



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
Εφαρμοσμένα Συστήματα Trackers



ΔΙΔΑΣΚΩΝ
Μηνάς Αλεξιάδης

ΕΡΓΑΣΙΑ
του φοιτητή
Παπαδόπουλου Λάμπρου

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	3
Τα φωτοβολταϊκά «κομμάτια του παζλ»	3
Κανόνες τοποθέτησης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών	4
Τοποθέτηση πάνελ και επίδραση σκίασης.....	4
Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ	6
Συστήματα σταθερών βάσεων	7
Συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (trackers)	10
Συστήματα σύγχρονων trackers της αγοράς	14
Βιβλιογραφία-Πηγές	20

Εισαγωγή

Οι **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας** (ΑΠΕ) κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος σε παγκόσμια κλίμακα, λόγω των διαφόρων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας (φυσικά καύσιμα όπως πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο κ.α.), με κυρίαρχα από αυτά να είναι πως οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, καθώς και πιο φιλικές προς το περιβάλλον. Μερικά παραδείγματα ΑΠΕ είναι η αιολική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια, βιομάζα, ενέργεια από κύματα, ηλιακή ενέργεια.

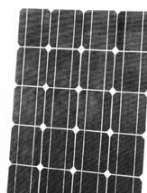
Για την εκμετάλλευση των παραπάνω ήπιων μορφών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το πώς η **ηλιακή ενέργεια** ως η ήπια μορφή ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάμεσα στις άλλες τεχνολογίες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι και η **φωτοβολταϊκή τεχνολογία**, η οποία κερδίζει ευρεία αποδοχή ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου χωρίς να βλάπτει το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα φωτοβολταϊκά στον παραγωγικό μηχανισμό.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα στοιχεία που συντελούν ένα Φ/Β σύστημα και παρουσιάζονται οι τρόποι τοποθέτησης και εγκατάστασης τους, καθώς και η σύνδεσή τους με το δίκτυο.

Τα φωτοβολταϊκά «κομμάτια του παζλ»

Ένα **Φ/Β στοιχείο**, ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται, μπορεί να δώσει DC τάση από 0.5 έως 1 V με συνήθη ισχύ περίπου 3 W. Συνεπώς, για παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυττάρων, καταφεύγοντας σε εν παραλλήλω και εν σειρά συνδεσμολογία. Όσο μεγαλύτερη η ένταση ακτινοβολίας, τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα, ενώ, αντίθετα, όσο υψηλότερη η θερμοκρασία της κυψέλης, τόσο μικρότερη η τάση.

- Συστοιχία φωτοβολταϊκών κυττάρων συντελούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (εικόνα 1). Το **Φ/Β πλαίσιο** (PV module), αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας.

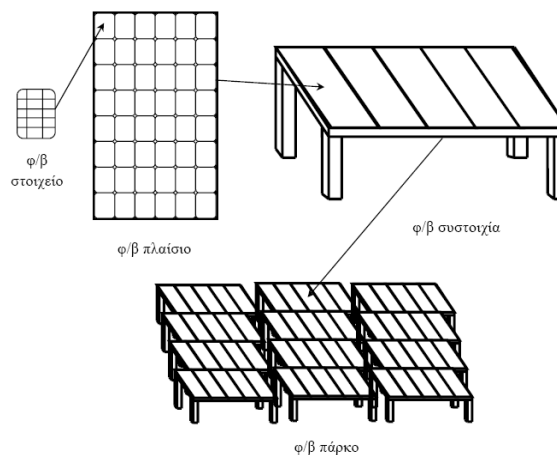


Εικόνα 1: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

- Ακολουθεί το **φωτοβολταϊκό πάνελ** (PV panel), το οποίο αποτελείται από ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε Φ/Β εγκατάσταση
- Η **φωτοβολταϊκή συστοιχία** (PV array), απεικονίζεται στην εικόνα 2. Είναι μία ομάδα από Φ/Β πλαίσια ή panels, με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, διαμορφώνουν ένα **Φ/Β πάρκο**.



Εικόνα 2: Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) συντελούν ένα Φ/Β πάρκο



Εικόνα 3: Εικονική αναπαράσταση Φ/Β «κομματιών»

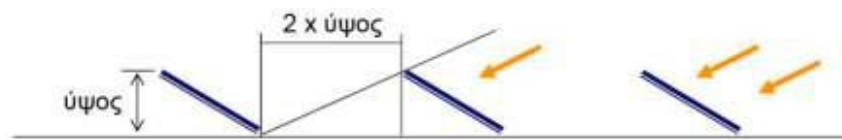
Κανόνες τοποθέτησης και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών

Τοποθέτηση πάνελ και επίδραση σκίασης

Για τη μέγιστη απολαβή ενέργειας, τα πάνελ είναι απαραίτητο να τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό με κλίση η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Για τα ελληνικά δεδομένα, μία τυπική μέση χαρακτηριστική κλίση είναι αυτή των **30 μοιρών**. Ωστόσο, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ενεργειακή απολαβή, «αναγκάζοντας» τα φωτοβολταϊκά πάνελ να ακολουθήσουν

καθημερινώς την πορεία του ήλιου από ανατολή προς δύση με μεταβλητή κλίση, ώστε να λαμβάνεται υπόψη και η θέση του ήλιου στον ορίζοντα.

Αναφορικά με τη **σκίαση**, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η εγκατάσταση να βρίσκεται σε χώρο στον οποίο απουσιάζουν εμπόδια. Ειδικά, προκαλείται μερική ή ολική απώλεια δημιουργίας φωτορεύματος. Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων (π.χ. δένδρα, κτίρια, στύλοι κλπ) ή από παροδικά (και μάλλον στοχαστικού χαρακτήρα) φαινόμενα (π.χ. σύννεφα). Για την αποφυγή σκιάσεων σειρών φωτοβολταϊκών πάνελ μεταξύ τους, ένας πρακτικός κανόνας τοποθέτησης είναι ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια του ύψους της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4 (για συστήματα σταθερής βάσης).

