



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός θερμικού ηλιακού συστήματος με τη μέθοδο της ωριαίας δυναμικής ανάλυσης



Ελισάβετ Χ. Σανδαλίδη

Αριθμός Μητρώου: 36748

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ Κωνσταντίνος Ρεπαπής, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Ιανουάριος 2013

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	10
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	10
2.2 Ο ΗΛΙΟΣ.....	10
2.3 Η ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ.....	11
2.4 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ.....	11
2.5 Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	12
2.6 ΑΛΗΘΗΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ.....	13
2.7 ΧΡΗΣΙΜΑ ΜΕΓΕΘΗ	16
2.8 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	19
2.9 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ	23
2.10 Ο ΛΟΓΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ.....	24
2.11 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	25
3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	28
3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ	28
3.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	29
3.3 ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ.....	30
3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	31
3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΙΘΡΙΟΤΗΤΑΣ.....	32
3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	33
3.7 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	34
3.7.1 Ισοτροπικό μοντέλο	34
3.7.2 Ανισοτροπικό μοντέλο	35
3.8 ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ: ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	37
3.9 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	37
3.10 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	38
3.10.1 Παρουσίαση του μοντέλου υπολογισμού.....	38
4 ΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	40
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	40

4.2	ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ	40
4.2.1	Επίπεδος συλλέκτης	40
4.2.2	Συλλέκτης σωλήνων κενού	44
4.2.3	Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες	45
4.3	ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	47
4.3.1	Οικιακά θερμοσιφωνικά συστήματα θερμού νερού χρήσης	47
4.3.2	Θερμικά ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας	48
4.4	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ	49
4.5	ΠΡΑΚΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ... ..	52
5	ΜΕΘΟΔΟΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	54
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	54
5.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	54
5.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ	60
5.3.1	Ταξινόμηση μοντέλων	60
5.3.2	Μοντέλο σταθερής κατάστασης	61
5.3.3	Δυναμικά μοντέλα	63
6	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	66
6.1	ΓΕΝΙΚΑ	66
6.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	67
6.2.1	Μέθοδος υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας	67
6.2.2	Μέθοδος υπολογισμού θερμοκρασίας περιβάλλοντος	68
6.2.3	Μέθοδος υπολογισμού απόδοσης συλλέκτη.....	68
6.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ	69
6.3.1	Ανάλυση με παράμετρο την πόλη	69
6.3.2	Σχόλια – Παρατηρήσεις.....	72
6.3.3	Ανάλυση με παράμετρο την κλίση του ηλιακού συλλέκτη, β	73
6.3.4	Σχόλια – Παρατηρήσεις.....	76
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
	Βιβλιογραφία.....	80

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση μέσω παραμετρικών αναλύσεων της συμπεριφοράς και απόδοσης ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη.

Στα πλαίσια αυτά, στο πρώτο μέρος της εργασίας περιλαμβάνεται μία βιβλιογραφική έρευνα, η οποία καλύπτει εκτενώς θέματα όπως η ηλιακή ακτινοβολία και οι συνιστώσες της καθ'όλη τη διαδρομή τους από την πηγή, δηλαδή τον ήλιο, έως τη συλλεκτική επιφάνεια. Επιπλέον, περιλαμβάνονται κατηγορίες των κυρίων θερμικών ηλιακών συστημάτων καθώς επίσης μία μέθοδος ωριαίας δυναμικής εξομοίωσης τους για τη χρήση της οποίας είναι δυνατό να απουσιάζουν πληροφορίες όσον αφορά τα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα.

Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσεται πρόγραμμα υπολογιστή, το οποίο αφ' ενός υπολογίζει την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, αφ' ετέρου προσδιορίζει την ωφέλιμη ισχύ και την απόδοση ενός επίπεδου συλλέκτη οποιωνδήποτε τεχνικών χαρακτηριστικών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών εμφανίζονται στη συνέχεια σε σχετικά γραφήματα παρέχοντας διάφορα χρήσιμα συμπεράσματα.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to parametrically analyze the behavior and performance of a flat-plate solar collector.

In this context, the first part of the study includes a literature review, which identifies solar radiation and its components. The route is explained in detail from the source, namely the sun, to the collector surface. Additionally, the survey includes the categories of the main solar thermal systems as well as an hourly dynamic simulation method. It is noted that the hourly meteorological data may be missing.

In the second part, a computer program is developed, which on the one calculates the hourly solar radiation incident on a surface, on the other hand determines the power output and performance of flat-plate collectors of any technical data. The results of these analyzes are then displayed in graphs providing various useful conclusions.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσης πτυχιακής είναι η μελέτη διαστασιολόγησης (σχεδιασμού) ενός συστήματος ηλιακών συλλεκτών. Όπως αναφέρει και η Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες σχεδιασμού όπως η μέθοδος καμπυλών f των S.Klein, W.A. Beckman και J.A.Duffie που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Wisconsin, οι μέθοδοι που αναφέρονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 15316.4-3:2008 καθώς και η ωριαία προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος.

Η σημασία και ο ρόλος των εργαλείων προσομοίωσης θερμικών ηλιακών διεργασιών είναι αδιαμφισβήτητα σημαντικός, τόσο κατά το σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων, όσο και για τη διερεύνηση της παθολογίας και τη βελτιστοποίηση ήδη εγκατεστημένων συστημάτων. Συζητείται λοιπόν και αναλύεται η μέθοδος ωριαίας προσομοίωσης η οποία παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους που αναφέρονται στην τεχνική οδηγία, κυρίως ως προς το εύρος χρήσης της αλλά και παράλληλα ως προς τον αναλυτικό της χαρακτήρα.

Στο Κεφάλαιο 2 συζητείται αρχικά η ηλιακή ακτινοβολία και οι επιμέρους συνιστώσες της καθ' όλη τη διαδρομή τους, δηλαδή από τον ήλιο έως την οριζόντια επιφάνεια της γης. Παρουσιάζονται επίσης οι απαραίτητες γεωμετρικές αναλύσεις.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετάται η επίδραση της ατμόσφαιρας, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμα καθώς και οι μέθοδοι επεξεργασίας τους, ώστε να λάβουμε τελικά την ακτινοβολία που προσπίπτει σε επιφάνειες διαφόρων κλίσεων και προσανατολισμών στην επιφάνεια της γης.

Το Κεφάλαιο 4 έχει ως αντικείμενο την «καρδιά» του ηλιακού συστήματος, τον ηλιακό συλλέκτη. Γίνεται αναφορά στους διάφορους τύπους συλλεκτών που έχουν επικρατήσει, ενώ αναλύονται διεξοδικά η θέση τους και η κλίση τους για τη μέγιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας.

Εν συνεχεία, στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται η μέθοδος ωριαίας δυναμικής προσομοίωσης ενώ επεξηγούνται όλες οι παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή της.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει την παρουσίαση προγράμματος υπολογιστή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Μελετάται ένας επίπεδος ηλιακός συλλέκτης και δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης της ενεργειακής του συμπεριφοράς ακόμη και όταν απουσιάζουν καίριες πληροφορίες μετεωρολογικών δεδομένων.

2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η δομή και τα χαρακτηριστικά του ήλιου καθορίζουν την προέλευση της ενέργειας που ακτινοβολείται στο διάστημα. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά αυτής της ενέργειας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η έντασή της και η φασματική της κατανομή. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι από 0,25 έως 3,0 μm, το τμήμα δηλαδή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που ακτινοβολείται από τον ήλιο.

Επιπλέον θα αναλυθεί η ηλιακή γεωμετρία δηλαδή η θέση του ήλιου στον ουρανό και η κατεύθυνση με την οποία η άμεση ακτινοβολία προσπίπτει σε επιφάνειες διαφόρων προσανατολισμών. Τέλος θέμα του κεφαλαίου αυτού είναι η ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας. Η κατανόηση της προέλευσης της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας και η θεωρητικά πιθανή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης είναι απαραίτητα στην κατανόηση και χρήση των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, θέμα του επόμενου κεφαλαίου.

2.2 Ο ΗΛΙΟΣ

Ο Ήλιος είναι μία σφαίρα διαμέτρου $1,39 \times 10^9$ m με απόσταση από τη γη κατά μέσο όρο $1,5 \times 10^{11}$ m. Ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του ανά 4 εβδομάδες όμως δεν περιστρέφεται ως στερεό σώμα καθώς αποτελείται από πλάσμα. Έτσι η περίοδος περιστροφής στον ισημερινό είναι 27 ημέρες ενώ στους 2 πόλους είναι 30 ημέρες.

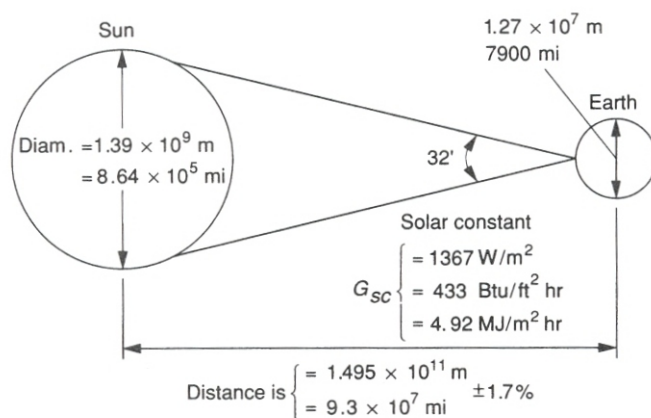
Η θερμοκρασία της επιφάνειας του ήλιου είναι 5777 K. Υπολογίζεται ότι η θερμοκρασία στον πυρήνα του είναι μεταξύ 8×10^6 και 40×10^6 K και η πυκνότητα του περίπου 100 φορές εκείνης του νερού. Ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας τεράστιος αντιδραστήρας σύντηξης που μετατρέπει Υδρογόνο (H_2) σε Ήλιον (He) ακτινοβολώντας ενέργεια με βάση την εξίσωση ενέργειας-μάζας ($E=mc^2$).

Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας σε θερμοκρασίες πολλών εκατομμυρίων βαθμών πρέπει να μεταφερθεί στην επιφάνεια και μετά να ακτινοβοληθεί στο διάστημα. Στη διαδοχική διαδικασία ακτινοβολίας και συναγωγής γίνεται εκπομπή, απορρόφηση και επανακτινοβολία. Η ακτινοβολία του πυρήνα του ήλιου ανήκει στο τμήμα των ακτίνων x και γ του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας να αυξάνεται καθώς η θερμοκρασία μειώνεται σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις. (Ήλιος)

2.3 Η ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ

Μία σχηματική αναπαράσταση της σχέσης ήλιου-γης φαίνεται στο Σχήμα 1. Εξαιτίας της ελλειπτικής τροχιάς της γης η απόσταση ήλιου-γης δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται συναρτησί του χρόνου κατά 1,7%. Σε απόσταση μίας αστρονομικής σταθεράς, $1,495 \times 10^{11}$ m, τη μέση απόσταση ήλιου-γης, η φαινόμενη διάμετρος του ήλιου δηλαδή η γωνία με την οποία παρατηρείται ο ήλιος από τη γη είναι 32'. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει κάθε φορά στο όριο της ατμόσφαιρας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερή για συγκεκριμένη απόσταση ήλιου-γης.

Ηλιακή σταθερά G_{sc} ονομάζεται η ποσότητα της ενέργειας που δέχεται από τον ήλιο μία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του, ανά μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου, έξω από το όριο της ατμόσφαιρας. Διάφορες μέθοδοι έχουν ακολουθηθεί σε πολλά ερευνητικά προγράμματα για την εύρεση της ακριβούς τιμής της ηλιακής σταθεράς. Εμείς στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή 1367 W/m^2 . (Duffie & Beckman, 2006)

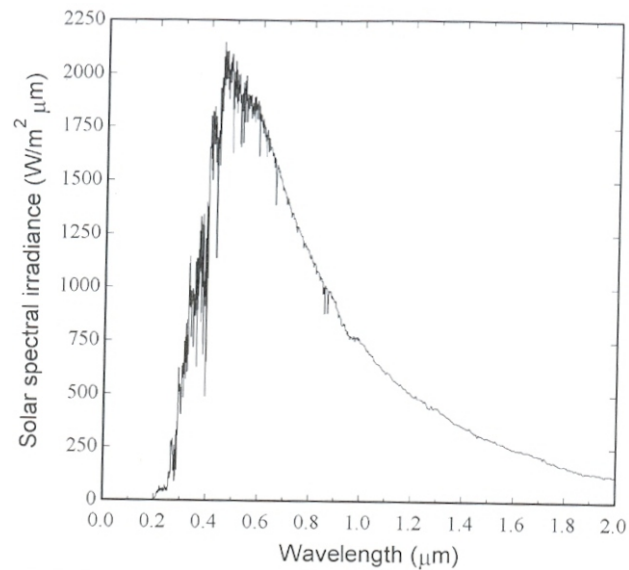


Σχήμα 1 Γεωμετρικές σχέσεις Ήλιου-Γης (Duffie & Beckman, 2006)

2.4 ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Επιπλέον της συνολικής ενέργειας της ακτινοβολίας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας (δηλ. ηλιακή σταθερά), είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε την κατανομή της στο φάσμα της συχνότητας. Ένα πρότυπο διάγραμμα για αυτό το λόγο έχει συνταχθεί βασισμένο σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε μεγάλο υψόμετρο και στο διάστημα. Το

πρότυπο διάγραμμα του Παγκοσμίου Κέντρου Ακτινοβολίας (World Radiation Center, WRC) φαίνεται στο Σχήμα 2. (Παντελάκης, 2010)



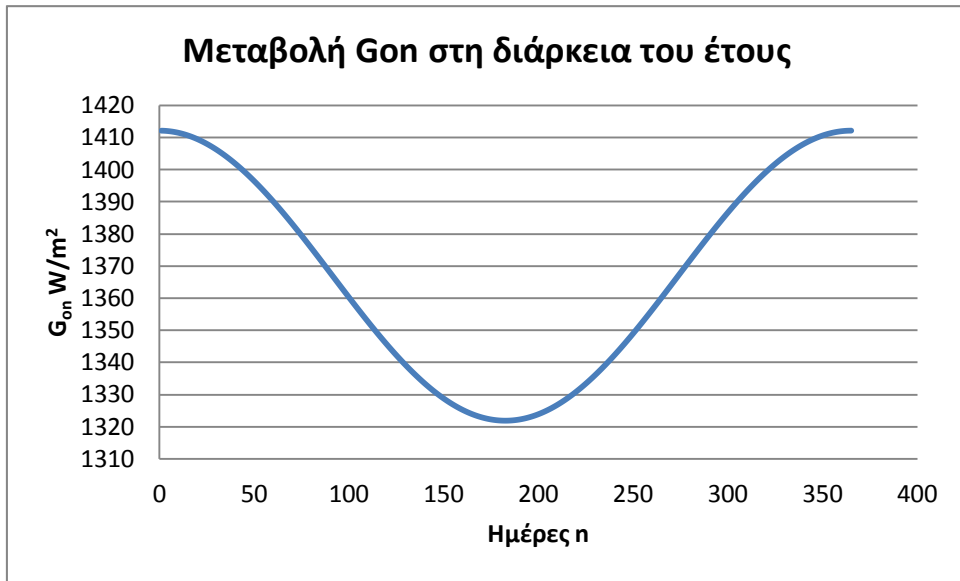
Σχήμα 2 Φάσμα εξωγήινης ακτινοβολίας (Duffie & Beckman, 2006)

2.5 Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας, σε αντίθεση με την ηλιακή σταθερά, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους εξαιτίας της απόστασης ήλιου-γης και των ηλιακών κηλίδων. Η ένταση της ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου τη νιοστή ημέρα του έτους μετριέται με επαρκή ακρίβεια για τους περισσότερους υπολογισμούς από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right)$$

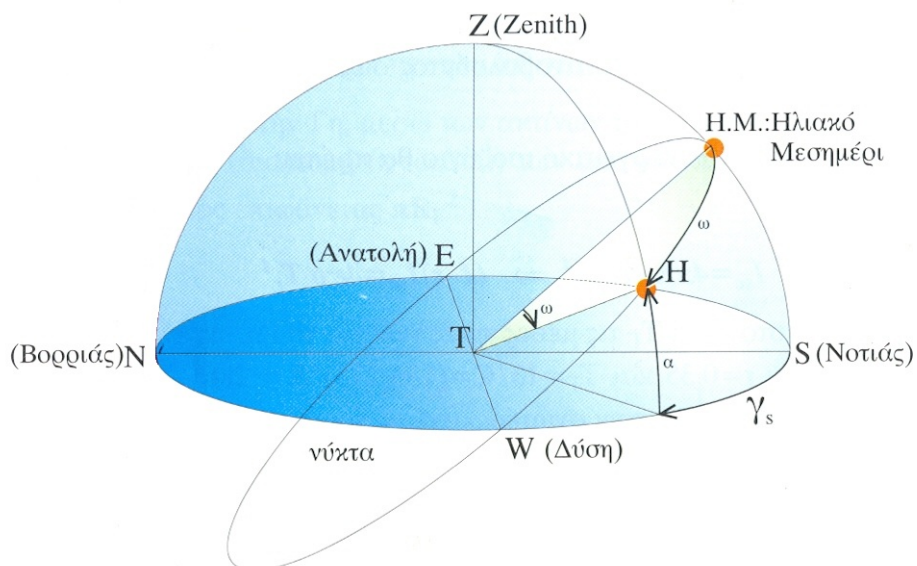
όπου n είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας και $1 \leq n \leq 365$. Αρχή μέτρησης του n λαμβάνεται πάντα η 1^η Ιανουαρίου. (Ηλιακή κηλίδα)



Σχήμα 3 Μεταβολή G_{on} στη διάρκεια του έτους

2.6 ΑΛΗΘΗΣ ΗΛΙΑΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ

Αληθής ηλιακός χρόνος, Α.Η.Χ., είναι ο χρόνος του οποίου η μέτρηση και ο προσδιορισμός βασίζεται στη γωνιακή μετακίνηση του ήλιου σε σχέση με το γήινο μεσημβρινό του τόπου (επίπεδο NZS Σχήματος 4).



Σχήμα 4 Τροχιά ήλιου στον ουρανό (Καπλάνης, 2004)

Παρατηρήσεις

Μεσημβρινός καλείται το επίπεδο NZS που είναι κάθετο στο οριζόντιο και ανήκει στη διεύθυνση B-N (N-S).

Ο ήλιος H, στο σχήμα, πέρασε ήδη από το ανώτερο σημείο της ημερήσιας τροχιάς του (H.M.) και οδεύει προς τη Δύση (W).

Ως 12η ώρα, δηλαδή ηλιακό μεσημέρι (H.M.), θεωρούμε τη χρονική στιγμή που ο ήλιος μεσουρανή, δηλαδή βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της τροχιάς του στον ουρανό. Είναι η στιγμή που ένας κατακόρυφος στύλος ρίχνει τη μικρότερη σκιά στο οριζόντιο.

Όταν ο ήλιος ξαναπεράσει από το ανώτερο σημείο, τότε έχουμε και πάλι ηλιακό μεσημέρι (12.00) και έχουν περάσει 24 ώρες (h).

Γενικά, ο Αληθής ηλιακός χρόνος (A.H.X.) δε συμπίπτει με τον Τοπικό ωρολογιακό χρόνο (Τ.Ω.Χ.) ο οποίος είναι συμβατικός και είναι ίδιος για όλους τους τόπους μιας χώρας.

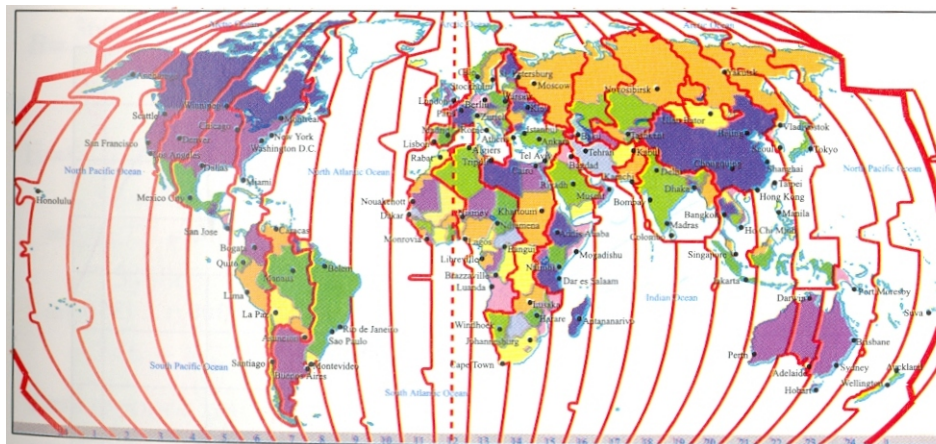
Τα δύο αυτά συστήματα προσδιορισμού του χρόνου συνδέονται μεταξύ τους γραμμικά. Είναι απλώς μετατοπισμένα. Υπάρχει μία χρονική μετατόπιση η οποία ωστόσο δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους.

Για τη μέτρηση του χρόνου χρησιμοποιείται η ίδια μονάδα, το second (s).

Για τους υπολογισμούς που υπεισέρχονται στις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας δε χρησιμοποιείται ο Τ.Ω.Χ. αλλά ο Α.Η.Χ. βάσει του οποίου γίνονται και τα πειράματα για την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, οι συγκρίσεις μεταξύ των κ.τ.λ..

Για τον υπολογισμό του Α.Η.Χ. με βάση τον Τ.Ω.Χ. γίνονται δύο βασικές διορθώσεις:

Διόρθωση εξαιτίας της διαφοράς του γεωγραφικού μήκους του μεσημβρινού του τόπου, L_{loc} , που γίνονται οι μετρήσεις, με το κατά συνθήκη γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού της ατράκτου στην οποία βρίσκεται ο τόπος ή η χώρα (L_{st}). Ως γνωστόν η γη είναι χωρισμένη σε 24 ατράκτους δηλαδή $360^\circ \div 24 = 15^\circ$ ανά άτρακτο, όπως δείχνει το Σχήμα 5.



Σχήμα 5 Η Γη χωρισμένη σε ατράκτους (Καπλάνης, 2004)

Για περιστροφή της γης κατά 360° μοίρες απαιτούνται 24h. Για στροφή κατά 15° (γωνιακή μετατόπιση μίας ατράκτου) απαιτούνται:

$$\frac{360^\circ}{15^\circ} = \frac{24h}{x} \rightarrow x = 24h \frac{15^\circ}{360^\circ} = 1h$$

Συνεπώς:

$$\frac{15^\circ}{1^\circ} = \frac{1h}{y} = \frac{60min}{y} \rightarrow y = 4min/μοίρα$$

Ο ήλιος δηλαδή χρειάζεται 4 πρώτα λεπτά για να διανύσει γωνία ατράκτου 1 μοίρας ($\Delta L = 1^\circ$). Για την Ελλάδα ο μεσημβρινός μέτρησης του χρόνου είναι αυτός της 2ας ατράκτου και αντιστοιχεί σε $L_{st} = 30^\circ$.

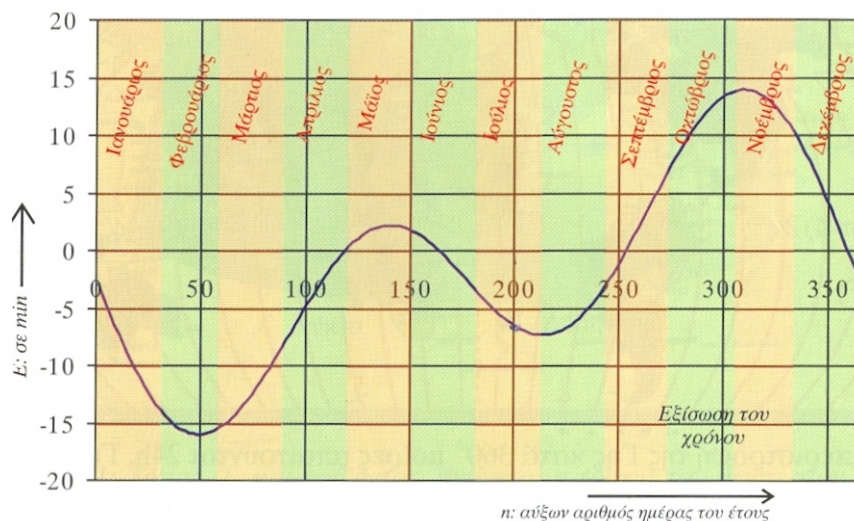
Η δεύτερη διόρθωση γίνεται εξαιτίας της ελλειπτικής τροχιάς της γης. Η διόρθωση δίνεται από την εξίσωση του χρόνου, E.

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,023077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B)$$

$$\text{όπου: } B = \frac{360(n-1)}{365}$$

και n είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας για την οποία γίνεται ο υπολογισμός του E. (Καπλάνης, 2004)

Το E υπολογίζεται αναλυτικά από την ανωτέρω σχέση. Είναι δυνατόν, ωστόσο, να ληφθεί και από το σχετικό διάγραμμα του Σχήματος 6.



