

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

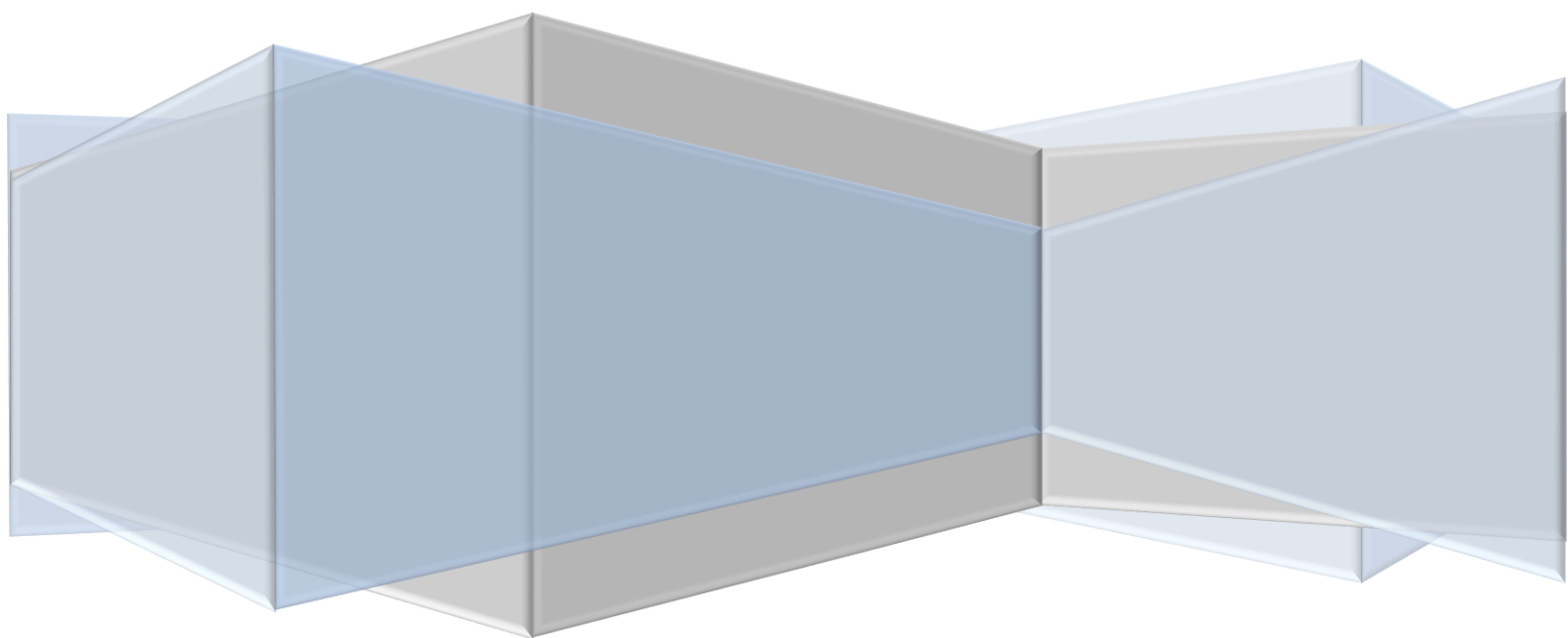


Διπλωματική Εργασία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ Ν - ΠΛΗΘΟΥΣ
ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ/ΘΕΡΜΙΚΩΝ
ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΝΕΡΟΥ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κ. ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ



Κοζάνη 2017-2018

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	6
Κεφάλαιο 1°	7
Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Φωτοβολταϊκά	7
1.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	8
1.3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	8
1.3.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο - Ορισμός	11
1.4 Φωτοβολταϊκή Διάταξη	12
1.5 Μέρη & Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	14
1.5.1 Κατηγοριοποίηση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων	14
1.5.2 Πυρίτιο	16
1.6 Δομή ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος.....	17
1.7 Χρήσεις των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων	17
1.7.1 Φωτοβολταϊκά σε Άλλες Χώρες & στην Ελλάδα	19
1.7.2 Φωτοβολταϊκά σε Στέγες	19
1.8 Συλλογή του Ηλιακού Φωτός.....	22
1.9 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Φωτοβολταϊκών	23
1.9.1 Πλεονεκτήματα	23
1.9.2 Μειονεκτήματα	23
1.10 Κατηγοριοποίηση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	24
1.10.1 Συνδεδεμένα στο Δίκτυο Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Grid-Connected):	24
1.10.2 Εκτός Δικτύου ή Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Off-grid ή Stand Alone).....	25
1.11 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Hybrid PV/Thermal Systems)	26
Κεφάλαιο 2°	28
Περιγραφή του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος	28
2.1 Εισαγωγή.....	28
2.2 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο του Υβριδικού Συστήματος.....	28
2.2.1 Γυαλί	29
2.2.2 Ηλιακά Στοιχεία	29
2.2.3 Tedlar	30
2.2.4 Απορροφητική Πλάκα.....	32

2.2.5 Αγωγός Ροής & Μόνωση.....	32
Κεφάλαιο 3°	33
Μελέτη της Περίπτωσης του Φωτοβολταϊκού Συστήματος χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 Υπολογισμοί στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα	33
3.2.1 Υπολογισμός Θερμικής Αντίστασης & Αποδόσεων στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα .	34
3.3 Περίπτωση 1 ^η	39
3.4 Περίπτωση 2 ^η	43
3.5 Περίπτωση 3 ^η	47
Κεφάλαιο 4°	51
Μελέτη της Περίπτωσης του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος με Αγωγό Ροής (με Flow Duct).....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Υπολογισμοί στο Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα	51
4.2.1 Υπολογισμός Θερμικής Αντίστασης & Αποδόσεων στο Υβριδικό Φωτοβολταϊκό .	52
4.3 Περίπτωση 1 ^η	62
4.4 Περίπτωση 2 ^η	63
4.5 Περίπτωση 4 ^η	63
4.6 Εύρεση της Θερμοκρασίας Εξόδου του Ρευστού Μετά από N Φωτοβολταϊκά Συνδεδεμένα σε Σειρά.....	66
4.7 Σύγκριση Συστοιχίας Παράλληλων Φωτοβολταϊκών Στοιχείων & Φωτοβολταϊκών Στοιχείων σε Σειρά	67
Κεφάλαιο 5°	68
Υπολογισμός της Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα	68
5.1 Εισαγωγή.....	68
5.2 Βασικές Έννοιες.....	68
5.2.1 Ηλιακή Σταθερά (G_{sc})	68
5.2.2 Μεταβολή της Ηλιακής Ακτινοβολίας εκτός Ατμόσφαιρας	68
5.2.3 Γωνία Ζενίθ (θ_z)	69
5.2.4 Ηλιακό Ύψος ($90 - \theta_z$)	69
5.2.5 Αζιμούθιο Επιφάνειας (γ).....	69
5.2.6 Αζιμούθιο Ηλίου (γ_s)	69
5.2.7 Κλίση Επιπέδου (β_1).....	69
5.2.8 Ηλιακός Χρόνος	69

5.2.9 Ωριαία Γωνία (ω)	70
5.2.10 Ηλιακή Απόκλιση (δ)	70
5.2.11 Άμεσος Ακτινοβολία (G_b)	71
5.2.12 Διάχυτος Ακτινοβολία (G_d)	71
5.2.13 Ολική Ακτινοβολία (G)	71
5.2.14 Ακτινοβολία Καθέτου Επιπέδου	71
5.2.15 Αέριος Μάζα (m)	71
5.3 Γωνία πρόσπτωσης (θ)	72
5.4 Άμεσος Ακτινοβολία Οριζόντιας & Κεκλιμένης Επιφάνειας	72
5.5 Μέση Τιμή Ισχύος Ακτινοβολίας Οριζόντιας Επιφάνειας εκτός Ατμόσφαιρας	73
5.6 Μέση Ωριαία Ισχύς Ακτινοβολίας Αίθριας Ατμόσφαιρας (Μέγιστη Ακτινοβολία)	74
5.7 Δείκτης Αιθριότητας	75
5.8 Ανάλυση Μέσης Ισχύος Ολικής Ακτινοβολίας σε Άμεση & Διάχυτη	75
5.9 Υπολογισμός Μέσης Ισχύος Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας Κεκλιμένων Επιφανειών .	76
Κεφάλαιο 6°	77
Προγράμματα Υπολογισμού για τις Περιπτώσεις που Εξετάζονται στο 4° Κεφάλαιο	77
6.1 Εισαγωγή	77
6.2 Πρόγραμμα Υπολογισμού Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος με Αγωγό Ροής (με Flow Duct)	77
6.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού Θερμικών Απωλειών Απλού Τοίχου (1 ^η Περίπτωση)	80
6.4 Πρόγραμμα Υπολογισμού Θερμικών Απωλειών Τοίχου με Μόνωση (2 ^η Περίπτωση) .	81
6.5 Πρόγραμμα Υπολογισμού του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού σε Τοίχο χωρίς Μόνωση (3 ^η Περίπτωση)	83
6.6 Αποτελέσματα Προγραμμάτων	86
6.6.1 Επίδραση της Εποχής του Έτους στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	86
6.6.2 Επίδραση του Αριθμού Σωλήνων στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	88
6.6.3 Επίδραση της Διαμέτρου των Σωλήνων στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	89
6.6.4 Επίδραση της Παροχής Νερού στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	90
6.6.5 Επίδραση της Ύπαρξης Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου στις Θερμικές Απώλειες μέσω Τοίχου	91
Κεφάλαιο 7°	93
Προγράμματα Υπολογισμού για τις Περιπτώσεις που Εξετάζονται στο 3° Κεφάλαιο	93

7.1 Εισαγωγή.....	93
7.2 Πρόγραμμα Υπολογισμού Φωτοβολταϊκού Συστήματος χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)	93
7.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού του Φωτοβολταϊκού σε Τοίχο χωρίς Μόνωση (3 ^η Περίπτωση).....	95
7.4 Αποτελέσματα Προγραμμάτων.....	98
7.4.1 Σύγκριση του Ηλεκτρικού Βαθμού Απόδοσης μεταξύ του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού με Αγωγό Ροής (με Flow Duct) & του Φωτοβολταϊκού χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct).....	98
7.4.2 Σύγκριση των Θερμικών Απωλειών μέσω Τοίχου για τις περιπτώσεις του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού με Αγωγό Ροής (με Flow Duct) & του Φωτοβολταϊκού χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)	101
7.5 Γενικά Συμπεράσματα	102
Πηγές Διαδικτύου	104
Βιβλιογραφία.....	104

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής χρειάστηκαν πολλές «εργατώρες» και τεράστια υποστήριξη. Γι' αυτό τον λόγο, θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένα πρόσωπα για τη σημαντική συμβολή τους στη διεκπεραίωση της. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Εμμανουήλ Σουλιώτη για την ιδέα και το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χάρη στην εμπειρία και στις γνώσεις του και σε συνδυασμο με το υλικό που μου έδωσε, κατάφερα να πραγματοποιήσω κάτι πολύ δύσκολο. Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Κωνσταντίνο Παπαδόπουλο και Αναστασία Μπούρα, γιατί χωρίς την στήριξη τους, οικονομική και κυρίως ψυχολογική, δεν θα κατάφερα να φτάσω ως εδώ.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται ένα επίκαιρο αντικείμενο, το οποίο έχει να κάνει με ηλιακά συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια (Building Integrated Solar Systems). Τα συγκεκριμένα ηλιακά συστήματα θα αντικαταστήσουν σταδιακά τα συμβατικά υλικά που χρησιμοποιούνται στα περιβλήματα των κτιρίων, όπως για παράδειγμα οι οροφές, οι φεγγίτες και οι προσόψεις. Επιπλέον, βασικός στόχος αυτής της διπλωματικής είναι να αποδείξει ότι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του περιβάλλοντος, τις συνθήκες που επικρατούν και τις αλλαγές στη δομή τους, είναι αποδοτικότερα σε σχέση με τα κλασσικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Σε αντίθεση με τα κλασσικά φωτοβολταϊκά, τα οποία παράγουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια, τα υβριδικά φωτοβολταϊκά παράγουν και ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Επίσης, μέσω της διπλωματικής, θα αποδειχθεί ότι τα φωτοβολταϊκά και πόσο μάλλον τα υβριδικά φωτοβολταϊκά, δεν αποτελούν μόνο συστήματα παραγωγής ενέργειας, αλλά και δομικά στοιχεία των κτιρίων, τα οποία επηρεάζουν τα θερμικά και ψυκτικά φορτία. Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και στα υβριδικά φωτοβολταϊκά. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή του υβριδικού φωτοβολταϊκού που θα εξεταστεί και θα συγκριθεί με ένα κλασσικό φωτοβολταϊκό. Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται τρεις περιπτώσεις δομικών στοιχείων για ένα κτίριο. Η πρώτη έχει να κάνει με κτίριο, του οποίου ο τοίχος έχει διπλή στρώση από τούβλα με κενό ανάμεσα τους, η δεύτερη με κτίριο του οποίου ο τοίχος είναι της ίδιας σύστασης, αλλά έχει και εξωτερική μόνωση και η τρίτη με ένα κλασσικό φωτοβολταϊκό πάνω στον τοίχο του κτιρίου της πρώτης περίπτωσης. Ουσιαστικά, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνεται το τυπολόγιο, μέσω του οποίου γίνεται ο υπολογισμός της ηλεκτρικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού και των θερμικών κερδών και απωλειών που υπάρχουν στο κτίριο. Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζονται τα ίδια πράγματα με το προηγούμενο κεφάλαιο, με τις μόνες εξαιρέσεις ότι στην τρίτη περίπτωση ενσωματωμένο στον τοίχο του κτιρίου είναι το υβριδικό φωτοβολταϊκό και υπολογίζεται επιπλέον και η θερμική του απόδοση. Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνεται το τυπολόγιο που αφορά την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Τέλος, στο έκτο και στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν τρέχοντας στην γλώσσα προγραμματισμού του Excel, Visual Basic, το τυπολόγιο του τρίτου, του τέταρτου και του πέμπτου κεφαλαίου. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται σε διαγράμματα και αφορούν κατά κύριο λόγο τις μεταβολές των βαθμών απόδοσης και των θερμικών κερδών και απωλειών, κατά την διάρκεια μιας ημέρας του Χειμώνα και μιας ημέρας του Καλοκαιριού.

Κεφάλαιο 1^ο

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

1.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνονται ορισμένες πληροφορίες για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του κεφαλαίου είναι να ορίσει τα φωτοβολταϊκά συστήματα, να εξηγήσει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και να δώσει πληροφορίες σχετικά με την διάταξη, τα τεχνικά μέρη και την δομή των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην χρήση των φωτοβολταϊκών τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό, στη συλλογή του φωτός μέσω των εγκατεστημένων στις στέγες των σπιτιών φωτοβολταϊκών, αλλά και στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών. Τέλος, το σημαντικότερο κομμάτι του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η κατηγοριοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και πιο συγκεκριμένα η κατηγορία των υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων, για τα οποία θέλουμε να δούμε αν είναι αποδοτικότερα σε σχέση με τα κλασσικά Φωτοβολταϊκά.

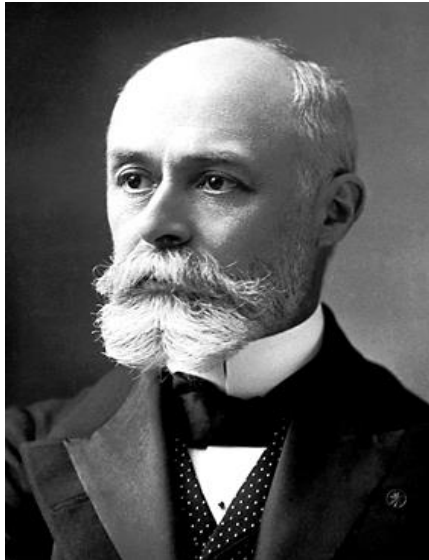
1.2 Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται οι βιομηχανικές διατάξεις πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μία σειρά. Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς, συνήθως από Πυρίτιο (Si), οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά και έχουν ως βάση λειτουργίας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στις μέρες μας, πέρα από τη βελτιστοποίηση του μοντέλου του συστήματος, πρέπει να επιτευχθεί και σημαντική μείωση στο κόστος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, έτσι ώστε εκτός από αντιρρυπαντική πηγή ενέργειας να αποτελούν και οικονομική πηγή ενέργειας.