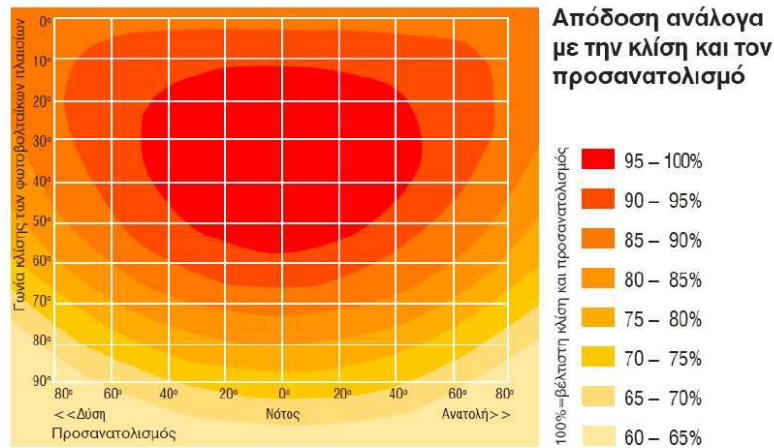


Εικόνα 4: Χωροθέτηση σειρών πάνελ

Η **ενεργειακή απολαβή** από τα φωτοβολταϊκά πάνελ εξαρτάται προφανώς και από τα κλιματολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης. Για παράδειγμα, είναι προφανές ότι φωτοβολταϊκά πάνελ του ίδιου κατασκευαστή τοποθετημένα ακριβώς με τον ίδιο τρόπο θα δίνουν διαφορετική παραγωγή στη Βόρεια απ' ό,τι στη Νότια Ελλάδα, όπου επικρατούν διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η αναγραφόμενη ισχύς κάθε πάνελ (peak power, W_p) αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις επικρατούσες συνθήκες.

Μία μέση τιμή ενεργειακής απολαβής είναι $1150 - 1500 \text{ kWh/kW}_p$ ετησίως, με τις μεγαλύτερες τιμές να καταγράφονται στην Κρήτη και τα Δωδεκάνησα. Ο υπολογισμός αυτός προσανξάνεται κατά περίπου $25 - 40\%$ κατά μέσο όρο με τη χρησιμοποίηση συστημάτων ανίχνευσης της πορείας του ήλιου (trackers).

Ωστόσο, ένα συχνό πρόβλημα αποτελεί ο υπολογισμός της απόδοσης όταν υπάρχει **απόκλιση από τις ιδανικές συνθήκες προσανατολισμού και κλίσης**. Το φαινόμενο αυτό συναντάται συνήθως σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε κτίρια όπου η επιφάνεια χωροθέτησης είναι δεδομένου προσανατολισμού και κλίσης. Αντίθετα, σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών επί εδάφους υπάρχει συνήθως αρκετός χώρος ώστε να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες. Στις περιπτώσεις αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν οι εικόνες 5 και 6:



Εικόνα 5: Βέλτιστος προσανατολισμός

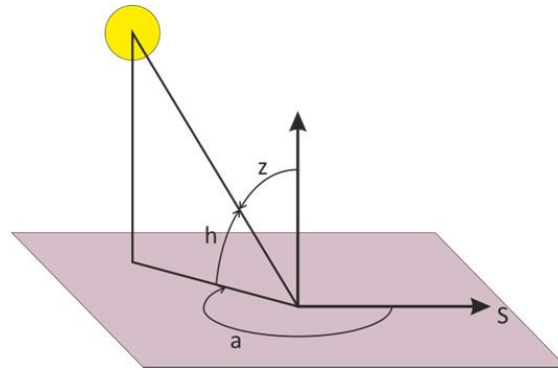
Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	0 °	30 °	90 °
Ανατολικός - Δυτικός	90	85	50
Νοτιοανατολικός- Νοτιοδυτικός	90	95	60
Νότιος	90	100	60
Βορειοανατολικός- Βορειοδυτικός	90	67	30
Βόρειος	90	60	20

Εικόνα 6: Βέλτιστος προσανατολισμός

Τρόποι στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ

Η ηλιακή ακτινοβολία για ένα σημείο του εδάφους είναι μεταβλητή κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της συνεχώς μεταβαλλόμενης θέσης του ήλιου σε σχέση με τον εκάστοτε παρατηρητή. Μετρώντας την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, αυτή αυξάνει από την ανατολή, μεγιστοποιείται κατά τις 12:00 το μεσημέρι και μετά μειώνεται μέχρι τη δύση του ήλιου. Το γιατί συμβαίνει αυτό είναι εύκολα αντιληπτό. Όταν σε μία ηλιόλουστη μέρα παρατηρήσουμε τη σκιά ενός αντικειμένου (π.χ. ενός βιβλίου που κρατάμε στα χέρια μας) το εμβαδό της σκιάς του στο έδαφος είναι μέγιστο όταν το κρατήσουμε κάθετα στη διεύθυνση των ακτινών του ήλιου, ενώ είναι ελάχιστο όταν το κρατήσουμε παράλληλα. Έτσι λοιπόν, όταν βάλουμε κάπου σταθερά ένα πάνελ κατά τη διάρκεια της μέρας, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς εξόδου του διαφοροποιείται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ακτινών του ήλιου.