Σχήμα 6 Εξίσωση του χρόνου (Καπλάνης, 2004)

Η σχέση που συνδέει τον Τ.Ω.Χ. και Α.Η.Χ. είναι η ακόλουθη:

$$AHX = T\Omega X - 4 \frac{\text{min}}{\text{μοίρα}} (L_{st} - L_{loc}) + E$$

2.7 ΧΡΗΣΙΜΑ ΜΕΓΕΘΗ

Άμεση ηλιακή ακτινοβολία, H_b , είναι αυτή η οποία φτάνει απ'ευθείας από τον ηλιακό δίσκο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από την απόσταση ήλιου-γης, την ηλιακή απόκλιση, το ηλιακό ύψος, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας επί της οποίας προσπίπτει καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση την οποία υφίσταται μέσα στην ατμόσφαιρα. Μετράται σε Joule/m^2 .

Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, H_d , είναι το ποσό της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή σκέδαση μέσα στην ατμόσφαιρα, αλλά και μετά από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ηλιακό ύψος, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την παρουσία διαφόρων κέντρων σκεδάσεως (αερολυμάτων, υδροσταγόνων κ.ά.) που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα, τόσο μικρότερο είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Για το λόγο αυτό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή. Τέλος, όσο πιο κάθετα προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μία επιφάνεια στη γη τόσο μεγαλύτερη είναι η έντασή της. Μετράται σε Joule/m^2 .

Ολική ηλιακή ακτινοβολία, H , είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια. Μετράται σε Joule/m^2 .

Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1,400-1,800 ($\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$) ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μία μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή και προβλέψιμη ένταση (W/m^2) στη διάρκεια του χρόνου και της ημέρας. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει τη μέγιστη έντασή της κατά τη διάρκεια του μεσημεριού (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά τη χειμερινή περίοδο. Η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο, λόγω της θέσης του ήλιου, αλλά και λόγω της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας (μείωση των νεφώσεων).

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε κεκλιμένη ή/και περιστρεφόμενη επιφάνεια, είναι απαραίτητη η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα (hr/day) αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις την ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m^2) για διάφορες περιοχές της χώρας μας.

Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών επιλέγονται ώστε οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες και να μην επηρεάζονται από φυσικά εμπόδια ή τοπικά φαινόμενα που να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέσες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (hr/mo) με χρονική διάρκεια πάνω από 30 έτη για τις περισσότερες περιοχές, οι οποίες παραχωρήθηκαν από την ΕΜΥ. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές σχέσεις όπως ισχύουν για τις ελληνικές περιοχές, καθώς και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία έχουν δημοσιευθεί σε επιστημονικές εργασίες και συνέδρια.

Για όποιες περιοχές δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από την πλησιέστερη περιοχή στην οποία παρατηρείται παρόμοια μορφολογία εδάφους (ορεινοί όγκοι, κ.ά.) και παρόμοιος προσανατολισμός. (Αργυρίου, και συν., 2012)

Πίνακας 1 Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m²·mo)] (Αργυρίου, και συν., 2012)

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αργίνο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχιάλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Αραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Άργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σπεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη (Καβάλα)	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Ως **αέρια μάζα, m**, ορίζεται το πηλίκιο του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας δια μέσου της οποίας περνά η άμεση ακτινοβολία, προς το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ. Έτσι, στο επίπεδο της θάλασσας, m=1 όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ

και $m=2$ όταν η ζενίθια γωνία $\theta_z=60^\circ$. Για γωνίες μεταξύ των 0° και 70° στο επίπεδο της θάλασσας ισχύει η σχέση:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

2.8 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ μίας επιφάνειας οποιουδήποτε προσανατολισμού (είτε η επιφάνεια αυτή είναι καθορισμένη ή κινείται σε σχέση με τη γη) και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια, μπορεί να περιγραφεί με διάφορες γωνίες.

ϕ **Γεωγραφικό πλάτος**, καλείται η γωνιώδης θέση του τόπου σε σχέση με τον ισημερινό. Ορίζεται ως θετικό για το Βόρειο Ημισφαίριο και αρνητικό για το Νότιο. Ισχύει $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

δ **Απόκλιση ήλιου**, καλείται η γωνιακή θέση του Ήλιου (συμβατικά κατά την ηλιακή μεσημβρία) σε σχέση με το Ισημερινό επίπεδο. Η ηλιακή απόκλιση, δ , αλλάζει καθημερινά και προσδιορίζεται από την εξίσωση του Cooper (1969):

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

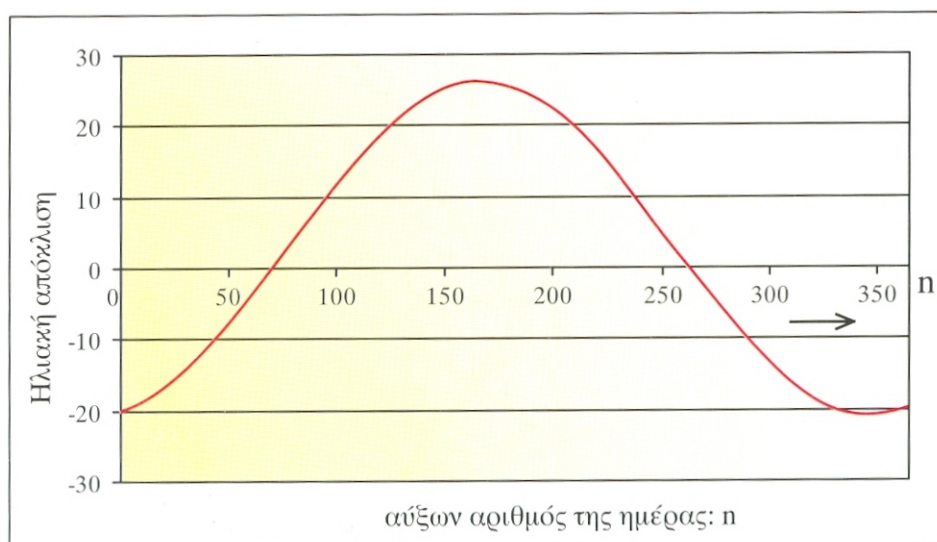
Λαμβάνει θετικές τιμές όταν ο ισημερινός βρίσκεται χαμηλότερα από την ευθεία που ενώνει Ήλιο και Γη. Ισχύει $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

Κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, η μέγιστη μεταβολή της δ είναι μικρότερη από $0,5^\circ$. Συνεπώς, εάν η ηλιακή απόκλιση θεωρηθεί σταθερή για 24 ώρες, έχουμε ένα μέγιστο σφάλμα στους υπολογισμούς των άλλων ηλιακών γωνιών μεγέθους $0,5^\circ$.

Τιμές της απόκλισης, δ , δίνουν ο Πίνακας 2 και το Σχήμα 7.

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές τιμές δ (Καπλάνης, 2004)

Χαρακτηριστικές τιμές απόκλισης δ	Ημερομηνία
$+23^\circ 27'$	22 ^α Ιουνίου
$+20^\circ$	21 ^η Μαΐου – 24 Ιουλίου
$+15^\circ$	1 ^η Μαΐου – 12 ^η Αυγούστου
$+10^\circ$	16 ^η Απριλίου – 28 ^η Αυγούστου
$+5^\circ$	3 ^η Απριλίου – 10 ^η Σεπτεμβρίου
0°	21 ^η Μαρτίου – 23 ^η Σεπτεμβρίου
-5°	8 ^η Μαρτίου – 6 ^η Οκτωβρίου
-10°	23 ^η Φεβρουαρίου – 20 ^η Οκτωβρίου
-15°	9 ^η Φεβρουαρίου – 3 ^η Νοεμβρίου
-20°	21 ^η Ιανουαρίου – 22 ^α Νοεμβρίου
$-23^\circ 27'$	22 ^α Δεκεμβρίου



Σχήμα 7 Ηλιακή απόκλιση συναρτήσει του χρόνου (Καπλάνης, 2004)



Σχήμα 8 Περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο (Declination, 2009)

β **Κλίση**, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της εξεταζόμενης επιφάνειας και του οριζώντιου επιπέδου. Ισχύει $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

γ **Αζιμουθιακή γωνία μίας επιφάνειας**, είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου μίας επιφάνειας και την κατεύθυνση προς νότο, στο μεσημβρινό επίπεδο του τόπου. Ισχύει $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Η αζιμουθιακή γωνία είναι μηδέν όταν η προβολή της καθέτου συμπίπτει με το Νότο. Η τιμή της είναι αρνητική όταν «βλέπει» προς την Ανατολή και θετική όταν βλέπει προς τη Δύση.

ω **Ωριαία γωνία**, είναι η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος κινούμενος στην ημερήσια τροχιά του. Η γωνία αυτή μετράται με αρχή το μεσημβρινό επίπεδο του τόπου, δηλαδή από το ηλιακό μεσημέρι. Για κάθε χρονική στιγμή (h) για μια ημέρα (n) αντιστοιχεί και μία τιμή του ω . Η τιμή της είναι αρνητική το πρωί και θετική το απόγευμα. Ανά μία ώρα η γωνία ω μεταβάλλεται κατά 15° .

θ **Γωνία πρόσπτωσης**, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο του τόπου ή του συλλέκτη και της ευθείας που συνδέει αυτό το επίπεδο με τον ήλιο.

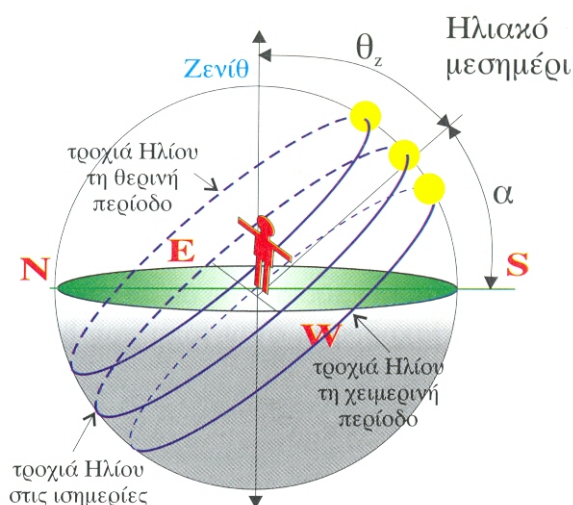
Παρατήρηση

Για το οριζόντιο επίπεδο η γωνία πρόσπτωσης ϑ , ταυτίζεται με τη γωνία ϑ_z .

Επιπλέον γωνίες που περιγράφουν τη θέση του ήλιου στον ουρανό ορίζονται παρακάτω:

θ_z **Ζενίθια γωνία**, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που συνδέει το επίπεδο του συλλέκτη ή του παρατηρητή με τον ήλιο και της κατακόρυφου στον τόπο που βρίσκεται ο ηλιακός συλλέκτης (διεύθυνση Zenith). Ισχύει $\vartheta_z + \alpha = 90^\circ$.

α_s **Ύψος ήλιου**, καλείται η συμπληρωματική γωνία της ζενίθιας γωνίας θ_z και ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της ευθείας τόπος-ήλιος και του οριζόντιου επιπέδου.

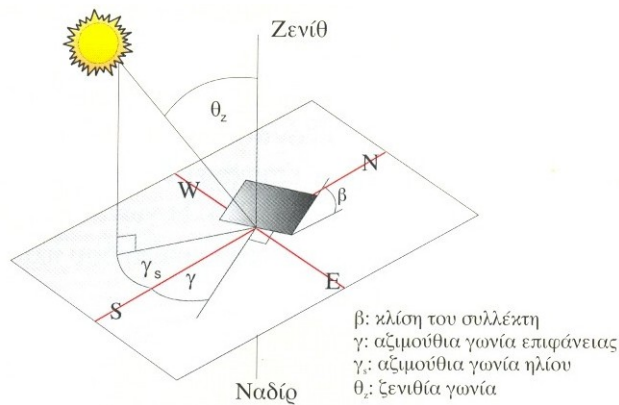


Σχήμα 9 Γωνίες χαρακτηριστικές της θέσης του ήλιου (Καπλάνης, 2004)

Παρατήρηση

Όταν ο ήλιος ανατέλλει ή δύει, ισχύει πάντα $\alpha_s = 0^\circ$ και $\theta_z = 90^\circ$.

γ_s **Αζιμουθιακή γωνία του ήλιου**, είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού του τόπου και της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο, της ευθείας που συνδέει τον ήλιο με τον παρατηρητή ή τον ήλιο με το συλλέκτη. Το γ_s είναι θετικό προς τη Δύση και αρνητικό προς την Ανατολή. (Κεραμιτζής, 2010)



Σχήμα 10 Χαρακτηριστικές γωνίες (Καπλάνης, 2004)

Οι μεταβολές στην απόσταση ήλιου-γης, η εξίσωση του χρόνου E και η απόκλιση δ είναι παράγοντες που συνεχώς αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για λόγους απλοποίησης υπολογισμών είναι σύνηθες να εκφράζεται η διάρκεια του χρόνου σε n όπου n είναι η αύξουσα ημέρα του χρόνου και είναι ακέραιος αριθμός από 1 έως 365. Για τους προαναφερθέντες τρεις παράγοντες, δίνεται η δυνατότητα χρήσης μη ακέραιων τιμών n . Σημειώνεται ότι το μέγιστο ποσοστό απόκλισης είναι περίπου $0,4^\circ$ ανά ημέρα. Συνεπώς η χρήση ακέραιων τιμών n επαρκούν για τους περισσότερους υπολογισμούς αυτής της εργασίας.

Πίνακας 3 Προτεινόμενες μέσες ημέρες του μήνα και τιμές n ανά μήνα (Duffie & Beckman, 2006)

Μήνας	n , νιοστή ημέρα του μήνα	Ημερομηνία	Μέση ημέρα του μήνα	
			n	δ
Ιανουάριος	i	17	17	-20,9
Φεβρουάριος	$31 + i$	16	47	-13,0
Μάρτιος	$59 + i$	16	75	-2,4
Απρίλιος	$90 + i$	15	105	9,4
Μάιος	$120 + i$	15	135	18,8
Ιούνιος	$151 + i$	11	162	23,1
Ιούλιος	$181 + i$	17	198	21,2
Αύγουστος	$212 + i$	16	228	13,5
Σεπτέμβριος	$243 + i$	15	258	2,2
Οκτώβριος	$273 + i$	15	288	-9,6
Νοέμβριος	$304 + i$	14	318	-18,9
Δεκέμβριος	$334 + i$	10	344	-23,0

2.9 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΡΙΓΩΝΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Οι δύο γενικές σχέσεις που συνδέουν τη γωνία πρόσπτωσης θ με τα υπόλοιπα τριγωνομετρικά μεγέθη που ορίσαμε ($\phi, \omega, \beta, \delta, \gamma, \gamma_s, \theta_z$) για μια ορισμένη χρονική στιγμή κατά τη νιοστή ημέρα του χρόνου είναι η:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega\end{aligned}$$

και

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Η γωνία θ μπορεί να υπερβαίνει τις 90° που σημαίνει ότι ο ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια της γης. Επίσης όταν χρησιμοποιείται η πρώτη εκ των δύο σχέσεων, είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται ότι η γη δεν καλύπτει τον ήλιο δηλαδή η ωριαία γωνία είναι μεταξύ ανατολής και δύσης του ήλιου.

Οι δύο σχέσεις μπορούν να απλοποιηθούν υπό ορισμένες συνθήκες που συναντώνται συχνά στην πράξη. Όταν $\gamma = 0^\circ$, δηλαδή για συλλέκτες προσανατολισμένους νότια, η πρώτη εκ των δύο σχέσεων γράφεται:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ &+ \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \omega\end{aligned}$$

Περαιτέρω απλοποίηση επιτυγχάνεται για οριζόντιες επιφάνειες, $\beta = 0^\circ$, προσανατολισμένες στο νοτιά, $\gamma = 0^\circ$ όπου η γωνία πρόσπτωσης θ ταυτίζεται με τη θ_z δηλαδή $\theta = \theta_z$ και η ίδια σχέση γράφεται:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi$$

Υπάρχουν επιπλέον διάφορες περιπτώσεις όπου οι γενικές σχέσεις απλοποιούνται.

Για $\theta_z = 90^\circ$ η ωριαία γωνία ω , είναι η ωριαία της Δύσης και Ανατολής (ω_s) αντίστοιχα. Λόγω συμμετρίας ως προς το ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία δύσης και ανατολής έχουν την ίδια απόλυτη τιμή.

Η παραπάνω σχέση στην περίπτωση αυτή γράφεται:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta$$

Η διάρκεια της ημέρας σε ώρες, N , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = \frac{2}{15^\circ/h} \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$$

ενώ η τιμή που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N = \frac{1}{15^\circ/h} \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$$

είναι το χρονικό διάστημα από την ανατολή έως το ηλιακό μεσημέρι ή από το ηλιακό μεσημέρι μέχρι τη δύση.

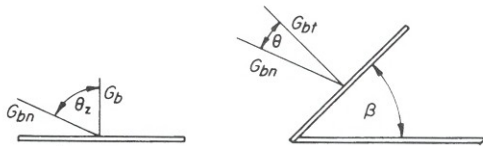
Η αζιμούθια γωνία του ήλιου κατά μία ημέρα n , που αντιστοιχεί σε απόκλιση δ και για μια χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε γωνία ω , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right|$$

2.10 Ο ΛΟΓΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ

Για τον υπολογισμό συστημάτων ηλιακής ενέργειας απαιτείται η γνώση της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες, γνωστής κλίσης. Συνήθως τα δεδομένα που έχουμε είναι η ωριαία ή ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια, ενώ για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο χρειάζεται η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία στην επιφάνεια ενός συλλέκτη. (Αρκούδης, 2007)

Ο γεωμετρικός παράγοντας R_b ορίζεται ως ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα επίπεδο με κλίση β , προς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Ο λόγος R_b δίνεται από την ακόλουθη σχέση αν μελετήσει κανείς προσεκτικά το Σχήμα 11.



Σχήμα 11 Άμεση ακτινοβολία σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια (Duffie & Beckman, 2006)

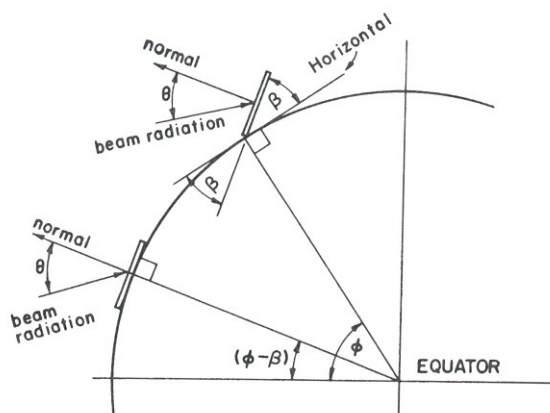
$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cos \theta}{G_{b,n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$$

Η βέλτιστη αζιμουθιακή γωνία για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες είναι συνήθως 0° στο βόρειο ημισφαίριο (ή 180° στο νότιο ημισφαίριο). Για αυτήν την περίπτωση για $\gamma = 0^\circ$, το R_b υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$

Και για $\gamma = 180^\circ$ η σχέση είναι:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi + \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta}$$



Σχήμα 12 Τμήμα της γης όπου διακρίνονται οι γωνίες β , θ , ϕ και $\phi - \beta$ για επιφάνεια σε νότιο προσανατολισμό (Duffie & Beckman, 2006)

2.11 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ένταση της ακτινοβολίας για ένα οριζόντιο επίπεδο που βρίσκεται έξω από το όριο της ατμόσφαιρας ισούται με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας διαιρεμένη με το γεωμετρικό παράγοντα R_b :

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z$$

ή

$$G_o = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta)$$

Ολοκλήρωση της ανωτέρω σχέση από την ανατολή έως τη δύση του ήλιου θα δώσει τη συνολική ακτινοβολία που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left(\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right)$$

Για δύο συγκεκριμένες χρονικές στιγμές που χαρακτηρίζονται από τις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 η ολική ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση:

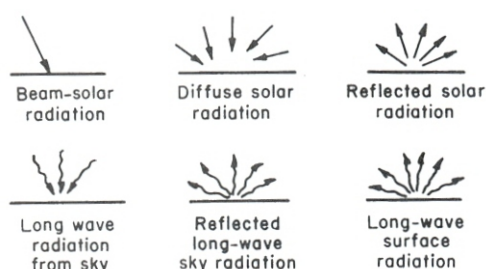
$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \varphi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \sin \delta \right]$$

Τα όρια ω_1 και ω_2 μπορεί να προσδιορίζουν ένα χρονικό διάστημα διαφορετικό από μία ώρα.

3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΙ

Το Σχήμα 13 δείχνει τις κύριες ροές ακτινοβολίας σε μία επιφάνεια πάνω ή κοντά στο έδαφος που είναι σημαντικές σε σχέση με τις ηλιακές θερμικές διεργασίες. Θα εξετάσουμε την ακτινοβολία σε δύο μήκη κύματος:



Σχήμα 13 Κύριες ροές ακτινοβολίας (Duffie & Beckman, 2006)
Η μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία απεικονίζεται με →
Η μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία απεικονίζεται με ↷

Ηλιακή ή μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο, σε μήκος κύματος από 0,3 έως 3 μm .

Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από πηγές θερμοκρασίας κοντά στις συνήθεις θερμοκρασίες περιβάλλοντος και επομένως ουσιαστικά σε όλα τα μήκη κύματος μεγαλύτερα των 3 μm . Η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος εκπέμπεται από την ατμόσφαιρα, από ένα συλλέκτη ή από ένα άλλο σώμα σε συνήθη θερμοκρασία. Αυτή η ακτινοβολία όταν προέρχεται από το έδαφος αναφέρεται πολλές φορές ως γήινη ακτινοβολία.

Για τη μέτρηση της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες φασματικές περιοχές, χρησιμοποιούνται τα **ακτινόμετρα**. Ιδιαίτερα αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πυκνότητας ροής σε ολόκληρο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, από 280 nm μέχρι περίπου 3.000 nm (ολοφασματική ακτινοβολία) ονομάζονται **πυρανόμετρα**. Αυτά που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της άμεσης συνιστώσας ονομάζονται **πυρηλιόμετρα** και μετρούν την ολοφασματική ακτινοβολία ή την ακτινοβολία σε μεγάλες περιοχές με τη χρήση φίλτρων. (Μπάη, Μελά, & Μπαλή, 2009)



Σχήμα 14 Πυρανόμετρο (Model 240-8101 Star Pyranometer, 2012)



Σχήμα 15 Πυρηλιόμετρο (Pyrheliometer OSC9711F103, 2009)

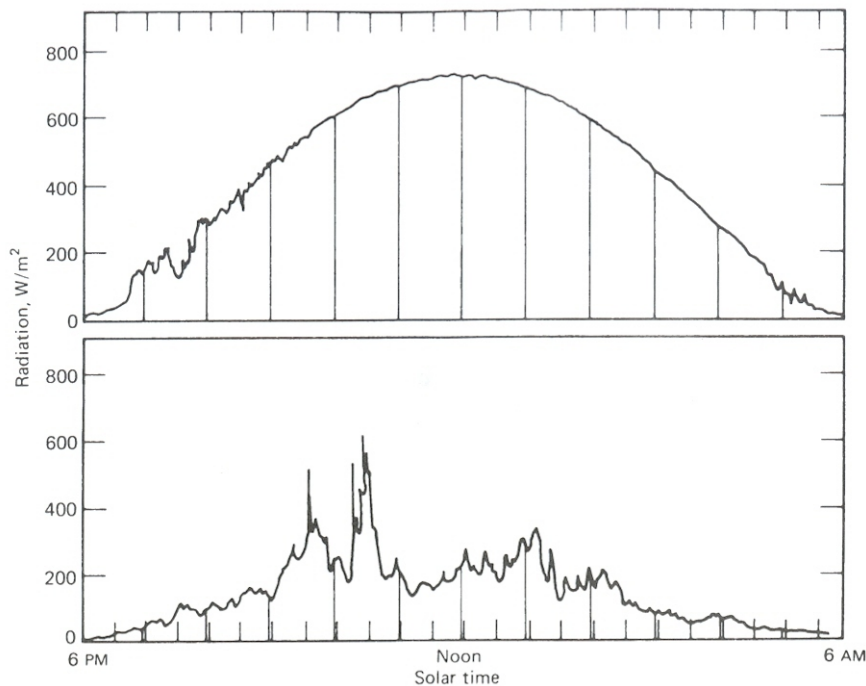
3.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχουν διαθέσιμα σε πολλές μορφές. Η κατανόηση και η χρήση των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη όταν πρόκειται για:

- Στιγμαίεις μετρήσεις ή για μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί σε ένα χρονικό διάστημα (συνήθως ώρα ή ημέρα)
- Άμεση, διάχυτη ή ολική ακτινοβολία
- Τα χρησιμοποιούμενα όργανα

- Τον προσανατολισμό της επιφάνειας (συνήθως οριζόντιος, μερικές φορές κεκλιμένος σταθερής κλίσης, ή κάθετος στην άμεση ακτινοβολία)
- Την περίοδο που χρησιμοποιείται για την εύρεση του μέσου όρου (αν αυτός υπάρχει)

Δύο τύποι δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαθέσιμοι. Ο πρώτος είναι η μέση μηνιαίως ημερήσια ολική ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια, \bar{H} . Ο δεύτερος είναι η ωριαία ολική ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια, I , για κάθε μία ώρα για μία μεγάλη χρονική περίοδο όπως για ένα ή δύο χρόνια. Ο πρώτος τύπος δεδομένων, \bar{H} είναι ευρέως διαθέσιμος και δίνεται από μετεωρολογικούς σταθμούς σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Μετράται σε MJ/m^2 .