1.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

1.3.1 Ιστορική Αναδρομή

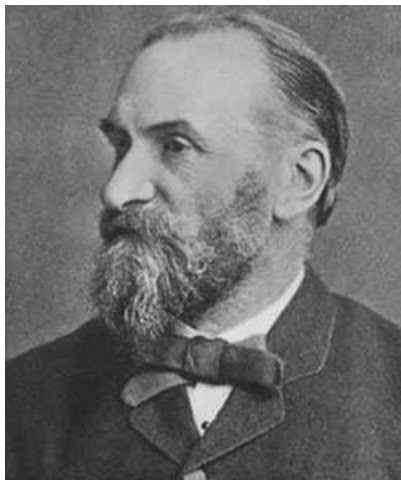
Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839, όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) (Εικόνα 1.1) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια.



Εικόνα 1.1: Edmond Becquerel (1820 - 1891)

<https://www.wikitree.com/wiki/Becquerel-1>

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Άγγλος William Grylls Adams (1836 - 1915) (Εικόνα 1.2) και ο φοιτητής του Richard Evans Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.



Εικόνα 1.2: William Grylls Adams (1836 - 1915)

http://solarcellcentral.com/history_page.html

Το 1918 ο Πολωνός Jan Czochralski (1885 - 1953) (Εικόνα 1.3) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του, η οποία χρησιμοποιείται βελτιωμένη ακόμα και σήμερα.

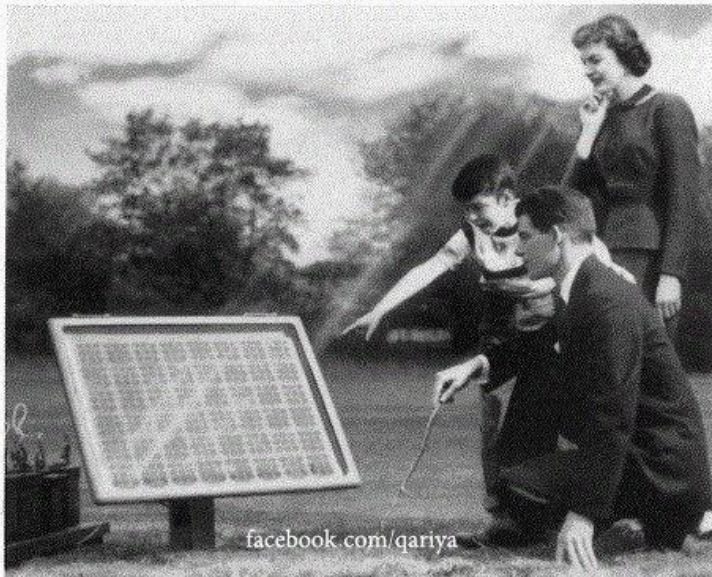


Εικόνα 1.3: Jan Czochralski (1885 - 1953)

https://en.wikipedia.org/wiki/Jan_Czochralski

Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949, όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Η κβαντική θεωρία είχε πλέον ξεδιπλωθεί και δρόμος για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Η πρώτη ηλιακή κυψέλη ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Gordon Pearson, Calvin Fuller και Darryl Charin (Εικόνα 1.4). Η συγκεκριμένη κυψέλη πυριτίου μετέτρεπε το 6% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιήθηκε σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως οι διαστημικοί δορυφόροι, από το 1958.



facebook.com/qariya

Something New Under the Sun. It's the Bell Solar Battery, made of thin discs of specially treated silicon, an ingredient of common sand. It converts the sun's rays directly into usable amounts of electricity. Simple and trouble-free. (The storage batteries beside the solar battery store up its electricity for night use.)

Bell System Solar Battery Converts Sun's Rays into Electricity!

Bell Telephone Laboratories invention has great possibilities for telephone service and for all mankind

Ever since Archimedes, men have been searching for the secret of the sun.

For it is known that the same kindly rays that help the flowers and the grains and the fruits to grow also send us almost limitless power. It is nearly as much every three days as in all known reserves of coal, oil and uranium.

If this energy could be put to use — there would be enough to turn every wheel and light every lamp that mankind would ever need.

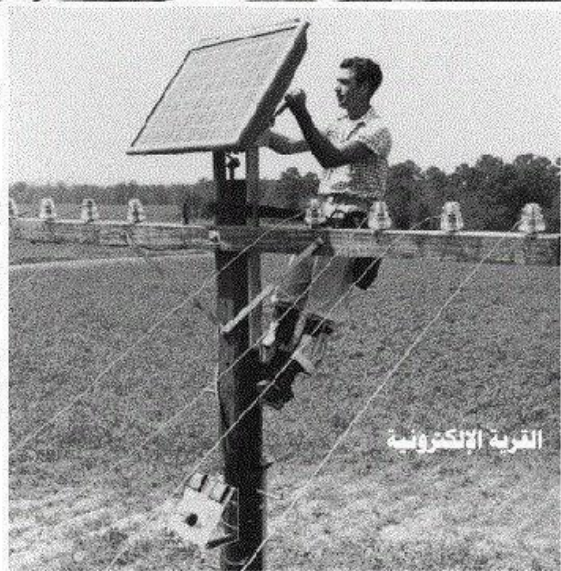
The dream of ages has been brought closer by the Bell System Solar Battery. It was invented at the Bell Telephone Laboratories after

long research and first announced in 1954. Since then its efficiency has been doubled and its usefulness extended.

There's still much to be done before the battery's possibilities in telephony and for other uses are fully developed. But a good and pioneering start has been made.

The progress so far is like the opening of a door through which we can glimpse exciting new things for the future. Great benefits for telephone users and for all mankind may come from this forward step in putting the energy of the sun to practical use.

BELL TELEPHONE SYSTEM



القرية الإلكترونية

Εικόνα 1.4: Εργαστήρια Bell (1954)

<http://mechcreators.blogspot.com/2013/12/gordon-pearson-calvin-fuller-and-darryl.html>

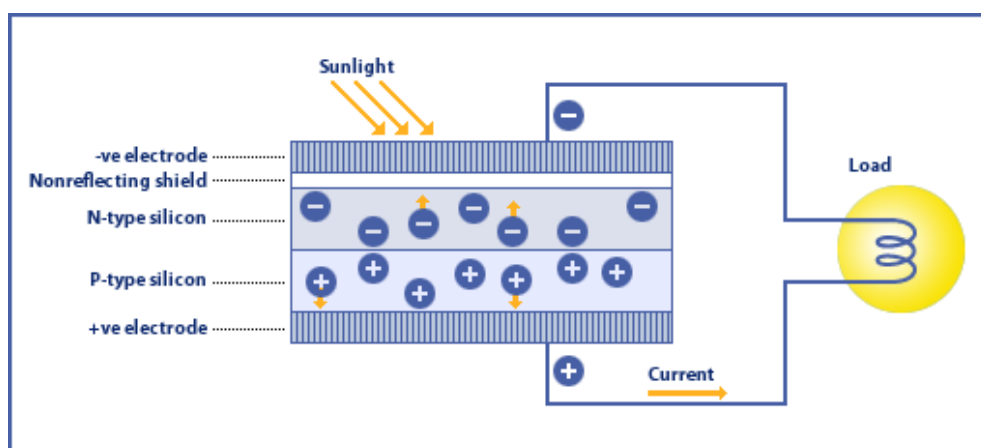
1.3.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο - Ορισμός

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Εικόνες 1.5 & 1.6) πρόκειται για μια φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο ή ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ή μία φωτοβολταϊκή κυψέλη (PV Cell) μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, δηλαδή από πακέτα ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια περιέχουν διάφορα ποσά ενέργειας, τα οποία αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, ή θα ανακλαστούν ή θα απορροφηθούν ή θα το διαπεράσουν. Αυτά που απορροφώνται, αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού κυττάρου να μετακινηθούν και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, καθώς και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζονται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών ή κοινώς ημιαγωγών. Σε αυτά τα υλικά οφείλεται η τεράστια τεχνολογική πρόοδος τόσο στον τομέα της ηλεκτρονικής, όσο και στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών. Στα σύγχρονα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά υλικά, όπως το πυρίτιο.

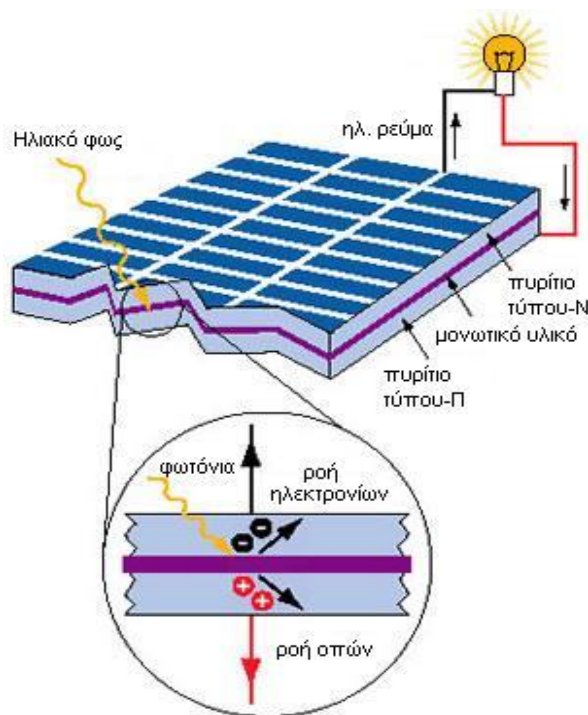
Υπάρχουν δύο τύποι ημιαγωγών. Αυτοί είναι α) οι ημιαγωγοί τύπου-N (type-N), στους οποίους υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια σχεδόν ελεύθερα και β) οι ημιαγωγοί τύπου-Π (type-P), στους οποίους υπάρχουν πολλές ελεύθερες οπές. Οι ελεύθερες οπές λέγονται οπές, διότι τα ηλεκτρόνια έχουν "αφήσει" τις θέσεις τους. Για αυτό το λόγο οι ημιαγωγοί τύπου-Π έχουν θετικό φορτίο.

Όταν ένα φωτόνιο χτυπάει έναν ημιαγωγό τύπου-N, το ηλεκτρόνιο φεύγει από την αρχική του θέση και επειδή έχει αρνητικό φορτίο έλκεται από το θετικό φορτίο, το οποίο είναι συγκεντρωμένο στον ημιαγωγό τύπου-Π. Εξαιτίας του μονωτικού υλικού που υπάρχει ανάμεσα στους ημιαγωγούς τύπου-N και τύπου-Π ο μοναδικός τρόπος διέλευσης από τη μια μεριά στην άλλη είναι μέσω του εξωτερικού φορτίου. Μ' αυτόν τον τρόπο έχουμε την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 1.5: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

<http://roscovnicoff.blogspot.com/2010/10/blog-post.html>



Εικόνα 1.6: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

<http://www.ostrisolar.gr/index.php/2011-03-04-23-37-35>

1.4 Φωτοβολταϊκή Διάταξη

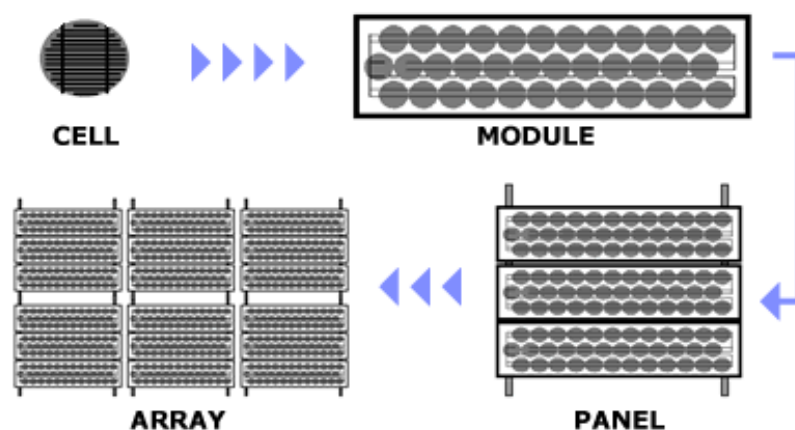
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (Solar Cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα, ανάλογα τον σκοπό χρήσης τους. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή γεννήτριες, τυπικής ισχύος από 20 W έως 300 W.

Ο συνδυασμός πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους, σε σειρά ή παράλληλα, σε μια επίπεδη συνήθως επιφάνεια, σταθερή ή μη, με αντίστοιχο κεντρικό ηλεκτρολογικό κιβώτιο, οδηγεί σε μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (Array). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται κατά κλάδους. Κάθε κλάδος αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ολική τάση, ενώ η παράλληλη σύνδεση αυξάνει το ολικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μιας συστοιχίας, συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η μεταφορά της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται με τις μικρότερες δυνατές απώλειες στη γραμμή μεταφοράς, δηλαδή, με χαμηλό ρεύμα και αντίστοιχα υψηλή ηλεκτρική τάση, μέσα στα επιτρεπτά όρια. Η μέγιστη επιτρεπτή τάση στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι 600 V.

Το σύνολο ενός πλήθους φωτοβολταϊκών συστοιχιών αποτελεί ένα φωτοβολταϊκό πάρκο (PV Park), το οποίο, σε συνδυασμό με όλες εκείνες τις διατάξεις που απαιτούνται για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, τον έλεγχο της φόρτισης συσσωρευτών, αν και εφόσον υπάρχουν, για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος επαρκούς για την τροφοδοσία μιας οικίας, οικισμών, χωριών κλπ., αποτελούν έναν φωτοβολταϊκό σταθμό (PV Station). Σε κάθε περίπτωση, κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, πρέπει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κάθε τμήματός του να συμφωνούν με τα αντίστοιχα του προηγούμενου και του επομένου του.

Στο σχήμα 1.1 που ακολουθεί, δίνονται οι μορφές των τυπικών κατηγοριών φωτοβολταϊκών συνθέσεων, από το φωτοβολταϊκό στοιχείο έως την φωτοβολταϊκή συστοιχία.

From Cell to Array



Σχήμα 1.1: Φωτοβολταϊκή Διάταξη

<http://www.solardirect.com/pv/pvlist/pvlist.htm>

Ηλιακά Στοιχεία (Solar Cells):

Τα ηλιακά στοιχεία είναι συσκευές ημιαγωγών, οι οποίες μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό ρεύμα (συνεχές ρεύμα - DC).

Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (PV Modules):

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούνται από κυκλώματα ηλιακών στοιχείων, τα οποία είναι σφραγισμένα σ' ένα πλαστικό προστατευτικό και αποτελούν το κύριο θεμέλιο των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Φωτοβολταϊκά Πάνελ (PV Panels):

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία είναι συναρμολογημένα μεταξύ τους και σχηματίζουν μία μονάδα.

Φωτοβολταϊκή Συστοιχία (PV Array):

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι η ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής, η οποία αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια και πάνελ.

Φωτοβολταϊκό Πάρκο (PV Park):

Το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι το σύνολο των φωτοβολταϊκών συστοιχιών.

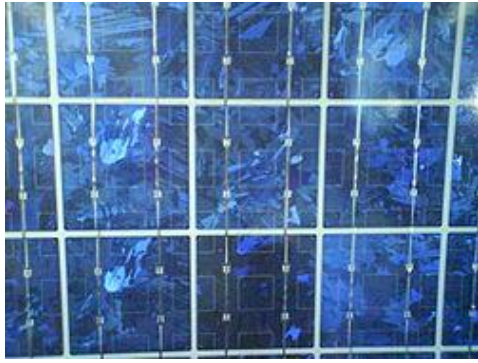
1.5 Μέρη & Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ ή αλλιώς πλαίσια, όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, φωτοβολταϊκών στοιχείων, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

1.5.1 Κατηγοριοποίηση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120 – 160 mm. Δύο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αυτοί είναι το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο. Το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό (Εικόνες 1.8 & 1.9) ή πολυκρυσταλλικό (Εικόνα 1.7). Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα. Κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής, όπως για παράδειγμα η κατεύθυνση, η διάρκεια της ηλιοφάνειας, οι τυχόν σκιάσεις κλπ. Αυτό γίνεται ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη τεχνολογία.

Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: στα φωτοβολταϊκά στοιχεία Κρυσταλλικού Πυριτίου και στα φωτοβολταϊκά στοιχεία Λεπτών Μεμβρανών. Καθεμιά από τις παραπάνω κατηγορίες διακρίνεται σε δύο υποκατηγορίες. Αυτές είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Εικόνες 1.8 & 1.9) και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Εικόνες 1.7), καθώς και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Άμορφου Πυριτίου (Εικόνα 1.10) και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Χαλκοπυριτών CIS / CIGS (Εικόνα 1.11).



Εικόνα 1.7: Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CF%8C_%CF%83%CF%8D%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1



Εικόνες 1.8 & 1.9: Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

<http://www.sunblog.org/%CF%80%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CE%BB/2012/12/%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CE%B7%CE%BA%CF%81%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC-%CE%AE-%CF%80%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%BA%CF%81%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC-10688.html>

<https://kladisenergy.gr/new/panels/>



Εικόνα 1.10: Άμορφο Πυρίτιο

<https://kladisenergy.gr/new/panels/>

1.5.1.1 Ηλιακά Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου

Τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι αδιαφανή ή μπλε ή σκούρο γκρι προς μαύρο και έχουν υψηλή απόδοση (14% - 16%). Το κόστος τους είναι υψηλό, καθώς είναι φτιαγμένα από κρυστάλλους σιλικόνης, μέσω μια πολύπλοκης κατασκευαστικής διαδικασίας.

1.5.1.2 Ηλιακά Στοιχεία Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

Τα ηλιακά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι κατά κύριο λόγο μπλε ή αδιαφανή. Είναι φθηνότερα, καθώς κατασκευάζονται από φθηνότερη σιλικόνη και έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης ($\approx 14\%$)

1.5.1.3 Ηλιακά Στοιχεία Άμορφου Πυριτίου

Τα συγκεκριμένα στοιχεία είναι μη κρυσταλλικά ηλιακά στοιχεία. Είναι διάφανα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν υαλοπίνακας σε παράθυρα κλπ. Τέλος, η απόδοση τους είναι χαμηλή ($\approx 7\%$).

1.5.1.4 Ηλιακά Στοιχεία Χαλκοπυριτών CIS / CIGS

Τα στοιχεία αυτά είναι επίσης μη κρυσταλλικά ηλιακά στοιχεία, με ονομαστική απόδοση από 7% έως 14% αντίστοιχα.

1.5.2 Πυρίτιο

Το πυρίτιο (Si) είναι η βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών. Αυτό οφείλεται αρχικά στην επιστημονική και τεχνική υποδομή του συγκεκριμένου υλικού από τη δεκαετία του '60. Μεγάλες κυβερνητικές και βιομηχανικές επενδύσεις έγιναν σε προγράμματα για τις χημικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες του πυριτίου (Si), ώστε να δημιουργηθεί ο εξοπλισμός που απαιτείται στα βήματα της επεξεργασίας για την απόκτηση της απαραίτητης καθαρότητας και της κρυσταλλικής δομής του υλικού.

Η γνώση που προέκυψε έτσι για το πυρίτιο, τα χαρακτηριστικά του και η αφθονία του στη γη το κατέστησαν ικανό και συμφέρον μέσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Εντούτοις, λόγω του ότι είναι εύθραυστο, το πυρίτιο απαιτεί τον σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται μετά την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας πρέπει να ταξιδέψουν

μεγάλες αποστάσεις για να ενταχθούν στην ροή του ρεύματος και να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς, το υλικό θα πρέπει να έχει υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα, ώστε να αποτρέψει την επιστροφή των ηλεκτρονίων στις φυσικές τους θέσεις. Οι ατέλειες πρέπει να αποφευχθούν, ώστε η ενέργεια του ηλεκτρονίου να μην μετατραπεί σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι επιθυμητή στα υβριδικά φωτοβολταϊκά, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα φωτοβολταϊκά, όπου η ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

Το πυρίτιο (Si), ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή άμορφα υλικά, από τα οποία παράγονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα λεπτά υλικά είναι ένας τρόπος να μειωθεί το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και να αυξηθεί η απόδοσή τους. Εκτός από τη χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρα πλαίσια μπορούν να κατασκευαστούν παράλληλα με τη διαδικασία απόθεσης. Αυτό είναι συμφέρον οικονομικά, αλλά επίσης πολύ απαιτητικό τεχνικά, καθώς η επεξεργασία χωρίς ατέλειες αφορά μεγαλύτερη επιφάνεια.

1.6 Δομή ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα αριθμό μερών ή υποσυστημάτων. Αυτά είναι:

1. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια με τη μηχανική υποστήριξη και πιθανόν ένα σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς.
2. Οι μπαταρίες, που λειτουργούν ως υποσύστημα αποθήκευσης και οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται πλέον, παραμόνο σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις, όπως για παράδειγμα οι φάροι. Διαφορετικά, η σύνδεση του πάνελ γίνεται απευθείας με το υφιστάμενο δίκτυο της ΔΕΗ.
3. Ο καθορισμός ισχύος και η συσκευή ελέγχου που περιλαμβάνει φροντίδα για μέτρηση και παρατήρηση.
4. Η εφεδρική γεννήτρια.

Η επιλογή του πώς και ποια από αυτά τα στοιχεία αξιοποιούνται μέσα στο σύστημα εξαρτάται από ποικίλες εκτιμήσεις. Κάποιες από αυτές αναφέρονται και παραπάνω.

1.7 Χρήσεις των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά, όπως αναφέραμε και παραπάνω, πρόκειται για διατάξεις που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα από την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιείται είτε για να δώσει ενέργεια σε μια συσκευή, είτε για να φορτίσει μια μπαταρία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μικροϋπολογιστές τσέπης, που λειτουργούν χωρίς μπαταρία, απλώς με την έκθεση τους στο φως.

Επίσης, τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται συχνά σε συστοιχίες για την παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Σε αυτή την μορφή χρησιμοποιούνται για να δίνουν ενέργεια σε δορυφόρους, διαστημόπλοια, αλλά και σε απλούστερες εφαρμογές, όπως για την

ενεργειοδότηση απομακρυσμένων τηλεφώνων εκτάκτου ανάγκης σε εθνικές οδούς, σε σπίτια κλπ.

Η θερμοκρασία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοικτού κυκλώματος είναι περίπου ίσος με $-2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ για κάθε ηλιακό στοιχείο. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής τάσης μιας βασικής μονάδας είναι αρνητικός και πολύ μεγάλος από τη στιγμή που συνδέονται σε σειρά 33 έως 36 ηλιακά στοιχεία. Από την άλλη, ο συντελεστής ρεύματος είναι θετικός και μικρός, περίπου ίσος με $+6 \mu\text{A}/^\circ\text{C}$ ανά τετραγωνικό εκατοστό της βασικής μονάδας. Επομένως, για πρακτικούς κυρίως λόγους, μόνο η μεταβολή τάσης σε σχέση με αυτή της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη.

Εξίσου σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η τάση καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών στοιχείων, η οποία είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για κάθε ηλιακό στοιχείο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}) μιας βασικής μονάδας είναι ανάλογο προς την ακτινοβολία και επομένως θα ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επιπλέον, η τάση είναι λογαριθμική συνάρτηση του ρεύματος και συνεπώς θα εξαρτάται λογαριθμικά και από την ακτινοβολία. Επομένως, κατά τη διάρκεια της ημέρας η τάση θα μεταβάλλεται λιγότερο από ότι το ρεύμα. Σε γενικές γραμμές, κατά τον σχεδιασμό μια φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι συνηθισμένο να μην λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της τάσης και να λαμβάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος ανάλογο προς την ακτινοβολία.

Η λειτουργία μιας βασικής μονάδας θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Είναι ένα σημαντικό γνώρισμα της χαρακτηριστικής της βασικής μονάδας, το ότι η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος (V_m) είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή αυτής της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να εκτιμηθεί στο 80% της τάσης ανοικτού κυκλώματος κάτω από κανονικές συνθήκες ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα χρησιμεύει στη σχεδίαση της μονάδας ελέγχου της ισχύος της συσκευής.

Ο χαρακτηρισμός της βασικής φωτοβολταϊκής μονάδας συμπληρώνεται με τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός ηλιακού στοιχείου κανονικής λειτουργίας (NOCT - Normal Operating Cell Temperature), οριζόμενης ως η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου, όταν η βασική μονάδα λειτουργεί κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες σε ανοικτό κύκλωμα:

1. Ακτινοβολία $0,8 \text{ kW}/\text{m}^2$
2. Φασματική Κατανομή AM 1,5
3. Θερμοκρασία Περιβάλλοντος 20°C
4. Ταχύτητα Ανέμου $1 \text{ m}/\text{s}$

Το NOCT (συνήθως μεταξύ 42°C και 46°C) χρησιμοποιείται για να καθορίσει τη θερμοκρασία του ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου (T_c) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της βασικής μονάδας. Συνήθως υποθέτουμε ότι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του ηλιακού ηλεκτρικού στοιχείου (T_c) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (T_a) εξαρτάται γραμμικά από την ακτινοβολία G_r .

1.7.1 Φωτοβολταϊκά σε Άλλες Χώρες & στην Ελλάδα

Σε πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει προγράμματα επιδότησης των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταπωλείται και εισάγεται στα δημόσια δίκτυα μεταφοράς. Τα συγκεκριμένα προγράμματα στοχεύουν στη διαφοροποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη σταδιακή απεξάρτηση της από το πετρέλαιο.

Σημαντικό ρόλο σε όλα αυτά είχε η επικύρωση του πρωτοκόλλου του Κιότο, καθώς και μια σειρά άλλων διεθνών συμφωνιών που ακολούθησαν ύπο την πίεση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Ωστόσο, η ουσιαστική ώθηση για τη χρήση φωτοβολταϊκών και για την χρήση των υπόλοιπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δόθηκε μέσα από κυβερνητικά προγράμματα με την μορφή επιδοτήσεων, όπως αναφέρουμε και παραπάνω. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η ευνοϊκή τιμολόγηση της ενέργειας που παράγεται από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), η οποία είναι γνωστή και ως feed - in - tariff.

Τέλος, η Ελλάδα έχει υιοθετήσει και αυτή με την σειρά της κίνητρα για την προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τα οποία ήταν και είναι ιδιαίτερα ελκυστικά για τους υποψήφιους επενδυτές. Άλλωστε, είναι γνωστό ότι αποτελεί μια χώρα με πλούσιο φυσικό πλούτο.

1.7.2 Φωτοβολταϊκά σε Στέγες

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλησε να ωθήσει τους πολίτες της να αξιοποιήσουν την ηλιακή ενέργεια, επιτρέποντας τους να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά στις στέγες των σπιτιών τους (Εικόνες 1.12 & 1.13). Έτσι εγκαινιάστηκε το Πρόγραμμα «Φωτοβολταϊκά σε Στέγες» με πολύ ευνοϊκές ρυθμίσεις και πολλά κίνητρα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αφορά στέγες και δώματα στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά συνολικής ισχύος 10 kW και σε αυτό είναι δυνατή η συμμετοχή όλων των πολιτών.

Στην Ελλάδα, οι συμμετέχοντες μπορούν να πωλούν το ρεύμα που παράγουν στη ΔΕΗ. Έτσι, το κέρδος για τον κάτοχο των φωτοβολταϊκών είναι διπλό, καθώς εισπράττει χρήματα από τη ΔΕΗ για το ρεύμα που παράγει και δεν χρειάζεται να πληρώνει για το ρεύμα που καταναλώνει.



Εικόνα 1.12: Φωτοβολταϊκά σε Μονοκατοικία

<http://www.aytonoma-fotovoltaiika.gr/>



Εικόνα 1.13: Φωτοβολταϊκά σε Μονοκατοικία

<https://www.open-mind.gr/opensolar/>

Εκτός όμως από τις στέγες μονοκατοικιών, τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τοποθετούνται σε στέγες και σε δώματα πολυκατοικιών (Εικόνες 1.14 & 1.15).



Εικόνα 1.14: Φωτοβολταϊκά σε Πολυκατοικία

http://anakainisi-oikodomi.blogspot.com/2011/01/blog-post_5508.html



Εικόνα 1.15: Φωτοβολταϊκά σε Πολυκατοικία

<http://www.selasenergy.gr/ergo-karvali1-20kw.php>

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών σε κατοικίες είναι μια σημαντική επένδυση για το μέλλον, καθώς εξασφαλίζει κέρδη για τον κάτοχο του φωτοβολταϊκού συστήματος για 25 χρόνια. Ειδικά σε περιοχές που επικρατεί ηλιοφάνεια τους περισσότερους μήνες του χρόνου, η υψηλή απόδοση είναι σίγουρη. Βέβαια, τα κέρδη εξαρτώνται και από το μέγεθος της εγκατάστασης. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερη είναι η εγκατάσταση (μέχρι 10 kW), τόσο περισσότερα κέρδη θα έχει.

1.8 Συλλογή του Ηλιακού Φωτός

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής μιας διάταξης φωτοβολταϊκών είναι το που θα στερεωθούν οι βασικές μονάδες, δηλαδή αν θα στερεωθούν σε σταθερές θέσεις ή οι προσανατολισμοί τους θα ιχνηλατούν την κίνηση του ήλιου.

Στην πλειοψηφία των διατάξεων οι βασικές μονάδες στερεώνονται σε ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο με την πρόσοψη προς τον ισημερινό. Αυτή είναι η απλούστερη διάταξη, με κανένα κινούμενο τμήμα και σχετικά χαμηλό κόστος. Επιπλέον, η βέλτιστη γωνία κλίσης εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος, την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και το είδος του φορτίου.

Στερεώνοντας λοιπόν τη διάταξη πάνω σε σύστημα με δύο άξονες παρακολούθησης του ήλιου, μπορεί να γίνει συλλογή μέχρι και 25% περισσότερης ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους, σε σύγκριση με την εγκατάσταση σταθερής κλίσης που προαναφέραμε. Ωστόσο, κάτι τέτοιο αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και έχει ως αποτέλεσμα μια χαμηλότερης αξιοπιστίας και υψηλότερου κόστους συντήρηση. Από την άλλη, η μονού άξονα ιχνηλάτηση είναι λιγότερο σύνθετη, αλλά παρουσιάζει μικρότερο κέρδος.

Με βάση υπολογισμούς, έχει παρατηρηθεί ότι σε κλίματα με ηλιοφάνεια, μια διάταξη επίπεδης κινούμενης πλάκας που είναι κατάλληλα ρυθμισμένη ώστε να στρέφεται προς τον ήλιο δυο φορές την ημέρα και να παίρνει την κατάλληλη κλίση τέσσερις φορές το χρόνο, μπορεί να συλλαμβάνει το 95% της ενέργειας, που συλλέγεται με ένα σύστημα δύο αξόνων παρακολούθησης, το οποίο είναι πλήρως αυτοματοποιημένο. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο προσανατολισμός μπορεί να ρυθμίζεται και χειροκίνητα.

Το σύστημα παρακολούθησης έχει ιδιαίτερη σημασία σε συστήματα, που λειτουργούν κάτω από συγκεντρωμένο ηλιακό φως. Η δομή των συγκεκριμένων συστημάτων εκτείνεται από έναν απλό σχεδιασμό βασισμένο πάνω σε πλευρικούς ενισχυτικούς καθρέφτες μέχρι και τα συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν υπερσύγχρονες οπτικές τεχνικές, για να αυξήσουν την είσοδο φωτός προς τα ηλιακά στοιχεία κατά μερικές τάξεις του μεγέθους.

Τέλος, η παρακολούθηση είναι απαραίτητη από τη στιγμή που ο λόγος συγκέντρωσης υπερβαίνει κάποιο όριο και το σύστημα μπορεί να μετατρέψει μόνο την άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας.

1.9 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Φωτοβολταϊκών

1.9.1 Πλεονεκτήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Η τεχνολογία τους είναι φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διότι είναι παντού διαθέσιμη και δεν κοστίζει.
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή και κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής.
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη.
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (20-30 χρόνια λειτουργίας).
- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών.
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως για παράδειγμα η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές. Με άλλα λόγια, τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ότι μπορούν να συνδεθούν με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, καταργώντας έτσι την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου.