Πιο συγκεκριμένα, ο ήλιος σε κάθε στιγμή έχει ορισμένες συντεταγμένες, οι οποίες μετρώνται όπως φαίνεται στην εικόνα 7:



Εικόνα 7: Συντεταγμένες ήλιου

Η γωνία h είναι η γωνία του ύψους του ήλιου, μετρούμενη από τον ορίζοντα. Η γωνία z είναι η γωνία ζενίθ, μετρούμενη από την κάθετο του επιπέδου στο όπου βρισκόμαστε. Τέλος, η γωνία a είναι το αζιμούθιο του ηλίου, μετρούμενο από το Νότο, με θετική την ωρολογιακή φορά. Λόγω της μεταβολής της γωνίας της γης σε σχέση με τον ήλιο (η ίδια αιτία που δημιουργεί και την εναλλαγή των εποχών), η διαδρομή του ήλιου και η σχετική του κίνηση σε σχέση με τη γη, διαφέρει από μέρα σε μέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, για τον Ελλαδικό χώρο, κατά την οριακή περίπτωση στις 22 Δεκεμβρίου ο ήλιος να ανατέλλει από τις -60° και να δύει στις $+60^\circ$, έχοντας μέγιστο ύψος περίπου 30° κατά τις 12:00. Το καλοκαίρι, και συγκεκριμένα στις 22 Ιουνίου, ανατέλλει από τις -120° και δύει στις $+120^\circ$ έχοντας φτάσει σε ύψος περίπου 80° στις 12:30.

Τα Φ/Β πάνελ συνήθως εδράζονται επί εδάφους (ή αλλού) με δύο τρόπους:

- Σε **βάσεις σταθερής κλίσης** ως προς την οριζόντιο, συνήθως αναφερόμενες ως «σταθερές βάσεις»
- Σε **βάσεις επί διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου** αναφερόμενες συνήθως ως συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή «ηλιοπαρακολουθητές» ή **trackers**

Συστήματα σταθερών βάσεων

Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον **απλούστερο** και **οικονομικότερο** τρόπο έδρασης Φ/Β πάνελ. Ουσιαστικά, οι βάσεις πρέπει να προσανατολιστούν έτσι ώστε να παράγεται το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Επομένως, εφόσον η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη κατά τις ώρες του μεσημεριού, οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στα πάνελ κατά το μεσημέρι. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6, η βέλτιστη σταθερή αυτή κλίση είναι οι 30° με νότιο προσανατολισμό. Η κλίση αυτή, όπως έχει αναφερθεί, θεωρείται ως μία ικανοποιητική μέση τιμή για τα ελληνικά δεδομένα. Προφανώς, η τιμή αυτή είναι κάτι σα «χρυσή τομή» για την ετήσια λειτουργία ενός Φ/Β. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ιδανική κλίση για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι μικρότερη από ότι για τους χειμερινούς.

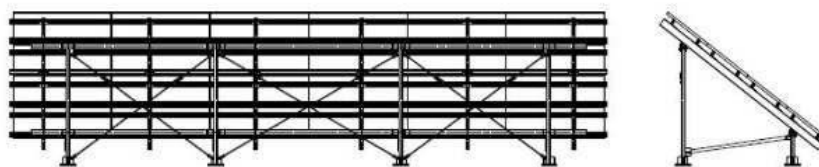
Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ). Η κατασκευή τους πρέπει σε κάθε περίπτωση να παρέχει επαρκή μηχανική αντοχή, ακόμα και σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Οι βάσεις τοποθετούνται επί του εδάφους είτε με **σκυροδέτηση** είτε απευθείας με **εδαφόμεληξη**. Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρι (δηλαδή σε όλη τη σειρά των βάσεων) από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε σε πέλματα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η εδαφόμεληξη γίνεται συνήθως σε βάθη τυπικά του 0.5 – 1.5 μέτρα, όπου τοποθετούνται πάσσαλοι, επί των οποίων στη συνέχεια εδράζεται η βάση. Η σκυροδέτηση αποτελεί ακριβότερη λύση, ωστόσο παρέχει μεγαλύτερη στατική αντοχή στις βάσεις.

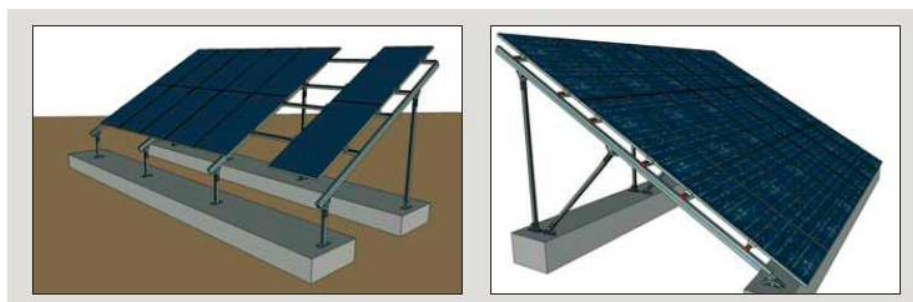
Επιπλέον, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στη χρήση παρελκόμενων υλικών όπως βίδες ή συνδέσμους Φ/Β πάνελ, καθώς θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή οξειδώσεων ή ηλεκτρόλυσης. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται μέριμνα για τη δυνατότητα όδευσης καλωδίων καθώς και για τη **στήριξη πινάκων ή αντιστροφέων**.

Οι σταθερές βάσεις αποτελούνται συνήθως από τεμάχια τα οποία συναρμολογούνται επί το έργο. Κάθε τεμάχιο χαρακτηρίζεται από μέγιστη επιφάνεια τοποθέτησης, η οποία συνήθως υπολογίζεται λαμβάνοντας κάποιες μέσες τιμές διαστάσεων πάνελ (τυπικά 1.6x1 για κρυσταλλικά πάνελ). Τα πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν ανά απλή (μονή) σειρά ή, συνηθέστερα, σε διπλή σειρά ή ακόμη και σε τριπλή ή τετραπλή σειρά. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτησής τους είτε κατά τη μικρή διάσταση (portrait) είτε κατά τη μεγάλη διάσταση (landscape). Η ακριβής χωροθέτηση εξαρτάται από τη μορφολογία του διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης και τις διαστάσεις αυτού.