Σχήμα 16 Ολική (άμεση και διάχυτη) ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για μία ηλιόλουστη και μία συννεφιασμένη ημέρα, για γεωγραφικό πλάτος 43° και για ημέρες κοντά στην ισημερία (Duffie & Beckman, 2006)

3.3 ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ηλιακή ακτινοβολία σε κάθετη πρόπτωση που φτάνει στην επιφάνεια της γης υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω αλλαγής της ακτινοβολίας που βρίσκεται έξω από το όριο της ατμόσφαιρας. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται και σε δύο ακόμη, πιο σημαντικά φαινόμενα:

1. Την ατμοσφαιρική σκέδαση από μόρια αέρα, νερού και σκόνης

2. Την ατμοσφαιρική απορρόφηση από O_3 , H_2O , CO_2

Η σκέδαση της ακτινοβολίας καθώς περνά μέσα από την ατμόσφαιρα οφείλεται στην αλληλεπίδραση ακτινοβολίας μορίων αέρα, νερού (υδρατμών και σταγονιδίων) και σκόνης. Ο βαθμός στον οποίο συμβαίνει σκέδαση είναι συνάρτηση του αριθμού των σωματιδίων, μέσω των οποίων η ακτινοβολία πρέπει να περάσει και το μέγεθος των σωματιδίων σε σχέση με το λ , το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσω των μορίων αέρα περιγράφεται από την αέρια μάζα. Τα σωματίδια νερού και σκόνης που διαπερνά η ακτινοβολία εξαρτώνται από την αέρια μάζα και από τις ποσότητες σκόνης και υγρασίας ανά χρόνο και τόπο που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα στο φάσμα ηλιακής ενέργειας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο όζον στο υπεριώδες φάσμα και στους υδρατμούς και στο διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο φάσμα. Υπάρχει σχεδόν πλήρης απορρόφηση των κυμάτων μικρού μήκους ακτινοβολίας από το όζον στα ανώτερα στρώματα ατμόσφαιρας σε μήκη κύματος κάτω από 0,29 μm . Η απορρόφηση από το όζον μειώνεται όσο το λ αυξάνεται πάνω από 0,29 μm και έως 0,35 μm όπου δεν υπάρχει σκέδαση. Υπάρχει επίσης ένα ασθενές στρώμα απορρόφησης του όζοντος κοντά στο $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$.

3.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας είναι η καλύτερη πηγή πληροφοριών για την εκτίμηση της μέσης προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Χωρίς αυτά ή χωρίς δεδομένα από κοντινές περιοχές παρόμοιου κλίματος, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση της ακτινοβολίας από τις ώρες ηλιοφάνειας ή νεφοκάλυψης. Δεδομένα των μέσων ωρών ηλιοφάνειας ή του μέσου ποσοστού ωρών ηλιοφάνειας είναι ευρέως διαθέσιμα από πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς του εξωτερικού και συνήθως βασίζονται σε μετρήσεις που λαμβάνονται με κατάλληλα όργανα μέτρησης. Δεδομένα νεφοκάλυψης είναι επίσης ευρέως διαθέσιμα αλλά βασίζονται σε οπτικές εκτιμήσεις και πιθανώς είναι λιγότερο χρήσιμα από τα δεδομένα ωρών ηλιοφάνειας.

Ο Page απλοποιώντας τον τύπο του Angstrom, θεωρεί ότι η μέση μηνιαίως ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία, \bar{H} , σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \alpha + \beta \frac{\bar{n}}{\bar{N}}$$

όπου: \bar{H}_0 = μέση μηνιαίως ημερήσια ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας

α, β = συντελεστές που προσδιορίζονται με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις σε μία περιοχή

Συγκεκριμένα:

$$\alpha = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin \omega_s - 60$$

3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΙΘΡΙΟΤΗΤΑΣ

Η μέθοδος των δεικτών αιθριότητας της ατμόσφαιρας αποτελεί μία εμπειρική μέθοδο ανάλυσης της ηλιακής ακτινοβολίας στις επιμέρους συνιστώσες της (άμεση-διάχυτη). Το γεγονός ότι είναι απλή στην εφαρμογή ενώ παράλληλα δίνει ικανοποιητική ακρίβεια αποτελεσμάτων, την έχει καταστήσει την πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδο εδώ και πολλά χρόνια. Βασίζεται στον υπολογισμό των ακόλουθων δεικτών:

Μέσος μηνιαίος δείκτης αιθριότητας, \bar{K}_T , καλείται ο λόγος της μέσης μηνιαίας ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για κάθε μήνα, \bar{H} , προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας μέση μηνιαίας ημερήσια ακτινοβολία, \bar{H}_0 , για κάθε μήνα:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας, K_T , καλείται ο λόγος της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, H , προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ημερήσια ακτινοβολία, H_0 , για κάθε μήνα:

$$K_T = \frac{H}{H_0}$$

Ωριαίος δείκτης αιθριότητας, k_T , καλείται ο λόγος της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, I , προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαία ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, I_0 :

$$k_T = \frac{I}{I_0}$$

Οι τιμές των \bar{H} , H , I είναι από μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια με τη χρήση πυρανομέτρων.

Οι δείκτες αυτοί μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούν ένα μέτρο της σχετικής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία. Όσο περισσότερο αίθρια είναι ωστόσο η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της άμεσης ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

Ωστόσο, κρίνεται απαραίτητος ο διαχωρισμός της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας της ακτινοβολίας για τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια, η οποία και απαιτεί χωριστούς υπολογισμούς.

Για τη μέση μηνιαίως ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία, έχουμε τη σχέση των Collares-Pereira, Rabl:

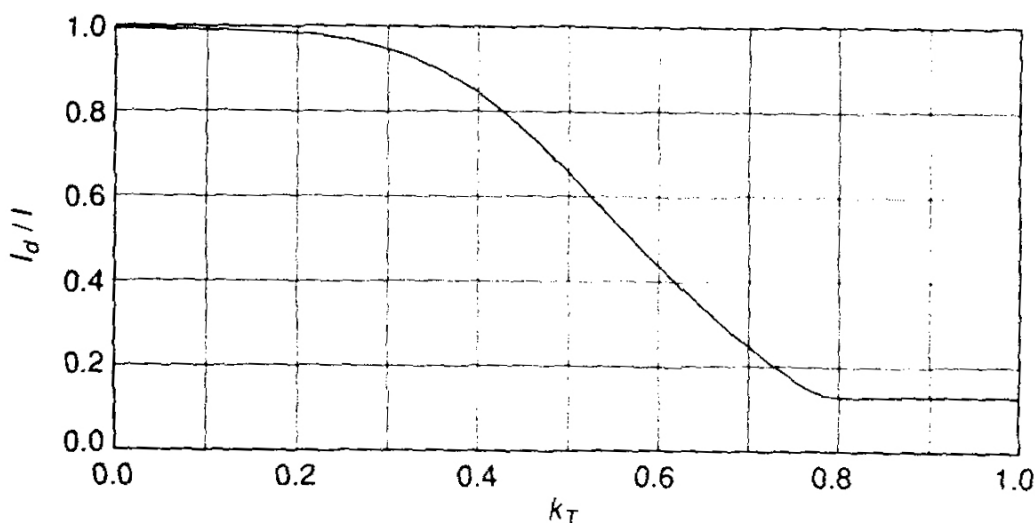
$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00606(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)] \cos(115\bar{K}_T - 103)$$

Ομοίως, για τη διάχυτη συνιστώσα της ημερήσιας ακτινοβολίας προτείνονται οι σχέσεις των Collares-Pereira, Rabl:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 & \text{για } K_T \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_T + 9,473K_T^2 - 21,865K_T^3 + 14,648K_T^4 & \text{για } 0,17 < K_T < 0,75 \\ -0,54K_T + 0,632 & \text{για } 0,75 < K_T < 0,80 \\ 0,2 & \text{για } K_T \geq 0,80 \end{cases}$$

Τέλος, για τον υπολογισμό των συνιστωσών της ωριαίας ακτινοβολίας, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, η πιο απλή και ακριβής από τις οποίες προτείνει τις σχέσεις των Orgill και Hollands:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T & \text{για } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{για } 0,22 < k_T \leq 0,80 \\ 0,165 & \text{για } k_T > 0,8 \end{cases}$$



Σχήμα 17 Σχέση μεταξύ διάχυτης και μετρούμενης ακτινοβολίας (Duffie & Beckman, 2006)

3.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΡΙΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Σε αρκετές περιπτώσεις, είναι επιθυμητός ο υπολογισμός ωριαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ υπάρχουν ημερήσια δεδομένα. Έτσι, εισάγεται ο συντελεστής r_t , ο

οποίος εκφράζει το ηλικό της ωριαίας ακτινοβολίας προς την ημερήσια και δίνεται από τη σχέση:

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} (\alpha + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s}$$

3.7 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο όταν είναι γνωστή μόνο η ηλιακή ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια χρειαζόμαστε την κατεύθυνση από την οποία οι συνιστώσες της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας φτάνουν στην εξεταζόμενη επιφάνεια. Στην παράγραφο 2.10 εξετάσαμε από γεωμετρικής άποψης την κατεύθυνση της άμεσης ακτινοβολίας. Η κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας στον ουράνιο θόλο είναι συνάρτηση της νεφοκάλυψης και της ατμοσφαιρικής διαύγειας. Και οι δύο αυτές συνιστώσες μεταβάλλονται διαρκώς.

3.7.1 Ισοτροπικό μοντέλο

Η ακτινοβολία σε ένα κεκλιμένο επίπεδο θεωρείται ότι περιέχει τρεις συνιστώσες: την άμεση, την ισοτροπικά διαδεδομένη διάχυτη και την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία. Ο υπολογισμός της συνιστώσας για τη διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στον ουράνιο θόλο. Προκύπτει, έτσι, ο διορθωτικός συντελεστής για τη διάχυτη ακτινοβολία, R_d , που είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{dT}) προς αυτήν στο οριζόντιο (I_d). Από ολόκληρη τη διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο, ένα μόνο ποσοστό δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο. Το ποσοστό αυτό είναι ο λόγος του τμήματος του ουράνιου θόλου που "βλέπει" το κεκλιμένο επίπεδο προς ολόκληρη την ημισφαιρική επιφάνεια του ουράνιου θόλου. Για ένα κεκλιμένο επίπεδο, κλίσης, β , που δε δέχεται σκίαση, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής είναι:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{\rho_g} \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Μπορεί να υποθεθεί [όπως έχει προταθεί από τους Hottel και Woertz (1942)] ότι ο συνδυασμός διάχυτης και ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας είναι ισοτροπικός. Με αυτήν την παραδοχή το άθροισμα διάχυτης από τον ουρανό και ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι το ίδιο ανεξαρτήτως προσανατολισμού.

3.7.2 Ανισοτροπικό μοντέλο

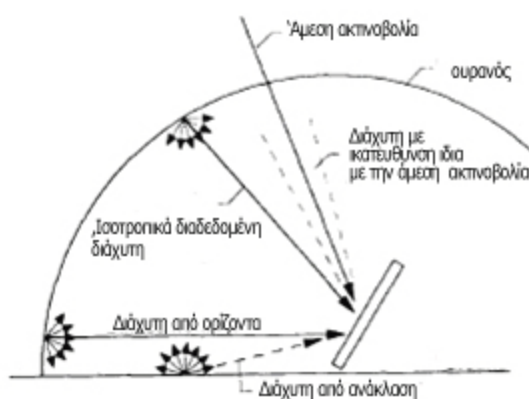
Το ανισοτροπικό μοντέλο δίνει μια μέθοδο για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε μία κεκλιμένη επιφάνεια στην επιφάνεια της γης. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση τις μετρήσεις που έχουμε για μία περιοχή στο οριζόντιο επίπεδο. Θεωρεί ότι η ακτινοβολία που φτάνει σε μία επιφάνεια στη γη αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες:

1. την άμεση ακτινοβολία
2. τη διάχυτη που έχει σκεδαστεί σε ένα κομμάτι γύρω από τον ήλιο αλλά ακολουθεί την κατεύθυνση της άμεσης (Circumsolar)
3. τη διάχυτη που διαδίδεται από όλο τον ουράνιο θόλο κατά τον ίδιο τρόπο
4. τη διάχυτη από το έδαφος και τον ορίζοντα που δεν έχει την ίδια κατεύθυνση με την άμεση

Συγκεκριμένα η συνολική ακτινοβολία σε μία κεκλιμένη επιφάνεια στη γη αποτελείται από τους όρους της παρακάτω εξίσωσης:

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{t,refl}$$

Ο πρώτος όρος υπολογίζει τη συνολική άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια. Ο δεύτερος τη συνολική διάχυτη ακτινοβολία η οποία είναι αποτέλεσμα της σκέδασης του ουράνιου θόλου. Ο τρίτος όρος υπολογίζει την ακτινοβολία που σκεδάζεται από ένα κομμάτι του ουρανού γύρω από τον ήλιο και έπειτα προωθείται μαζί με την άμεση ακτινοβολία. Ενώ οι δύο τελευταίοι εκφράζουν τη λάμψη του ορίζοντα (κυρίως τις ηλιόλουστες μέρες) και την ανακλώμενη από το έδαφος αντίστοιχα.



Σχήμα 18 Συνιστώσες της συνολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία κεκλιμένη επιφάνεια (Duffie & Beckman, 2006)

Ο υπολογισμός της άμεσης έρχεται από τη σχέση:

$$I_b = I_0 - I_d$$

Έχοντας υπολογίσει την άμεση και διάχυτη ακτινοβολία μπορούμε να επέμβουμε στη βασική εξίσωση και να υπολογίσουμε όλους τους όρους της:

$$I_{d,T} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} = I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + A_i R_b \right]$$

όπου A_i είναι δείκτης της άμεση ακτινοβολίας:

$$A_i = \frac{I_{bn}}{I_{on}} = \frac{I_b}{I_o}$$

Η συνολική ακτινοβολία σε μία κεκλιμένη επιφάνεια υπολογίζεται από την εξίσωση των the Hay, Davies, Klucher, Reindl (μοντέλο HDKR):

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d \left[(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Η αντανάκλαση του εδάφους δίνεται από την $I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$

όπου ρ_g είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους με τιμές από 0 έως 1.

Ο συντελεστής ανάκλασης (albedo), ρ_g , λαμβάνεται συνήθως 0,2, αλλά όταν η γύρω περιοχή είναι καλυμμένη με χιόνι, ο συντελεστής αυτός μπορεί να είναι πολύ υψηλός (π.χ. $\rho_g = 0,7$ κατά Liu-Jordan). (Ζάρρας, 2009)

Τυπικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης (albedo) για κάποιες κοινές επιφάνειες φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 4 Τιμές του συντελεστή ανάκλασης (albedo) (Ζάρρας, 2009)

Επιφάνεια	ρ_g
Τσιμέντο	0,17-0,27
Πέτρες-Τούβλα	0,2-0,4
Φρέσκο χιόνι	0,8-0,95
Παλιό χιόνι	0,5-0,65
Άσφαλτος	0,05-0,1
Χώμα	0,05-0,3
Άμμος	0,2-0,4
Γρασίδι	0,25-0,3
Καλλιέργειες	0,1-0,25
Δάσος	0,1-0,2
Υδάτινα σώματα (Εξαρτάται από το υψόμετρο του ήλιου)	0,1-0,6
Σκούρα στέγη	0,08-0,16
Ανοιχτή στέγη	0,35-0,5
Γρανίτης	0,3-0,35

Ο παράγοντας $\left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]$ είναι μία διόρθωση που εφαρμόζεται για την καλύτερη προσέγγιση των υπολογισμών τις συνεφιασμένες μέρες με:

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$$

3.8 ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ: ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για τη σχεδίαση θερμικών ηλιακών συστημάτων, εκτός από τον υπολογισμό της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια από μετρήσεις σε οριζόντια επιφάνεια, χρειαζόμαστε επίσης τη μέση μηνιαίως ημερήσια ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της \bar{H}_T είναι αντίστοιχη με αυτή για την I_T , δηλαδή αθροίζουμε τους όρους της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας. Αν θεωρήσουμε ότι η διάχυτη και η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία είναι ιστροπικές, τότε η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε μία μη σκιασμένη κεκλιμένη επιφάνεια μπορεί να εκφραστεί ως :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \bar{H} \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

και

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(\frac{1 - \bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

3.9 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Οι επιδράσεις της ατμόσφαιρας στη σκέδαση και στην απορρόφηση της ακτινοβολίας μεταβάλλονται με το χρόνο καθώς μεταβάλλονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και η μάζα του αέρα. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να καθοριστεί ένα πρότυπο διαυγούς ατμόσφαιρας και να υπολογιστεί η ωριαία και η ημερήσια ακτινοβολία που θα λαμβανόταν σε οριζόντια επιφάνεια υπό αυτές τις συνθήκες.

Ο Hottel (1976) παρουσίασε μία μέθοδο που υπολογίζει την άμεση ακτινοβολία που εκπέμπεται μέσω διαυγούς ατμόσφαιρας και η οποία λαμβάνει υπόψη τη ζενίθια γωνία και το υψόμετρο για μία πρότυπη ατμόσφαιρα και για τέσσερα διαφορετικά είδη κλίματος. Η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για άμεση ακτινοβολία τ_b ισούται με G_{bn}/G_{on} (ή G_{bT}/G_{oT}) και δίνεται με τη μορφή:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp \left(\frac{-k}{\cos \theta_z} \right)$$

Οι σταθερές a_0 , a_1 και k για την πρότυπη ατμόσφαιρα με ορατότητα 23 km υπολογίζονται από τα a_0^* , a_1^* και k που για υψόμετρο μικρότερο των 2,5 km δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2$$

$$\alpha_1^* = 0,5055 - 0,00595(6,5 - A)^2$$

$$k^* = 0,2711 - 0,01858(2,5 - A)^2$$

όπου A είναι το υψόμετρο όπου βρίσκεται ο παρατηρητής σε χιλιόμετρα. (Ο Hottel δίνει επίσης εξισώσεις για τα α_0^* , α_1^* και k για πρότυπη ατμόσφαιρα με ορατότητα έως 5 km.)

Για να ληφθεί υπόψη η αλλαγή του κλίματος, στα α_0^* , α_1^* και k εφαρμόζονται διορθωτικοί συντελεστές. Οι διορθωτικοί συντελεστές $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$ και $r_k = k/k^*$ δίνονται στον πίνακα:

Πίνακας 5 Διορθωτικοί συντελεστές για τα είδη κλιμάτων (Duffie & Beckman, 2006)

Τύπος κλίματος	r_0	r_1	r_k
Τροπικό	0.95	0.98	1.02
Μέσο καλοκαίρι	0.97	0.99	1.02
Καλοκαίρι πολικού ψύχους	0.99	0.99	1.01
Μέσος χειμώνας	1.03	1.01	1.00

Hottel (1976)

Έτσι η διαπερατότητα της εν λόγω ατμόσφαιρας για την άμεση ακτινοβολία προσδιορίζεται από οποιαδήποτε ζενίθια γωνία και από οποιοδήποτε υψόμετρο πάνω από 2,5 km. Η άμεση κάθετη ακτινοβολία τότε είναι:

$$G_{cnb} = G_{on}\tau_b$$

όπου ο τρόπος υπολογισμού του G_{on} δίνεται στην παράγραφο 2.5. Η άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι:

$$G_{cb} = G_{on}\tau_b \cos \theta_z$$

Για περιόδους μίας ώρας, η άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι:

$$I_{cb} = I_{on}\tau_b \cos \theta_z$$

3.10 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος και το συντελεστή αιθριότητας είναι δυνατό να εκτιμήσουμε την ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος μίας περιοχής. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου υπολογισμού της θερμοκρασίας και οι αντίστοιχες μετρούμενες τιμές από περιοχές όπου υπήρχαν δεδομένα τουλάχιστον δέκα ετών έχουν συγκριθεί και είναι όμοια με πολύ μικρές διαφορές και συνεπώς η μέθοδος είναι αποδεκτή.

3.10.1 Παρουσίαση του μοντέλου υπολογισμού

Σύμφωνα με τον Erbs η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος για μία ώρα του μήνα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\bar{T}_{m,h} = \bar{T}_m + A_m[0,4632 \cos(t - 3,805) + 0,0984 \cos(2t - 0,360) + 0,0168 \cos(3t - 0,822) + 0,0138 \cos(4t - 3,513)]$$

όπου \bar{T}_m είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος για ένα μήνα (m) σε °C, t είναι ο αδιάστατος αριθμός που εκφράζει την ώρα της ημέρας, A_m είναι η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας ενός μήνα (m) σε °C, με τα t και A_m να υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$t = 2\pi(h - 1)/24$$

$$A_m = 25,8\bar{K}_T - 5,21$$

$h = 1$ αντιστοιχεί στη 1.00 π.μ. και $h = 24$ αντιστοιχεί στα μεσάνυχτα. (Parakostas, Bentoulis, Bakas, & Kyriakis, 2007)

Από την τελευταία εξίσωση παρατηρούμε ότι το πλάτος της ημερήσιας διακύμανσης σχετίζεται με το μέσο μηνιαίο δείκτη αιθριότητας (\bar{K}_T) ο οποίος έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 3.5.

4 ΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

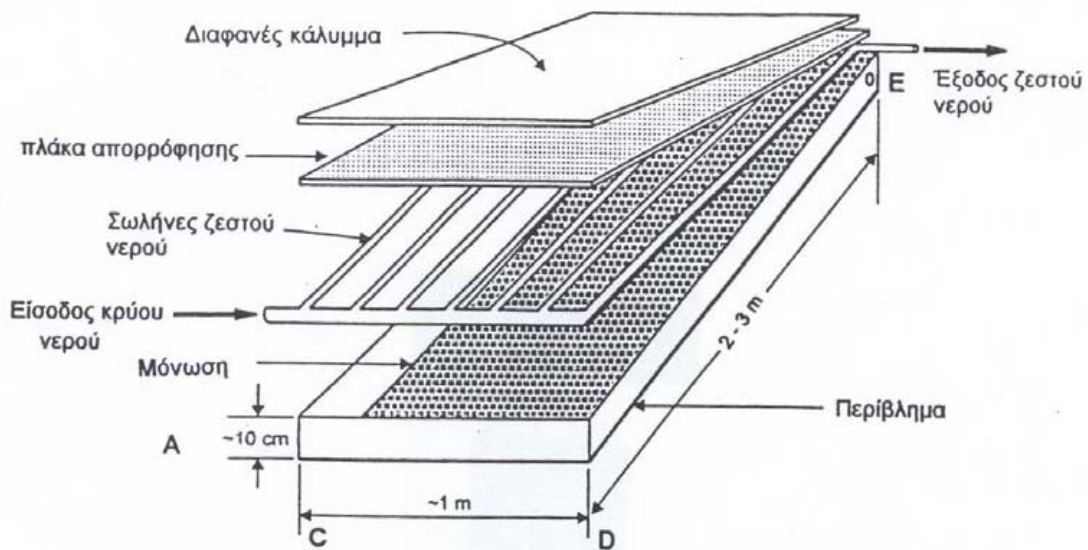
Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιασθούν με συνοπτικό τρόπο οι διάφοροι τύποι θερμικών ηλιακών συλλεκτών και συστημάτων, αποσκοπώντας στο να τονιστεί ότι η πληθώρα τύπων ηλιακών συλλεκτών ή / και συστημάτων, καθώς και η σχεδιαστική τους πολυπλοκότητα, καθιστά εν γένει την προσομοίωση δύσκολη και αρκετές φορές αδύνατη. Για ορισμένους μάλιστα τύπους συλλεκτών, ο προσδιορισμός των θερμοϋδραυλικών τους χαρακτηριστικών με προτυποτεχνικές διαδικασίες είναι εξαιρετικά δυσχερές (για παράδειγμα σωλήνες κενού με ανακλαστήρες) ή ακόμα και αδύνατος λόγω της απουσίας τέτοιων διαδικασιών (για παράδειγμα συγκεντρωτικοί συλλέκτες). Ως συνέπεια των παραπάνω είναι δύσκολο, και σε ορισμένες περιπτώσεις αδύνατο, να αναπτυχθούν αναλυτικές γενικευμένες εκφράσεις προσομοίωσης και πρόβλεψης της μακρόχρονης ενεργειακής απολαβής για τα περισσότερα από τα ηλιακά συστήματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

Λόγω των προαναφερθεισών αδυναμιών ανάλυσης συλλεκτών προκύπτει η ανάγκη, παράλληλα και το κίνητρο, εύρεσης μίας μεθόδου μοντελοποίησης των θερμικών ηλιακών, συστημάτων ανεξαρτήτως τύπου, μεγέθους και σκοπού χρήσης, που θα βασίζεται στη θεώρησή τους ως ένα λειτουργικά ενιαίο σύνολο. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η μέθοδος αυτή.