1.9.2 Μειονεκτήματα

Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 kW, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Ωστόσο, το υψηλό αυτό κόστος μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το φωτοβολταϊκό σύστημα να συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια.

Όπως και να έχει, τα πλεονεκτήματα υπερσχύουν και το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και ιδίως στα φωτοβολταϊκά, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών.

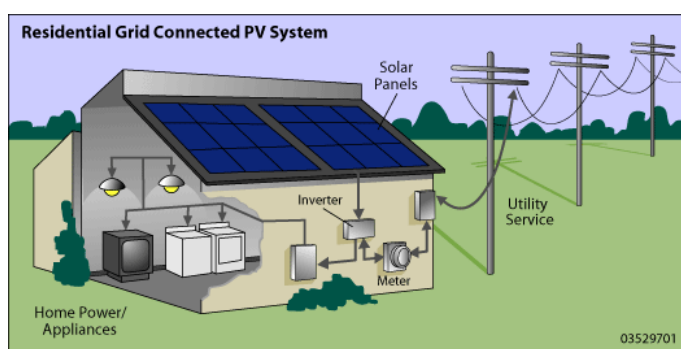
1.10 Κατηγοριοποίηση των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Γενικά, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων. Αυτές είναι: 1) το διασυνδεδεμένο με το δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα (Grid-Connected) και 2) το εκτός δικτύου ή αυτόνομο σύστημα (Off-grid ή Stand Alone). Στη συνέχεια αναλύονται οι παραπάνω κατηγορίες μία προς μία.

1.10.1 Συνδεδεμένα στο Δίκτυο Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Grid-Connected):

Τα συστήματα αυτά (Εικόνα 1.16) συνδέονται με το εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο αποτελεί για τα φωτοβολταϊκά συστήματα έναν τεράστιο συσσωρευτή σταθερής τάσης 220 V. Συνεπώς, στα συγκεκριμένα συστήματα δεν απαιτείται η αποθήκευση της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Επιπλέον, τα παραπάνω συστήματα χωρίζονται σε αυτά που συνιστούν κεντρικούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο και στα καταναμημένα. Τα καταναμημένα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας, δηλαδή το φωτοβολταϊκό σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής και σε αυτά που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπρόσθετη παραγόμενη ενέργεια σε αυτό, δηλαδή το φωτοβολταϊκό σύστημα επιλέγεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις και όταν υστερεί να παίρνει από το δίκτυο. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο κριτήριο, μέσα στο έτος η συνολική ενέργεια από το δίκτυο στην εφαρμογή προβλέπεται να είναι ίση με την ενέργεια από το σύστημα στο δίκτυο.



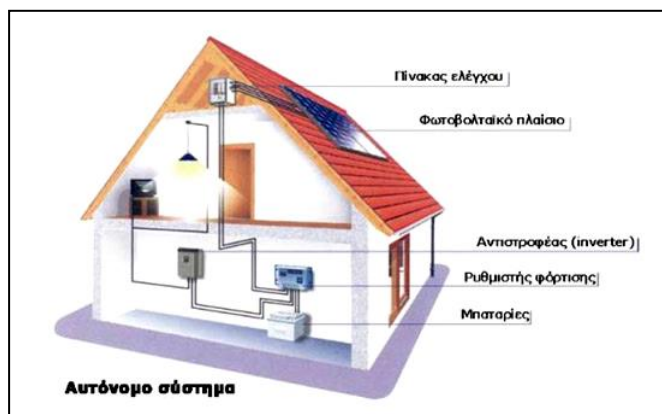
Εικόνα 1.16: Συνδεδεμένα στο Δίκτυο Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Grid-Connected)

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42986-residential-grid-connected-pv-system-with-mppt>

1.10.2 Εκτός Δικτύου ή Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Off-grid ή Stand Alone)

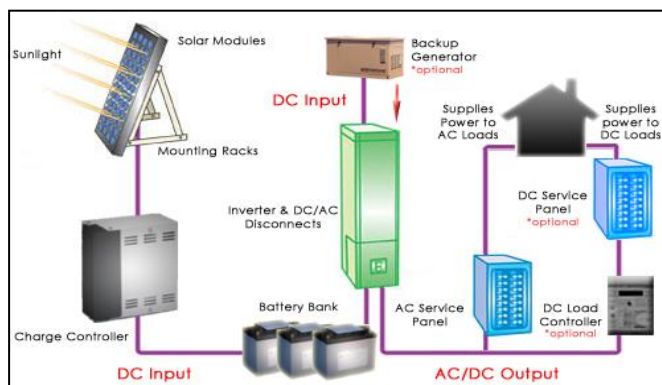
Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά συστήματα (Εικόνες 1.17 & 1.18) παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται μόνο από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία χωρίς να συμμετέχουν άλλες πηγές σε αυτό. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία των φορτίων της εφαρμογής (συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου), είτε αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή των περιόδων συννεφιάς (συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας).

Επίσης η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε αξιοποιείται ως ενέργεια συνεχούς ρεύματος, είτε μετατρέπεται σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω του αντιστροφέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις πάντως, ενδείκνυται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τη συστοιχία σε εναλλασσόμενο, καθώς οι περισσότερες συσκευές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα τάσης 220 V. Αυτού του τύπου τα συστήματα είναι κοινά σε εφαρμογές άντλησης.



Εικόνα 1.17: Εκτός Δικτύου ή Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Off-grid ή Stand Alone)

<http://vensongreen.com/stand-alone-solar-pv-systems/>

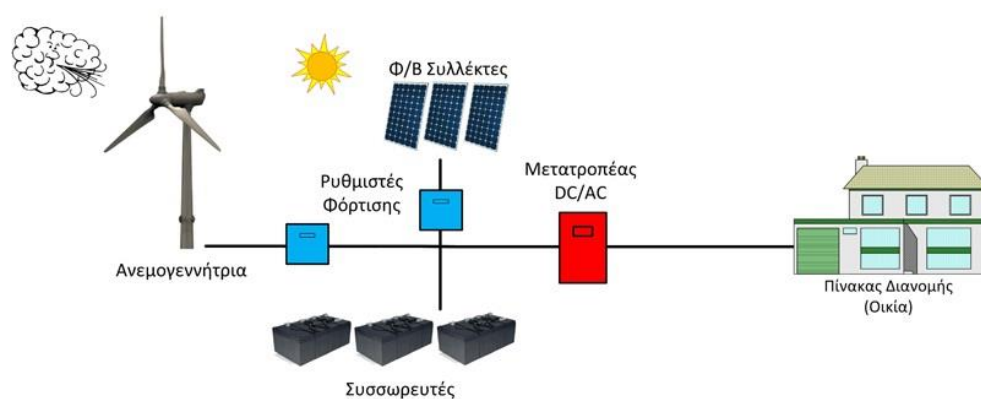


Εικόνα 1.18: Διάγραμμα Αυτόνομου ή Εκτός Δικτύου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

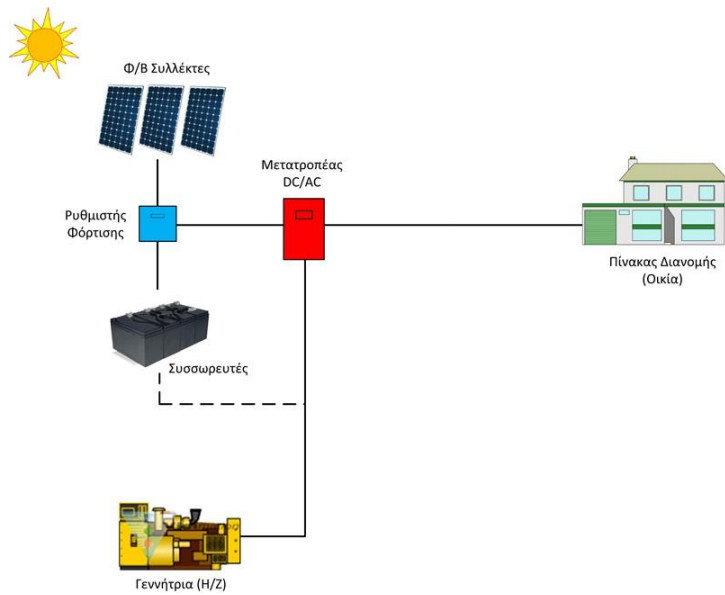
<https://www.slideshare.net/MMEMANMADEENERGY/mme-solar-off-grid-on-grid-solar-system>

1.11 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα (Hybrid PV/Thermal Systems)

Στα υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά συστήματα (Εικόνες 1.19, 1.20 & 1.21) το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, αλλά σε θερμότητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τους και κατά συνέπεια την μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Η φυσική ψύξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων με ακτινοβολία και μεταφορά με αέρα δεν επαρκεί για την μείωση της θερμοκρασίας τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Επιπλέον, η απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν βοηθά μόνο στη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους, αλλά και στην αύξηση της συνολικής ενεργειακής τους απόδοσης. Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα αναπτύσσονται ραγδαία και έχουν αρχίσει ήδη να χρησιμοποιούνται σε κάποιο βαθμό. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια με ενσωματωμένη θερμική μονάδα απολαβής της θερμότητας του φωτοβολταϊκού, στην οποία ένα κυκλοφορούν ρευστό, με θερμοκρασία χαμηλότερη από την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού, θερμαίνεται ψύχοντας το. Το συγκεκριμένο ρευστό χρησιμοποιείται και σε πλήθος άλλων πρακτικών εφαρμογών πέρα από την ψύξη του φωτοβολταϊκού. Στις υβριδικές συσκευές, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι θερμικές μονάδες αποτελούν ενιαίες συσκευές και μπορούν να μετατρέψουν την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία ταυτόχρονα σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Επίσης, παρέχουν επιπλέον ποσότητα θερμότητας της ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερη ολική αποδιδόμενη ενέργεια σε σχέση με τα απλά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τέλος, σε γενικές γραμμές, τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι τα υβριδικά συστήματα θέρμανσης νερού (PV/T-W) και τα υβριδικά συστήματα θέρμανσης αέρα (PV/T-A). Στην συγκεκριμένη διπλωματική θα επικεντρωθούμε στην πρώτη κατηγορία συστημάτων.

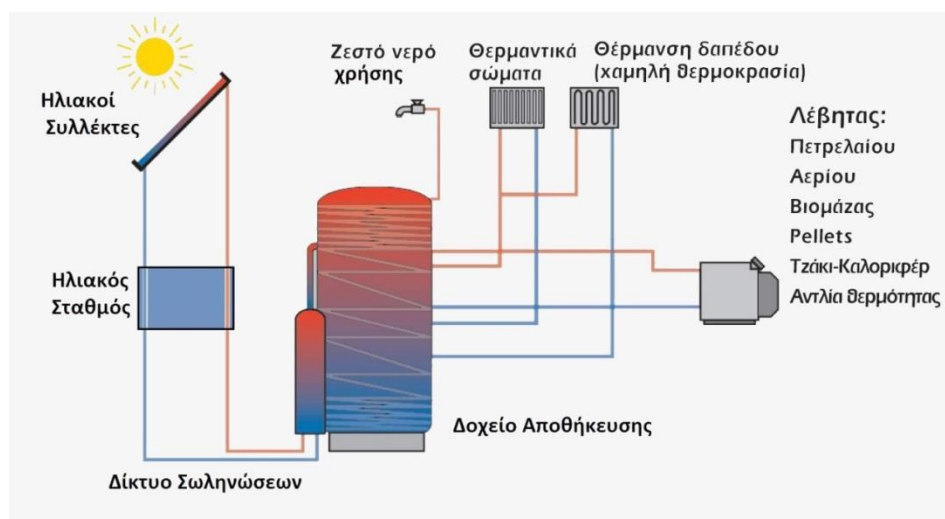


Εικόνα 1.19: Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα



Εικόνα 1.20: Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα

<http://greenmindset.cti.gr/categories>



Εικόνα 1.21: Θερμικά Συστήματα

<http://www.andrianos.gr/gr/iliaki-thermans>

Κεφάλαιο 2^ο

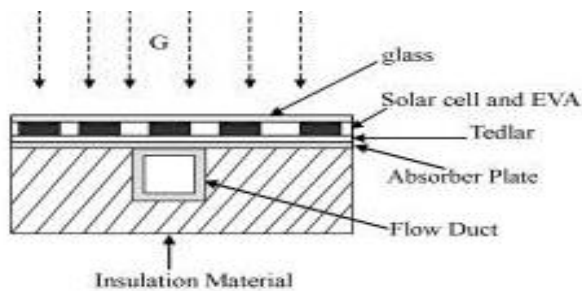
Περιγραφή του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος

2.1 Εισαγωγή

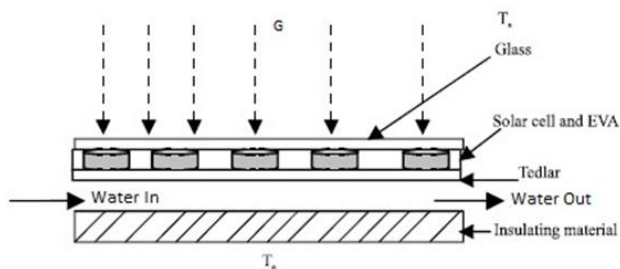
Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η περιγραφή του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, με το οποίο θα ασχοληθούμε και θα μελετήσουμε, κατά κύριο λόγο, στην συγκεκριμένη διπλωματική. Τα κτίρια απαιτούν τόσο θερμική, όσο και ηλεκτρική ενέργεια. Γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία αποτελούν μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία για κτιριακές εφαρμογές. Ένα τέτοιο υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα θέλουμε να εγκαταστήσουμε σε ένα τυχαίο κτίριο. Στη συνέχεια, μελετώντας ξεχωριστά τρεις διαφορετικές περιπτώσεις για το συγκεκριμένο κτίριο, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω, θα προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε αν τελικά είναι ενεργειακά αποδοτικότερο να έχουμε εγκατεστημένο ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα ή ένα κλασσικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Με άλλα λόγια, θα δούμε για κάθε περίπτωση τι θερμικές απώλειες και τι θερμικά κέρδη έχουμε, καθώς και τους παράγοντες και τις παραμέτρους που επηρεάζουν όλα τα προηγούμενα. Θεωρώντας ενεργειακή ισορροπία για τα διάφορα συστατικά του υβριδικού συστήματος μπορούμε να αποκτήσουμε αναλυτικές εκφράσεις για τις θερμικές παραμέτρους, όπως για παράδειγμα την θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων, την θερμική απόδοση, την μέση θερμοκρασία του νερού κλπ. Τέλος, η θερμική ανάλυση των υβριδικών συστημάτων εξαρτάται από την ηλεκτρική ανάλυση τους.

2.2 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο του Υβριδικού Συστήματος

Το υβριδικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο που μελετάμε (Σχήματα 2.1 & 2.2), αποτελείται από γυαλί (Glass), από ηλιακό στοιχείο (Solar Cell), από Tedlar, από αγωγό ροής (Flow Duct) και από μονωτικό υλικό (Insulation). Παρακάτω δίνονται και ορισμένες πληροφορίες για τα συστατικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 2.1: Τομή Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος



Σχήμα 2.2: Τομή Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος

<https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=ijar.2007.211.226>

2.2.1 Γυαλί

Το γυαλί (Glass) που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά είναι ένα ειδικό γυαλί, με ενσωματωμένα ηλιακά στοιχεία, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Εκτός του ότι παρέχει προστασία από τον θόρυβο και την βροχή, το συγκεκριμένο γυαλί χρησιμοποιείται για θερμική μόνωση και για σκίαση, επιτρέποντας παράλληλα την διέλευση του ηλιακού φωτός.

2.2.2 Ηλιακά Στοιχεία

2.2.2.1 Ορισμός

Τα ηλιακά στοιχεία (Solar Cells) είναι ενσωματωμένα ανάμεσα σε δύο υαλοπίνακες και σε μια ειδική μεμβράνη, η οποία βρίσκεται επίσης μεταξύ των υαλοπινάκων και καλύπτει τα ηλιακά στοιχεία από κάθε πλευρά. Κάθε ηλιακό στοιχείο, σε ατομικό επίπεδο, έχει δύο ηλεκτρικές συνδέσεις, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με τα υπόλοιπα στοιχεία του πλαισίου (PV Module), με σκοπό τον σχηματισμό ενός συστήματος που παράγει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 1^ο– 1.4).

