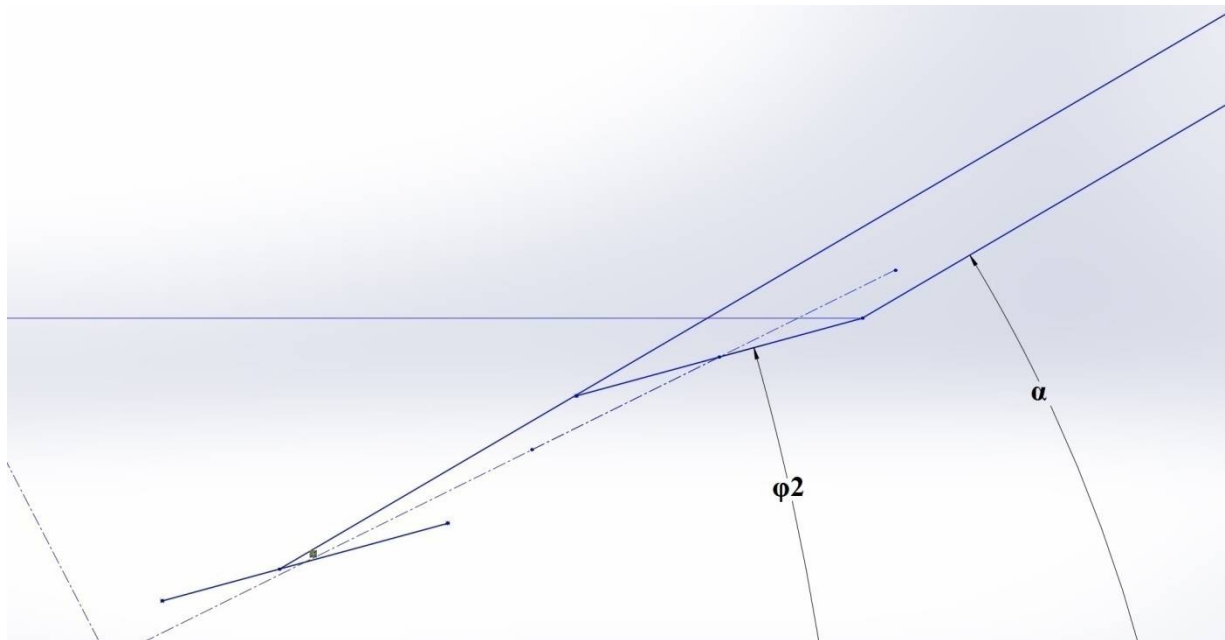
Η οπτική απεικόνιση της πορείας των ανακλώμενων ηλιακών ακτινών μπορεί να

πραγματοποιηθεί με την ολοκλήρωση των παραπάνω υπολογισμών αλλά και με τον ορισμό των απαραίτητων παραμέτρων για το συγκεντρωτικό σύστημα τύπου Fresnel. Συνοψίζοντας η διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς και του συγκεντρωτικού συστήματος που πραγματοποιήθηκε στο SolidWorks, μεταφέρεται με τα αντίστοιχα δεδομένα στο πρόγραμμα RayOptics με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος. Με αυτή την διαδικασία δίνεται η δυνατότητα της κατανόησης και του υπολογισμού της συνολικής ενέργειας που θα προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

4.3.3.1. Προσομοίωση

Σύμφωνα με τον πίνακα 6 η ελάχιστη γωνία πρόσπτωσης είναι $\alpha = 28,78^\circ$ και η γωνία ανάκλασης φτάνει έως και $\varphi_2 = 14,39^\circ$. Ωστόσο, στην μελέτη θα θεωρηθεί η γωνία $\varphi_2=19,4^\circ$ διότι πέρα από αυτή την κλίση το επιμέρους κάτοπτρο που βρίσκεται στην επόμενη κάτω σειρά σκιάζεται από το προηγούμενο. Αυτό αποδεικνύεται στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εις άτοπου απαγωγής. Έστω ότι λαμβάνουμε γωνία τοποθέτησης για τον μήνα Νοέμβριο $\varphi_2=16,42^\circ$ η γωνία πρόσπτωσης τον μήνα αυτό είναι $\alpha=32,84^\circ$ (Σχήμα 51).