4.2 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

4.2.1 Επίπεδος συλλέκτης

Ο πλέον διαδεδομένος τύπος ηλιακού συλλέκτη είναι ο επίπεδος, με κύρια γνωρίσματα την επίπεδη απορροφητική επιφάνεια, το παράλληλο προς αυτή διαφανές κάλυμμα, και τη μόνωση της πλάτης και των πλευρικών επιφανειών με υλικά υψηλής θερμικής αντίστασης με σκοπό τη μείωση των θερμικών απωλειών (Σχήμα19).



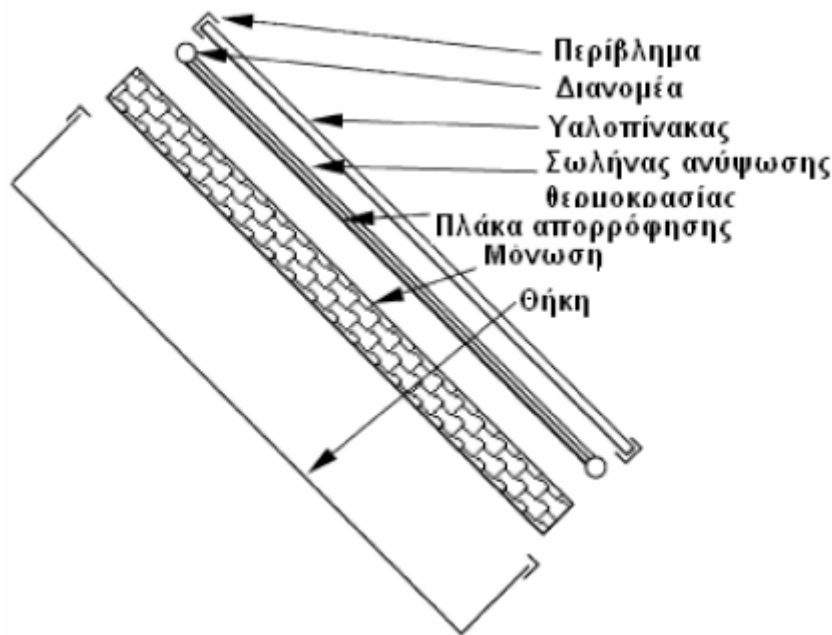
Σχήμα 19 Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης και συνθετικά του μέρη (συνήθεις διαστάσεις) (Μπελεσιώτης, 2006)

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία περνά διαμέσου του διάφανου καλύμματος και προσπίπτει πάνω σε μια “μαυρισμένη” απορροφητική πλάκα επιλεκτικού υλικού επιφανείας, ένα μεγάλο μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από την πλάκα και έπειτα μεταφέρεται στο ρευστό που ρέει μέσα στους σωλήνες, το οποίο εν συνεχεία οδηγείται είτε για αποθήκευση είτε για χρήση. Οι σωλήνες που ρέει το υγρό μπορούν είτε να συγκολληθούν είτε να αποτελούν ένα ενιαίο κομμάτι με την πλάκα. Οι σωλήνες αυτοί επίσης συνδέονται και στα δύο τους άκρα με συλλέκτες.

Το διαφανές κάλυμμα χρησιμοποιείται για τη μείωση των απωλειών συναγωγής από την πλάκα απορρόφησης μέσω του περιορισμού του στάσιμου στρώματος αέρα μεταξύ της πλάκας απορρόφησης και του γυαλιού. Μειώνει επίσης και τις απώλειες ακτινοβολίας από το συλλέκτη αφού το γυαλί είναι μεν διάφανο για τη χαμηλού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία αλλά εμφανίζεται σχεδόν αδιαφανές για τη μεγάλου μήκους κύματος θερμική ακτινοβολία (υπέρυθρη ακτινοβολία) η οποία εκπέμπεται από την πλάκα απορρόφησης (φαινόμενο του θερμοκηπίου).

Οι επίπεδοι συλλέκτες είναι συνήθως σταθερά στερεωμένοι σε δεδομένο προσανατολισμό και δεν απαιτούν σύστημα παρακολούθησης του ήλιου. Οι συλλέκτες πρέπει να προσανατολίζονται προς τον ισημερινό, “βλέποντας” νότια για το βόριο ημισφαίριο και βόρεια για το νότιο ημισφαίριο. Η ιδανική κλίση, που πρέπει να έχουν, ισούται με το γεωγραφικό πλάτος (latitude) της περιοχής που θα τοποθετηθούν με μια διακύμανση της γωνίας περίπου με $10^{\circ} - 15^{\circ}$, αναλόγως της εφαρμογής.

Ένα επίπεδος συλλέκτης γενικά αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα όπως αυτά φαίνονται και στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20 Αποτελούμενα μέρη ενός επίπεδου συλλέκτη (Παντελάκης, 2010)

Υαλοπίνακας: Ένα ή και περισσότερα στρώματα γυαλιού ή άλλου διαθερμικού υλικού

Σωλήνες, πτερύγια ή περάσματα: Βοηθούν στην αγωγή και στην κατεύθυνση του υγρού από την είσοδο στην έξοδο.

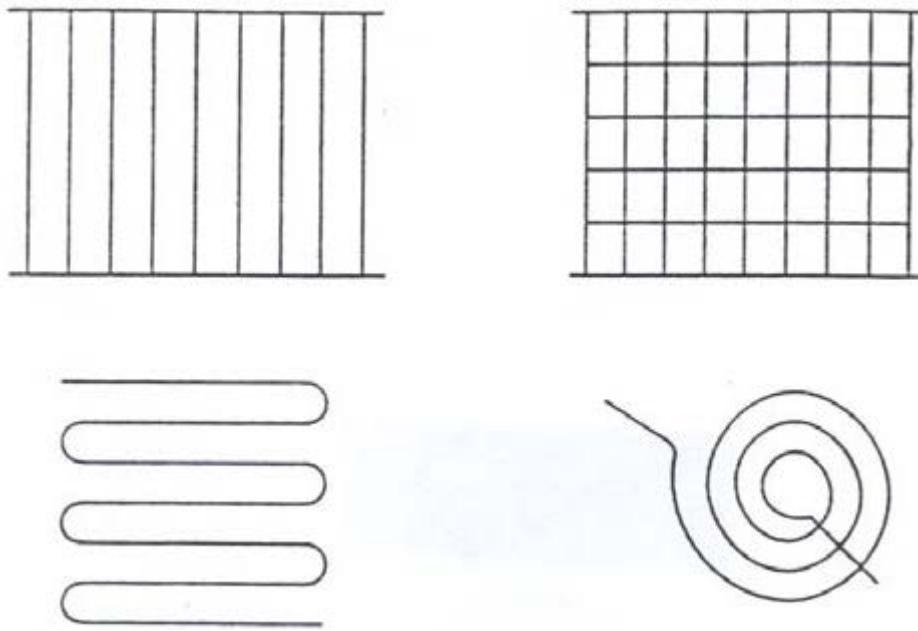
Απορροφητική πλάκα: Επίπεδη, κυματοειδής ή αυλακωτή πάνω στην οποία οι σωλήνες, τα πτερύγια ή τα περάσματα είναι συνδεδεμένα. Η πλάκα μπορεί να είναι και ακέραια με τους σωλήνες.

Διανομείς για την υποδοχή ή απόρριψη του ρευστού

Θερμομόνωση για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θερμότητας από την πίσω και την πλαϊνή πλευρά του συλλέκτη

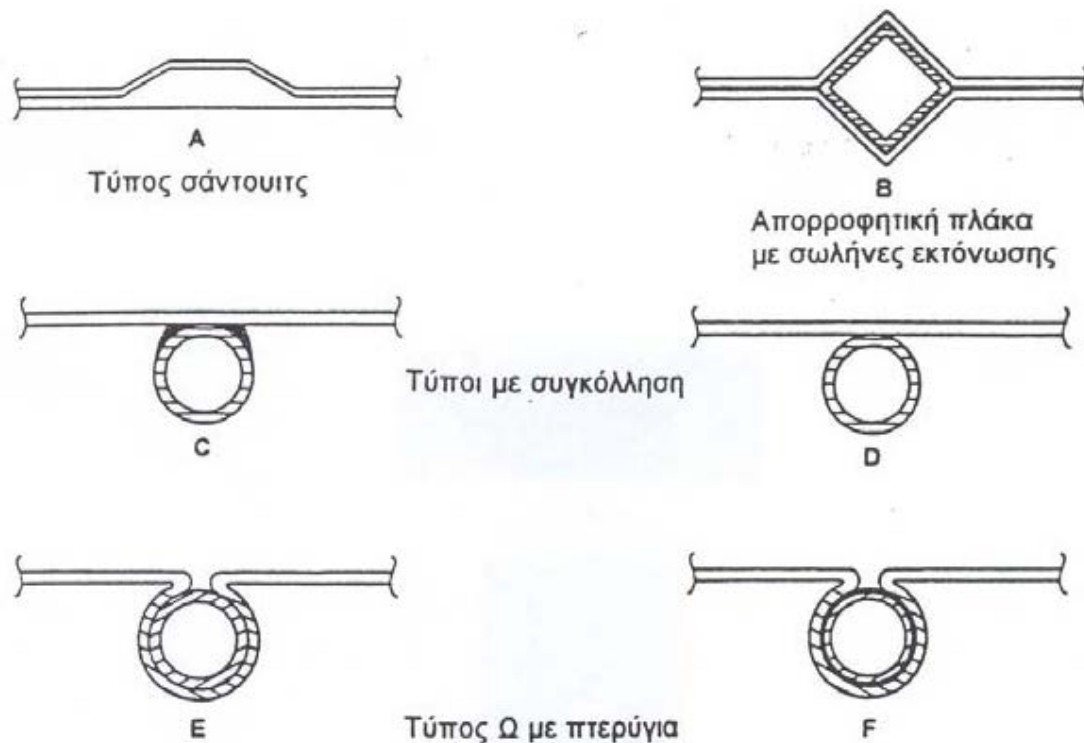
Θήκη για συγκράτηση και προστασία των προηγούμενων εξαρτημάτων από σκόνη, υγρασία κ.λπ.

Μια μεγάλη ποικιλία από επίπεδους συλλέκτες έχουν κατασκευαστεί με διαφορετική σχεδίαση και υλικά. Έχουν χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση υγρών όπως νερού, νερού σε συνδυασμό με πρόσθετα αντιπηκτικά ή αέρα. Ο κύριος τους σκοπός είναι να συγκεντρώσουν όση περισσότερη ηλιακή ενέργεια γίνεται στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Οι συλλέκτες πρέπει επίσης να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, ανεξάρτητα από τις αντίθετες συνέπειες της υπερϊώδους ακτινοβολίας του ήλιου, της διάβρωσης και του εμφράγματος εξαιτίας της οξύτητας, αλκαλικότητας ή σκλήρυνσης του θερμαινόμενου υγρού, πήξης του νερού ή εναπόθεσης σκόνης υγρασίας στην επιφάνεια του υαλοπίνακα είτε σπάσιμο αυτού εξαιτίας θερμικής διαστολής, χαλαζιού, βανδαλισμού κ.λπ..



Σχήμα 21 Διάφορες διαμορφώσεις σωλήνων της απορροφητικής επιφάνειας (Μπελεσιώτης, 2006)

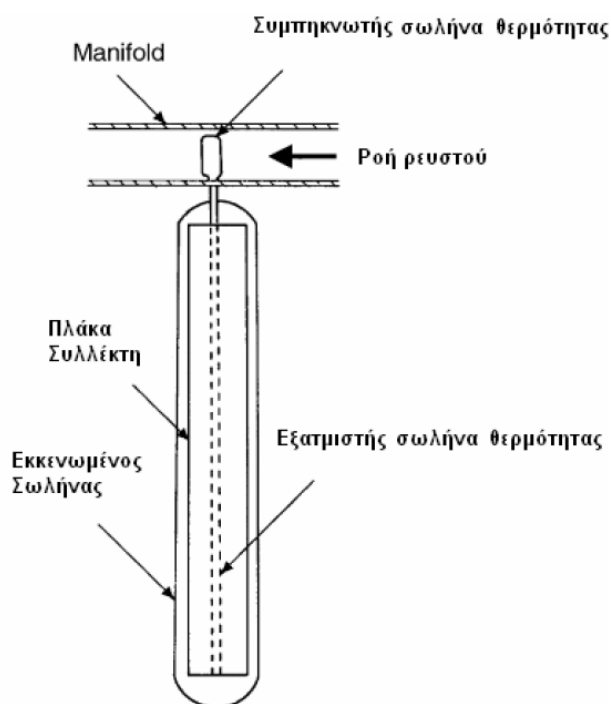
Στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται διάφοροι σχεδιασμοί σωληνώσεων της απορροφητικής επιφάνειας και στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται διάφορες διαμορφώσεις των σωληνώσεων για το σχηματισμό της απορροφητικής επιφάνειας.



Σχήμα 22 Διάφορες διαμορφώσεις της απορροφητικής επιφάνειας (Μπελεσιώτης, 2006)

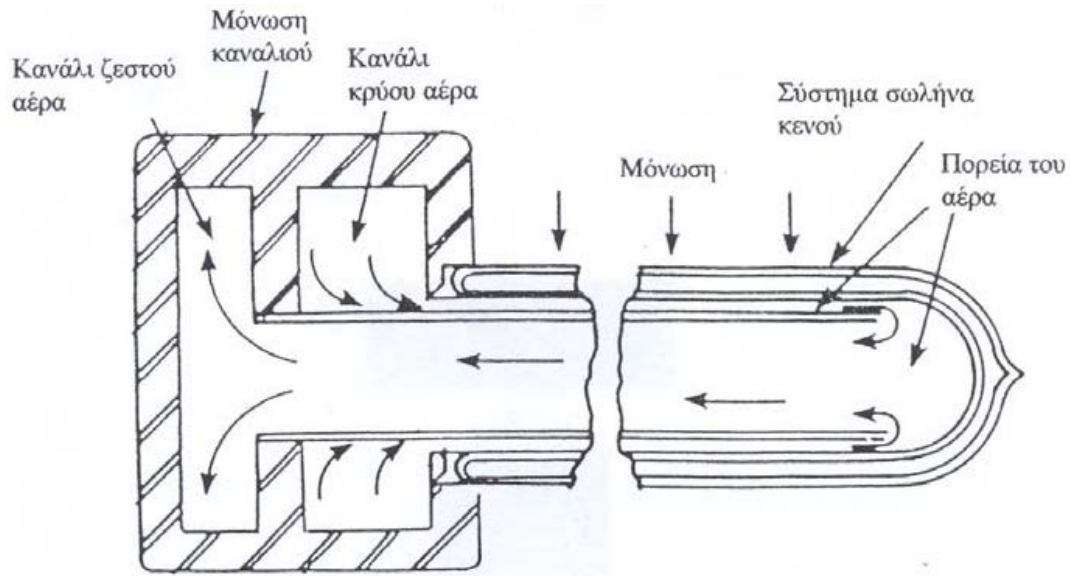
4.2.2 Συλλέκτης σωλήνων κενού

Ένας άλλος τύπος, επίσης διαδεδομένος, είναι ο θερμικός συλλέκτης στον οποίο η θερμική μόνωση του απορροφητή πραγματοποιείται με τη δημιουργία κενού αέρος. Ο συλλέκτης αυτός χρησιμοποιεί την εναλλαγή της υγρής-αέριας φάσης για τη μεταφορά θερμότητας με υψηλή απόδοση. Περιέχει ένα σωλήνα θερμότητας τοποθετημένο μέσα σε ένα εκκενωμένο σωλήνα. Ο σωλήνας, ο οποίος είναι ένας σφραγισμένος σωλήνας χαλκού, είναι συγκολλημένος με πτερύγιο χαλκού που συμπληρώνει τον κενό χώρο (πλάκα απορρόφησης). Η προεξοχή της μεταλλικής κορυφής συνδέεται με το σφραγισμένο σωλήνα (συμπυκνωτής). Ο σωλήνας θερμότητας περιέχει μια μικρή ποσότητα υγρού (π.χ. μεθανόλης), η οποία υπόκειται σε κύκλο εξάτμισης-συμπύκνωσης. Σε αυτόν τον κύκλο η ηλιακή ακτινοβολία εξατμίζει το υγρό, το οποίο στη συνέχεια συμπυκνώνεται και απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητά του στο ρευστό.



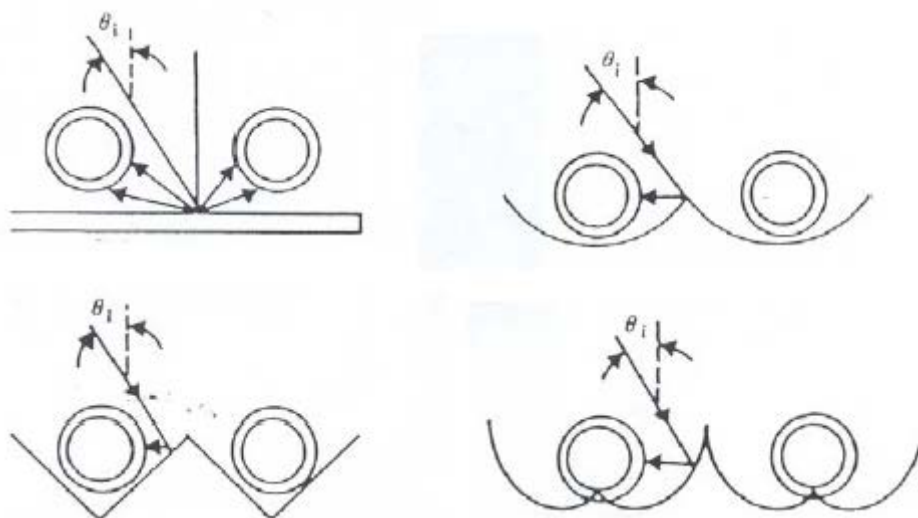
Σχήμα 23 Συλλέκτης σωλήνα κενού (Παντελάκης, 2010)

Στο Σχήμα 24 δίνεται η τομή ενός συλλέκτη σωλήνα κενού με τα διάφορα τμήματα αυτού.



Σχήμα 24 Τομή ενός σωλήνα κενού με τα διάφορα κατασκευαστικά τμήματα και την κυκλοφορία του ρευστού απολαβής της θερμότητας (Μπελεσιώτης, 2006)

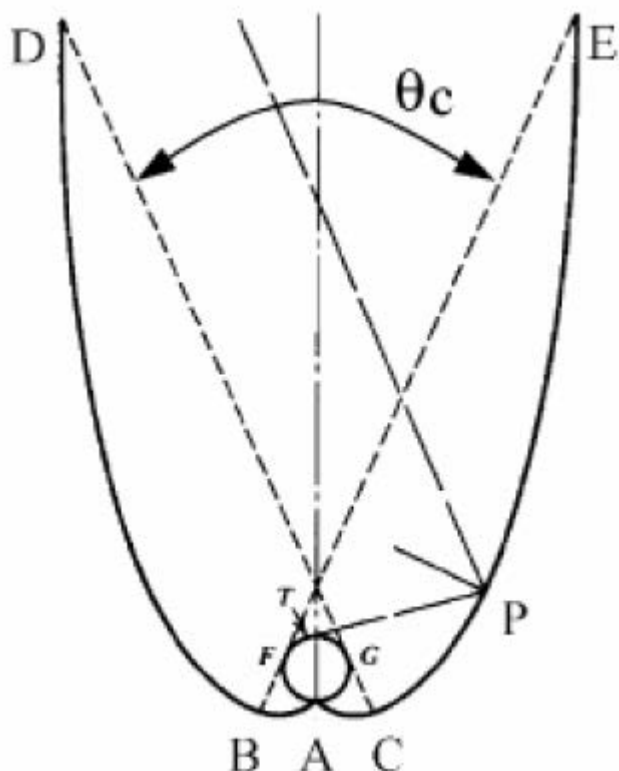
Στην ίδια κατηγορία εντάσσονται και οι συλλέκτες σωλήνων κενού με χρήση ανακλαστήρων διαφόρων μορφών (Σχήμα 25).



Σχήμα 25 Συλλέκτες σωλήνων κενού με ανακλαστήρες (Μπελεσιώτης, 2006)

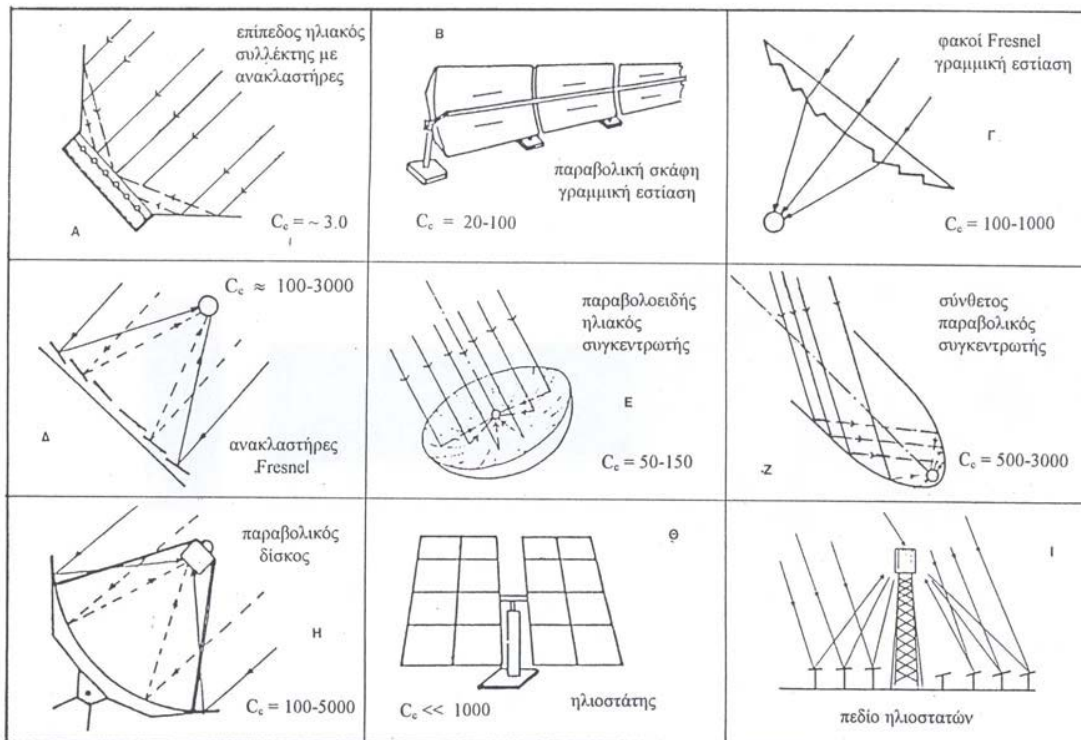
4.2.3 Σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες ανήκουν στην κατηγορία των non-imaging συλλεκτών. Έχουν τη δυνατότητα να ανανακλούν στον απορροφητή όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία εντός ευρέων ορίων της γωνίας που αυτή προσπίπτει πάνω στο συλλέκτη. Οι ανάγκες για κίνηση του συλλέκτη έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές στον ηλιακό προσανατολισμό μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας τις τομές δύο παραβολών, τη μία απέναντι στην άλλη όπως φαίνεται στο Σχήμα 26.