2.2.2.2 Λειτουργία

Όπως έχουμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 1^ο – 1.3.2), ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δημιουργείται όταν ένα θετικά φορτισμένο στρώμα σιλικόνης, τύπου-Π, τοποθετείται κόντρα σε ένα αρνητικά φορτισμένο στρώμα σιλικόνης, τύπου-N, με σκοπό την δημιουργία μιας διόδου.

2.2.2.3 Παραγωγή

Κάθε ηλιακό στοιχείο έχει δύο ηλεκτρικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV Modules). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, χρησιμοποιείται ως συστατικό ενός μεγαλύτερου φωτοβολταϊκού συστήματος, ώστε να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν μια μορφή παθητικής ηλιακής προστασίας.

2.2.2.4 Υλικά Κατασκευής

Τα ηλιακά στοιχεία έχουν ως βασικό συστατικό το πυρίτιο (Si) και είναι διαθέσιμα σε δύο τύπους. Αυτοί είναι:

- 1) Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου
- 2) Τα ηλιακά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία διακρίνονται σε δύο τύπους. Αυτοί είναι:
 - a) Του μονοκρυσταλλικού πυριτίου
 - b) Του πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Για τα συγκεκριμένα υλικά δίνονται περισσότερες πληροφορίες στο πρώτο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 1^ο – 1.5).

2.2.3 Tedlar

2.2.3.1 Ορισμός

Το Tedlar είναι ένα ιδανικό προστατευτικό υλικό για αρχιτεκτονικά υποστρώματα. Μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε μεγάλο εύρος υποστρωμάτων, παρέχοντας προστασία έναντι στις ακραίες καιρικές συνθήκες, στο ξεθώριασμα, στο ράγισμα, στο σπάσιμο, καθώς και στη διάβρωση. Επιπλέον, το Tedlar επιμηκύνει σημαντικά την χρήσιμη ζωή και διατηρεί την αισθητική τόσο στο εσωτερικό, όσο και στο εξωτερικό των αρχιτεκτονικών εφαρμογών.

2.2.3.2 Χαμηλό Κόστος Συντήρησης

Με εξαιρετική αντίσταση στα στοιχεία της φύσης, το Tedlar δεν απαιτεί υψηλά κόστη συντήρησης. Επιπρόσθετα, το συγκεκριμένο υλικό, λόγω της χημικής του σταθερότητας, δίνει την δυνατότητα καθαρισμού του με τη χρήση μεγάλης δύναμης ή πίεσης, χωρίς να προκαλείται ζημιά στην ταινία ή το υπόστρωμα του και κατ'επέκταση μείωση στην διάρκεια ζωής του.

2.2.3.3 Εμπόδιο στον Σχηματισμό Υγρασίας & Μούχλας

Το Tedlar όταν εφαρμόζεται σε εσωτερικές και εξωτερικές κατασκευές, αποτρέπει την αποδυνάμωση τους, καθώς και τον σχηματισμό μούχλας και υγρασίας. Οι ταινίες Tedlar δεν διευκολύνουν την ανάπτυξη βακτηρίων. Για τον λόγο αυτό, είναι ιδανικές στο να παρέχουν πρόσθετη προστασία έναντι των μολύνσεων σε νοσοκομεία, εργαστήρια, δωμάτια καθαρισμού και εστιατόρια.

2.2.3.4 Διάφανες & Αδιάφανες Ταινίες – Στρώσεις

Οι ταινίες Tedlar είναι διαθέσιμες τόσο σε διάφανη μορφή, όσο και σε αδιάφανη μορφή. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από χρωματισμένες αδιάφανες ταινίες Tedlar. Η ομοιομορφία του χρώματος και η αντίσταση στο ξεθώριασμα των συγκεκριμένων ταινιών Tedlar, τους επιτρέπει να διατηρούν το χρώμα τους και την αρχική τους εμφάνιση για πολλά χρόνια. Από την άλλη, οι διάφανες ταινίες επιτρέπουν την μακροχρόνια μετάδοση του φωτός, ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα σπασίματος, κιτρινίσματος και ξεθωριάσματος του υλικού.

2.2.3.5 Χαρακτηριστικές Εφαρμογές

Το Tedlar μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επένδυση τοίχων, σε εσωτερικές και εξωτερικές κατασκευές, ως υαλοπέτασμα, ως υλικό κατασκευής οροφών, για τριμάρισμα, σε σχηματισμένα ή επίπεδα μεταλλικά πάνελ κτιρίων, ως επένδυση σωληνώσεων ή δοχείων, σε επιφάνειες εγκαταστάσεων υγείας, όπως νοσοκομεία, καθώς και για να προσφέρει ευκαμψία σε κατασκευές όπως στέγαστρα, μαρκίζες και θόλοι σταδίων.

2.2.4 Απορροφητική Πλάκα

Οι απορροφητικές πλάκες είναι συνήθως μαύρες επιφάνειες, οι οποίες απορροφούν ιδιαίτερα υψηλό ποσοστό φωτός. Το επίπεδο της απορρόφησης υποδεικνύει την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται και δεν αντανακλάται. Καθώς η απορροφητική πλάκα θερμαίνεται και φτάνει σε μια θερμοκρασία υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, παράγει ένα μεγάλο μέρος της συσσωρευμένης ηλιακής ενέργειας. Ο ρυθμός με τον οποίο η απορροφούμενη ενέργεια εκπέμπεται ως θερμότητα, καθορίζεται από τον βαθμό εκπομπής. Τέλος, για να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας κατά την εκπομπή θερμότητας, οι πιο αποτελεσματικές απορροφητικές πλάκες διαθέτουν επιφανειακή επένδυση. Η συγκεκριμένη επένδυση επιτρέπει την μετατροπή μεγάλου μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα, μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές της τελευταίας.

2.2.5 Αγωγός Ροής & Μόνωση

Οι αγωγοί ροής (Flow Ducts) είναι αγωγοί ή αλλιώς περάσματα, μέσα από τους οποίους διέρχονται αέρας ή νερό και χρησιμοποιούνται είτε για θέρμανση, είτε για ψύξη, είτε για εξαερισμό. Σε ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα, όπως αυτό που απεικονίζεται στα Σχήματα 2.1 και 2.2, ο αγωγός ροής είναι μονωμένος, ώστε να μην υπάρχει μεταφορά θερμότητας από και προς το περιβάλλον. Στην συγκεκριμένη διπλωματική θα μελετήσουμε το παραπάνω υβριδικό σύστημα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Ωστόσο, θα μελετήσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η μία περίπτωση θα αφορά το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα που αναλύεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, με αγωγό ροής (με Flow Duct), δηλαδή με παραγωγή θερμικής, αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη περίπτωση θα αφορά ένα κλασσικό φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς αγωγό ροής (χωρίς Flow Duct), δηλαδή χωρίς παραγωγή θερμικής ενέργειας, αλλά με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από τον αγωγό ροής της πρώτης περίπτωσης θα διέρχεται νερό.

Κεφάλαιο 3^ο

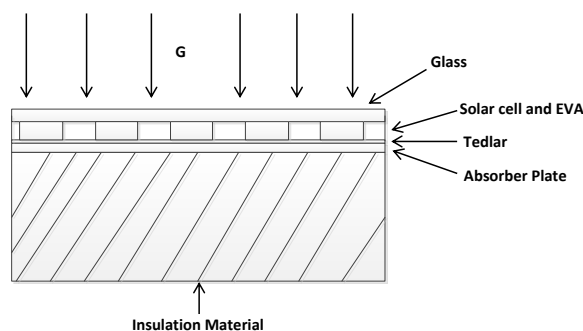
Μελέτη της Περίπτωσης του Φωτοβολταϊκού Συστήματος χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)

3.1 Εισαγωγή

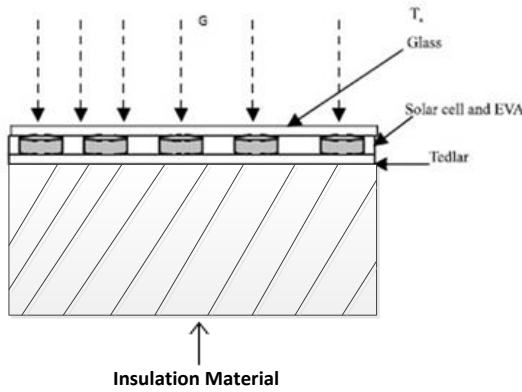
Για την μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με το κτίριο στο οποίο θα ενσωματωθεί, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάμε τρεις διαφορετικές εκδοχές του κτιρίου και των δομικών του στοιχείων, τις οποίες θα χαρακτηρίσουμε ως περιπτώσεις. Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση (R_{tot}) σε κάθε περίπτωση, την πυκνότητα θερμορροής (q) και την προσδιδόμενη ή απαγόμενη θερμότητα (Q). Επιπλέον, θα δούμε την απόδοση του φωτοβολταϊκού όταν είναι μόνο του και όταν έχει ενσωματωθεί στο κτίριο. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με κτίριο, στο οποίο ο τοίχος δεν έχει εξωτερική μόνωση και αποτελείται από δύο στρώσεις τούβλου και κενό ανάμεσα τους. Η δεύτερη περίπτωση αφορά κτίριο με τοίχο της ίδιας δομής, όμως με εξωτερική μόνωση συγκεκριμένου πάχους. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση έχουμε το κτίριο της πρώτης και σε αυτό έχει ενσωματωθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα. Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις θα δημιουργήσουμε ένα δίκτυο θερμικών αντιστάσεων μέσω του VISIO, ώστε να διευκολυνθούμε στην μελέτη τους.

3.2 Υπολογισμοί στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Αρχικά και πριν προχωρήσουμε σε κάθε περίπτωση που αναφέραμε ξεχωριστά, πρέπει να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος που επιλέξαμε να μελετήσουμε.



Σχήμα 3.1: Τομή Φωτοβολταϊκού Συστήματος



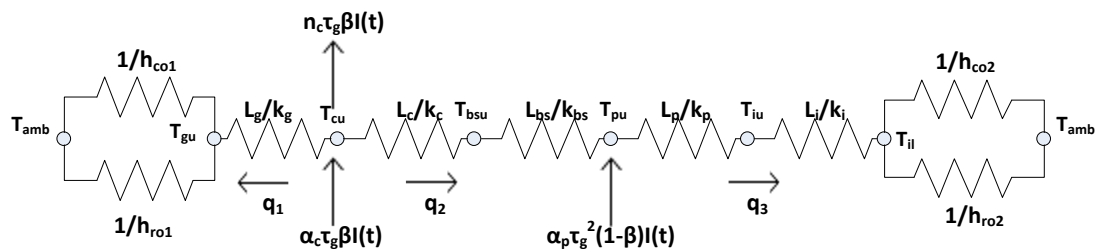
Σχήμα 3.2: Τομή Φωτοβολταϊκού Συστήματος

<https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=ijar.2007.211.226>

3.2.1 Υπολογισμός Θερμικής Αντίστασης & Αποδόσεων στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Σε πρώτη φάση, μελετάμε την περίπτωση που το φωτοβολταϊκό δεν έχει αγωγό ροής (χωρίς Flow Duct). Με άλλα λόγια, θα έχουμε ένα κλασικό φωτοβολταϊκό σύστημα όπως στα παραπάνω σχήματα (Σχήματα 3.1 & 3.2). Συνεπώς, το φωτοβολταϊκό μας θα αποτελείται από γυαλί πάχους L_g (m), ηλιακό κελί πάχους L_c (m), Tedlar πάχους L_{bs} (m), απορροφητική πλάκα πάχους L_p (m) και μονωτικό υλικό πάχους L_i (m). Οι τιμές των παχών, των αγωγιμοτήτων και των λοιπών παραμέτρων θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων του φωτοβολταϊκού (Σχήμα 3.3) και των ροών ενέργειας, το οποίο έχει δημιουργηθεί μέσω του VISIO, έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 3.3: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Φωτοβολταϊκού χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)

Στο ανωτέρω δίκτυο α_c είναι η απορροφητικότητα του ηλιακού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, του ηλιακού στοιχείου και του Tedlar, n_c είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου και α_p είναι η απορροφητικότητα της απορροφητικής πλάκας. Επίσης, β είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας, ([1]). Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί πως αν κάποια από τις

πυκνότητες θερμορροής προκύψει αρνητική από τους υπολογισμούς, τότε απλά η φορά της θα είναι αντίθετη από αυτήν που έχει σημειωθεί στο σχήμα.

Με βάση λοιπόν το παραπάνω δίκτυο (Σχήμα 3.3), συνεχίζουμε με τους υπολογισμούς για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό.

Αρχικά, οι όροι h_{ro1} και h_{ro2} υπολογίζονται ως εξής:

$$h_{ro1} = h_{ro2} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{\text{επιφάνειας}}^2 + (0,05 \cdot T_{\text{amb}})^2] \cdot (T_{\text{επιφάνειας}} + 0,05 \cdot T_{\text{amb}}) \quad (3.1)$$

Όπου:

h_{ro1}, h_{ro2} : οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία (W/m^2K)

ε : η εκπεμπικότητα, με εύρος από 0 έως 1 ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

σ : η σταθερά Stefan – Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$)

$T_{\text{επιφάνειας}}$: η απόλυτη θερμοκρασία στην επιφάνεια (K)

και

T_{amb} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος (συνήθως $\approx 25^\circ C$ ή 298K)

Από το ανωτέρω δίκτυο (Σχήμα 3.3) διακρίνουμε τις σύνθετες θερμικές αντιστάσεις. Πρώτα, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{\text{amb}} = T_{\text{inf},o}$) έως και την θερμοκρασία στο κάτω μέρος του γυαλιού (T_{gl}), η οποία θεωρούμε ότι ισούται με την θερμοκρασία στο πάνω μέρος του ηλιακού στοιχείου (T_{cu}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, μέσω συναγωγής, αλλά και μέσω ακτινοβολίας. Επομένως ισχύει:

Από $T_{\text{amb}} = T_{\text{inf},o}$ έως $T_{gl} = T_{cu}$:

$$R_{\text{tot1}} = \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} \quad (3.2)$$

Όπου:

k_g : ο συντελεστής αγωγιμότητας του γυαλιού (W/mK)

h_{co1} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο μπροστινό μέρος του Φ/B (W/m^2K)

h_{ro1} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο μπροστινό μέρος του Φ/B (W/m^2K)

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία στο πάνω μέρος του ηλιακού στοιχείου (T_{cu}) έως την θερμοκρασία στο κάτω μέρος του Tedlar (T_{bsl}), η οποία θεωρούμε ότι ισούται με την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pu}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή. Επομένως ισχύει:

Από T_{cu} έως $T_{bsl}=T_{pu}$:

$$R_{tot2} = \frac{L_c}{k_c} + \frac{L_{bs}}{k_{bs}} = \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} \quad (3.3)$$

Όπου:

k_c : ο συντελεστής αγωγιμότητας του ηλιακού στοιχείου (W/mK)

k_{bs} : ο συντελεστής αγωγιμότητας του Tedlar (W/mK)

Τέλος, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pu}) έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας με αγωγή, με συναγωγή, αλλά και με ακτινοβολία. Επομένως ισχύει:

Από $T_{pu}=T_{bsl}$ έως T_{amb} :

$$R_{tot3} = \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} = \frac{k_i \cdot L_p + k_p \cdot L_i}{k_p \cdot k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} \quad (3.4)$$

Όπου:

k_p : ο συντελεστής αγωγιμότητας της απορροφητικής πλάκας (W/mK)

k_i : ο συντελεστής αγωγιμότητας της μόνωσης (W/mK)

h_{co2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο πίσω μέρος του Φ/B (W/m²K)

h_{ro2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο πίσω μέρος του Φ/B (W/m²K)

Έχοντας υπολογίσει σταδιακά όλες τις παραπάνω σύνθετες θερμικές αντιστάσεις, αθροίζοντας τις παίρνουμε την θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού. Επομένως, από τις εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.4), η ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} R_{tot\Phi/B} &= R_{tot1} + R_{tot2} + R_{tot3} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} + \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} + \frac{k_i \cdot L_p + k_p \cdot L_i}{k_p \cdot k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_c \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} \quad (3.5)$$