Όπως εύκολα διακρίνεται το επόμενο στη σειρά επιμέρους κάτοπτρο σκιάζεται σε μέρος που ξεπερνάει το μισό πλάτος από το προηγούμενο. Με τα δεδομένα που προκύπτουν η μελέτη της προσομοίωσης πραγματοποιείται για τις 3 θέσεις τοποθέτησης και δεν πραγματοποιείται προσομοίωση για τον μήνα Δεκέμβριο εφόσον παρουσιάζεται μεγάλος βαθμός σκίασης λόγω της μικρής κλίσης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.



Σχήμα51: Απεικόνιση βαθμού σκίασης επιμέρους κατοπτρικού τμήματος τον μήνα Νοέμβριο ($\alpha=32,84^\circ$ και $\varphi_2 = 16,42^\circ$)

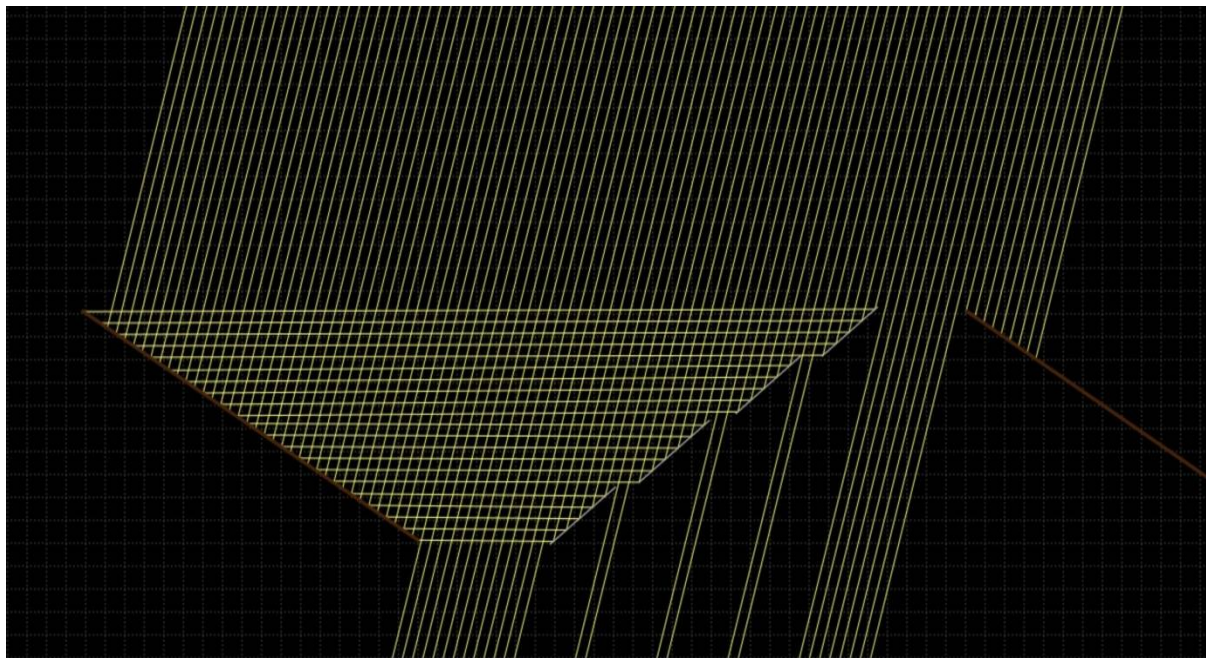
Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης πραγματοποιείται με την επιλογή των τοποθεσιών όπως αυτές καταγράφονται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7: Επιλεγμένη θέση τοποθέτησης πραγματοποίησης προσομοίωσης