Σχήμα 26 Τομή σύνθετου παραβολικού συλλέκτη (Παντελάκης, 2010)

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες μπορούν να δεχτούν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία για ένα μεγάλο εύρος γωνιών πρόπτωσης. Χρησιμοποιώντας πολλαπλές εσωτερικές ανακλάσεις, οποιαδήποτε ακτινοβολία εντός των ορίων της (γωνίας υποδοχής), μπορεί να φτάσει το στοιχείο απορρόφησης, το οποίο μπορεί να είναι κυλινδρικό (Σχήμα 26), επίπεδο κ.ά.. Εφόσον τα ανώτερα τμήματα των παραβολών συμμετέχουν ελάχιστα μπορούν να κοπούν και να σχηματίσουν μικρότερους σε μέγεθος παραβολικούς συλλέκτες. Ακόμα οι παραβολικοί συλλέκτες συνήθως καλύπτονται με γυαλί για την αποφυγή της εισόδου σκόνης και άλλων υλικών και συνεπακόλουθη μείωση της αντανακλαστικότητας των επιφανειών των παραβολών των. (Παντελάκης, 2010)

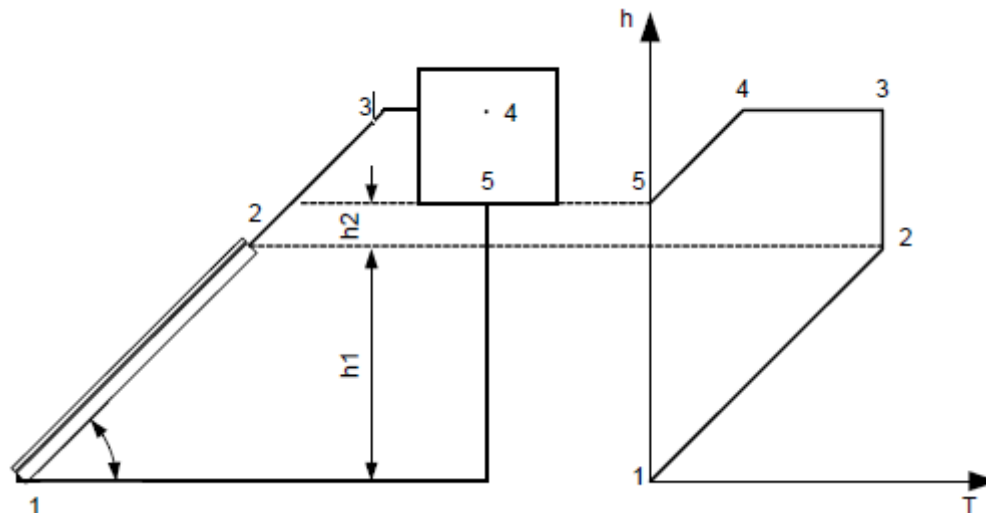


Σχήμα 27 Διάφοροι τύποι συγκεντρωτικών συλλεκτών και αντίστοιχος βαθμός συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (Μπελεσιώτης, 2006)

4.3 ΤΥΠΟΙ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

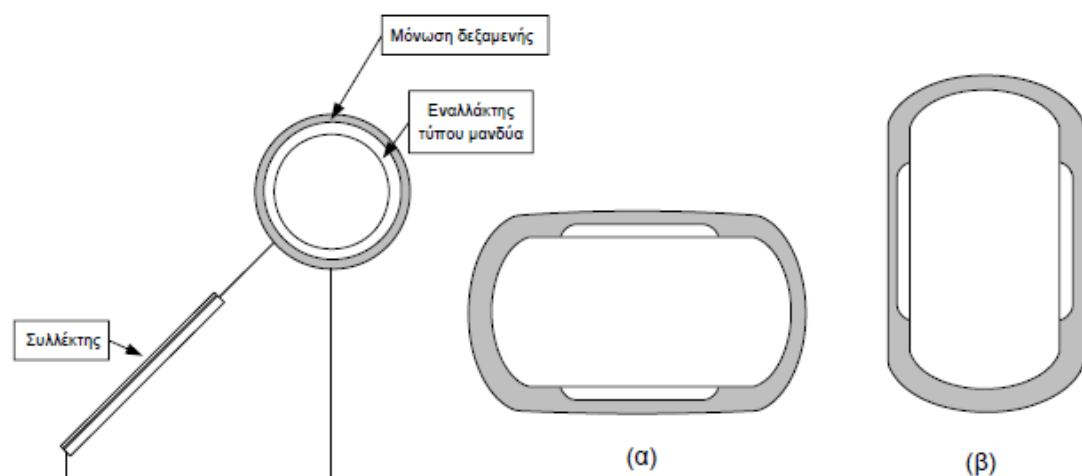
4.3.1 Οικιακά θερμοσιφωνικά συστήματα θερμού νερού χρήσης

Το βασικό χαρακτηριστικό των θερμοσιφωνικών συστημάτων είναι ότι την ωθούσα δύναμη για τη ροή του θερμικού φορέα, την καθορίζει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ψυχρής (έξοδος δεξαμενής – είσοδος συλλέκτη) και θερμής στήλης (είσοδος – έξοδος συλλέκτη), καθώς και το ύψος της θερμής / ψυχρής στήλης, h_1 (Σχήμα 28):



Σχήμα 28 Καθ' ύψος θερμοκρασιακή κατανομή σε θερμοσιφωνικά συστήματα (Μπελεσιώτης, 2006)

Η γεωμετρία των επιμέρους στοιχείων του συστήματος καθώς και ο τρόπος διάταξης είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για τη στιγμιαία συμπεριφορά του συστήματος όσο και για τη μακροχρόνια ενεργειακή απολαβή από αυτά. Μία άλλη σχεδιαστική παράμετρος που επηρεάζει ισχυρά τη στιγμιαία συμπεριφορά και την ενεργειακή απολαβή του θερμοσιφωνικού συστήματος, ειδικότερα στην περίπτωση των συστημάτων κλειστού κυκλώματος κυκλοφορίας του θερμικού φορέα μέσω εναλλάκτη τύπου μανδύα, αφορά τον ίδιο τον εναλλάκτη. Το μέγεθος του εναλλάκτη, η θέση εισόδου και εξόδου του θερμικού φορέα στη δεξαμενή αλλά και το είδος και ο προσανατολισμός της δεξαμενής (οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση), συνιστούν σημαντικές σχεδιαστικές παραμέτρους που καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος (Σχήμα 29).



Σχήμα 29 Θερμοσιφωνικά συστήματα κλειστού κυκλώματος με εναλλάκτη τύπου μανδύα και δεξαμενή (α) οριζόντιας και (β) κατακόρυφης τοποθέτησης (Μπελεσιιώτης, 2006)

4.3.2 Θερμικά ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας

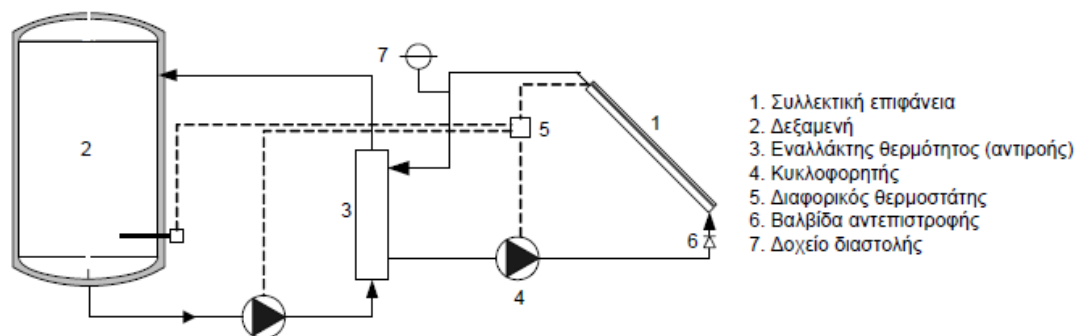
Τα θερμικά ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας είναι δυνατό να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, θεωρώντας ως κριτήριο το λόγο όγκου δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας V_s , προς συλλεκτική επιφάνεια A_c :

- I. Συστήματα με λόγο V_s/A_c μεταξύ 50 έως 100 l/m², για τα οποία ο χαρακτηριστικός χρόνος συλλογής και κατανάλωσης της ενέργειας είναι της τάξης της ημέρας.
- II. Συστήματα με λόγο V_s/A_c μεταξύ 100 έως 1000 l/m², για τα οποία ο χρόνος συλλογής και κατανάλωσης της ενέργειας μπορεί να είναι από μερικές ημέρες έως μερικές εβδομάδες. Αυτά τα συστήματα συνήθως αποκαλούνται «εποχιακά ηλιακά συστήματα»
- III. Συστήματα με λόγο V_s/A_c από 1000 έως και 3000 l/m² καλούνται διεποχιακά. Στα συστήματα αυτά η ενέργεια συλλέγεται κατά την περίοδο του έτους κατά την οποία οι απαιτήσεις φορτίου είναι ελάχιστες ενώ η ηλιακή προσφορά είναι πολύ μεγάλη, για παράδειγμα από Μάιο έως Σεπτέμβριο. Στο υπόλοιπο διάστημα του έτους αντίθετα, η κατανάλωση μεγιστοποιείται με την ηλιακή προσφορά να είναι χαμηλή (για παράδειγμα την περίοδο Νοέμβριος - Μάρτιος).

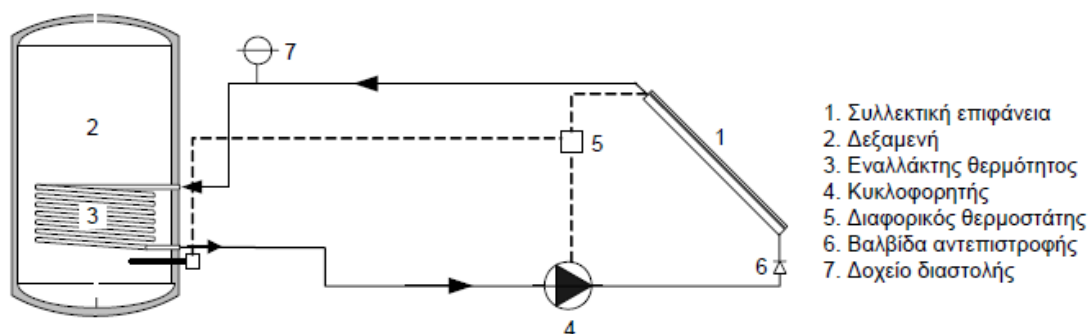
Τα βασικά στοιχεία που καθορίζουν τη θερμοϋδραυλική συμπεριφορά του συστήματος είναι:

1. ο τύπος και το μέγεθος της συλλεκτικής επιφάνειας,
2. ο τύπος, το μέγεθος και η θέση του εναλλάκτη, και
3. το μέγεθος και ο τύπος της διάταξης αποθήκευσης θερμότητας.

Στα Σχήματα 30 και 31 παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο τυπικά ηλιακά συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας τα οποία διαφοροποιούνται ως προς το είδος και τη θέση του εναλλάκτη.



Σχήμα 30 Σύστημα κλειστού κυκλώματος, εναλλάκτης έξω από τη δεξαμενή (Μπελεσιώτης, 2006)



Σχήμα 31 Σύστημα κλειστού κυκλώματος, εναλλάκτης εντός της δεξαμενής (Μπελεσιώτης, 2006)

4.4 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΣΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγικότητας των συλλεκτών, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, εύλογα αντιλαμβάνεται κανείς πως για να απορροφήσει τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να

ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

Στην πλειονότητα των ηλιοθερμικών συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των ηλιακών συλλεκτών, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις 90° . Η επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στη σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του συλλέκτη.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι 0° . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων) ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους.

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. Πρώτα επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα η θέση του συλλέκτη επηρεάζει το συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και το συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.

Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία γωνία 30° ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι 45° ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες π.χ. ξενοδοχεία η κλίση λαμβάνεται μικρότερη, περίπου 25° . Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

Τέλος, η τοποθέτηση τους είναι πολύ σημαντική και συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συλλέκτη. Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται στο έδαφος, σε οριζόντιες στέγες (ταράτσες), σε κεκλιμένες στέγες, σε στέγαστρα και σε προσόψεις κτιρίων.



Σχήμα 32 Εγκατάσταση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στο έδαφος (Τσαρτσάλης, 2012)



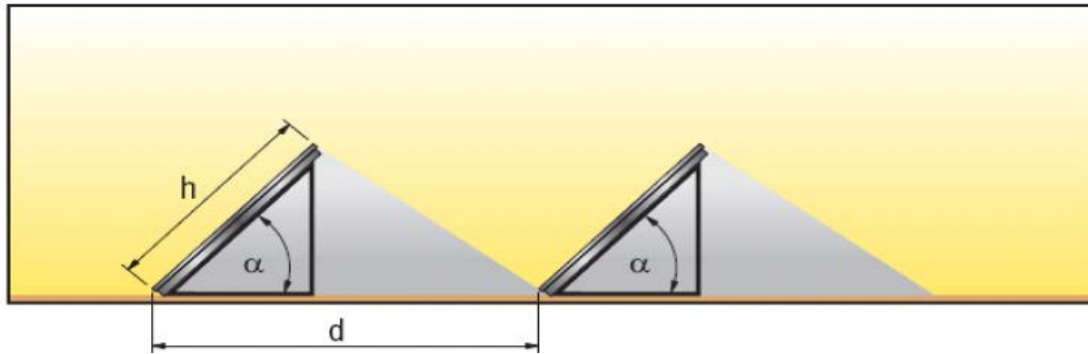
Σχήμα 33 Εγκατάσταση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη σε οριζόντια στέγη (Τσαρτσάλης, 2012)



Σχήμα 34 Εγκατάσταση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη σε κεκλιμένη στέγη (Τσαρτσάλης, 2012)

Στην περίπτωση της στέγης, αν έχει ελάχιστη κλίση 20° , οι συλλέκτες μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτή αντικαθιστώντας τα κεραμίδια. Αν επιλεγθεί ο παραπάνω τρόπος εγκατάστασης απαιτείται υψηλός βαθμός στεγανοποίησης και έχει μεγαλύτερες δυσκολίες στην κατασκευή από μία απλή στήριξη των συλλεκτών πάνω στη στέγη.

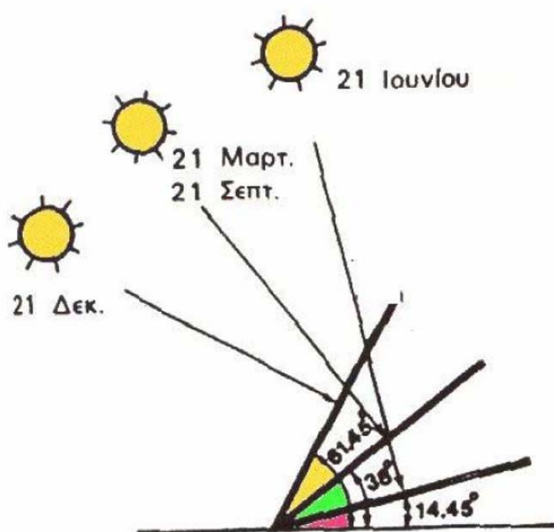
Στην περίπτωση που επιλεγθεί οριζόντια επιφάνεια (έδαφος ή ταράτσα), πρέπει να εξασφαλιστεί η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών των συλλεκτών, ώστε να μη σκιάζεται η επόμενη. (Τσαρτσάλης, 2012)



Σχήμα 35 Θέση τοποθέτησης ηλιακών συλλεκτών (Τσαρτσάλης, 2012)

4.5 ΠΡΑΚΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΛΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με το γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς το νότο). Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για το χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10° ως 15° μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο Σχήμα 36 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους.



Σχήμα 36 Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη (Τσαρτσάλης, 2012)

Συνοψίζοντας:

- Η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ).
- Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου $10^\circ - 15^\circ$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ).
- Κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου $10^\circ - 15^\circ$ μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (ϕ).
- Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.
- Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο γ) είναι νότιος ($\gamma = 0^\circ$), ενώ απόκλιση κατά $20^\circ - 30^\circ$ από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου $10 - 15\%$ μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατανάλωση ενέργειας για ένα σύστημα θέρμανσης ή ψύξης έχει άμεση επίδραση στο κόστος λειτουργίας του κτιρίου και έμμεση επίδραση στην ποιότητα του περιβάλλοντος.

Ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων υπολογισμού της ενέργειας έχει αναπτυχθεί κατά τα τελευταία έτη. Μεταξύ αυτών, οι πλέον λεπτομερείς μέθοδοι προσομοιώνουν την ωριαία δυναμική διαδικασία μεταφοράς θερμότητας όπως επίσης και τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος θέρμανσης. Αυτές είναι οι λεγόμενες «λεπτομερείς μέθοδοι προσομοίωσης» και απαιτούν ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα.

Απλούστερες μέθοδοι, που απαιτούν λιγότερα δεδομένα αλλά παρέχουν επαρκή αποτελέσματα για απλά συστήματα και εφαρμογές, χρησιμοποιούν μοντέλα σταθερής κατάστασης. Αυτές είναι οι λεγόμενες «μέθοδοι απλών υπολογισμών». Η εφαρμογή τους όμως περιορίζεται στις περιπτώσεις κατά τις οποίες ο τρόπος χρήσης του κτιρίου και η αποδοτικότητα του συστήματος θεωρούνται σταθερά, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά μόνο για συμβατικές εφαρμογές θέρμανσης κατοικιών ή μικρών επαγγελματικών κτιρίων, δεδομένου ότι σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο τρόπος χρήσης του κτιρίου και η αποτελεσματικότητα του συστήματος δε μπορούν να θεωρηθούν σταθερά.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Η σχεδίαση και υλοποίηση κάθε είδους εγκατάστασης συνοδεύεται πάντα από λιγότερο ή περισσότερο σημαντικές αβεβαιότητες ως προς το αναμενόμενο αποτέλεσμα, δηλαδή για το κατά πόσο ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις οι οποίες επέβαλαν την ύπαρξή της. Είναι προφανές ότι οι αβεβαιότητες αυτές είναι ισχυρή συνάρτηση τόσο της πολυπλοκότητας των φυσικών φαινομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία της ίδιας της εγκατάστασης, όσο και του βαθμού βεβαιότητας σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν το αποτέλεσμα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στις σύγχρονες βιομηχανοποιημένες και εμπορευματοποιημένες κοινωνίες, η παραγωγή προϊόντων οφείλει να υπακούει στη λογική της οικονομικής και, κατά συνέπεια, τεχνολογικής αποτελεσματικότητας με στόχο την ελαχιστοποίηση των αστοχιών, δηλαδή των αποκλίσεων του αποτελέσματος από τις προσδοκίες. Το «όνειρο» του κάθε εμπλεκόμενου, σχεδιαστή ή μηχανικού, είναι να ελέγχει εκ των προτέρων τόσο

αποτελεσματικά όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν το τελικό προϊόν, ώστε να εκμηδενιστεί, κατά το δυνατόν, ο κίνδυνος αυτών των αποκλίσεων.

Ολόκληρη η σύγχρονη, αλλά και η λιγότερο πρόσφατη ιστορία ανάπτυξης της τεχνολογίας και των επιστημών, είναι διάσπαρτη από επεισόδια αυτού του αγώνα ανάμεσα στις αβεβαιότητες του παρόντος και στις αστοχίες του μέλλοντος. Αγώνα που εστιάζεται κυρίως στο επίπεδο της κατανόησης των νόμων που διέπουν τη συμπεριφορά του προϊόντος, δηλαδή της βαθύτερης γνώσης των σχέσεων αιτίων-αποτελέσματος, ή αλλιώς του μοντέλου συμπεριφοράς του προϊόντος.

Η προσομοίωση ή μοντελοποίηση συνιστά μια παλαιά δραστηριότητα, ορίζεται δε ως η προσπάθεια ανάκτησης πληροφορίας σχετικά με μια διεργασία, με τη βοήθεια υπολογισμών. Η ανάγκη ωστόσο για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των κάθε είδους διεργασιών επέβαλε τη γενίκευση της χρήσης των κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων για τη σχεδίαση και αξιολόγηση νέων και υφιστάμενων διεργασιών, ειδικότερα τις τελευταίες δεκαετίες με τη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι προσομοιωτές διεργασιών (process simulator) έχουν κατακτήσει μια σημαντική θέση στο οπλοστάσιο του επιστήμονα, του μηχανικού και του εκπαιδευτικού.

Βεβαίως, η αποτελεσματικότητα ενός μοντέλου δεν είναι συνάρτηση μόνο της ποιότητας του μοντέλου, δηλαδή της ακρίβειας με την οποία περιγράφει τα φυσικά φαινόμενα που καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός προϊόντος. Απαιτείται ακόμα η γνώση των συνθηκών μέσα στις οποίες θα υπάρξει το προϊόν, συνθηκών που συνήθως εμφανίζονται ως τιμές των μεταβλητών του μοντέλου. Συχνά, η γνώση των μεταβλητών αυτών αποτελεί σημαντική πηγή αβεβαιότητας και παραπέμπει στη χρήση άλλων δευτερευόντων μοντέλων τα οποία, με τη σειρά τους, εμπλέκουν άλλες παραμέτρους και μοντέλα συμπεριφοράς.

Οι γενικές αρχές που περιγράφηκαν παραπάνω έχουν πλήρη εφαρμογή και στην περίπτωση των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της θερμικής ηλιακής ενέργειας, με ορισμένες βέβαια εύλογες προσαρμογές λόγω των ιδιομορφιών που χαρακτηρίζουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία.

Η επίγνωση ότι η αλόγιστη πρόσδεση της ανάπτυξης των σύγχρονων κοινωνιών σε ένα ενεργειακό μοντέλο σχεδόν αποκλειστικά βασισμένο στην εκμετάλλευση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων θα κατέληγε σε οικολογικά, οικονομικά και γεωπολιτικά αδιέξοδα. Οδήγησε λοιπόν, εδώ και χρόνια στην αναζήτηση αποδοτικών τρόπων εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γενικά και της ηλιακής ενέργειας ειδικότερα.

Εξαρχής το βασικό ερώτημα που ετέθη - και εξακολουθεί να υφίσταται - μπορεί να συνοψιστεί ως ακολούθως: *ποια τεχνολογική λύση είναι η πλέον ενδεδειγμένη ώστε, για δεδομένες ανάγκες, να υπάρξει το μέγιστο ενεργειακό κέρδος με το χαμηλότερο δυνατό κόστος; Δεν είναι δύσκολο να αντιληφθεί κανείς ότι το ερώτημα αυτό, αν και σαφές, δεν επιδέχεται μια ευθεία απάντηση, δεδομένου ότι:*

- Τόσο η προσφορά ανανεώσιμου δυναμικού, όσο και η ζήτηση ενέργειας (οι «ανάγκες») συνιστούν μεγέθη χαρακτηριζόμενα από μια έντονη χρονική μεταβλητότητα, η οποία επιπλέον δεν υπακούει σε απόλυτα καθορισμένους

νόμους αλλά αντίθετα παρουσιάζει έναν έντονα τυχαίο χαρακτήρα. Πώς να καθοριστεί με ακρίβεια ένα σύστημα όταν δεν είναι επαρκώς γνωστά τα δεδομένα που το τροφοδοτούν και οι ανάγκες που καλείται να υπηρετήσει;

- Η εμπειρία δείχνει ότι η οικονομική ανταποδοτικότητα τέτοιων εγκαταστάσεων δεν είναι δεδομένη, αλλά υπόκειται σε μια διαρκή, εύλογη ή κατευθυνόμενη αμφισβήτηση. Πώς να εμπιστευθεί ο χρήστης μια τεχνολογία, όταν υπάρχουν απτά παραδείγματα αποτυχημένων προσπαθειών;
- Υπάρχει μια κλασική δυσκολία, χαρακτηριστική των ενεργειακών προβλημάτων (και όχι μόνο): από τη στιγμή που θα υπάρχει ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών από μια ανανεώσιμη και κατά βάση δωρεάν πηγή ενέργειας, οι χρήστες τείνουν φυσιολογικά στην εντατικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων πόρων, αυξάνοντας έτσι το προς ικανοποίηση φορτίο. Πώς λοιπόν να οριστεί με ακρίβεια ένα πρόβλημα, η επίλυση του οποίου αλλάζει τα αρχικά δεδομένα στα οποία βασίστηκε η επίλυση, καθιστώντας τη λύση άκυρη;

Το αρχικό ερώτημα είναι επομένως σκόπιμο να διατυπωθεί διαφορετικά, αναδιατάσσοντας τις προτεραιότητες: *εάν επιλεγεί ένα ορισμένο σύστημα, υποθέτοντας παράλληλα ότι η προσφορά ανανεώσιμου δυναμικού θα ακολουθήσει ένα προφίλ χαρακτηριστικό – από στατιστική άποψη – του συγκεκριμένου τύπου εφαρμογής, σε ποιο βαθμό προβλέπεται να καλυφθεί το συγκεκριμένο είδος αναγκών (φορτίου);*

Το νέο αυτό ερώτημα είναι σαφώς ποιο εύκολο να απαντηθεί, απουσιάζει όμως το χαρακτηριστικό της βελτιστοποίησης: το σύστημα έχει προεπιλεγεί, τη στιγμή που το αρχικό ερώτημα αφορούσε ακριβώς την αναζήτηση αυτής της επιλογής. Η τελευταία αυτή δυσκολία μπορεί να υπερπηδηθεί επαναλαμβάνοντας την απάντηση για μια ολόκληρη γκάμα τεχνολογικών λύσεων – μεταξύ αυτών που υποψιαζόμαστε ως τις πλέον κατάλληλες, συγκρίνοντας τις αναμενόμενες για κάθε σύστημα αποδόσεις και, τέλος, επιλέγοντας την καταλληλότερη με βάση συγκεκριμένα τεχνικοοικονομικά κριτήρια.