Επίσης ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου (Solar Cell) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_c = n_o \cdot [1 - \beta_o \cdot (T_{cu} - T_o)] \quad (3.6)$$

Όπου:

n_o : ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη - σταθερά

β_o : το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη - σταθερά

T_o : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o = T_{amb} \approx 25^\circ\text{C}$ ή 298K) - σταθερά

και

T_{cu} : η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου (K)

Ο ενεργειακός ισολογισμός ή αλλιώς το ενεργειακό ισοζύγιο στο ηλιακό στοιχείο (Solar Cell) δίνει:

$$\frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} = \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \quad (3.8)$$

Από την εξίσωση (3.8), αντικαθιστώντας το n_c από την εξίσωση (3.6) έχουμε:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot [1 - \beta_o \cdot (T_{cu} - T_o)] \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} = \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot (T_{cu} - T_o) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} = \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \frac{T_{cu}}{R_{tot1}} - \frac{T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_{cu} + n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_o + \frac{T_{cu}}{R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} = \\ & \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ & \Rightarrow \left[n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot \frac{1}{R_{tot1}} - \frac{1}{R_{tot2}} \right] \cdot T_{cu} + \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} = n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_o - \\ & \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - \frac{T_{amb}}{R_{tot1}} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω αλγεβρικές πράξεις μας οδήγησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$URL_1 \cdot T_{cu} + URL_2 \cdot T_{pu} = AL_1 \quad (3.9)$$

Όπου:

$$AL_1 = n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_o + n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - a_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - \frac{T_{amb}}{R_{tot1}} \quad (3.10)$$

$$URL_1 = n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - \frac{1}{R_{tot1}} - \frac{1}{R_{tot2}} \quad (3.11)$$

$$URL_2 = \frac{1}{R_{tot2}} \quad (3.12)$$

Ο ενεργειακός ισολογισμός ή αλλιώς το ενεργειακό ισοζύγιο στην απορροφητική πλάκα (Absorber Plate) δίνει:

$$\begin{aligned} \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) &= \frac{T_{pu} - T_{amb}}{R_{tot3}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{cu}}{R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) &= \frac{T_{pu}}{R_{tot3}} - \frac{T_{amb}}{R_{tot3}} \Rightarrow \\ \Rightarrow -\frac{T_{cu}}{R_{tot2}} + \left(\frac{1}{R_{tot2}} + \frac{1}{R_{tot3}} \right) \cdot T_{pu} &= a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) + \frac{T_{amb}}{R_{tot3}} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω αλγεβρικές πράξεις μας οδήγησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$-URL_2 \cdot T_{cu} + URL_3 \cdot T_{pu} = AL_2 \quad (3.13)$$

Όπου:

$$AL_2 = a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) + \frac{T_{amb}}{R_{tot3}} \quad (3.14)$$

$$URL_2 = \frac{1}{R_{tot2}} \quad (3.15)$$

$$URL_3 = \frac{1}{R_{tot2}} + \frac{1}{R_{tot3}} \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις (3.9) και (3.13) αποτελούν γραμμικό σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους, το οποίο επιλύεται και έχει ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \text{URL}_1 \cdot T_{\text{cu}} + \text{URL}_2 \cdot T_{\text{pu}} &= \text{AL}_1 \\ -\text{URL}_2 \cdot T_{\text{cu}} + \text{URL}_3 \cdot T_{\text{pu}} &= \text{AL}_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$T_{\text{pu}} = \frac{\frac{\text{AL}_1 \cdot \text{URL}_2 + \text{AL}_2}{\text{URL}_1}}{\text{URL}_3 + \frac{\text{URL}_2^2}{\text{URL}_1}} \quad (3.17)$$

και

$$T_{\text{cu}} = \frac{\text{AL}_1}{\text{URL}_1} - \frac{\text{URL}_2}{\text{URL}_1} \cdot \frac{\frac{\text{AL}_1 \cdot \text{URL}_2 + \text{AL}_2}{\text{URL}_1}}{\text{URL}_3 + \frac{\text{URL}_2^2}{\text{URL}_1}} \quad (3.18)$$

Από την εξίσωση (3.6), αντικαθιστώντας το T_{cu} από την εξίσωση (3.18) ο βαθμός απόδοσης του στοιχείου μετατροπής ενέργειας γίνεται:

$$n_c = n_o \cdot \left[1 - \beta_o \cdot \left(\frac{\text{AL}_1}{\text{URL}_1} - \frac{\text{URL}_2}{\text{URL}_1} \cdot \frac{\frac{\text{AL}_1 \cdot \text{URL}_2 + \text{AL}_2}{\text{URL}_1}}{\text{URL}_3 + \frac{\text{URL}_2^2}{\text{URL}_1}} - T_o \right) \right] \quad (3.19)$$

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_{\text{el}} = \tau_g \cdot \beta \cdot n_o \cdot [1 - \beta_o \cdot (T_{\text{cu}} - T_o)] \quad (3.20)$$

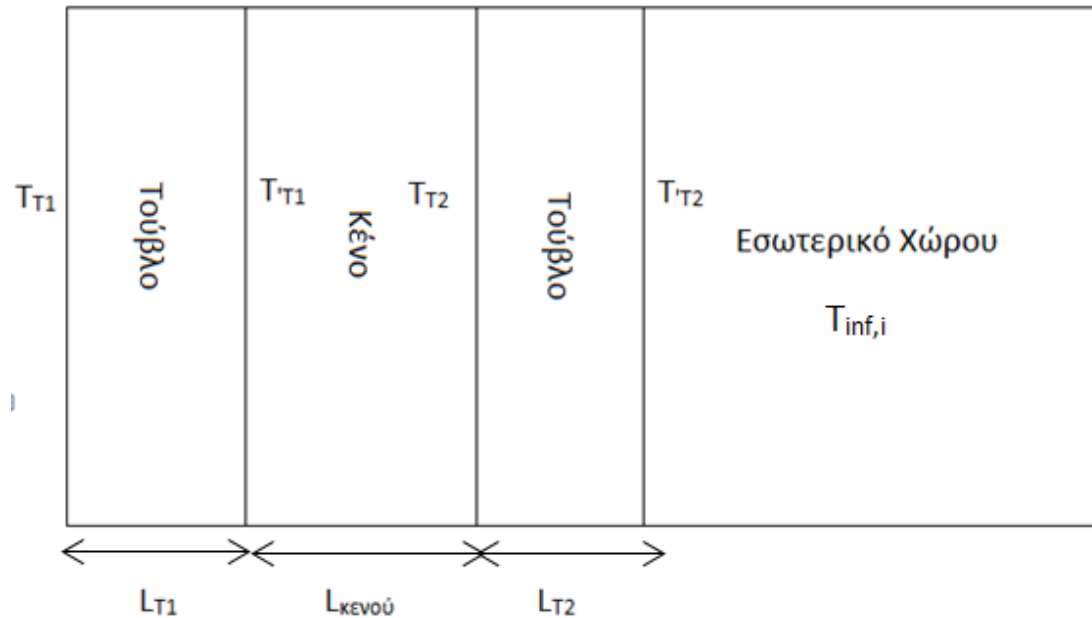
Από την εξίσωση (3.20), αντικαθιστώντας το T_{cu} από την εξίσωση (3.18) ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού γίνεται:

$$n_{\text{el}} = \tau_g \cdot \beta \cdot n_o \cdot \left[1 - \beta_o \cdot \left(\frac{\text{AL}_1}{\text{URL}_1} - \frac{\text{URL}_2}{\text{URL}_1} \cdot \frac{\frac{\text{AL}_1 \cdot \text{URL}_2 + \text{AL}_2}{\text{URL}_1}}{\text{URL}_3 + \frac{\text{URL}_2^2}{\text{URL}_1}} - T_o \right) \right] \quad (3.21)$$

Έχοντας την ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού μας, καθώς και την ηλεκτρική του απόδοση, συνεχίζουμε εξετάζοντας τις τρεις περιπτώσεις που αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου και υπολογίζοντας την ολική θερμική αντίσταση (R_{tot}) κάθε περίπτωσης, την πυκνότητα θερμορροής (q) και την απαγόμενη ή την προσδιδόμενη θερμότητα (Q).

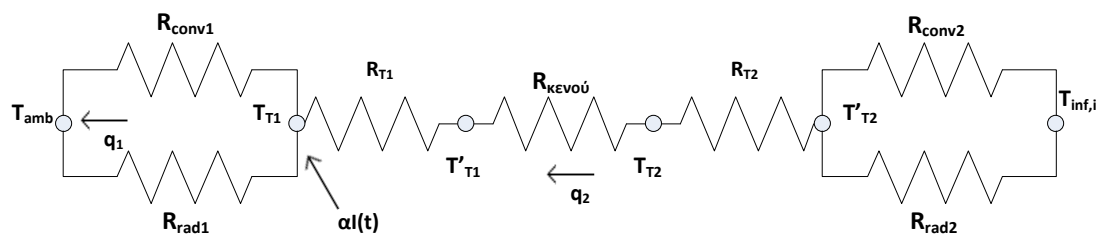
3.3 Περίπτωση 1^η

Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι η πιο απλή εκδοχή του κτιρίου και αφορά, όπως έχουμε προαναφέρει, κτίριο με τοίχο με δύο στρώσεις από τούβλο, κενό ανάμεσα στις στρώσεις αυτές και χωρίς εξωτερική μόνωση. Παρακάτω δίνεται και το σχέδιο του τοίχου (Σχήμα 3.4). Τα πάχη των δύο στρώσεων από τούβλο είναι L_{T1} και L_{T2} αντίστοιχα και η μεταξύ τους απόσταση (κενό) είναι $L_{\text{κενού}}$.



Σχήμα 3.4: Τοίχος χωρίς Εξωτερική Μόνωση & χωρίς το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Για αρχή και πριν πάμε να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του τοίχου και την θερμική απώλεια από τον χώρο, σχεδιάσαμε μέσω του VISIO το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων (Σχήμα 3.5) που ακολουθεί:



Σχήμα 3.5: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Τοίχου χωρίς Εξωτερική Μόνωση & χωρίς το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Πάνω στο δίκτυο (Σχήμα 3.5) έχουμε σχεδιάσει και τη ροή ενέργειας. Σε περίπτωση που κάποια πυκνότητα θερμορροής μετά τους υπολογισμούς προκύψει αρνητική, παίρνουμε την απόλυτη τιμή της και απλά η φορά της είναι αντίθετη από αυτή που έχουμε στο σχήμα. Επιπλέον, διακρίνεται το ποσό της απορροφούμενης θερμορροής από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου.

Πρώτα υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb}=T_{inf,o}$) έως την θερμοκρασία που έχει η εξωτερική επιφάνεια της πρώτης στρώσης τούβλου (T_{T1}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες η μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Επομένως έχουμε:

Από T_{amb} έως T_{T1} :

$$\frac{1}{R'_{tot}} = \frac{1}{R_{conv1}} + \frac{1}{R_{rad1}} = \frac{R_{rad1} + R_{conv1}}{R_{rad1} \cdot R_{conv1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R'_{tot} = \frac{R_{rad1} \cdot R_{conv1}}{R_{rad1} + R_{conv1}} = \frac{\frac{1}{h_{ri}} \cdot \frac{1}{h_{ci}}}{\frac{1}{h_{ri}} + \frac{1}{h_{ci}}} = \frac{1}{(h_{ci} + h_{ri})} \quad (3.22)$$

Όπου:

h_{ci} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο μπροστινό μέρος του τοίχου (W/m^2K)

h_{ri} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο μπροστινό μέρος του τοίχου (W/m^2K)

Συνεχίζουμε με τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης από την θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της πρώτης στρώσης τούβλου (T_{T1}) έως και την θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της δεύτερης στρώσης τούβλου (T'_{T2}). Ανάμεσα στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες είχαμε μετάδοση θερμότητας μόνο με αγωγή. Επομένως έχουμε:

Από T_{T1} έως T'_{T2} :

$$R''_{tot} = R_{T1} + R_{κενο\acute{\upsilon}} + R_{T2} = \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{\kappa}}{k_{\kappa}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} =$$

$$= \frac{k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_{\kappa} + k_{\kappa} \cdot k_{T1} \cdot L_{T2}}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa}} \quad (3.23)$$

Όπου:

k_{T1} : ο συντελεστής αγωγιμότητας της πρώτης στρώσης τούβλων (W/mK)

k_{κ} : ο συντελεστής αγωγιμότητας του κενού (W/mK)

k_{T2} : ο συντελεστής αγωγιμότητας της δεύτερης στρώσης τούβλων (W/mK)

Τέλος, κάνουμε τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης από την θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της δεύτερης στρώσης τούβλου (T'_{T2}) έως και την θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου που μελετάμε ($T_{inf,i}$). Ανάμεσα στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Επομένως έχουμε:

Από T'_{T2} έως $T_{inf,i}$:

$$\frac{1}{R'''_{tot}} = \frac{1}{R_{conv2}} + \frac{1}{R_{rad2}} = \frac{R_{rad2} + R_{conv2}}{R_{rad2} \cdot R_{conv2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R'''_{tot} = \frac{R_{rad2} \cdot R_{conv2}}{R_{rad2} + R_{conv2}} = \frac{\frac{1}{h_{ro2}} \cdot \frac{1}{h_{co2}}}{\frac{1}{h_{ro2}} + \frac{1}{h_{co2}}} = \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.24)$$

Όπου:

h_{co2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο εσωτερικό του χώρου (W/m^2K)

h_{ro2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο εσωτερικό του χώρου (W/m^2K)

Άρα από τις εξισώσεις (3.22), (3.23) και (3.24) η ολική θερμική αντίσταση για την πρώτη περίπτωση είναι:

$$R_{tot1\eta\varsigma} = R'_{tot} + R''_{tot} + R'''_{tot} =$$

$$= \frac{1}{(h_{ci} + h_{ri})} + \frac{k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_{\kappa} + k_{\kappa} \cdot k_{T1} \cdot L_{T2}}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} =$$

$$= \frac{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + (k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_{\kappa} + k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{ci} + h_{ri}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot (h_{ci} + h_{ri})}{(h_{ci} + h_{ri}) \cdot k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot (h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.25)$$

Κάνοντας το ενεργειακό ισοζύγιο έχουμε:

$$\alpha \cdot I(t) = q_1 + q_2 = \frac{T_{T1} - T_{amb}}{R_{tot1}} + \frac{T_{inf,i} - T_{T1}}{R_{tot2}} \quad (3.26)$$

Όπου:

$$R_{tot1} = R'_{tot} = \frac{1}{(h_{ci} + h_{ri})} \quad (3.22)$$

$$R_{tot2} = R''_{tot} + R'''_{tot} = \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{\kappa}}{k_{\kappa}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.27)$$

Από την ΤΟΤΕΕ 20701/2010 λαμβάνουμε τις ακόλουθες ενδεικτικές τιμές:

$$h_{ci} + h_{ri} = 25 \frac{W}{m^2K} \quad (3.28)$$

$$h_{co2} + h_{ro2} = 7.7 \frac{W}{m^2K} \quad (3.29)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (3.26) ως προς T_{T1} προκύπτει το εξής:

$$T_{T1} = \frac{aI(t) + \frac{T_{inf,i}}{R_{tot2}} + \frac{T_{amb}}{R_{tot1}}}{\frac{1}{R_{tot1}} + \frac{1}{R_{tot2}}} \quad (3.30)$$

Η πυκνότητα θερμορροής (q) της πρώτης περίπτωσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{1ης} = q_2 = \frac{T_{inf,i} - T_{T1}}{R_{tot2}} \quad (3.31)$$

Έχοντας την θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της πρώτης στρώσης τούβλου (T_{T1}), μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα θερμορροής (q) από τον χώρο, αντικαθιστώντας την υπολογιζόμενη τιμή της T_{T1} από την εξίσωση (3.30) στην εξίσωση (3.31). Έτσι προκύπτει η εξίσωση που ακολουθεί:

$$q_{1ης} = q_2 = \frac{T_{inf,i} - T_{T1}}{R_{tot2}} = \frac{T_{inf,i} - \frac{a \cdot I(t) + \frac{T_{inf,i}}{R_{tot2}} + \frac{T_{amb}}{R_{tot1}}}{\frac{1}{R_{tot1}} + \frac{1}{R_{tot2}}}}{R_{tot2}} \quad (3.32)$$