Στις εικόνες 8-13 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες σταθερές βάσεις:



Εικόνα 8: Τυπική σταθερή βάση στήριξης



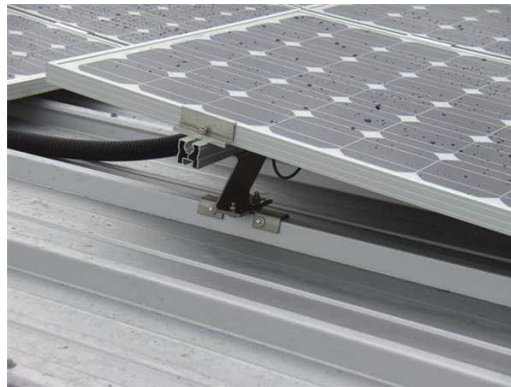
Εικόνα 9: Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε δοκάρι από μπετόν



Εικόνα 10: Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε πέλμα από μπετόν



Εικόνα 11: Παράδειγμα εδαφόμεληξης βάσεων (ταυτόχρονη στήριξη πίνακας-αντιστροφείας)



Εικόνα 12: Σταθερές βάσεις σε οροφή κτιρίου



Εικόνα 13: Σταθερές βάσεις για σκεπές

Σημειώνεται ότι υφίστανται και **αρθρωτές σταθερές βάσεις** οι οποίες όμως έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν βάσεις, των οποίων ο προσανατολισμός είναι νότιος, με δυνατότητα ρύθμισης από 25° έως 75° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η ρύθμιση γίνεται κάθε μήνα με βάση τη μηνιαία βέλτιστη κλίση της εκάστοτε περιοχής. Ένα Φ/Β πάρκο με αρθρωτές σταθερές βάσεις φαίνεται στην εικόνα 14:



Εικόνα 14: Τοποθέτηση Φ/Β συλλεκτών με χειροκίνητη ρύθμιση της κλίσης στην οριζόντιο

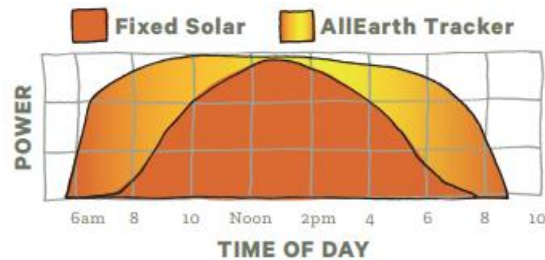
Συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (trackers)

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα συστήματα που αποτελούνται από σταθερές βάσεις είναι μεν μια ικανοποιητική, πολλές φορές, λύση, όχι όμως και η βέλτιστη. Η συνεχής παρακολούθηση της πορείας του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας κίνησης των βάσεων των πάνελ κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα συστήματα που επιτυγχάνουν ιχνηλάτηση της πορείας του ήλιου είναι μεταλλικές κατασκευές, οι οποίες αποτελούνται από ένα σύνολο μηχανισμών. Οι μηχανισμοί αυτοί στρέφουν κατά τη

διάρκεια της ημέρας τα Φ/Β που εδράζονται σε αυτά, όπως κάνουν τα άνθη ενός ηλίανθου.

Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου, ή ηλιοπαρακολουθητές ή trackers χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων, παρέχοντας ωστόσο, αυξημένες αποδόσεις κατά μέσο όρο της τάξης του 25 – 40%.

Η διαφορά στην παραγωγή ενέργειας αποτυπώνεται στην εικόνα 15:

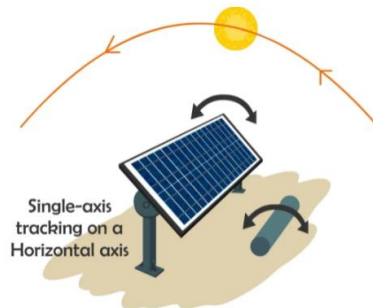


Εικόνα 15: Παραγωγή Φ/Β σταθερής βάσης συγκριτικά με tracker στη διάρκεια της ημέρας, πηγή [8]

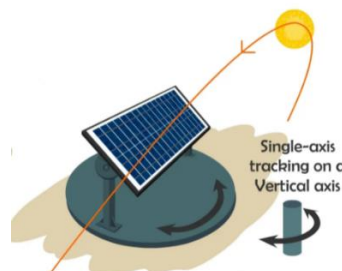
Παρατηρείται ότι με σύστημα παρακολούθησης επιτυγχάνεται υψηλή παραγωγή ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια της ηλιοφάνειας για μια τυπική ανοιξιιάτικη ημέρα (6:30πμ – 6:30μμ).

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Συστήματα μονού άξονα (single axis):** Στα συστήματα αυτά η κίνηση αφορά μόνο έναν άξονα, συνήθως αυτόν της Ανατολής-Δύσης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20 – 30% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

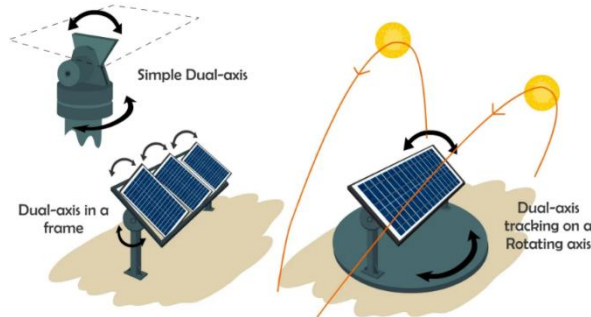


Εικόνα 16: Σύστημα μονού άξονα (οριζόντιου)



Εικόνα 17: Σύστημα μονού άξονα (κατακόρυφου)

- b) **Συστήματα διπλού άξονα (dual axis):** Στα συστήματα αυτά, εκτός από την κίνηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης, είναι δυνατή και η ρύθμιση κλίσης ως προς την οριζόντιο. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 25 – 40% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων. Αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή από άποψη απόδοσης ενός Φ/Β.