	Μήνας	Γωνία πρόσπτωσης α (°)	Γωνία συστήματος φ_2 (°)
Εαρινή ισημερία	Μάρτιο	49,33	24,67
Θερινό ηλιοστάσιο	Ιούνιο	74,90	37,45
Φθινοπωρινή ισημερία	Σεπτέμβριο	53,97	26,98

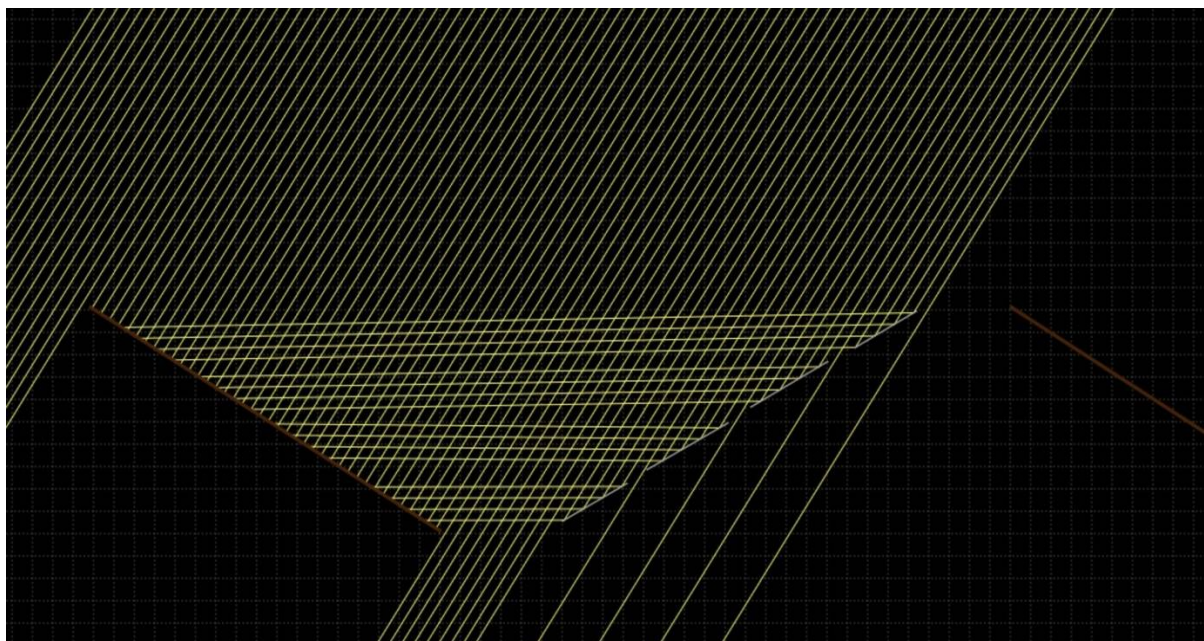
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη δεν θα ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ανάκλασης και διάθλασης διότι δεν δίνεται η δυνατότητα στο πρόγραμμα να υπάρξουν τέτοιου είδους περιορισμοί. Η παρούσα πτυχιακή εργασία λαμβάνει αποτελέσματα απεικόνισης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα για το θερινό ηλιοστάσιο και για τον μήνα Ιούνιο παρουσιάζεται η μέγιστη κλίση ($\varphi_2 = 37,45^\circ$). Επιπλέον, σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο θα πρέπει να υπάρχει και η μέγιστη απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο σχήμα 52.