Τέλος, η θερμορροή ή αλλιώς η απαγόμενη θερμότητα από τον χώρο (Q) της πρώτης περίπτωσης προκύπτει ως εξής:

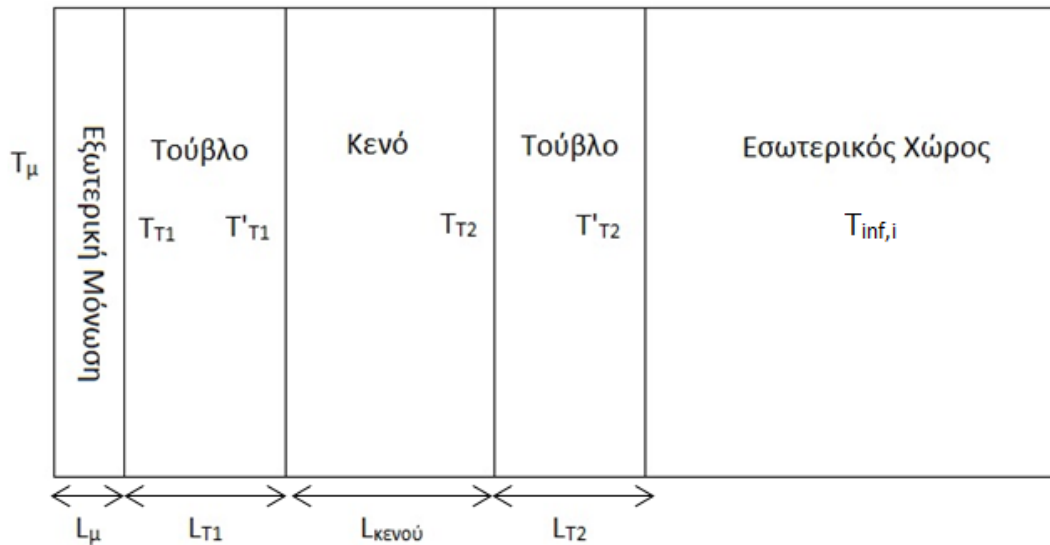
$$Q_{1ης} = q_{1ης} \cdot A = q_2 \cdot A \quad (3.33)$$

Όπου:

A: η επιφάνεια του τοίχου σε m^2

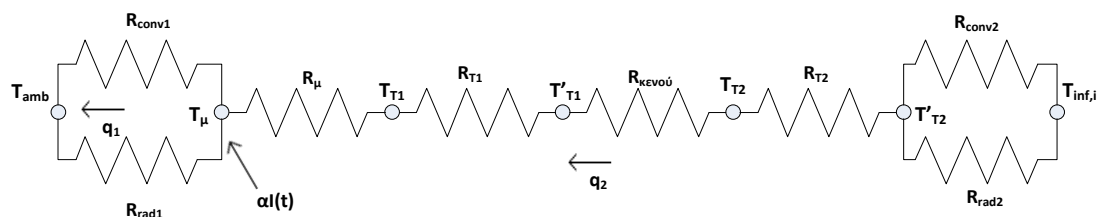
3.4 Περίπτωση 2^η

Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά την εκδοχή του κτιρίου με τοίχο με δύο στρώσεις από τούβλο, κενό ανάμεσα στις στρώσεις αυτές και εξωτερική μόνωση πάχους (L_μ) 5 cm. Παρακάτω δίνεται και το σχέδιο του τοίχου (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Τοίχος με Εξωτερική Μόνωση Πάχους 5 cm & χωρίς το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Για αρχή και πριν πάμε να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του τοίχου και την θερμική απώλεια από τον χώρο, σχεδιάσαμε μέσω του VISIO το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων (Σχήμα 3.7) που ακολουθεί:



Σχήμα 3.7: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Τοίχου με Εξωτερική Μόνωση Πάχους 5 cm & χωρίς το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Πάνω στο δίκτυο (Σχήμα 3.7) έχουμε σχεδιάσει και τη ροή ενέργειας. Σε περίπτωση που κάποια πυκνότητα θερμορροής μετά τους υπολογισμούς προκύψει αρνητική, παίρνουμε την απόλυτη τιμή της και απλά η φορά της είναι αντίθετη από αυτή που έχουμε στο σχήμα. Επιπλέον, διακρίνεται το ποσό της απορροφούμενης θερμορροής από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού τοίχου.

Εδώ υπολογίζουμε πρώτα την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb}=T_{inf,o}$) έως την θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης (T_{μ}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες η μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσω συναγωγής και ακτινοβολίας. Επομένως έχουμε:

Από T_{amb} έως T_{μ} :

$$\frac{1}{R'_{tot}} = \frac{1}{R_{conv1}} + \frac{1}{R_{rad1}} = \frac{R_{rad1} + R_{conv1}}{R_{rad1} \cdot R_{conv1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R'_{\text{tot}} = \frac{R_{\text{rad1}} \cdot R_{\text{conv1}}}{R_{\text{rad1}} + R_{\text{conv1}}} = \frac{\frac{1}{h_{\text{ri}}} \cdot \frac{1}{h_{\text{ci}}}}{\frac{1}{h_{\text{ri}}} + \frac{1}{h_{\text{ci}}}} = \frac{1}{(h_{\text{ci}} + h_{\text{ri}})} \quad (3.34)$$

Συνεχίζουμε με τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης από την θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης (T_{μ}) έως και την θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της δεύτερης στρώσης τούβλου (T'_{T2}). Ανάμεσα στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες είχαμε μετάδοση θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Επομένως έχουμε:

Από T_{μ} έως T'_{T2} :

$$\begin{aligned} R''_{\text{tot}} &= R_{\mu} + R_{T1} + R_{\text{κενοού}} + R_{T2} = \frac{L_{\mu}}{k_{\mu}} + \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{\kappa}}{k_{\kappa}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} = \\ &= \frac{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot L_{\mu} + k_{\mu} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\mu} \cdot L_{\kappa} + k_{\kappa} \cdot k_{T1} \cdot k_{\mu} \cdot L_{T2}}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{\mu}} \quad (3.35) \end{aligned}$$

Όπου:

k_{μ} : ο συντελεστής αγωγιμότητας της εξωτερικής μόνωσης (W/mK)

Τέλος κάνουμε τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης από την θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια της δεύτερης στρώσης τούβλου (T'_{T2}) έως και την θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου που μελετάμε ($T_{\text{inf},i}$). Ανάμεσα στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες έχουμε μετάδοση θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία. Επομένως έχουμε:

Από T'_{T2} έως $T_{\text{inf},i}$:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R'''_{\text{tot}}} &= \frac{1}{R_{\text{conv2}}} + \frac{1}{R_{\text{rad2}}} = \frac{R_{\text{rad2}} + R_{\text{conv2}}}{R_{\text{rad2}} \cdot R_{\text{conv2}}} \Rightarrow \\ \Rightarrow R'''_{\text{tot}} &= \frac{R_{\text{rad2}} \cdot R_{\text{conv2}}}{R_{\text{rad2}} + R_{\text{conv2}}} = \frac{\frac{1}{h_{\text{ro2}}} \cdot \frac{1}{h_{\text{co2}}}}{\frac{1}{h_{\text{ro2}}} + \frac{1}{h_{\text{co2}}}} = \frac{1}{(h_{\text{co2}} + h_{\text{ro2}})} \quad (3.36) \end{aligned}$$

Άρα από τις εξισώσεις (3.34), (3.35) και (3.36) η ολική θερμική αντίσταση για την δεύτερη περίπτωση είναι:

$$\begin{aligned} R_{\text{tot2ης}} &= R'_{\text{tot}} + R''_{\text{tot}} + R'''_{\text{tot}} = \\ &= \frac{1}{(h_{\text{ci}} + h_{\text{ri}})} + \frac{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot L_{\mu} + k_{\mu} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\mu} \cdot L_{\kappa} + k_{\kappa} \cdot k_{T1} \cdot k_{\mu} \cdot L_{T2}}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{\mu}} + \frac{1}{(h_{\text{co2}} + h_{\text{ro2}})} = \end{aligned}$$

$$\frac{k_{\mu} \cdot k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_{\kappa} \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + (k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{\mu} + k_{\mu} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{\mu} \cdot k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_{\kappa} + k_{\mu} \cdot k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{ci} + h_{ri}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{\mu} \cdot k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot (h_{ci} + h_{ri})}{(h_{ci} + h_{ri}) \cdot k_{\mu} \cdot k_{T1} \cdot k_{\kappa} \cdot k_{T2} \cdot (h_{co2} + h_{ro2})}$$

(3.37)

Κάνοντας το ενεργειακό ισοζύγιο έχουμε:

$$\alpha \cdot I(t) = q_1 + q_2 = \frac{T_{\mu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + \frac{T_{inf,i} - T_{\mu}}{R_{tot2}} \quad (3.38)$$

Όπου:

$$R_{tot1} = R'_{tot} = \frac{1}{(h_{ci} + h_{ri})} \quad (3.22)$$

$$R_{tot2} = R''_{tot} + R'''_{tot} = \frac{L_{\mu}}{k_{\mu}} + \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{\kappa}}{k_{\kappa}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.39)$$

Από την ΤΟΤΕΕ 20701/2010 λαμβάνουμε τις ακόλουθες ενδεικτικές τιμές:

$$h_{ci} + h_{ri} = 25 \frac{W}{m^2K} \quad (3.28)$$

$$h_{co2} + h_{ro2} = 7.7 \frac{W}{m^2K} \quad (3.29)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (3.38) ως προς T_{μ} προκύπτει το εξής:

$$T_{\mu} = \frac{\alpha I(t) + \frac{T_{inf,i}}{R_{tot2}} + \frac{T_{amb}}{R_{tot1}}}{\frac{1}{R_{tot1}} + \frac{1}{R_{tot2}}} \quad (3.40)$$

Η πυκνότητα θερμορροής (q) της δεύτερης περίπτωσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{2ης} = q_2 = \frac{T_{inf,i} - T_{\mu}}{R_{tot2}} \quad (3.41)$$

Έχοντας την θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης (T_{μ}), μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα θερμορροής (q) από τον χώρο, αντικαθιστώντας την υπολογιζόμενη τιμή της T_{μ} από την εξίσωση (3.40) στην εξίσωση (3.41). Έτσι προκύπτει η εξίσωση που ακολουθεί:

$$q_{2ης} = q_2 = \frac{T_{inf,i} - T_{\mu}}{R_{tot2}} = \frac{T_{inf,i} - \frac{aI(t) + \frac{T_{inf,i} + T_{amb}}{R_{tot2} + R_{tot1}}}{\frac{1}{R_{tot1}} + \frac{1}{R_{tot2}}}}{R_{tot2}} \quad (3.42)$$

Τέλος, η θερμορροή ή αλλιώς η απαγόμενη θερμότητα από τον χώρο (Q) της δεύτερης περίπτωσης προκύπτει ως εξής:

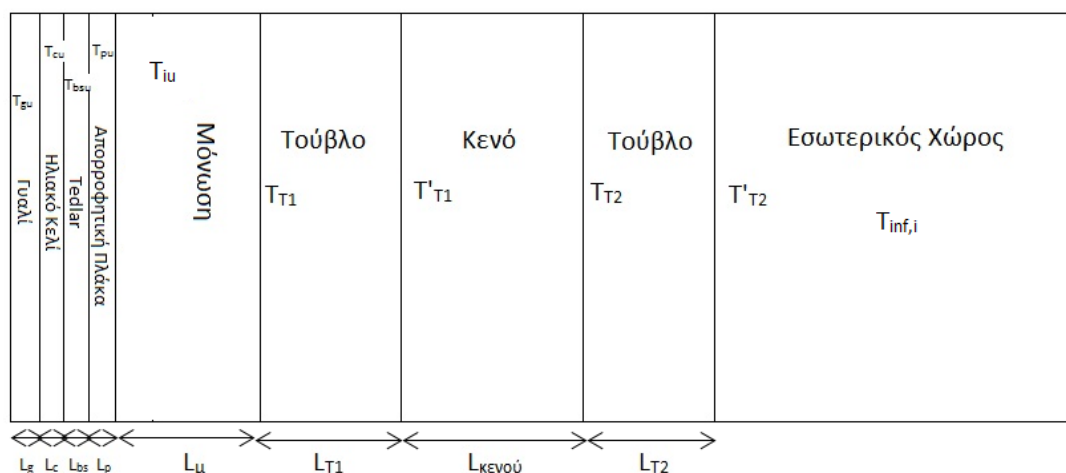
$$Q_{2ης} = q_{2ης} \cdot A = q_2 \cdot A \quad (3.43)$$

Όπου:

A: η επιφάνεια του τοίχου σε m²

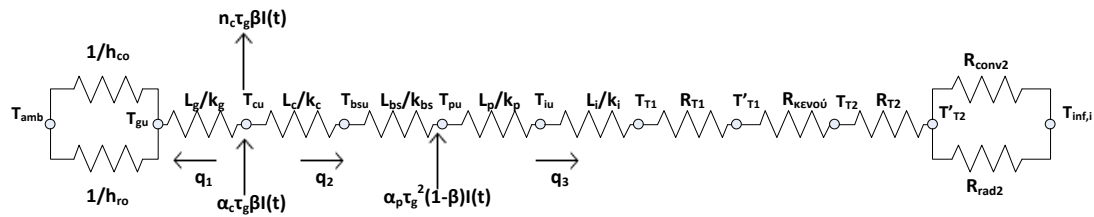
3.5 Περίπτωση 3^η

Τελευταία έχουμε την περίπτωση, στην οποία το φωτοβολταϊκό έχει τοποθετηθεί πάνω στον τοίχο της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή στον τοίχο χωρίς την εξωτερική μόνωση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση, αρκεί να προσθέσουμε την ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού και την ολική θερμική αντίσταση της πρώτης περίπτωσης. Ωστόσο, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ορισμένες αλλαγές. Αυτές αφορούν τη μεταφορά θερμότητας από το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού, από το οποίο η μεταφορά θερμότητας θα γίνεται πλέον με αγωγή, καθώς όπως αναφέραμε το φωτοβολταϊκό είναι ενσωματωμένο πλέον στον τοίχο, αλλά και τη μεταφορά θερμότητας στο μπροστινό μέρος του τοίχου, η οποία για ευνόητους λόγους θα γίνεται με αγωγή. Παρακάτω δίνεται και το σχέδιο του τοίχου (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Τοίχος χωρίς Εξωτερική Μόνωση & με το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Για αρχή και πριν πάμε να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του τοίχου της συγκεκριμένης περίπτωσης, σχεδιάσαμε μέσω του VISIO το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων (Σχήμα 3.9) που ακολουθεί:



Σχήμα 3.9: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Τοίχου χωρίς Εξωτερική Μόνωση με το Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Στο ανωτέρω δίκτυο (Σχήμα 3.9) α_c είναι η απορροφητικότητα του ηλιακού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, του ηλιακού στοιχείου και του Tedlar, n_c είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου και α_p είναι η απορροφητικότητα της απορροφητικής πλάκας. Επίσης β είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας, ([1]).