Εικόνα 18: Σύστημα διπλού άξονα

Τα μέσα που επιτυγχάνουν την κίνηση στα συστήματα αυτά είναι συνήθως ηλεκτρομηχανικά ή ηλεκτρουδραυλικά. Επομένως, για τα συστήματα με trackers είναι απαραίτητη η παροχή ισχύος για τη λειτουργία των μηχανισμών και άρα, αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από **ιδιοκαταναλώσεις**. Για λόγους κυρίως οικονομικούς, η παροχή αυτής της απαιτούμενης για ιδιοκατανάλωση ενέργειας προτείνεται να γίνεται από το δίκτυο, χωρίς όμως αυτό να είναι απόλυτο. Η μηχανική κίνηση των αξόνων είναι απεριοδική. Ενδεικτική τιμή είναι μία κίνηση ανά 10 λεπτά.

Υπάρχουν δύο τρόποι ανίχνευσης πορείας του ήλιου. Ο πρώτος πλαισιώνεται στη λογική των **ηλιακών αισθητήρων**, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω λογισμικού, από **αστρονομικά δεδομένα**, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και η πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πάνελ, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης. Εκεί δύναται να συνδεθεί και ο αντιστροφέας, ή εάν αυτό δεν είναι εφικτό, πραγματοποιείται η αναχώρηση των καλωδίων προς το σημείο όπου βρίσκονται οι inverter.

Λόγω των παραπάνω, είναι αντιληπτό πως το ύψος των κατασκευών είναι σχετικά υψηλό (από 2.5 έως 12 μέτρα). Το ύψος της κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας των πάνελ. Σήμερα, συστήματα ιχνηλάτησης κατασκευάζονται για να φέρουν ισχύ πάνελ που κυμαίνεται από 2 – 3 kW_p έως περίπου 33 kW_p .

Λόγω του σημαντικού μεγέθους της κατασκευής των trackers, η μηχανική στήριξή τους είναι σχετικά απαιτητική. Προκειμένου να εξασφαλισθεί στατική αντοχή, οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα σημαντικού όγκου (από 2 – 3 έως και περίπου 20 – 30 κυβικά μέτρα). Ακόμη, απόρροια του σημαντικού μεγέθους των κατασκευών trackers (κυρίως λόγω ύψους), αυξάνονται και οι απαιτήσεις στο χώρο συγκριτικά με ένα σύστημα σταθερών βάσεων περίπου 1.5 – 2 φορές, έτσι ώστε να

αποφεύγονται καταστάσεις σκίασης. Επιπλέον, το μέγεθος των trackers τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Για το λόγο αυτό, είναι δυνατή η χρήση ενός ανεμόμετρου και εάν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια μέγιστη επιτρεπτή τιμή, τότε ενεργοποιείται ο μηχανισμός «οριζοντίωσης» των επιφανειών των πάνελ για κάποιο χρονικό διάστημα, για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5 – 6 *Bf*. Κατά συνέπεια, είναι αντιληπτή η σημασία των περιβαλλοντικών συνθηκών, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος με trackers. Ακόμη ένα μειονέκτημα των συστημάτων με trackers έναντι αυτών με σταθερές βάσεις είναι η συχνότερη συντήρηση που απαιτούν λόγω λίπανσης των αξόνων.

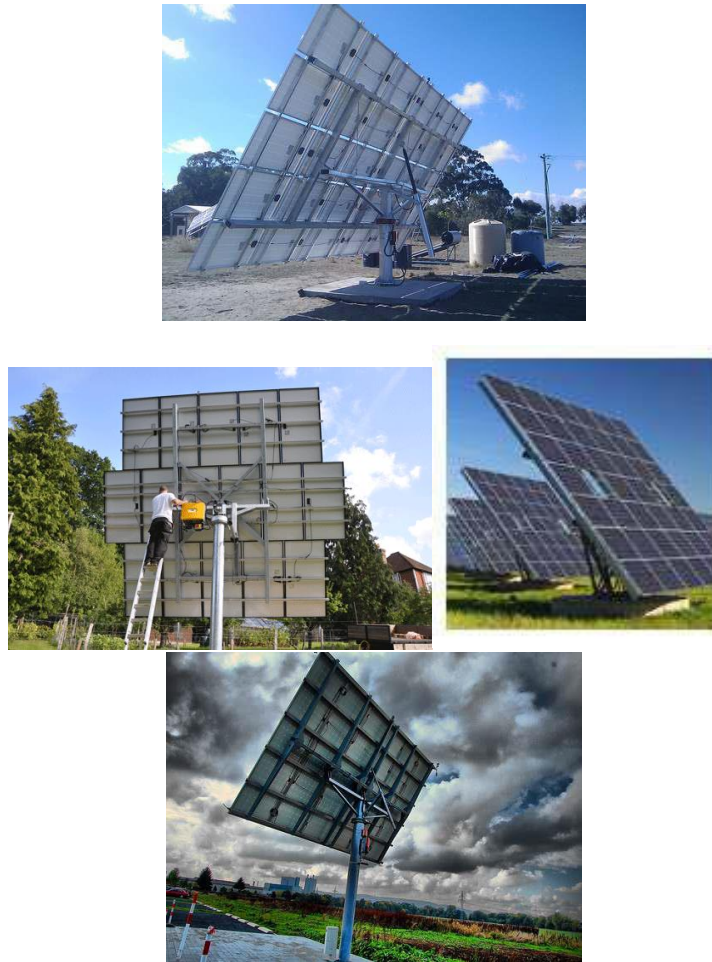
Επιπλέον στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την μελέτη και εγκατάσταση συστημάτων ιχνηλάτησης:

- Τα συστήματα που περιλαμβάνουν λειτουργίες παρακολούθησης, όπως αυτές που αναφέρθηκαν, χρήζουν συντήρησης λόγω των μηχανισμών κίνησής τους. Σε κάποιες περιπτώσεις, η απώλεια δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη για επαναπρογραμματισμό του λογισμικού του συστήματος κίνησης.
- Λόγω του σημαντικού τους ύψους, είναι απαραίτητη η έκδοση οικοδομικής άδειας και όχι έγκρισης εργασιών μικρής κλίμακας, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το γεγονός αυτό, αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει το χρόνο υλοποίησης της κατασκευής του σταθμού.
- Επιπλέον, λόγω του σημαντικού ύψους, η εκτέλεση διάφορων εργασιών γίνεται δυσκολότερη σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων (όπως για παράδειγμα η αντικατάσταση ή ο καθαρισμός ενός πάνελ).

Παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες διατάξεις ιχνηλάτησης πορείας του ήλιου στις εικόνες 19 και 20:



Εικόνα 19: Διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου μονού άξονα



Εικόνα 20: Διατάξεις ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου διπλού άξονα

Συστήματα σύγχρονων trackers της αγοράς

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν κάποια από τα πιο σύγχρονα tracking συστήματα της αγοράς, από την ιταλική εταιρία **Soltigua**⁹, η οποία μελετά, κατασκευάζει και εμπορεύεται αποκλειστικά συστήματα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Οι τεχνολογίες αυτές εφαρμόζονται τόσο στα **φωτοβολταϊκά συστήματα** (τα οποία εξετάζονται και στην παρούσα εργασία), όσο και στα συστήματα αξιοποίησης της θερμικής ενέργειας για την κίνηση μιας γεννήτριας ή άλλων λειτουργιών.

Τα τελευταία, είναι ουσιαστικά θερμοηλεκτρικά συστήματα και ο αγγλικός όρος που τα περιγράφει ονομάζεται **Concentrated Solar Power (CSP)**. Ο τρόπος λειτουργίας είναι παρεμφερής, όχι όμως ίδιος με αυτόν των Φ/Β συστημάτων. Μέσω καθρεπτικών μέσων, συλλέγεται το ηλιακό φως και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Ένα παράδειγμα είναι να κινεί μια θερμική μηχανή που συνδέεται σε μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα συστήματα που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν «έξυπνους» trackers για Φ/Β.

1) Σύστημα iTracker WL

Το σύστημα αυτό αποτελεί σύστημα μονού άξονα (ρύθμιση στην οριζόντιο). Μπορεί να εξασφαλίσει ετήσια παραγωγή ενέργειας μέχρι και 30% περισσότερη από αυτή που θα παραγόταν μέσω σταθερών βάσεων.



Εικόνα 21: Σύστημα iTracker WL

Είναι δυνατή η ρύθμιση σε σχεδόν συνεχές εύρος γωνιών (ακρίβεια 1°), με χρήση αλγορίθμου μέσω αστρονομικών δεδομένων. Η ρύθμιση του κάθε tracker μπορεί είναι ανεξάρτητη, βελτιστοποιώντας έτσι το αποτέλεσμα.

Η γωνία που επιτυγχάνεται βρίσκεται στο φάσμα $\pm 50^\circ$, με δυνατότητα ρύθμισης για $\pm 60^\circ$. Παρουσιάζει υψηλές αντοχές σε έντονους ανέμους (μέχρι 80 km/h σε λειτουργία ή $200 + \text{km/h}$ σε θέση προστασίας), χιόνι (1500 N/m^2) και έντονες περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Κατασκευασμένο από γαλβανισμένο χάλυβα, για αποφυγή περιπτώσεων διάβρωσης. Δυνατότητα παρακολούθησης, ελέγχου και εποπτείας δεδομένων μεμονωμένα για κάθε tracker μέσω συστημάτων SCADA. Χαμηλή απαίτηση ενέργειας και υψηλή διάρκεια ζωής μπαταρίας Li-FePO₄ για επικουρική αυτόνομη λειτουργία (πάνω από 5 ημέρες αυτονομία). Κάθε tracker για συστοιχία Φ/Β 1000 – 1500 V, δηλαδή περίπου μέχρι 90 Φ/Β πλαίσια των 72 Φ/Β κυττάρων το καθένα.

2) Σύστημα iTracker DUETTO

Τα συστήματα αυτά είναι και πάλι μονού άξονα (ρύθμιση στην οριζόντιο), εξασφαλίζοντας και εδώ ετήσια παραγωγή ενέργειας μέχρι και 30% περισσότερη από αυτή που θα παραγόταν μέσω σταθερών βάσεων.



Εικόνα 22: Σύστημα iTracker DUETTO

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 22, το σύστημα αυτό αποτελεί έναν tracker διπλής σειράς (ουσιαστικά δύο trackers). Κατάλληλο για ανομοιόμορφο τύπο εδάφους, λόγω στιβαρούς κατασκευής.

Η λειτουργία του, ο έλεγχος και η παρακολούθηση είναι παρόμοια με το σύστημα iTracker WL, με τη διαφορά ότι τα συστήματα iTracker DUETTO παρουσιάζουν ακόμα μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Το σύστημα παροχής

ενέργειας είναι παρόμοιο με το σύστημα των iTracker WL. Συνδέεται σε συστοιχίες μέχρι 120 (2X60) πλαίσια των 72 κυττάρων το καθένα, με αντίστοιχη τάση συστοιχίας 1000 – 1500 V.