Επανερχόμενοι στη σημασία της δυνατότητας πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός θερμικού ηλιακού συστήματος, μπορούμε να πούμε ότι στην περίπτωση των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της θερμικής ηλιακής ενέργειας, όπως και σε πολλές άλλες περιπτώσεις, υπάρχει ανάγκη για εργαλεία προσομοίωσης τα οποία θα βασίζονται σε αξιόπιστα μοντέλα ενεργειακής συμπεριφοράς των εγκαταστάσεων. Η χρησιμότητα των εργαλείων αυτών είναι πολλαπλή και αφορά ζωτικής σημασίας δραστηριότητες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

– Σχεδιασμός νέων εγκαταστάσεων

Αφορά τη δυνατότητα εκτέλεσης αριθμητικών πειραμάτων τα οποία θα αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα σενάρια με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων χρήσιμων για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων. Τα σενάρια αυτά μπορούν να διαφοροποιούνται είτε ως προς την αρχιτεκτονική των εγκαταστάσεων (π.χ. αριθμός, γεωμετρία, θέση και διασύνδεση δεξαμενών θερμού νερού, διασύνδεση συστοιχιών συλλεκτών, ύπαρξη, θέση και τύπος εναλλακτών κλπ), είτε ως προς τις τιμές βασικών παραμέτρων (π.χ. συνολική επιφάνεια συλλεκτών, μέγεθος δεξαμενών, παροχές θερμικού φορέα, κλίση και προσανατολισμός συλλεκτών κλπ),

είτε τέλος ως προς εναλλακτικές δυνατότητες πρόσληψης της χρήσιμης ενέργειας (θερμοκρασία ή / και χρονική κατανομή φορτίου).

Η χρησιμότητα της δυνατότητας αυτής και η εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων την οποία συνεπάγεται, γίνεται εμφανής εάν αναλογιστεί κανείς τις πρακτικές δυσκολίες, ή καλύτερα την αδυναμία εκτέλεσης πραγματικών πειραμάτων με σκοπό την αξιολόγηση της μιας ή της άλλης λύσης.

– Διερεύνηση της παθολογίας και βελτιστοποίηση εγκατεστημένων συστημάτων

Δεν είναι σπάνιο φαινόμενο ήδη εγκατεστημένα θερμικά ηλιακά συστήματα να εμφανίζουν μια ενεργειακή συμπεριφορά διαφορετική από αυτή που είχε επιδιωχθεί κατά το σχεδιασμό τους και γενικά να μην αποδίδουν τα αναμενόμενα. Συχνά οι λόγοι που προκαλούν τα προβλήματα αυτά είναι προφανείς, σε πολλές όμως περιπτώσεις ο εντοπισμός τους είναι εξαιρετικά δύσκολος, δεδομένης της πολυπλοκότητας και του πολυ-παραμετρικού τους χαρακτήρα.

Η χρήση εργαλείων προσομοίωσης επιτρέπει, με τη βοήθεια της κατάλληλης παραμετρικής ανάλυσης, δηλαδή της μελέτης των επιδόσεων του συστήματος όταν αλλάζουν ορισμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του, τη διερεύνηση των αιτιών των παρατηρούμενων αποκλίσεων και τη μελέτη και υλοποίηση διορθωτικών παρεμβάσεων.

– Δοκιμή και ενεργειακός χαρακτηρισμός προϊόντων

Στη σύγχρονη εμπορευματοποιημένη, παγκοσμιοποιημένη και άκρως ανταγωνιστική πραγματικότητα, ο ποιοτικός χαρακτηρισμός των διακινούμενων προϊόντων συνιστά προϋπόθεση επιβίωσης για τη βιομηχανία, ελάχιστη εγγύηση για τον καταναλωτή – χρήστη και όρο διασφάλισης του υγιούς ανταγωνισμού. Στην περίπτωση των θερμικών ηλιακών προϊόντων, ο ενεργειακός τους χαρακτηρισμός συνιστά κρίσιμο ποιοτικό χαρακτηριστικό, στο βαθμό που επιτρέπει στο χρήστη να συγκρίνει αποδόσεις και τιμές και να αποφασίσει ανάλογα.

Είναι προφανές ότι ο ενεργειακός αυτός χαρακτηρισμός των προϊόντων δεν είναι αποδεκτό να περιορίζεται στα εξωτερικά ορατά τους χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα η συλλεκτική επιφάνεια ή ο όγκος της δεξαμενής θερμού νερού. Απαιτείται αντίθετα η ουσιαστική και αδιαμφισβήτητη αποτύπωση των πραγματικών τους επιδόσεων, με τρόπο επιστημονικά έγκυρο, εύκολα κατανοητό από τους υποψήφιους χρήστες και ο οποίος να επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ ομοειδών προϊόντων.

Ο αποτελεσματικότερος τρόπος επίτευξης του στόχου αυτού είναι ο προσδιορισμός μιας κάποιας «ενεργειακής ταυτότητας» του κάθε προϊόντος, και στη συγκεκριμένη περίπτωση η εύρεση της χαρακτηριστικής του εξίσωσης, δηλαδή της σχέσης αποδιδόμενης ενέργειας και μετεωρολογικών συνθηκών. Αυτό είναι απολύτως εφικτό με τις δοκιμές του προϊόντος σε μια ευρεία γκάμα συνθηκών και τον προσδιορισμό, στη βάση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, των τιμών εκείνων των

συντελεστών του μοντέλου που αφορούν το κάθε συγκεκριμένο προϊόν. Με τον τρόπο αυτό, η ενεργειακή συμπεριφορά όλων των προϊόντων περιγράφεται από την ίδια εξίσωση (μοντέλο), καθένα όμως από αυτά φέρει μια μοναδιαία ταυτότητα που δεν είναι άλλη από τους συντελεστές του μοντέλου. Ο χρήστης του προϊόντος μπορεί στη συνέχεια, ο ίδιος ή με τη βοήθεια ενός κοινά αποδεκτού μηχανισμού (π.χ. ενός σχήματος πιστοποίησης), να αξιολογήσει τα διαφορετικά προϊόντα, εφαρμόζοντας το μοντέλο για κάθε ένα από αυτά στις συνθήκες που τον ενδιαφέρουν και συγκρίνοντας την αναμενόμενη ενεργειακή απολαβή.

– Πρόβλεψη ενεργειακής απολαβής

Συνδεδεμένη με τα προηγούμενα, αλλά και ιδιαίτερης σημασίας δυνατότητα των εργαλείων προσομοίωσης, είναι η πρόβλεψη της αναμενόμενης ενεργειακής απολαβής από μια συγκεκριμένη θερμική ηλιακή εγκατάσταση σε δεδομένες συνθήκες χρήσης. Η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη τόσο για τον απλό οικιακό καταναλωτή, ο οποίος αναζητά επιβεβαίωση της ανταποδοτικότητας της απαιτούμενης επένδυσης, όσο και από όσους επενδύουν σε μεγάλες κεντρικές ηλιακές εγκαταστάσεις και προσβλέπουν σε συγκεκριμένους χρόνους απόσβεσης. Παράλληλα, η πρόβλεψη ενεργειακής απολαβής συχνά αποτελεί προαπαιτούμενο των σχετικών σχημάτων χρηματοδότησης, συμπεριλαμβανομένων των σχημάτων επιδότησης.

Βεβαίως, η χρησιμότητα των εργαλείων προσομοίωσης προϋποθέτει ότι τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα είναι επιστημονικά έγκυρα και πρακτικά αξιοποιήσιμα. Με δεδομένο μάλιστα το λιγότερο ή περισσότερο προσεγγιστικό χαρακτήρα του κάθε μοντέλου, οι επιδόσεις του δε συνιστούν αφηρημένη έννοια, αλλά κρίνονται σε συνάρτηση με τη σκοπούμενη χρήση του. Ένα μοντέλο ακριβές στις προβλέψεις του, το οποίο όμως απαιτεί για την εφαρμογή του μη διαθέσιμα δεδομένα, δεν είναι περισσότερο χρήσιμο από ένα άλλο προσεγγιστικό που απαιτεί μόνο ορισμένες βασικές πληροφορίες αλλά δίνει λιγότερο ακριβείς προβλέψεις.

Χαρακτηριστικό και εξαιρετικά συχνό πρόβλημα αποτελεί η διαθεσιμότητα των κατάλληλων μετεωρολογικών δεδομένων. Όπως είναι φυσιολογικό, οι προβλέψεις των μοντέλων είναι ισχυρή συνάρτηση των δεδομένων που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στον τόπο υλοποίησης μιας θερμικής ηλιακής εγκατάστασης, δεδομένα που θα έπρεπε, για τα περισσότερα σύγχρονα εργαλεία προσομοίωσης, να είναι διαθέσιμα σε τουλάχιστον ωριαία βάση. Είναι όμως ευρέως γνωστό ότι τα ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα, ακόμα και όταν υπάρχουν, δεν είναι τίποτε άλλο από μια στατιστική μετεωρολογική ταυτότητα του τόπου. Επομένως, είναι ισχυρότατη η πιθανότητα η πραγματική μελλοντική απόδοση του υπό προσομοίωση συστήματος να απέχει αισθητά από τις εκτιμήσεις του μοντέλου.

Από την άποψη αυτή, η έννοια της ακρίβειας των μοντέλων προσομοίωσης είναι προτιμότερο να αντικατασταθεί από αυτήν της καταλληλότητας τους, δηλαδή της ικανότητάς τους να οδηγούν σε εκτιμήσεις αρκούντως ορθές, με δεδομένη την ακρίβεια των δεδομένων που τα τροφοδοτούν. Και σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματά τους δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως προβλέψεις για το τι πράγματι θα συμβεί, αλλά ως

εκτιμήσεις για το τι θα συνέβαινε εάν οι συνθήκες προσομοίωσης ήταν οι πραγματικές, επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ συστημάτων.

Από τα όσα προαναφέρθηκαν αναφορικά με την καταλληλότητα και ιδιαίτερα με την ακρίβεια των μοντέλων προσομοίωσης, προκύπτει η σκοπιμότητα υιοθέτησης προσεγγίσεων που βασίζονται στη θεώρηση ενός Θερμικού Ηλιακού Συστήματος (Θ.Η.Σ.) ως ένα λειτουργικά ενιαίο σύνολο, τόσο – και κυρίως – από πλευράς πειραματικής αξιολόγησης και χαρακτηρισμού, όσο και από πλευράς προσομοίωσης, ανεξάρτητα από το σκοπό για τον οποίο έχει σχεδιαστεί και, γενικότερα, από τον τρόπο χρήσης του. Η θεώρηση αυτή έχει καίριο πρακτικό και οικονομικό ενδιαφέρον στο βαθμό που αίρει, κατά την προσομοίωση ενός Θ.Η.Σ, τις δυσχέρειες εκείνες που σχετίζονται με τη δυσκολία αναλυτικής διατύπωσης του μοντέλου συμπεριφοράς του συστήματος, δυσκολία που εντοπίζεται κυρίως στα ακόλουθα σημεία :

- I. Αδυναμία διατύπωσης αναλυτικών αλγεβρικών μοντέλων για ορισμένους τύπους συλλεκτών: Βασικό συστατικό ενός ηλιακού συστήματος είναι ο ηλιακός συλλέκτης, ο τύπος του οποίου καθορίζει εν γένει και τον τύπο της συλλεκτικής επιφάνειας της συνολικής διάταξης (π.χ. ηλιακό σύστημα με παραβολικά κάτοπτρα). Έως σήμερα οι συλλέκτες που έχουν αναπτυχθεί διακρίνονται σε τρεις τύπους: α) επίπεδος, β) συλλέκτης σωλήνων κενού και γ) συλλέκτες με συγκεντρωτικά κάτοπτρα. Για ορισμένους από τους τύπους αυτούς δεν υπάρχει ακόμη ούτε κοινά αποδεκτή προσέγγιση, ούτε κοινή μεθοδολογία προσδιορισμού των χαρακτηριστικών παραμέτρων του συλλέκτη (π.χ. συγκεντρωτικοί με παραβολικά κάτοπτρα με βαθμό συγκέντρωσης μεγαλύτερο του 2), με συνέπεια την αδυναμία εκτίμησης της ενεργειακής συμπεριφοράς του Θ.Η.Σ. στο οποίο χρησιμοποιούνται.
- II. Έλλειψη επαρκών πληροφοριών σχετικών με βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους του συστήματος: Ως τέτοιες μπορούν να αναφερθούν το πλήθος και ο τρόπος διασύνδεσης των ηλιακών συλλεκτών, ο τύπος, το μέγεθος, η θέση και η δυναμικότητα του εναλλάκτη θερμότητας, καθώς επίσης και η γεωμετρία, η θέση και το μέγεθος της διάταξης αποθήκευσης θερμότητας. Το πρόβλημα επιτείνεται στις περιπτώσεις ήδη εγκατεστημένων συστημάτων για τα οποία δεν είναι διαθέσιμες οι σχετικές πληροφορίες ή ακόμα συστημάτων η διαμόρφωση των οποίων δεν είναι η συνήθης.

Από τις προαναφερθείσες αδυναμίες επεξεργασίας μιας αναλυτικής «ενεργειακής ταυτότητας» του συστήματος προέκυψε η ανάγκη, παράλληλα και το κίνητρο, της διερεύνησης μιας μεθόδου μοντελοποίησης των θερμικών ηλιακών συστημάτων, ανεξαρτήτως τύπου, μεγέθους και σκοπού χρήσης, που θα βασίζεται στη θεώρησή του ως ένα λειτουργικά ενιαίο σύνολο. (Μπελεσιώτης, 2006)

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

5.3.1 Ταξινόμηση μοντέλων

Ο ηλιακός συλλέκτης είναι αναμφίβολα η καρδιά μιας θερμικής ηλιακής διεργασίας και, για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη μια – έστω συνοπτική – αναφορά στις προσεγγίσεις μοντελοποίησής του. Η απόδοση του ηλιακού συλλέκτη εξαρτάται από μία σειρά τεχνικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών και παραγόντων οι οποίοι, ο καθένας με τον τρόπο του, διαμορφώνουν το τελικό αποτέλεσμα. Η γνώση αφενός μεν των χαρακτηριστικών και των παραγόντων αυτών, αφετέρου δε του τρόπου και του βαθμού με τον οποίο ο κάθε παράγοντας επηρεάζει την απόδοση του συλλέκτη, είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή μοντελοποίηση της συνολικής διεργασίας.

Όλα τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα λαμβάνουν υπόψη τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη, διακρίνονται όμως σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που προσεγγίζουν τη λειτουργία του συλλέκτη στις μεταβατικές καταστάσεις:

- **Δυναμικά μοντέλα (dynamic model):** Τα δυναμικά μοντέλα προσπαθούν να προσεγγίσουν τη στιγμιαία συμπεριφορά του συλλέκτη, συνυπολογίζοντας, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό, τα μεταβατικά φαινόμενα, δηλαδή αυτά που συνδέονται με τα φαινόμενα συσσώρευσης (ή καθυστέρησης) που επιβάλλονται από τη θερμοχωρητικότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και τα αποκαλούμενα οιονεί-δυναμικά μοντέλα (quasi-dynamic models), τα οποία λαμβάνουν υπόψη ορισμένα μόνο από τα θερμοχωρητικά στοιχεία του συστήματος.
- **Μοντέλα σταθερής κατάστασης (steady-state):** Πρόκειται για μοντέλα, ή καλύτερα για μοντέλο, που περιγράφει τη στιγμιαία ενεργειακή συμπεριφορά ενός συλλέκτη σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, δηλαδή όταν δεν υπάρχει σημαντική διακύμανση των κύριων κλιματολογικών μεγεθών (ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος), καθώς και των λειτουργικών του χαρακτηριστικών (θερμοκρασία εισόδου και παροχή θερμικού φορέα). Το μοντέλο συνίσταται σε μια χαρακτηριστική εξίσωση, οι συντελεστές της οποίας μπορούν να υπολογιστούν τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά (Duffie and Beckman, 2006). Η προσέγγιση αυτή έχει βρει τη μεγαλύτερη εφαρμογή μέχρι σήμερα, ακόμα και ως βάση προτυποποιημένων μεθόδων αξιολόγησης.

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων έγκειται στη θεώρηση των επιπτώσεων στη συμπεριφορά του συλλέκτη από τις κλιματολογικές κυρίως μεταβολές, που αναπόφευκτα υπάρχουν σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας. Στο βαθμό που η θερμοχωρητικότητα των υπολοίπων υποσυστημάτων που συμμετέχουν σε μια διεργασία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του συλλέκτη, το μοντέλο σταθερής κατάστασης είναι επαρκές και τα σφάλματα που οφείλονται στην προσέγγιση της θεώρησης σταθερής κατάστασης είναι αμελητέα. Η περίπτωση αυτή είναι η συνηθέστερη στην πράξη. Όταν όμως πρόκειται για συστήματα με συνολικές σταθερές χρόνου συγκρίσιμες αυτής του συλλέκτη, το δυναμικό μοντέλο είναι πιο αποτελεσματικό.

5.3.2 Μοντέλο σταθερής κατάστασης

Σύμφωνα με το μοντέλο σταθερής κατάστασης, η λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη περιγράφεται με απλή μαθηματική σχέση, σύμφωνα με την οποία η ωφέλιμη ενέργεια από τον συλλέκτη \dot{Q} εκφράζεται ως συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας I , της μέσης θερμοκρασίας T_m του ρευστού και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a (Duffie and Beckman, 2006):

$$\dot{Q} = A_c F' [I(\tau\alpha)_{eff} - U_L(T_m - T_a)]$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια του συλλέκτη, και οι ποσότητες F' , $(\tau\alpha)_{eff}$, U_L είναι χαρακτηριστικοί συντελεστές που συζητούνται στη συνέχεια.

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τον απορροφητή είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας I , παίρνοντας όμως υπόψη και τις οπτικές απώλειες του συλλέκτη. Σε συνθήκες μάλιστα σταθερής κατάστασης, η ωφέλιμη ενέργεια είναι η διαφορά μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται και των θερμικών απωλειών του συλλέκτη που προκύπτουν από τη διαφορά θερμοκρασίας του απορροφητή και του περιβάλλοντος. Οι οπτικές απώλειες του συλλέκτη εκφράζονται με το ενεργό γινόμενο διαπερατότητας - απορροφητικότητας $(\tau\alpha)_{eff}$, οι θερμικές απώλειες εκφράζονται με το συντελεστή θερμικών απωλειών U_L , ενώ ο συντελεστής ικανότητας πτερυγίου F' αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο του συλλέκτη η ερμηνεία του οποίου δίδεται στη συνέχεια.

Συνοπτικά, η στιγμιαία απόδοση του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη γράφεται:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{A_c I} = \eta_0 - U_0 \frac{T_m - T_a}{I} = F'(\tau\alpha)_{eff} - F'U_L \frac{T_m - T_a}{I}$$

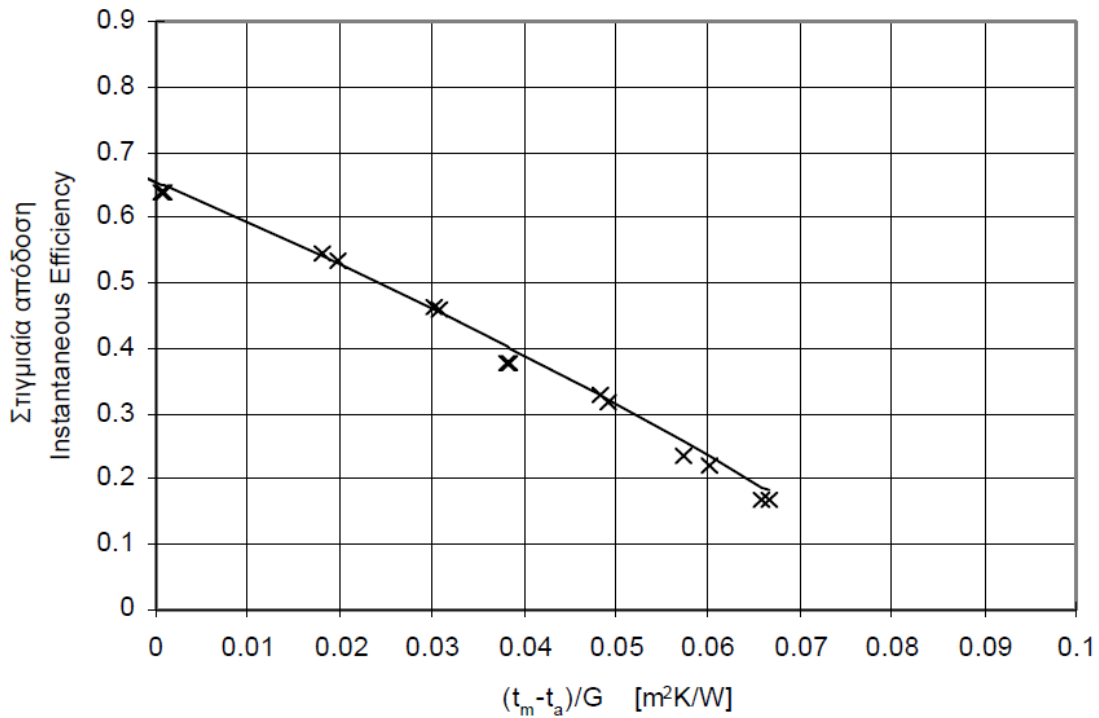
όπου $\eta_0 = F'(\tau\alpha)_{eff}$ είναι η μέγιστη απόδοση του συλλέκτη και $U_0 = F'U_L$ ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών.

Ο συντελεστής όμως απωλειών U_0 μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_0 = \alpha_1 + \alpha_2(T_m - T_a)$$

όπου οι συντελεστές α_1 και α_2 εκφράζουν τις απώλειες λόγω μεταφοράς και ακτινοβολίας αντίστοιχα, οδηγώντας σε μια εξίσωση τριών χαρακτηριστικών παραμέτρων η_0 , α_1 και α_2 :

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \frac{T_m - T_a}{I} - \alpha_2 I \left(\frac{T_m - T_a}{I} \right)^2$$



Σχήμα 37 Τυπική καμπύλη απόδοσης ηλιακού συλλέκτη (Μπελεσιώτης, 2006)

Στο Σχήμα 37 δίνεται η γραφική απεικόνιση μιας χαρακτηριστικής εξίσωσης συλλέκτη. Το σημείο στο οποίο η καμπύλη τέμνει τον κατακόρυφο άξονα είναι η μέγιστη απόδοση του συλλέκτη (η διαφορά του σημείου αυτού με τη μονάδα οφείλεται στις οπτικές απώλειες), ενώ με την αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας η απόδοση μειώνεται λόγω της επίδρασης των θερμικών απωλειών. Επιπλέον, η καμπυλότητα δηλώνει τις, αυξανόμενες με τη θερμοκρασία, απώλειες ακτινοβολίας.

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία εισόδου του νερού στο συλλέκτη T_c :

$$\dot{Q} = A_c F_R [I(\tau\alpha)_{eff} - U_L(T_c - T_a)] \text{ και } \eta = \eta_0 - U_0 \frac{T_c - T_a}{I}$$

όπου $\eta_0 = F_R(\tau\alpha)_{eff}$ είναι η μέγιστη απόδοση του συλλέκτη, $U_0 = F_R U_L$ ο συντελεστής θερμικών απωλειών, και F_R ο συντελεστής θερμικής απολαβής. Ανάλογη σχέση με την παραπάνω ισχύει για τη δευτεροβάθμια έκφραση της εξίσωσης απόδοσης του συλλέκτη χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία T_c . (Klein & Beckman, 1984)

Συνοψίζοντας, η εξίσωση (καμπύλη απόδοσης) ενός συλλέκτη ορίζεται από τους χαρακτηριστικές συντελεστές η_0 και U_0 , οι οποίοι ισούνται με:

- $F'(\tau\alpha)_{eff}$ και $F'U_L$ αντίστοιχα, θεωρώντας τη μέση θερμοκρασία του ρευστού στο συλλέκτη,
- $F_R(\tau\alpha)_{eff}$ και $F_R U_L$ αντίστοιχα, θεωρώντας τη θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη.