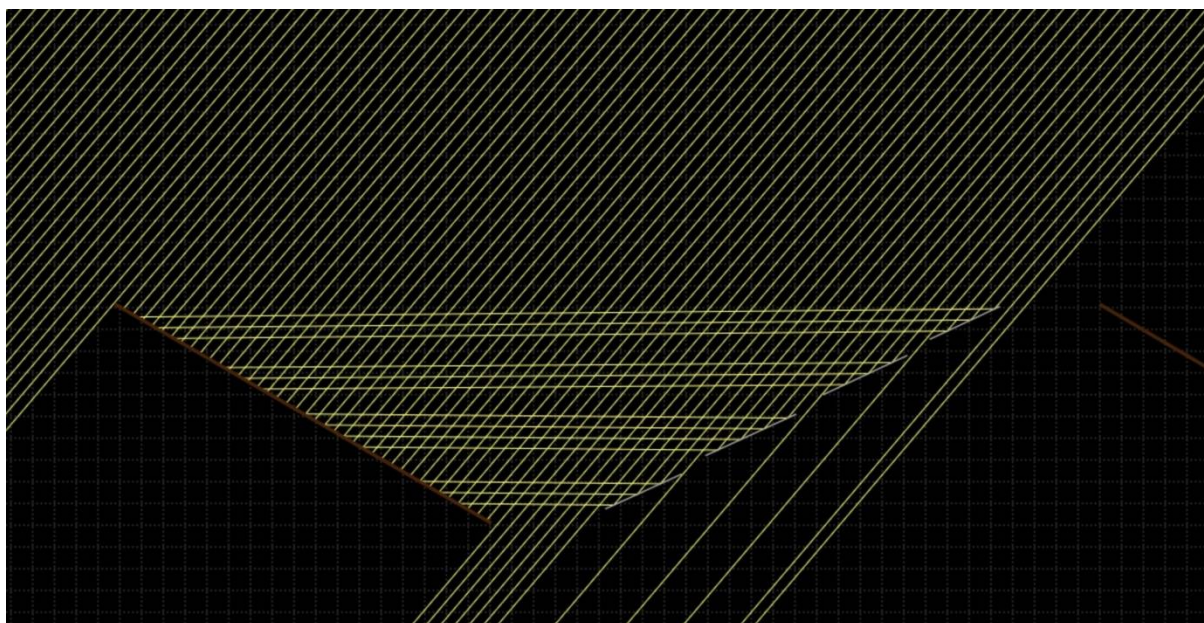
Σχήμα 52: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για το θερινό ηλιοστάσιο ($\varphi_2 = 37,45^\circ$)

Ακολουθεί η ίδια διαδικασία για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης κατά την φθινοπωρινή ισημερία και τον μήνα Σεπτέμβριο με γωνία πρόσπτωσης $\alpha=53,97^\circ$ και γωνία ανάκλασης του συγκεντρωτικού συστήματος $\varphi_2 = 26,98^\circ$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο σχήμα 53.



Σχήμα 53: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την φθινοπωρινή ισημερία ($\varphi_2 = 26,98^\circ$)

Ακολουθεί και η προσομοίωση για την τελευταία θέση τοποθέτησης που είναι για την εαρινή ισημερία και για τον μήνα Μάρτιο με γωνία πρόσπτωσης $\alpha=49,33^\circ$ και γωνία ανάκλασης του συγκεντρωτικού συστήματος $\varphi_2 = 24,67^\circ$. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από το πρόγραμμα RayOptics απεικονίζονται στο σχήμα 54.



Σχήμα 54: Απεικόνιση γωνίας τοποθέτησης συγκεντρωτικού συστήματος για την εαρινή ισημερία ($\varphi_2 = 24,67^\circ$)

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι οι ηλιακές ακτίνες που φτάνουν στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με το συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel κατά την θερινή

περίοδο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία συγκρινόμενες με αυτές των άλλων δύο περιπτώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πραγματοποίηση και υλοποίηση της μελέτης της κατασκευής βασίστηκε πάνω στα δεδομένα αυτής της περιόδου με συνέπεια να προκύπτει η μέγιστη απόδοση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα, απεικονίζουν ότι η κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη θα μπορούσε να δώσει σημαντικά αποτελέσματα για την ποσότητα των ηλιακών ακτινών αφού παρουσιάζεται σχετικά μεγάλη αύξηση της ποσότητας τους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε με σκοπό την συγκριτική μελέτη των φωτοβολταϊκών μονάδων ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικά σύστημα του τύπου Fresnel για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Η μελέτη έγινε για το βόρειο και νότιο τμήμα της Ελλάδας, δηλαδή για την Κοζάνη και την Πάτρα αντίστοιχα.