3) Σύστημα iTracker XL

Το σύστημα αυτό είναι παρόμοιος λειτουργίας με τα πρώτα σύστημα που παρουσιάστηκε (σύστημα iTracker WL), με δυνατότητα ρύθμισης γωνίας $\pm 60^\circ$. Περιλαμβάνει μικρό κινητήρα για κάθε tracker, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ρύθμιση γωνίας.



Εικόνα 23: Σύστημα iTracker XL

Μπορεί να στηρίξει μεγαλύτερο αριθμό Φ/Β πλαίσια από τα άλλα δύο συστήματα (120). Για την παροχή ενέργειας χρησιμοποιείται παρόμοιο σύστημα όπως στις προηγούμενες δύο τεχνολογίες. Η αντοχή του στις επιδράσεις έντονων

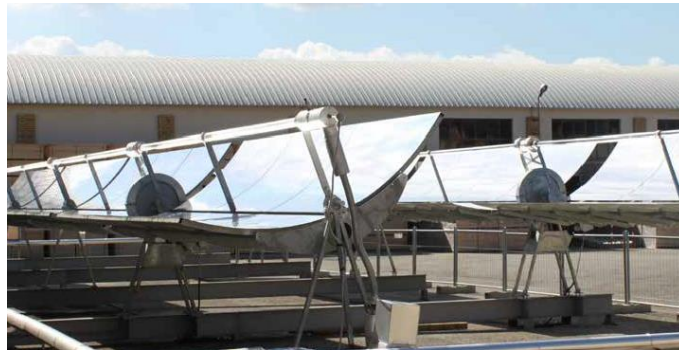
ανέμων είναι ελαφρώς υποδεέστερη των προηγούμενων δύο συστημάτων (μέχρι 60 km/h σε λειτουργία ή 160 + km/h σε θέση προστασίας). Ακόμη, στα συστήματα αυτά μεγιστοποιείται η εκμετάλλευση της διάχυτης ακτινοβολίας, για βελτιστοποίηση απόδοσης ακόμα και τις συννεφιασμένες ημέρες.

Συστήματα Concentrated Solar Power (CSP)

Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως υβριδικά, παράγοντας θερμική και ηλεκτρική ενέργεια για πληθώρα εφαρμογών.

1) Σύστημα PTMx (Parabolic trough)

Τα φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα αυτά αποτελούνται από παραβολικούς «καθρέπτες» που συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια. Είναι αρκετά ευέλικτα συστήματα και χρησιμοποιούνται ακόμα και σε μικρές εγκαταστάσεις



Εικόνα 24: Σύστημα PTMx

(< 1 MW). Παρέχουν πληθώρα επιλογών εγκατάστασης, όπως για παράδειγμα σε στέγη. Οι καθρέπτες κατασκευάζονται από ενισχυμένο γυαλί για μηχανική αντοχή. Διαθέτει ακριβές και αξιόπιστο σύστημα

παρακολούθησης της πορείας του ήλιου. Είναι δυνατός ο προσανατολισμός προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Μπορούν να παράγουν θερμική ενέργεια

χρησιμοποιώντας λάδι θερμοκρασίας 250°C ή 110°C χρησιμοποιώντας νερό, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Κατάλληλο για τροφοδότηση air conditioning, εκμεταλλευόμενο την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και την ανάγκη ψύξης σε καλοκαιρινή περίοδο, το σύστημα αυτό μπορεί να είναι πολύ αποδοτικό και να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής. Μπορεί να ενσωματωθεί σε πλήρες σύστημα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning). Το σύστημα PTMx μπορεί να παράγει περισσότερο από 1000 kWh ετησίως ανά m². Η παραγωγή θερμότητας μέσω αυτών των συστημάτων είναι πολύ φθηνότερη από το συμβατικό τρόπο που καταναλώνεται ορυκτό καύσιμο και ταυτόχρονα, ανεξάρτητη των τιμών της αγοράς. Στον πίνακα 1 φαίνεται η ετήσια παραγωγή για κάποιες πόλεις που χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα:

[kWh/sqm year]	Cairo (Egypt)	Nice (France)	Seville (Spain)
100°C	1136	814	850
200°C	975	711	747

Πίνακας 1: Ετήσια παραγωγή μέσω PTMx συστημάτων

Ενδεικτικό παράδειγμα: Μια φαρμακευτική βιομηχανία στην Ινδία που καταναλώνει περισσότερα από 400,000 l diesel ανά χρόνο, μπορεί να εξοικονομήσει έως και 30% από τα έξοδά της εγκαθιστώντας ένα σύστημα PTMx επιφάνειας 1100 m².

Υπάρχουν 4 μοντέλα συλλεκτών PMTx τα οποία μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας μεγάλες επιφάνειες. Στον πίνακα 2 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων:

Model	PTMx-18	PTMx-24	PTMx-30	PTMx-36
Net collecting surface [m ²]	41	54	68	82
Aperture width [m]	2,4			
Length [m]	20,7	27,2	33,2	39,6
Reference thermal capacity* [kWh]	23	31	39	47
Mirrors	Weather resistant highly reflective tempered glass			
Receiver	Not evacuated and selectively coated receiver			
Working temperature	Hot water up to 110°C; thermal oil up to 250°C			
Heat transfer fluid	Hot water or thermal oil			
Pressure	Up to 10 bar			

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά PMTx μοντέλων

2) Συστήματα FLT (Linear fresnel collector)