Ο συντελεστής ικανότητας πτερυγίου ορίζεται από το λόγο $F' = U_0/U_L$ της θερμικής αντίστασης μεταξύ του απορροφητή και του αέρα περιβάλλοντος προς τη θερμική αντίσταση μεταξύ του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και του αέρα περιβάλλοντος. Εκφράζει ουσιαστικά το λόγο της ωφέλιμης ενέργειας προς εκείνη που θα έδινε ο συλλέκτης εάν η θερμοκρασία του απορροφητή ήταν ίση με τη θερμοκρασία του ρευστού κυκλοφορίας στο συλλέκτη. Είναι σημαντικός συντελεστής και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του συλλέκτη, όπως πάχος και υλικό πτερυγίου απορροφητή, εξωτερική και εσωτερική διάμετρο των σωλήνων, αριθμός σωλήνων, μήκος σωλήνων, απόσταση μεταξύ των σωλήνων, παροχή ρευστού κυκλοφορίας, συντελεστή θερμικών απωλειών του συλλέκτη και είδος και διαστάσεις κόλλησης.

Ο συντελεστή θερμικής απολαβής F_R ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ωφέλιμης ενέργειας που συλλέγεται από το συλλέκτη προς την ενέργεια που θα είχε συλλεχθεί, αν η θερμοκρασία του συλλέκτη ήταν ίση με τη θερμοκρασία εισόδου του υγρού σε αυτόν. Ο συντελεστής αυτός ισούται με:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_0 - T_c)}{A_c[I - U_L(T_c - T_a)]} = \frac{\dot{m}c_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}c_p}\right) \right]$$

για θερμοκρασία στην είσοδο και έξοδο του συλλέκτη T_c και T_0 αντίστοιχα, ηλιακή ακτινοβολία I , θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας \dot{m} . (Karatasou, Santamouris, & Geros, 2006)

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν πιο πάνω είναι οι βασικές και αφορούν τη λειτουργία του ηλιακού συλλέκτη ως ανεξάρτητης μονάδας. Όταν όμως ο συλλέκτης εντάσσεται σ' ένα ευρύτερο πεδίο μιας πραγματικής εγκατάστασης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση μιας σειράς παραμέτρων οι οποίες αλλάζουν τις τιμές των χαρακτηριστικών συντελεστών. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- επίδραση της σύνδεσης των συλλεκτών εν σειρά,
- επίδραση της ροής του θερμικού φορέα,
- επίδραση των απωλειών των αγωγών και σωληνώσεων,
- επίδραση του εναλλάκτη θερμότητας (όταν υπάρχει),
- επίδραση της σκίασης μεταξύ σειρών συλλεκτών (όταν υφίσταται),
- επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης

Δεδομένου ότι όλες αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη λειτουργία και συνεπώς την απόδοση ενός πεδίου συλλεκτών, είναι χρήσιμο να θεωρηθούν οι συλλέκτες, οι αγωγοί και σωληνώσεις και ο εναλλάκτης θερμότητας (εφόσον υπάρχει) ως ένα ενιαίο υποσύνολο, το οποίο πλέον θεωρείται ως ένας νέος, τροποποιημένος συλλέκτης. Για την περιγραφή της απόδοσης του τροποποιημένου συλλέκτη, θα πρέπει να γίνουν διορθώσεις στη βασική εξίσωση σε συγκεκριμένη σειρά.

5.3.3 Δυναμικά μοντέλα

Ένα δυναμικό μοντέλο έχει σκοπό να προσδιορίσει τη στιγμιαία απόδοση του συλλέκτη σε μεταβαλλόμενες κλιματολογικές και λειτουργικές συνθήκες. Ένα τέτοιο μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να λαμβάνεται υπόψη αφενός η μεταβλητότητα των παραμέτρων που

επηρεάζουν τη λειτουργία του συλλέκτη και αφετέρου η επίδραση παραμέτρων όπως η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του αέρα, η θερμοκρασία ουρανού και η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, που δεν αγνοούνται από τα μοντέλα σταθερής κατάστασης.

Το πλέον γνωστό δυναμικό μοντέλο είναι αυτό που χρησιμοποιείται σαν βάση για την αξιολόγηση των ηλιακών συλλεκτών μέσω δοκιμών, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12975-2 και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\dot{Q}}{A_c} = F'(\tau\alpha)_{en}K_{b(\theta)}I_b + F'(\tau\alpha)_{en}K_{\theta d}I_d - c_1(T_m - T_a) - c_2(T_m - T_a)^2 - c_3u(T_m - T_a) + c_4(E_L - \sigma T_a^4) - c_5 \frac{dT_m}{dt} - c_6uI$$

όπου $(\tau\alpha)_{en}$ είναι το γινόμενο απορροφητικότητας - διαπερατότητας για κάθε πρόσπτωση ακτινοβολίας, $K_{b(\theta)}$ ο συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης για την άμεση ακτινοβολία (Thevenard, Haddad, & Purdy, 2004), $K_{\theta d}$ ο συντελεστής γωνίας πρόσπτωσης για τη διάχυτη ακτινοβολία, u η ταχύτητα του περιβάλλοντος αέρα, E_L η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, ενώ τα I_b , I_d , I αντιπροσωπεύουν την άμεση, τη διάχυτη και την ολική ακτινοβολία αντίστοιχα. (EN12975-2, 2006)

Το δυναμικό αυτό μοντέλο αποτελεί ουσιαστικά μία επέκταση του βασικού μοντέλου σταθερής κατάστασης, στο οποίο όμως έχει περιληφθεί η επίδραση και άλλων παραγόντων

όπως της ενεργού θερμοχωρητικότητας, του συντελεστή γωνίας πρόσπτωσης, της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας ουρανού και της διάχυτης ακτινοβολίας. Συνεπώς:

- Οι απώλειες του συλλέκτη λόγω μεταφοράς και ακτινοβολίας περιγράφονται μέσω των συντελεστών c_1 και c_2 αντίστοιχα, αντίστοιχων των συντελεστών α_1 και α_2 του μοντέλου σταθερής κατάστασης.
- Η ενεργός θερμοχωρητικότητα εκφράζεται μέσω του συντελεστή c_5 , ο οποίος σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας στο συλλέκτη στις μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες.
- Η μέγιστη απόδοση του συλλέκτη, η οποία εκφράζεται με τον όρο $F'(\tau\alpha)_{en}I$ στην εξίσωση σταθερής κατάστασης, εδώ χωρίζεται σε δύο όρους, όπου ο πρώτος $F'(\tau\alpha)_{en}K_{b(\theta)}I_b$ αντιστοιχεί στην άμεση ακτινοβολία και ο δεύτερος $F'(\tau\alpha)_{en}K_{\theta d}I_d$ στη διάχυτη. Σημειώνεται ότι στον πρώτο όρο λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας στην απόδοση του συλλέκτη.
- Η επίδραση της ταχύτητας του αέρα επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συλλέκτη. Στο δυναμικό μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η στιγμιαία ταχύτητα, ενώ τα μοντέλα σταθερής κατάστασης θεωρούν σταθερό το συντελεστή θερμικών απωλειών εντός ενός δεδομένου εύρους ταχυτήτων (π.χ. 2 έως 3 m/s). Η επίδραση της ταχύτητας του αέρα μοντελοποιείται με δύο όρους, όπου ο πρώτος c_6uI δίνει την επίδραση στη μέγιστη απόδοση μέσω του συντελεστή c_6 , και ο δεύτερος $c_3u(T_m - T_a)$ την επίδραση στις θερμικές απώλειες μέσω του συντελεστή c_3 .

- Η επίδραση της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος στις θερμικές απώλειες του συλλέκτη $c_4(E_L - \sigma T_a^4)$ λαμβάνεται επίσης υπόψη στο δυναμικό μοντέλο μέσω του συντελεστή c_4 .

Άλλο δυναμικό μοντέλο είναι το αποκαλούμενο *μοντέλο ταιριασμένης ροής (matched flow collector model - MFC)* που δίδει την έμφαση στις θερμικές απώλειες και στη θερμική χωρητικότητα. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο απορροφητής χαρακτηρίζεται από τοπικές χωρητικότητες και τιμές U οι οποίες είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Στόχος είναι η πιο ακριβής μοντελοποίηση των θερμικών απωλειών σε συνθήκες χαμηλής ροής και απότομων αλλαγών στην θερμοκρασία εισόδου όταν η θερμοκρασιακή αύξηση κατά της διεύθυνση της ροής στον απορροφητή είναι μη γραμμική. Στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη επίσης η επίδραση του ανέμου, της θερμοκρασίας ουρανού και της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Οι παράμετροι του συλλέκτη που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι παρόμοιες αλλά όχι εντελώς ίδιες με αυτές του δυναμικού μοντέλου που προαναφέρθηκε. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι το μοντέλο ταιριασμένης ροής βασίζεται στην ολοκλήρωση των τοπικών θερμοκρασιών στο συλλέκτη, ενώ το δυναμικό μοντέλο χρησιμοποιεί τον αριθμητικό μέσο όρο της μέσης θερμοκρασίας T_m στο συλλέκτη.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί το *δυναμικό μοντέλο Dyncoll*, σύμφωνα με το οποίο ο απορροφητής του συλλέκτη χωρίζεται σε έναν αριθμό κόμβων κατά τη διεύθυνση της ροής του ρευστού, χωρίς όμως να χρησιμοποιείται αναλυτική λύση. Ο στόχος του μοντέλου είναι να ληφθεί υπόψη η θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος της ροής του ρευστού στον απορροφητή. Το οπτικό μέρος του μοντέλου είναι το ίδιο με αυτό του δυναμικού μοντέλου εκτός του ότι η εξάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης περιγράφεται από την εξίσωση του Ambrosetti.

Τέλος, αξίζει μια σύντομη αναφορά στα δυναμικά μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (finite difference) και γρήγορου Μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform), τα οποία έχουν βρει μόνο περιορισμένη εφαρμογή. Ο σκοπός τους είναι κυρίως η παραγωγή συνθετικών δεδομένων δοκιμών έτσι ώστε να είναι δυνατή η διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας ουρανού και της θερμικής αγωγιμότητας σε περιόδους απότομης αλλαγής της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στο συλλέκτη, της παροχής του ρευστού και της ηλιακής ακτινοβολίας.

6 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ηλιακή ακτινοβολία περνά διαμέσου της ατμόσφαιρας και προσπίπτει στον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, όπου μετατρέπεται σε θερμότητα και απορροφάται. Σκοπός των προηγούμενων κεφαλαίων ήταν η συστηματική μελέτη της όλης αυτής διαδικασίας και των επιμέρους συνιστωσών της.

Με βάση λοιπόν τη θεωρία και τις σχέσεις που έχουν έως εδώ μελετηθεί, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία διερεύνηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και της συμπεριφοράς και απόδοσης του δεδομένου συλλέκτη.

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα υπολογιστή σε γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic.NET, ο πηγαίος κώδικας του οποίου παρατίθεται στο παράρτημα της εργασίας. Το πρόγραμμα αποτελείται από μία φόρμα όπου στο πάνω μέρος της ο χρήστης εισάγει τις απαιτούμενες τιμές για την υλοποίηση των υπολογισμών (όλα τα πεδία έχουν προεπιλεγμένες τιμές για διευκόλυνση του χρήστη). Οι τιμές αυτές αφορούν:

- Τα στοιχεία της περιοχής μελέτης. Δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής από το χρήστη των γεωγραφικών συντεταγμένων, του υψομέτρου και των μηνιαίων θερμοκρασιών 24ώρου, στοιχεία απαραίτητα για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα στοιχεία των πέντε μεγαλύτερων πόλεων της Ελλάδας υπάρχουν ήδη στο πρόγραμμα για διευκόλυνση του χρήστη. Επισημαίνεται ότι η μελέτη μπορεί να αφορά οποιαδήποτε περιοχή εντός του Ελλαδικού χώρου.
- Την κλίση και τον προσανατολισμό του συλλέκτη. Όταν ο χρήστης εισάγει, όσον αφορά την κλίση, τιμή μεγαλύτερη των 90° ή μικρότερη από 0° το πρόγραμμα αυτόματα διορθώνει την τιμή σε 90° και 0° αντίστοιχα. Ομοίως όσον αφορά τον προσανατολισμό του συλλέκτη, με την εισαγωγή τιμής μεγαλύτερης των 90° ή μικρότερης των -90° αντίστοιχα διορθώνει σε 90° και -90° .
- Τα συνολικά τετραγωνικά μέτρα της επιφάνειας του προς μελέτη συλλέκτη
- Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου του συλλέκτη ($F'(\tau\alpha)_{en}$, $K_{b(\theta)}$, b_0 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_6 όπως αυτά έχουν υπολογιστεί έπειτα από εργαστηριακούς ελέγχους σε διαπιστευμένα εργαστήρια και υπό ορισμένες συνθήκες. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται σύμφωνα με το EN12975-2.
- Τη μέση θερμοκρασία εισόδου του υγρού στο συλλέκτη. Η θερμοκρασία του υγρού (συνήθως νερό) που κυκλοφορεί μέσα στους σωλήνες του συλλέκτη και στη δεξαμενή αποθήκευσης συνεχώς εναλλάσσεται. Για λόγους απλοποίησης και επειδή η μελέτη της θερμοκρασίας του υγρού του συλλέκτη δεν αποτελεί θέμα αυτής της εργασίας, λαμβάνουμε ως θερμοκρασία εισόδου του υγρού στο συλλέκτη τρεις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες.

Στο κάτω μέρος της φόρμα βρίσκονται οι πίνακες σε μορφή excel των μηνιαίων και ωριαίων αποτελεσμάτων της μελέτης του συλλέκτη. Τα αποτελέσματα αυτά εύκολα μπορούμε να τα αντιγράψουμε σε ένα φύλλο του excel και να δημιουργήσουμε χρήσιμα διαγράμματα για την καλύτερη κατανόηση και παρατήρηση της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της απόδοσης του συλλέκτη λαμβάνοντας ως παράμετρο οποιαδήποτε από τις τιμές της πάνω φόρμας που αναλύθηκαν νωρίτερα. Παρακάτω θα δούμε σε μορφή παραδείγματος μερικές από τις αναλύσεις και παρατηρήσεις, αναφορικά με την απόδοση του συλλέκτη, που είναι δυνατό να γίνουν.

6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

6.2.1 Μέθοδος υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας

Αρχικά βάσει της μεθόδου που παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.6 υπολογίζεται ο Αληθής ηλιακός χρόνος (ΑΗΧ). Έπειτα υπολογίζονται οι γωνίες που χαρακτηρίζουν τη θέση του συλλέκτη, της γης και του ήλιου. Οι γωνίες αυτές είναι:

- Η ηλιακή απόκλιση, δ
- Η ωριαία γωνία, ω
- Η ζενίθια γωνία, θ_z
- Η γωνία πρόσπτωσης, θ
- Αζιμουθιακή γωνία ήλιου, γ_s

οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στις παραγράφους 2.8 και 2.9.

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια απαιτείται η ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Χωρίς τα δεδομένα της ανά ώρα ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο δεν είναι δυνατή η ωριαία μελέτη. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας που είναι διαθέσιμα από την ΕΜΥ είναι σε μορφή- βήμα ημερήσιο και αφορούν μόνο επτά πόλεις της Ελλάδας, όπου δηλαδή υπάρχουν αεροδρόμια ή εργαστήρια (πανεπιστημιακά και μη) με σταθμούς μέτρησης της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Για τις υπόλοιπες περιοχές όπου δεν υπάρχει πυρανόμετρο ή πυρηλιόμετρο, η Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 δίνει μηνιαίες τιμές για 47 Ελληνικές πόλεις.

Το ζητούμενο λοιπόν είναι μία μέθοδος υπολογισμού της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο χωρίς τον περιορισμό του υπολογισμού μόνο για δεδομένες περιοχές όπου έχουμε μηνιαίες ή ημερήσιες μετρήσεις, αλλά για οποιαδήποτε περιοχή. Αυτά τα δεδομένα ακτινοβολίας ονομάζονται «τεχνητά δεδομένα» (synthetic data) και ο τρόπος υπολογισμού τους αναλύεται στην παράγραφο 3.9.

Έχοντας βρει την ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και τις συνιστώσες της (άμεση και διάχυτη) ανά ώρα μπορεί πλέον να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο ανά ώρα. Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ο συντελεστής ανακλαστικότητας (albedo) $\rho_g = 0,2$.

6.2.2 Μέθοδος υπολογισμού θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Ομοίως η θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά ώρα είναι δυσεύρετο στοιχείο ενώ αντίθετα οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος 24ώρου για τις 47 πόλεις αναφέρονται σε σχετικούς πίνακες στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010. Έχοντας ως δεδομένο τις μηνιαίες θερμοκρασίες δημιουργούμε ως «τεχνητά δεδομένα» τις μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος ανά ώρα με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παράγραφο 3.10. Για τις πέντε έτοιμες πόλεις που περιέχει το πρόγραμμα οι θερμοκρασίες αυτές υπάρχουν, διαφορετικά ο χρήστης εισάγοντας μία άλλη πόλη οφείλει να εισάγει και τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες της.

6.2.3 Μέθοδος υπολογισμού απόδοσης συλλέκτη

Το πρόγραμμα, που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της εργασίας αυτής, περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα δεδομένα και παραμέτρους για έναν τύπο επίπεδου συλλέκτη. Δίνει όμως τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τα χαρακτηριστικά για οποιοδήποτε τύπο επίπεδου συλλέκτη και να εισάγει τις τιμές των. Στο διαδίκτυο μπορούμε να βρούμε βάσεις δεδομένων που περιέχουν τα χαρακτηριστικά όλων των πιστοποιημένων ηλιακών συλλεκτών. Η πιστοποίηση τους πραγματοποιείται από διαπιστευμένα εργαστήρια σύμφωνα με ευρωπαϊκές οδηγίες (EN12975-1 και EN12975-2).

Η απόδοση του συλλέκτη ορίζεται ως το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύος προς την ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο. Για τον υπολογισμό της ωφέλιμης ισχύος του συλλέκτη χρησιμοποιήθηκε η δυναμική μέθοδος QDT (Quasi Dynamic Testing) που επιτρέπει την ανάλυση περισσότερων τύπων συλλεκτών συγκριτικά με τη μέθοδο σταθερής κατάστασης (Steady state) και δίδει ορθότερα αποτελέσματα καθώς λαμβάνει υπόψη περισσότερα δεδομένα για τον υπολογισμό της ισχύος. Λεπτομέρειες για τις δύο μεθόδους και τις εφαρμογές τους δίνονται στην παράγραφο 5.3. Η σχέση της δυναμικής μεθόδου γίνεται:

$$\frac{\dot{Q}}{A_c} = F'(\tau\alpha)_{en}K_{b(\theta)}I_b + F'(\tau\alpha)_{en}K_{\theta a}I_d - c_1(T_m - T_a) - c_2(T_m - T_a)^2 - c_33\frac{m}{s}(T_m - T_a) + c_4(E_L - \sigma T_a^4) - c_63\frac{m}{s}I$$

Με την εισαγωγή λοιπόν των απαραίτητων δεδομένων, το πρόγραμμα δημιουργεί δύο διαφορετικούς πίνακες. Ο πρώτος πίνακας περιέχει τη μηνιαία ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο, την ωφέλιμη ισχύ για τις τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες εισόδου του υγρού στο συλλέκτη και την απόδοση για τις τρεις θερμοκρασίες εισόδου αντίστοιχα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τα μηνιαία αποτελέσματα αποτελούν το μέσο όρο των ωριαίων και παρουσιάζονται για ευκολότερη κατανόηση από το χρήστη και για λόγους ετήσιας εποπτείας. Ο δεύτερος πίνακας περιέχει τα παραπάνω αλλά σε μορφή-βήμα ωριαίο, καθώς επίσης και τις χαρακτηριστικές γωνίες και τις συνιστώσες της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο σε ωριαίο βήμα.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πώς παρατηρήθηκε μία ομοιομορφία μεταξύ των ακτινοβολιών χειμώνα-φθινοπώρου και άνοιξης-καλοκαιριού το οποίο προκύπτει διότι η μέθοδος των τεχνικών δεδομένων χρησιμοποιεί ένα πρότυπο διαυγούς ατμόσφαιρας όπου δηλαδή ο συντελεστής αιθριότητας πλησιάζει τη μονάδα. Έτσι για τους μεν καλοκαιρινούς μήνες οι τιμές της ακτινοβολίας πλησιάζουν τις μετρούμενες, για τους χειμερινούς μήνες

όμως παρατηρείται απόκλιση από τις μετρούμενες τιμές. Η παρατηρηθείσα αυτή απόκλιση οφείλεται επιπλέον σε εσφαλμένες τιμές των συντελεστών R_b που λαμβάνονται σε ώρες γειτονικές της ανατολής και της δύσης του ήλιου.

6.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

6.3.1 Ανάλυση με παράμετρο την πόλη

Θα συγκριθούν οι πόλεις Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο. Από το πρόγραμμα λαμβάνουμε τις γεωγραφικές συντεταγμένες, το υψόμετρο και τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες 24ώρου για τις δύο πόλεις.

Στοιχεία πόλης		Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)			
Πόλη	Θεσσαλονίκη	Ιαν	5,3	Ιουλ	26,8
Γεωγραφικό πλάτος	40,52	Φεβ	6,8	Αυγ	26,2
Γεωγραφικό μήκος	22,97	Μαρ	9,8	Σεπ	21,9
Υψόμετρο	0,050 km	Απρ	14,3	Οκτ	16,3
		Μαϊ	19,7	Νοε	11,1
		Ιουν	24,5	Δεκ	6,9

Στοιχεία πόλης		Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)			
Πόλη	Ηράκλειο	Ιαν	12,1	Ιουλ	26,2
Γεωγραφικό πλάτος	35,33	Φεβ	12,2	Αυγ	26,1
Γεωγραφικό μήκος	25,18	Μαρ	13,5	Σεπ	23,6
Υψόμετρο	0,390 km	Απρ	16,5	Οκτ	20,1
		Μαϊ	20,3	Νοε	16,7
		Ιουν	24,4	Δεκ	13,7

Τα στοιχεία του συλλέκτη σε αυτήν την ανάλυση παραμένουν σταθερά

Στοιχεία συλλέκτη

Κλίση συλλέκτη: 30

Προσανατολισμός συλλέκτη: 0

Επιφάνεια συλλέκτη: 2,5 m²

F'(τα)en: 0,7

Kθ,d: 1,0

b_o: 0,10

Μέση θερμοκρασία υγρού συλλέκτη (°C):

Επιλογή 1: 25,0

Επιλογή 2: 50,0

Επιλογή 3: 75,0

c1: 3,00 W/m²K

c2: 0,015 W/m²K²

c3: 0,20 J/m²K

c4: 0,50

c6: 0,05 s/m

Ακολουθούν τα μηνιαία αποτελέσματα σε μορφή πίνακα για τη Θεσσαλονίκη

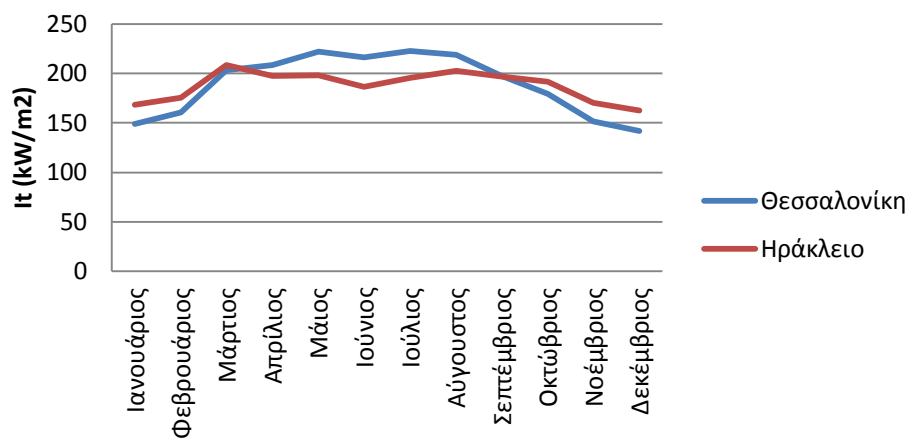
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα		Αναλυτικά αποτελέσματα						
Μήνας	Ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο It (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1 (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2 (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3 (κWh/m ²)	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3	
1	140,27	48,45	26,29	7,51	0,35	0,19	0,05	
2	153,4	59,05	37,39	16,65	0,38	0,24	0,11	
3	199,19	87,25	59,86	33,63	0,44	0,3	0,17	
4	207,67	98,11	71,12	43,46	0,47	0,34	0,21	
5	224,52	112,78	83,22	52,88	0,5	0,37	0,24	
6	219,6	115,76	86,71	57,49	0,53	0,39	0,26	
7	226,1	122	92,36	62,6	0,54	0,41	0,28	
8	219,7	117,93	89,35	59,71	0,54	0,41	0,27	
9	194,62	97,96	72,39	45,65	0,5	0,37	0,23	
10	173,36	77,5	52,18	27,74	0,45	0,3	0,16	
11	142,71	54,68	33,19	13,03	0,38	0,23	0,09	
12	133,61	44,68	23,15	5,58	0,33	0,17	0,04	