Αρχικά υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη και στις δύο περιπτώσεις και έγινε αλλαγή μόνο στην τοποθεσία. Ο πίνακας 8 παρουσιάζει τα γεωμετρικά στοιχεία των συγκεντρωτικών διατάξεων όπως αυτά προέκυψαν από τους υπολογισμούς και για την Κοζάνη και για την Πάτρα.

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων γεωμετρικών στοιχείων διάταξης

Στοιχείο	Συμβολισμός	Κοζάνη	Πάτρα
Μήκοςφωτοβολταϊκού πλαισίου	L	1m	1m
Βέλτιστηγωνία	φ_1	30,28°	28,25°
Μήκοςδιάκενου	D	1,48m	1,64m
Κάθετη απόσταση φβ εγκατάστασης	D_{min}	0,987m	1,092m
Υπολειπόμενος χώροςγια εργασίες	D_{serv}	0,493m	0,555
Ύψοςεγκατάστασης	H	0,504m	0,473m
Συνολική επιφάνεια	L_F	1,106m	1,244m.
Απόσταση κατοπτρικών επιφανειών	d_s	0,111m,	0,124m.
Πλάτος επιμέρους επιφάνειας	D	0,184m.	0,207m.
Μέγιστηγωνία κλίσης κατόπτρων	φ_2	36,44°	37,45°
Μικρότερηγωνία κλίσης κατόπτρων	φ_2	26,75°	28,78°

Αυτό που διακρίνεται είναι ότι τα γεωμετρικά στοιχεία παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Η περιοχή της Πάτρας απαιτεί λίγο μεγαλύτερο χώρο εγκατάστασης με στόχο να μην διακρίνεται το φαινόμενο σκίασης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι παράλληλα συνδεδεμένα.

Στην συνέχεια ακλούθησε η οπτική απεικόνιση της πορείας των ανακλώμενων ηλιακών ακτινών η οποία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τους προαναφερόμενους υπολογισμούς αλλά και τις παραμέτρους που λήφθηκαν για το συγκεντρωτικό σύστημα Fresnel. Τα δεδομένα αυτά τοποθετήθηκαν στο πρόγραμμα RayOptics με στόχο την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος και τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Αρχικά επιλέχθηκαν οι ελάχιστες γωνίες πρόσπτωσης, που παρατηρούνται τον μήνα Νοέμβριο για την Κοζάνη και την Πάτρα. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση και διαπιστώθηκε ότι και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται έντονο το φαινόμενο σκίασης με συνέπεια να απαιτείται η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν τρεις θέσεις, οι οποίες είναι η εαρινή ισημερία και μήνας Μάρτιος, θερινό ηλιοστάσιο και μήνας Ιούνιος, φθινοπωρινή ισημερία και μήνας Σεπτέμβριος, για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης. Τονίζεται ότι δεν πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για τον μήνα Δεκέμβριο εφόσον παρουσιάζεται μεγάλος βαθμός σκίασης λόγω της μικρής κλίσης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.