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμότητας

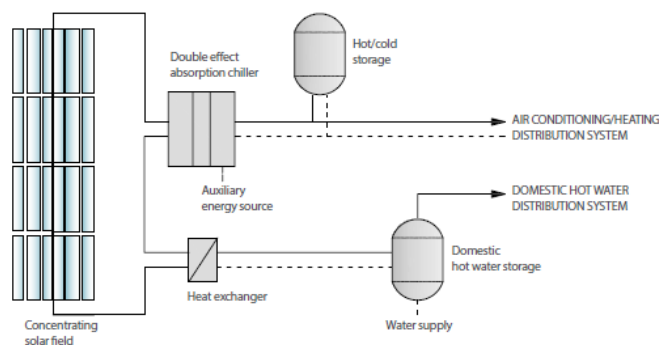


Εικόνα 25: Σύστημα FLT

χρησιμοποιώντας ευθείς καθρέπτες. Η ελαφριά αλλά στιβαρή κατασκευή κάνει τα συστήματα αυτά κατάλληλα για τοποθέτηση σε στέγη. Η δυνατότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, επιτρέπει στα συστήματα αυτά, εκμεταλλευόμενα την ηλιακή ενέργεια, να παρέχουν διάφορες υπηρεσίες όπως:

- Λειτουργία air-conditioning (solar cooling):

Τις περιόδους που τόσο η ηλιακή ακτινοβολία όσο και οι ανάγκες για κλιματισμό είναι αυξημένες, προτείνεται η χρήση των συστημάτων αυτών. Είναι πολύ αποδοτικά και φιλικά προς το περιβάλλον. Ακόμη, η κάλυψη των αναγκών κλιματισμού μέσω της ηλιακής ενέργειας μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός κρίσιμης σημασίας ειδικά για τις ώρες αιχμής ενός δικτύου. Η λειτουργία αυτή βελτιστοποιείται εισάγοντας συσκευές αποθήκευσης θερμότητας για ομαλή λειτουργία και τις περιόδους της ημέρας που η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή. Ακόμη, τα συστήματα FLT μπορούν να ενσωματωθούν σε πλήρες σύστημα HVAC, συνεισφέροντας και στην παραγωγή ζεστού νερού.



Εικόνα 26: Διαδικασία solar-cooling και hot water storage

- Παραγωγή «χρησιμοποιούμενης» θερμότητας (solar process heat):

Πληθώρα βιομηχανικών λειτουργιών απαιτούν θερμική ενέργεια σχετικά υψηλής θερμοκρασίας. Μερικές από αυτές τις βιομηχανικές διεργασίες που είναι κατάλληλες για ενσωμάτωση συστημάτων FLT παρουσιάζονται στον πίνακα 3:

Industry	Process	Temperature (°C)
Food and beverages	cleaning	80-150
	pasteurisation	80-110
	sterilisation	130-150
	drying	130-240
	cooking	80-100
Plastic	extrusion and drying	150-180
Chemical	heat treatments	150-180
	boiling	95-110
	distillation	110-300
	drying	150-180
Paper	bleaching and drying	130-180
Textile	washing	80-100
	heat treatment	80-130
	bleaching	60-100
	dyeing	100-160
Industrial cleaning	steam washing	150

Πίνακας 3: Βιομηχανικές εφαρμογές συστήματος FLT μέσω solar process heat

- Παραγωγή θερμικής ενέργειας:
Συστήματα FLT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με θερμικές μονάδες (όπως ένα κύκλο Rankine) ή στροβίλους ατμού. Μέχρι 5/10 MW τα κύκλα Rankine αρκούν, ενώ για μεγαλύτερη ισχύ συστήνονται οι στροβίλοι ατμού. Μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, με σκοπό αύξησης των ορών λειτουργίας.

Υπάρχουν 5 μοντέλα συλλεκτών FLT τα οποία μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας μεγάλες επιφάνειες. Στον πίνακα 4 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μοντέλων:

Model	FLT10v-24	FLT10v-36	FLT10v-48	FLT10v-60	FLT10v-72
Net collecting surface [m ²]	148,5	222,8	297,0	371,3	445,5
Width [m]	8,05				
Length [m]	25,02	37,35	49,68	62,01	74,34
Reference thermal capacity* [kWt]	83	124	166	207	249
Mirrors	Weather resistant highly reflective tempered glass				
Receiver	Evacuated and selectively coated receiver with secondary mirror				
Working temperature	Up to 320°C				
Heat transfer fluid	Hot water (up to 220°C) or thermal oil				
Pressure	Hot water (up to 20 bar) or thermal oil (up to 10 bar)				

Πίνακας 4: Τεχνικά χαρακτηριστικά FLT μοντέλων

Βιβλιογραφία-Πηγές

- [1] Διπλωματική εργασία Βουλβουκέλη Χρήστου με θέμα «Σχεδίαση, μελέτη και ανάλυση φωτοβολταϊκού συστήματος στην περιοχή «Κούκος» της Κρήτης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πραγματικά», 2013, επιβλέπων καθηγητής Χ.Δημουλιάς
- [2] Διπλωματική εργασία Παπακωνσταντίνου Χ. Κωνσταντίνου με θέμα «Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων υπό το θεσμό της ιδιοκατανάλωσης», 2015, επιβλέπων καθηγητής Ν.Χατζηαργυρίου
- [3] Στοιχεία μελετών, αρχών λειτουργίας και εγκατάστασης Φ/Β, εταιρία EGNATIA GROUP
- [4] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, 2011, «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων»
- [5] Δρ. Πέτρος Καραϊσας , «Φωτοβολταϊκά συστήματα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας», 2014
- [6] Πτυχιακή εργασία Μπαμπουκή Γεωργίου και Τσούκα Γεωργίου με θέμα «Θεωρητική και πειραματική μελέτη επίδρασης της σκίασης στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου», 2015
- [7] <https://www.solarreviews.com/>
- [8] <https://www.allearthrenewables.com/>
- [9] <https://www.soltigua.com/>