και τα μηνιαία αποτελέσματα σε μορφή πίνακα για το Ηράκλειο

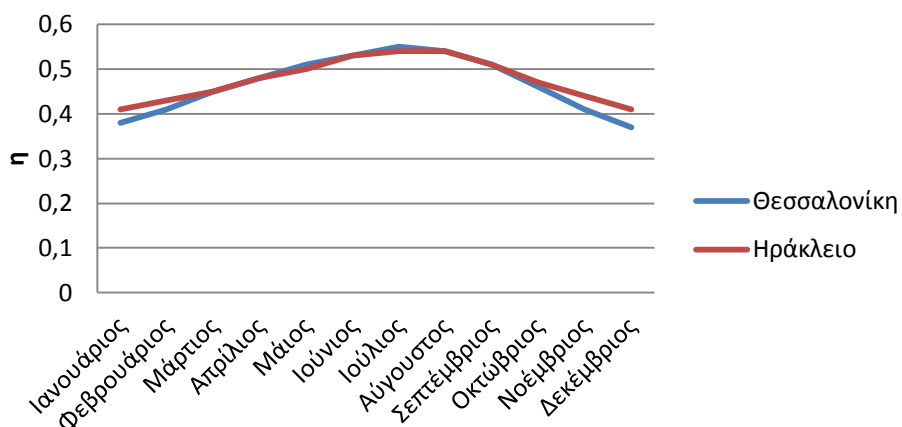
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα		Αναλυτικά αποτελέσματα						
Μήνας	Ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο It (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1 (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2 (κWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3 (κWh/m ²)	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3	
1	159,95	66,28	43,21	20,36	0,41	0,27	0,13	
2	168,33	73,44	50,04	27,32	0,44	0,3	0,16	
3	209,15	97,51	70,28	43,24	0,47	0,34	0,21	
4	209,91	102,53	75,75	47,79	0,49	0,36	0,23	
5	220,6	111,67	82,79	52,82	0,51	0,38	0,24	
6	213,05	112,29	84,02	55,04	0,53	0,39	0,26	
7	220,65	118,67	89,66	59,98	0,54	0,41	0,27	
8	219,49	118,28	90,09	60,46	0,54	0,41	0,28	
9	201,59	104,58	78,95	51,48	0,52	0,39	0,26	
10	187,1	90,11	64,33	38,92	0,48	0,34	0,21	
11	162,48	71,57	48,18	25,05	0,44	0,3	0,15	
12	151,21	62,27	40,08	18,08	0,41	0,27	0,12	

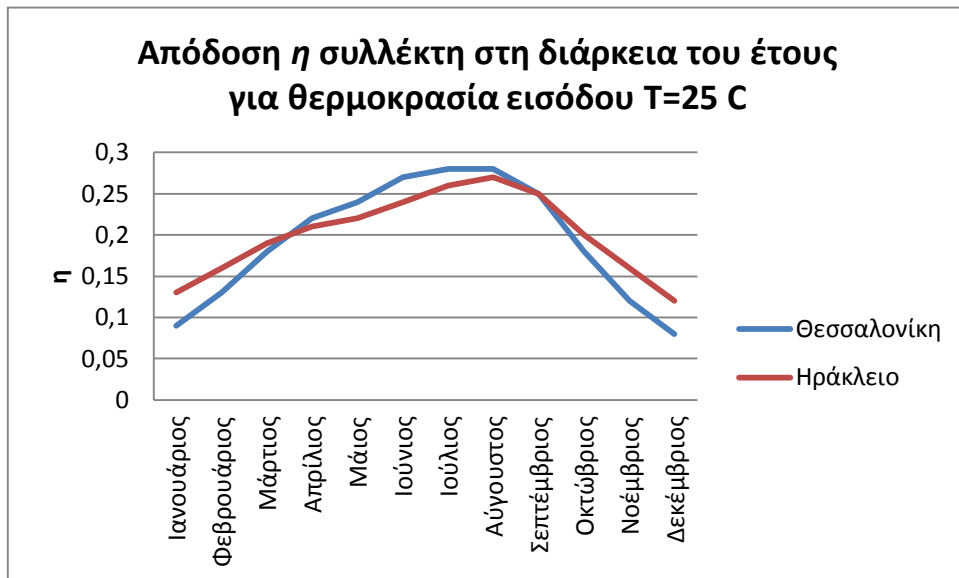
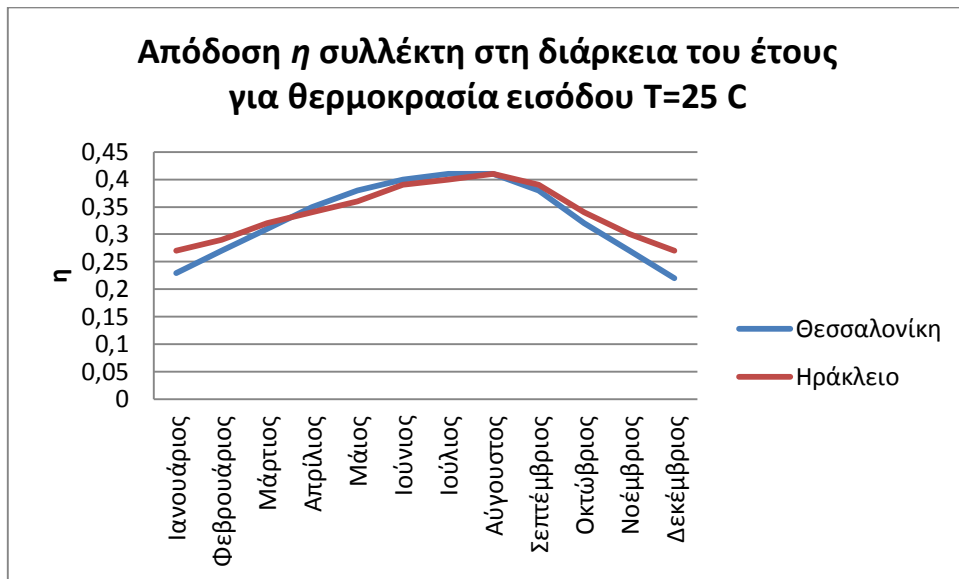
Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο πόλεων σε κοινά γραφήματα

Προσπίπτουσα ακτινοβολία I_t (kW/m²) στη διάρκεια του έτους



Απόδοση η συλλέκτη στη διάρκεια του έτους για θερμοκρασία εισόδου $T=25$ C





6.3.2 Σχόλια - Παρατηρήσεις

Μία πρώτη παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει είναι ότι στις δύο πόλεις, με διαφορά γεωγραφικού πλάτους $5,19^\circ$, η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η απόδοση του συλλέκτη κατά τους χειμερινούς μήνες διαφέρει και συγκεκριμένα στο Ηράκλειο τα δύο αυτά μεγέθη είναι κατά πολύ μεγαλύτερα απ' ό,τι στη Θεσσαλονίκη και αυτό οφείλεται βεβαίως στο ότι το Ηράκλειο βρίσκεται νοτιότερα.

Ωστόσο παρατηρώντας τους καλοκαιρινούς μήνες, η διαφορά αυτή εκμηδενίζεται και μάλιστα όσον αφορά την προσπίπτουσα ακτινοβολία, υπάρχει αντιστροφή στις τιμές της έντασης της στις δύο πόλεις. Ένας παράγοντας σε αυτήν την αντιστροφή πιθανώς είναι το υψόμετρο. Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 6.2 οι ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας αποτελούν τεχνητά δεδομένα (synthetic data) για την εύρεση των οποίων χρησιμοποιείται εκτός άλλων το υψόμετρο της προς μελέτης περιοχής. Στη Θεσσαλονίκη, το υψόμετρο για το σημείο που εξετάζουμε είναι 50 m, ενώ στο Ηράκλειο είναι 390 m. Επιπλέον δε μπορεί

να αγνοηθεί ότι τα τεχνητά δεδομένα παρουσιάζουν σφάλμα σε σχέση με τα μετρούμενα δεδομένα.

6.3.3 Ανάλυση με παράμετρο την κλίση του ηλιακού συλλέκτη, β

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν έχουν ληφθεί για την Αθήνα

Στοιχεία πόλης

Πόλη

Γεωγραφικό πλάτος

Γεωγραφικό μήκος

Υψόμετρο km

Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)

Ιαν	<input type="text" value="8,7"/>	Ιουλ	<input type="text" value="28,1"/>
Φεβ	<input type="text" value="9,3"/>	Αυγ	<input type="text" value="27,5"/>
Μαρ	<input type="text" value="11,2"/>	Σεπ	<input type="text" value="23,4"/>
Απρ	<input type="text" value="15,4"/>	Οκτ	<input type="text" value="18,2"/>
Μαϊ	<input type="text" value="20,7"/>	Νοε	<input type="text" value="13,8"/>
Ιουν	<input type="text" value="25,7"/>	Δεκ	<input type="text" value="10,3"/>

Εισάγοντας ως κλίση του συλλέκτη $\beta = 30^\circ$ και διατηρώντας σταθερά στις προεπιλεγμένες τιμές όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του συλλέκτη, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα

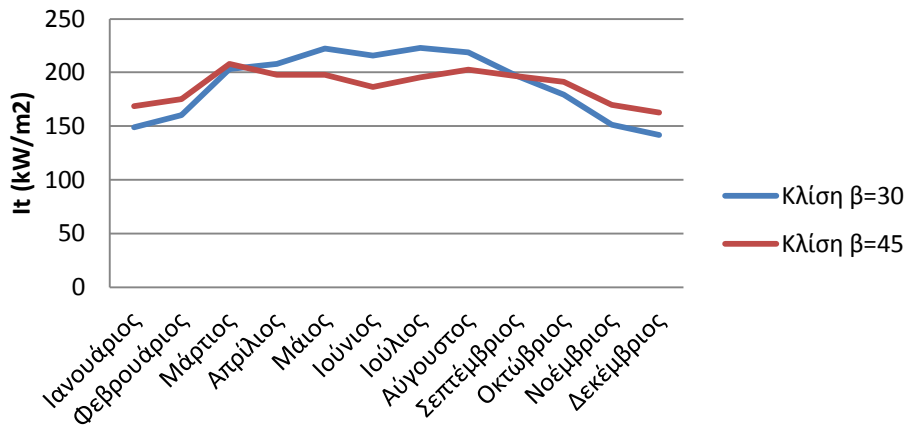
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα		Αναλυτικά αποτελέσματα						
Μήνας	Ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο lt (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1 (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2 (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3 (kWh/m ²)	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3	
1	148,69	56,41	34,17	13,27	0,38	0,23	0,09	
2	160,46	65,64	43,14	21,24	0,41	0,27	0,13	
3	203,41	91,48	64,03	37,51	0,45	0,31	0,18	
4	208,19	99,95	73,07	45,3	0,48	0,35	0,22	
5	222,06	112,7	83,48	53,35	0,51	0,38	0,24	
6	215,9	115,06	86,41	57,49	0,53	0,4	0,27	
7	222,91	121,74	92,48	63,04	0,55	0,41	0,28	
8	219,02	119,2	90,82	61,41	0,54	0,41	0,28	
9	197,42	101,54	75,97	48,85	0,51	0,38	0,25	
10	179,43	83,37	57,64	32,75	0,46	0,32	0,18	
11	151,3	62,38	40,2	18,48	0,41	0,27	0,12	
12	141,58	52,64	30,81	10,84	0,37	0,22	0,08	

Ενώ εισάγοντας ως κλίση του συλλέκτη $\beta = 45^\circ$ λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα

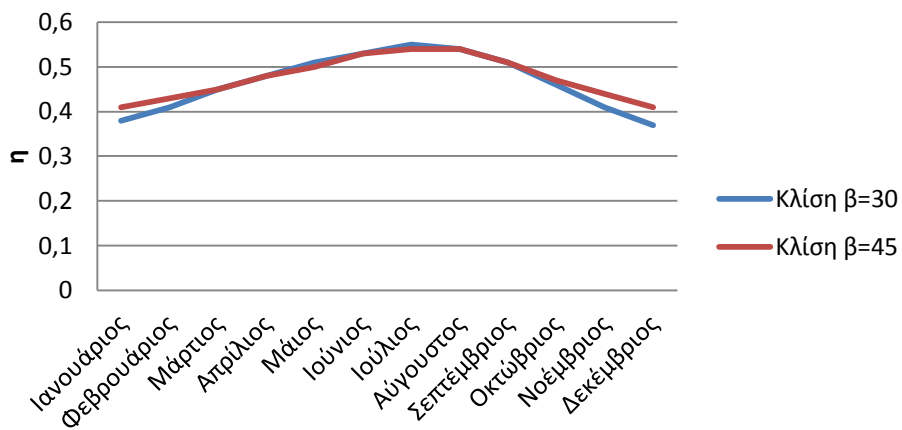
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα		Αναλυτικά αποτελέσματα						
Μήνας	Ολική ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο lt (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1 (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2 (kWh/m ²)	Οφέλιμη ισχύς για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3 (kWh/m ²)	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 1	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 2	Απόδοση για θερμοκρασία υγρού επιλογή 3	
1	168,39	69,36	45,67	21,93	0,41	0,27	0,13	
2	175,23	74,48	50,6	27,44	0,43	0,29	0,16	
3	208,07	94,35	66,71	39,99	0,45	0,32	0,19	
4	197,6	94	67,85	41,16	0,48	0,34	0,21	
5	197,98	98,92	71,6	43,64	0,5	0,36	0,22	
6	186,63	98,41	72,03	44,81	0,53	0,39	0,24	
7	195,51	106,1	78,88	50,41	0,54	0,4	0,26	
8	202,76	109,86	82,77	54,06	0,54	0,41	0,27	
9	196,52	101,12	75,74	48,78	0,51	0,39	0,25	
10	191,53	90,63	64,41	38,79	0,47	0,34	0,2	
11	169,98	74,71	50,64	26,79	0,44	0,3	0,16	
12	162,42	65,89	43,19	20,14	0,41	0,27	0,12	

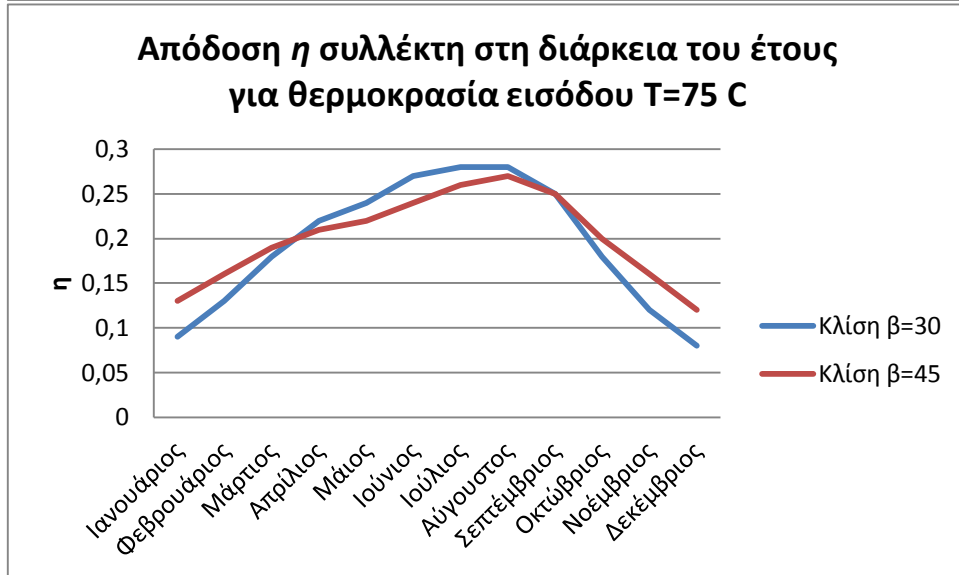
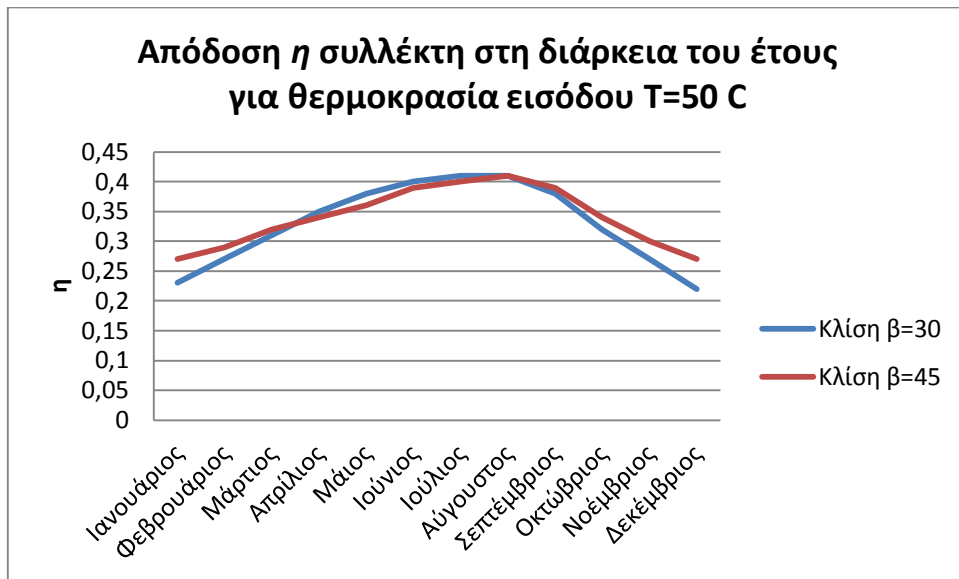
Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις δύο διαφορετικές κλίσεις σε κοινά γραφήματα

Προσπίπτουσα ακτινοβολία I_t (kW/m²) στη διάρκεια του έτους



Απόδοση η συλλέκτη στη διάρκεια του έτους για θερμοκρασία εισόδου $T=25$ C





6.3.4 Σχόλια - Παρατηρήσεις

Από τα παραπάνω γραφήματα γίνεται φανερός ο σπουδαίος ρόλος που διαδραματίζει η επιλογή της κλίσης των ηλιακών συλλεκτών στον προσδιορισμό της απόδοσής των. Όπως είναι φυσικό ο ηλιακός συλλέκτης παρουσιάζει μία μεγιστοποίηση της απόδοσης του κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Την περίοδο αυτή οι κατοικίες ικανοποιούν τις ανάγκες τους σε ζεστό νερό χρήσης με τη χρήση ηλιακής ενέργειας και χωρίς τη χρήση βοηθητικής πηγής ενέργειας. Όμως παρατηρείται από το γράφημα κυρίως της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ότι για κλίση $\beta = 45^\circ$ η μεγιστοποίηση που προαναφέρθηκε δεν είναι τόσο ξεκάθαρη σε σχέση με τη μεγιστοποίηση για κλίση $\beta = 30^\circ$. Ο λόγος είναι η διακύμανση του ύψους του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους. Τη θερινή περίοδο ο ήλιος διανύει μεγαλύτερο τόξο στον ουράνιο θόλο και η ακτινοβολία προσπίπτει σχεδόν κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο. Για να δεχτεί ο συλλέκτης τη μέγιστη ακτινοβολία στη θερινή περίοδο θα πρέπει η κλίση του να πλησιάζει της 0° . Αναλυτικότερα το ύψος του ήλιου παρουσιάζεται στην παράγραφο 2.8.

Παρατηρώντας τα γραφήματα της απόδοσης επιβεβαιώνεται ο πρακτικός-εμπειρικός κανόνας της τοποθέτησης των συλλεκτών με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Και για τις δύο επιλεγθείσες κλίσεις η απόδοση του συλλέκτη είναι πολύ ικανοποιητική. Θα είχαμε όμως τη μέγιστη απόδοση εάν κατά τις δύο ισημερίες του Μάρτη και του Σεπτεμβρίου αλλάζαμε την κλίση του συλλέκτη έτσι ώστε τη χειμερινή περίοδο η κλίση να ήταν $\beta = 45^\circ$ και τη θερινή να ήταν $\beta = 30^\circ$ για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω και αναλύονται στην παράγραφο 4.5.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, αναπτύχθηκε πρόγραμμα υπολογιστή για την ωριαία προσομοίωση της απόδοσης ενός επίπεδου συλλέκτη. Αρχικά μελετήθηκε η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του και η ωφέλιμη ισχύς του. Ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος του προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι η απόδοση του συλλέκτη.

Της προσομοίωσης προηγήθηκε μία εκτενής βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία και τις επιμέρους συνιστώσες της καθώς επίσης των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον παρουσιάστηκαν τα κύρια είδη ηλιακών συλλεκτών και θερμικών ηλιακών συστημάτων.

Το μέρος της εργασίας που περιλαμβάνει το πρόγραμμα ωριαίας προσομοίωσης αποσκοπεί στον υπολογισμό της ωριαίας-αναλυτικής απόδοσης ενός επίπεδου συλλέκτη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι παραμετροποιήσιμα. Το ίδιο ισχύει και για την περιοχή μελέτης όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει οποιαδήποτε πολή εντός του Ελλαδικού χώρου. Επιλέχθηκε η ανάλυση-παρουσίαση συγκεκριμένων παραμέτρων και διαγραμμάτων αντίστοιχα με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των λειτουργιών που προσφέρει το πρόγραμμα. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαπιστώθηκε ότι το υπολογιστικό μοντέλο ερμηνεύει ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του προγράμματος που επιλέχθηκαν για μελέτη.

Η προσομοίωση μας επέτρεψε έναν ωριαίο έλεγχο αλλά και παράλληλα την εποπτεία της μακροχρόνιας εξέλιξης του συστήματος.

Βιβλιογραφία

- EN12975-2. (2006). Bruxelles: European Committee for Standardization.
- Declination*. (2009). Retrieved from Susdesign:
<http://www.susdesign.com/popups/sunangle/declination.php>
- Pyrheliometer OSC971IF103*. (2009). Retrieved from OSC: <http://osc-tokyo-japan.sakura.ne.jp/osc/product/OSC971IF103.html>
- Model 240-8101 Star Pyranometer*. (2012). Retrieved from Novalynx:
<http://www.novalynx.com/240-8101.html>
- Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin: Wiley.
- Karatasou, S., Santamouris, M., & Geros, V. (2006, December). On the calculation of solar utilizability for south oriented flat plate collectors tilted to an angle equal to the local latitude. *Solar energy*, pp. 1600-1610.
- Klein, S., & Beckman, W. (1984, November). Review of solar radiation utilizability. *ASME*, pp. 393-402.
- Papakostas, K., Bentoulis, A., Bakas, V., & Kyriakis, N. (2007, May). Estimation of ambient temperature bin data. *Renewable Energy*, pp. 991-1005.
- Thevenard, D., Haddad, K., & Purdy, J. (2004). Development of a new solar collector model in ESP-R. *Canadian Solar Buildings Conference*, (p. 9). Montreal.
- Αργυρίου, Γάγλια, Δασκαλάκη, Ζαχαρίας, Κατσάνος, Κοντογιαννίδης, και συν. (2012). *T.O.T.E.E. 20701-3/2010 Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών*. Αθήνα: Τ.Ε.Ε.
- Αρκούδης, Γ. (2007). *Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Ζάρρας, Γ. (2009). *Σχεδιασμός θερμικού ηλιακού συστήματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Πάτρας*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Ηλιακή κηλίδα*. (n.d.). Ανάκτηση από Wikipedia:
http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE_%CE%BA%CE%B7%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B1
- Ήλιος*. (n.d.). Ανάκτηση από Wikipedia:
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%89%CE%BB%CE%B9%CE%BF%CF%82>
- Καπλάνης, Σ. (2004). *Ηλιακή μηχανική*. Αθήνα: Ίων.
- Κεραμιτζής, Π. (2010). *Διαχείριση δεδομένων μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας*. Αθήνα: ΕΜΠ.

- Μπάη, Α., Μελά, Δ., & Μπαλή, Δ. (2009). *Σημειώσεις ατμοσφαιρικής τεχνολογίας*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- Μπελεσιώτης, Β. (2006). *Θερμο-υδραυλική προσομοίωση θερμικών ηλιακών εγκαταστάσεων με ένταξη διεποχιακής αποθήκευσης*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- Παντελάκης, Ε. (2010). *Σχεδίαση συστήματος θερμού κλιματισμού με τη συμβολή παραβολικών ηλιακών συλλεκτών*. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
- Τσαρτσάλης, Χ. (2012). *Εξοικονόμηση ενέργειας με εφαρμογή ηλιοθερμικών συστημάτων*. Αθήνα: ΕΜΠ.