Με το πρόγραμμα RayOptics διαπιστώθηκε ότι για το θερινό ηλιοστάσιο παρουσιάζεται η μέγιστη απόδοση τους φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς και η αύξηση της ισχύος. Ομοίως και

για τις θέσεις στη φθινοπωρινή ισημερία και στην εαρινή ισημερία παρουσιάζεται μια αξιόλογη αύξηση της ισχύος. Άρα γίνεται άμεσα κατανοητό ότι οι ηλιακές ακτίνες που φτάνουν στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο με την βοήθεια του συγκεντρωτικού συστήματος τύπου Fresnel κατά την θερινή περίοδο παρουσιάζουν μεγαλύτερη ομοιομορφία συγκρινόμενες με αυτές των άλλων δύο τοποθεσιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πραγματοποίηση και υλοποίηση των μελέτης της κατασκευής βασίστηκε πάνω στα δεδομένα αυτής της περιόδου με συνέπεια να προκύπτει η μέγιστη απόδοση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα, απεικονίζουν ότι η κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη θα μπορούσε να δώσει σημαντικά αποτελέσματα για την ποσότητα των ηλιακών ακτινών αφού παρουσιάζεται σχετικά μεγάλη αύξηση της ποσότητάς τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανδρικόπουλος Φ., 2014, Ανάπτυξη οργανικών ημιαγωγών με τεχνικές κενού και χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων τους, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πτυχιακή Εργασία, Πάτρα

Αντωνίου Ι., 2014, Οργανικά φωτοβολταϊκά και σύγκριση με την τεχνολογία πυριτίου, Πτυχιακή Εργασία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.

Αραπόγλου Β., 2016, Παραμετρική σχεδίαση και μελέτη συνθετών επιφανειών αντικειμένων με μορφή κάτοπτρου, Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη

Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ., Δημάκης Α., Καρταλίδης Α. και Τσιλιγκιρίδης Γ., 2015, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Δυναμικό και τεχνολογίες, Εκδόσεις σοφία, Αθήνα

Βιδιαδάκης Α., Μπινιάρης Α., Κανελλόπουλος Χ., Χατζαράκης Γ., 1999, Ηλεκτρολογία, Εκδόσεις Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα.

Ζαφειράκης Π., 2014, Χρήση ανακλαστήρων σε συστήματα ηλιακής ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μεταπτυχιακή Εργασία Πάτρα.

Θεοδώρου Γ., 2013, Μελέτης εφαρμογής φωτοβολταϊκού συστήματος 10KW σε οροφή κτιρίου, Εκδόσεις Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Πτυχιακή Εργασία, Ηράκλειο

Καγκαράκη Κ., 1992, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία,Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, εκδόσεις συμμετρία, Αθήνα.

Καπλάνης, 2004,Ηπιες μορφές Ενέργειας - Ηλιακή Μηχανική, Τόμος II Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα

Καπλάνης, 2004,Ηπιες μορφές Ενέργειας - Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τόμος III Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα

Κατσαπάρκης Δ. και Μονιάκης Μ., 2015, Θέρμανση – Ψύξη – Κλιματισμός, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, <http://hdl.handle.net/11419/6167> Αθήνα

Ματθαίου Ν. και Μιχαλοδημητρακάκης, 1991, Εισαγωγή στην ειδική θεωρία της σχετικότητας, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Νικολακοπούλου Α., 2012, Μελέτη υβριδικού φωτοβολταϊκού θερμικού ηλιακού (pv/t) συστήματος θέρμανσης νερού, Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών, Μεταπτυχιακή εργασία, Πάτρα.

Παυλίδης Α., 2014, Εγκατάσταση Φ/Β πάρκου 100KW με κυρτά κάτοπτρα,Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη

Πελέκη Μ-Δ, 2013, Οργανικά φωτοβολταϊκά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική εργασία, Αθήνα.

Ταταρίδης Δ., 2014, Φωτοβολταϊκά - ηλιακή ενέργεια - εφαρμογές στη Ναυτιλία, Ακαδημία Εκδόσεις Εμπορικό Ναυτικό Α.Ε.Ν Μακεδονίας

Τετελένης Σ., 2011, Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διπλωματική εργασία, Αθήνα.

Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Γιαννούλης Π., Παπαευθυμίου Σ. και Ζαφειράτος Σ., 1996, Θερμικοί ηλιακοί συλλέκτες με επίπεδα κάτοπτρα ρυθμιζόμενης κλίσης, 5^ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ για τις Ήπιες μορφές ενέργειας, Αθήνα

Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Σουλιώτης Ε., Κουτσούμπας Π. και Μωραΐτης Ε., 2002, Συμβολή των επιπέδων κατόπτρων στις ηλιακές εγκαταστάσεις, 7^ο Εθνικού Συνεδρίου ΙΗΤ, Πάτρα

Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., Τσελέπης Σ., Σουλιώτης Ε. και Τονι J.K., 2005, Σχεδίαση και οικονομικά στοιχεία για υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα, 3^ο Εθνικού Συνεδρίου RENES-ΕΜΠ, Αθήνα.

Σταθόπουλος Ι και Σταθόπουλος Κ., 2015, Υβριδικά φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα νερού, Εκδόσεις Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας, Πτυχιακή Εργασία, Πάτρα

Ξενογλωσση Βιβλιογραφία

Faiman D., Zemel A., 1988, Low profile solar water heaters: The mirror booster problem revisited, J. Solar Energy, 40, p. 385-390

Filipa Reis, Miguel C. Brito, Victoria Corregidor, Jojo Wemans, Gianfranco Sorasio, 2010, Ageing of Standard PV Module when Integrated in a V-trough Concentration System.

Mats Rönnelid, Björn Karlsson, Peter Krohn and Johan Wennerberg, 2000, Booster reflectors for PV modules in Sweden.

Tonui JK and Tripanagnostopoulos Y, 2007, Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvement. Solar Energy 81: 498-511

Tripanagnostopoulos Y., Souliotis M. and Nousia Th., 2001, Proc. Int. Conf. Ecological Protection of Planet Earth, Vol II, pp 775-782, Xanthi, Greece

Tripanagnostopoulos Y., 2002 CPC reflectors – Fresnel deflector solar thermal system, Cologne

Tripanagnostopoulos Y. and Souliotis M., 2005, Booster Reflector Contribution to Performance Improvement of Solar Collectors, Int. Conf. WREC 2005, Aberdeen, Scotland

Tripanagnostopoulos Y., 2008, Novel designs of building integrated concentrating photovoltaics». Int Conf. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, PVSEC, Valencia, Spain.

Tripanagnostopoulos Y., 2009, Building integrated concentrating photovoltaics, International Conference CISBAT 2009, Lausanne, Switzerland.

Tripanagnostopoulos Y., Chemisana D., Rosell J.I. and Souliotis E., 2010, "New CPV Systems with Static Reflectors", AIP Conference Proceedings, 1277, pp. 199-202, (2010). 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems: CPV-6 Freiburg, Germany.

Tripanagnostopoulos Y., 2012, Building Integrated Renewable Energy Systems, Presentation at Summer School Innovation Week on Renewable Energy Systems on PV systems engineering & the other R.E.S. and the Entrepreneurship spirit, Patra,

Sangani C.S., Solanki C.S., 2006, Experimental evaluation of V-trough (2 suns) PV concentrator system using commercial PV modules.

SolidWorks Corp, user's Manual, 2014, Dassault Systems SolidWorks Corporation, MA, USA

Ray Optics Simulation, open source software

Διαδίκτυο – Ιστότοποι

Ροδόπουλος Κ., 2015, Κλιματική Αλλαγή, <http://entaxi.webnode.gr>

Κόρκης, 2008, Ήλιος και ενέργεια <http://kpe-kastor.kas.sch.gr/>

Μοναχός Γ., 2014, Ηλιακή ενέργεια, <http://www.monachos.gr/>

Wikipedia Συλλογικό εγκυκλοπαιδικό εγχείρημα <http://el.wikipedia.org/wiki>

Είδη Φωτοβολταϊκών συστημάτων <http://www.energotechniki.gr/>

Φωτοβολταϊκά στοιχεία <http://www.selasenergy.gr>