Αρχικά, πηγαίνουμε να εφαρμόσουμε τις αλλαγές που αναφέραμε στο φωτοβολταϊκό. Ουσιαστικά η μόνη θερμική αντίσταση που θα χρειαστεί να πειράξουμε είναι η R_{tot3} , η οποία ορίζεται πλέον ως εξής:

$$R'_{tot3} = \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_i}{k_i} = \frac{k_i \cdot L_p + k_p \cdot L_i}{k_p \cdot k_i} \quad (3.44)$$

Επομένως, αθροίζοντας τις θερμικές αντιστάσεις R_{tot1} και R_{tot2} με την R'_{tot3} θα πάρουμε τη νέα θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού. Η θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού θα αφορά πλέον τις θερμοκρασίες από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb}=T_{inf,o}$) έως την θερμοκρασία της πρώτης στρώσης του τοίχου (T_{T1}), η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμοκρασία στο κάτω μέρος της μόνωσης του φωτοβολταϊκού (T_{ii}). Επομένως, από τις εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.44) η ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού έχει ως εξής:

Από T_{amb} έως $T_{T1}=T_{ii}$:

$$\begin{aligned} R'_{tot\Phi/B} &= R_{tot1} + R_{tot2} + R'_{tot3} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} + \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} + \frac{k_i \cdot L_p + k_p \cdot L_i}{k_p \cdot k_i} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_c \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i} \quad (3.45) \end{aligned}$$

Συνεχίζουμε υπολογίζοντας τη νέα συνολική θερμική αντίσταση της πρώτης περίπτωσης, την οποία θα ορίσουμε ως $R'_{tot1ης}$ και αφορά τις θερμοκρασίες από την θερμοκρασία της πρώτης στρώσης του τοίχου (T_{T1}), η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμοκρασία στο κάτω μέρος της μόνωσης του φωτοβολταϊκού (T_{ii}) έως την θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου ($T_{inf,i}$). Ουσιαστικά η $R'_{tot1ης}$ ισούται με το άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων R''_{tot} και R'''_{tot} της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή της περίπτωσης που ο τοίχος δεν έχει εξωτερική μόνωση. Επομένως έχουμε:

Από $T_{T1}=T_{ii}$ έως $T_{inf,i}$:

$$R'_{tot1ης} = R''_{tot} + R'''_{tot} = R_{T1} + R_{κενο\acute{\upsilon}} + R_{T2} + R'''_{tot} = \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_K}{k_K} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} =$$

$$= \frac{(k_K \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_K + k_K \cdot k_{T1} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_K}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_K \cdot (h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.46)$$

Άρα από τις εξισώσεις (3.45) και (3.46) η ολική θερμική αντίσταση για την τρίτη περίπτωση είναι:

$$R_{tot3ης} = R'_{tot\Phi/B} + R'_{tot1ης} =$$

$$= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_C \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_C \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_C \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_C \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g \cdot k_C \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i} +$$

$$+ \frac{(k_K \cdot k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot L_K + k_K \cdot k_{T1} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_K}{k_{T1} \cdot k_{T2} \cdot k_K \cdot (h_{co2} + h_{ro2})} \quad (3.47)$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, κάνοντας την ίδια ανάλυση που κάναμε για το φωτοβολταϊκό στοιχείο προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου (Solar Cell) – στοιχείου μετατροπής ενέργειας δίνεται από την εξίσωση:

$$n_c = n_o \cdot \left[1 - \beta_o \cdot \left(\frac{AL_1}{URL_1} - \frac{URL_2}{URL_1} \cdot \frac{AL_1 \cdot URL_2 + AL_2}{URL_3 + \frac{URL_2^2}{URL_1}} - T_o \right) \right] \quad (3.19)$$

Και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δίνεται από την εξίσωση:

$$n_{el} = \tau_g \cdot \beta \cdot n_o \cdot \left[1 - \beta_o \cdot \left(\frac{AL_1}{URL_1} - \frac{URL_2}{URL_1} \cdot \frac{AL_1 \cdot URL_2 + AL_2}{URL_3 + \frac{URL_2^2}{URL_1}} - T_o \right) \right] \quad (3.21)$$

Όλοι οι όροι των ανωτέρω εξισώσεων έχουν υπολογιστεί στην παράγραφο 3.2.1 με ορισμένες εξαιρέσεις. Αυτές είναι οι εξής:

$$R_{\text{tot}3} = \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_i}{k_i} + \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_k}{k_k} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{\text{co}2} + h_{\text{ro}2})} \quad (3.48)$$

$$AL_2 = a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) + \frac{T_{\text{inf}i}}{R'_{\text{tot}3}} \quad (3.49)$$

Συνεπώς, έχοντας τις εξισώσεις (3.48) και (3.49) μπορούμε να υπολογίσουμε τους βαθμούς απόδοσης του φωτοβολταϊκού για την περίπτωση που είναι ενσωματωμένο στον τοίχο.

Επίσης έχουμε:

$$h_{\text{co}2} + h_{\text{ro}2} = 7.7 \frac{W}{m^2K} \quad (3.29)$$

$$T_{\text{pu}} = \frac{\frac{AL_1 \cdot URL_2 + AL_2}{URL_1}}{URL_3 + \frac{URL_2}{URL_1}} \quad (3.50)$$

Η πυκνότητα θερμορροής (q) της τρίτης περίπτωσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{3\eta\varsigma} = q_3 = \frac{T_{\text{pu}} - T_{\text{inf},o}}{R_{\text{tot}3}} \quad (3.51)$$

Έχοντας την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pu}), η οποία είναι επίσης ένας από τους όρους που διαφέρουν, καθώς αποτελεί συνάρτηση του AL_2 , το οποίο υπολογίζουμε από την εξίσωση (3.49), μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα θερμορροής (q) προς τον χώρο, αντικαθιστώντας την υπολογιζόμενη τιμή της T_{pu} από την εξίσωση (3.50) στην εξίσωση (3.51). Έτσι προκύπτει η εξίσωση που ακολουθεί:

$$q_{3\eta\varsigma} = q_3 = \frac{T_{\text{inf},o} - T_{\text{pu}}}{R_{\text{tot}3}} = \frac{-\frac{\frac{AL_1 \cdot URL_2 + AL_2}{URL_1}}{\frac{URL_2}{URL_3 + URL_1}} + T_{\text{inf},o}}{R_{\text{tot}3}} \quad (3.52)$$

Αν η υπολογιζόμενη πυκνότητα θερμορροής (q) από την εξίσωση (3.52) είναι θετική, τότε έχουμε θερμικό κέρδος στον χώρο. Αντίθετα, αν είναι αρνητική έχουμε θερμική απώλεια στον χώρο.

Τέλος, η θερμορροή (Q) ή το προσαγόμενο ποσό θερμότητας στο χώρο της τρίτης περίπτωσης προκύπτει ως εξής:

$$Q_{3\eta\varsigma} = q_{3\eta\varsigma} \cdot A = q_3 \cdot A \quad (3.53)$$

Κεφάλαιο 4^ο

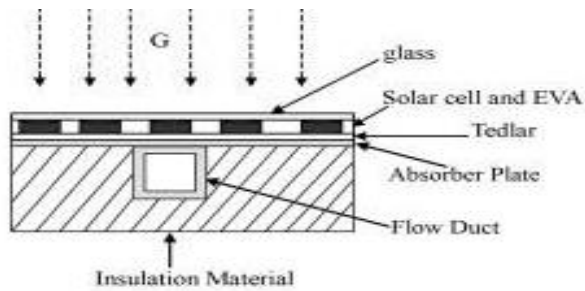
Μελέτη της Περίπτωσης του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος με Αγωγό Ροής (με Flow Duct)

4.1 Εισαγωγή

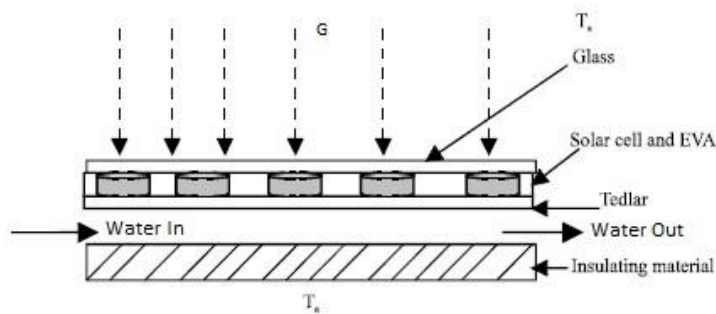
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ενσωματωμένη μονάδα απολαβής θερμότητας, όπου ένα κυκλοφορούν ρευστό θερμαίνεται, ψύχοντας ταυτόχρονα το φωτοβολταϊκό. Για την μελέτη του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με το κτίριο στο οποίο θα ενσωματωθεί, και σε αυτό το κεφάλαιο μελετάμε τρεις διαφορετικές εκδοχές του κτιρίου και των δομικών του στοιχείων, τις οποίες θα χαρακτηρίσουμε ως περιπτώσεις. Σκοπός μας είναι να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση (R_{tot}) σε κάθε περίπτωση, την πυκνότητα θερμορροής (q) και την απαγόμενη ή την προσδιδόμενη θερμότητα (Q) χρησιμοποιώντας ως ρευστό απολαβής θερμότητας το νερό. Επιπλέον, θα δούμε την θερμική και την ηλεκτρική απόδοση του υβριδικού φωτοβολταϊκού όταν είναι μόνο του και όταν έχει ενσωματωθεί στο κτίριο. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με κτίριο, στο οποίο ο τοίχος δεν έχει εξωτερική μόνωση και αποτελείται από δύο στρώσεις τούβλου και κενό ανάμεσα τους. Η δεύτερη περίπτωση αφορά κτίριο με τοίχο της ίδιας δομής, όμως με εξωτερική μόνωση συγκεκριμένου πάχους. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση έχουμε το κτίριο της πρώτης και σε αυτό έχει ενσωματωθεί το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο έχουμε αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 2^ο). Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις θα δημιουργήσουμε ένα δίκτυο θερμικών αντιστάσεων μέσω του VISIO, ώστε να διευκολυνθούμε στην μελέτη τους.

4.2 Υπολογισμοί στο Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Αρχικά και πριν προχωρήσουμε σε κάθε περίπτωση που αναφέραμε ξεχωριστά, πρέπει να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος που επιλέξαμε να μελετήσουμε.



Σχήμα 4.1: Τομή Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος



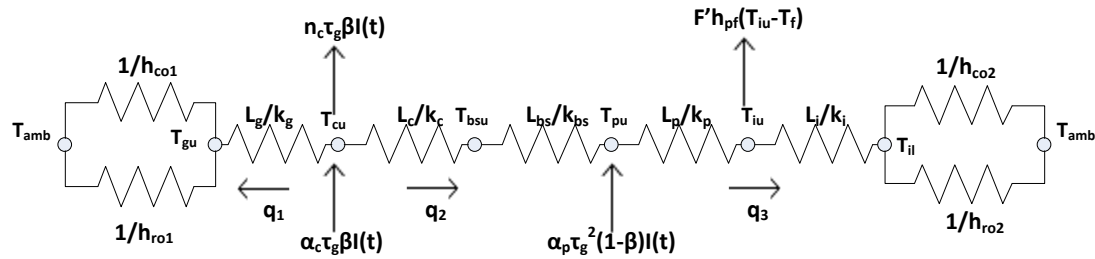
Σχήμα 4.2: Τομή Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος

<https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=ijar.2007.211.226>

4.2.1 Υπολογισμός Θερμικής Αντίστασης & Αποδόσεων στο Υβριδικό Φωτοβολταϊκό

Σε δεύτερη φάση, μελετάμε την περίπτωση του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (με Flow Duct). Με άλλα λόγια, από την σύσταση του παραπάνω υβριδικού φωτοβολταϊκού, δεν θα παραλείψουμε τον αγωγό ροής (Flow Duct) που ακολουθεί μετά την απορροφητική πλάκα. Συνεπώς, το φωτοβολταϊκό μας πλέον θα αποτελείται από γυαλί πάχους L_g (m), ηλιακό κελί πάχους L_c (m), Tedlar πάχους L_{bs} (m), απορροφητική πλάκα πάχους L_p (m), αγωγό ροής εσωτερικής διαμέτρου D_i (m) και μήκους L_{fd} (m) και μονωτικό υλικό πάχους L_i (m). Οι τιμές των παχών, των αγωγιμοτήτων και των λοιπών παραμέτρων θα δοθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Συνεπώς, συμπεριλαμβάνοντας τον αγωγό ροής (Flow Duct), το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων του υβριδικού φωτοβολταϊκού (Σχήμα 4.3) και των ροών ενέργειας, το οποίο έχει δημιουργηθεί μέσω του VISIO, έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4.3: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Υβριδικού Φωτοβολταϊκού με Αγωγό Ροής (με Flow Duct)

Στο ανωτέρω δίκτυο α_c είναι η απορροφητικότητα του ηλιακού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, του ηλιακού στοιχείου και του Tedlar, n_c είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου, α_p είναι η απορροφητικότητα της απορροφητικής πλάκας και β είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας, ([1]). Επίσης, ο παράγοντας F' που υπολογίζεται στο τέλος της παραγράφου είναι συνάρτηση του πλάτους του φωτοβολταϊκού, της εσωτερικής διαμέτρου των αγωγών ροής, του πλήθους των αγωγών ροής και των χαρακτηριστικών της σύνδεσης των αγωγών ροής στην απορροφητική πλάκα. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί πως αν κάποια από τις πυκνότητες θερμοροής προκύψει αρνητική από τους υπολογισμούς, τότε απλά η φορά της θα είναι αντίθετη από αυτήν που έχει σημειωθεί στο σχήμα.

Με βάση λοιπόν το παραπάνω δίκτυο (Σχήμα 4.3), συνεχίζουμε με τους υπολογισμούς για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό.

Αρχικά, οι όροι h_{ro1} και h_{ro2} υπολογίζονται ως εξής:

$$h_{ro1} = h_{ro2} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [T_{\text{επιφάνειας}}^2 + (0,05 \cdot T_{\text{αmb}})^2] \cdot (T_{\text{επιφάνειας}} + 0,05 \cdot T_{\text{αmb}}) \quad (4.1)$$

Όπου:

h_{ro1}, h_{ro2} : οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία (W/m^2K)

ε : η εκπεμπικότητα, με εύρος από 0 έως 1 ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

σ : η σταθερά Stefan – Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$)

$T_{\text{επιφάνειας}}$: η απόλυτη θερμοκρασία στην επιφάνεια (K)

και

$T_{\text{αmb}}$: η θερμοκρασία περιβάλλοντος (συνήθως $\approx 25^\circ C$ ή 298K)

Από το ανωτέρω δίκτυο (Σχήμα 4.3) διακρίνουμε τις σύνθετες θερμικές αντιστάσεις. Πρώτα, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb}=T_{inf,o}$) έως και την θερμοκρασία στο κάτω μέρος του γυαλιού (T_{gl}), η οποία θεωρούμε ότι ισούται με την θερμοκρασία στο πάνω μέρος του ηλιακού στοιχείου (T_{cu}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, μέσω συναγωγής, αλλά και μέσω ακτινοβολίας. Επομένως ισχύει:

Από $T_{amb}=T_{inf,o}$ έως $T_{gl}=T_{cu}$:

$$R_{tot1} = \frac{1}{h_{co1}+h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} \quad (4.2)$$

Όπου:

k_g : ο συντελεστής αγωγιμότητας του γυαλιού (W/mK)

h_{co1} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο μπροστινό μέρος του Φ/B (W/m²K)

h_{ro1} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο μπροστινό μέρος του Φ/B (W/m²K)

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία στο πάνω μέρος του ηλιακού στοιχείου (T_{cu}) έως την θερμοκρασία στο κάτω μέρος του Tedlar (T_{bsl}), η οποία θεωρούμε ότι ισούται με την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pu}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή. Επομένως ισχύει:

Από T_{cu} έως $T_{bsl}=T_{pu}$:

$$R_{tot2} = \frac{L_c}{k_c} + \frac{L_{bs}}{k_{bs}} = \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} \quad (4.3)$$

Όπου:

k_c : ο συντελεστής αγωγιμότητας του ηλιακού στοιχείου (W/mK)

k_{bs} : ο συντελεστής αγωγιμότητας του Tedlar (W/mK)

Ακολουθεί η θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pu}), έως την θερμοκρασία στο κάτω μέρος της απορροφητικής πλάκας (T_{pl}), η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της μόνωσης (T_{iw}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγή. Επομένως ισχύει:

Από T_{pu} έως $T_{pi}=T_{iu}$:

$$R_{tot3} = \frac{L_p}{k_p} \quad (4.4)$$

Όπου:

k_p : ο συντελεστής αγωγιμότητας της απορροφητικής πλάκας (W/mK)

Τέλος, υπολογίζουμε την θερμική αντίσταση από την θερμοκρασία στο πάνω μέρος της μόνωσης (T_{iu}), έως την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}). Ανάμεσα σε αυτές τις θερμοκρασίες συναντάμε μεταφορά θερμότητας με αγωγή, με συναγωγή, αλλά και με ακτινοβολία. Επομένως ισχύει:

Από T_{iu} έως T_{amb} :

$$R_{tot4} = \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} \quad (4.5)$$

Όπου:

k_i : ο συντελεστής αγωγιμότητας της μόνωσης (W/mK)

h_{co2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο πίσω μέρος του Φ/Β (W/m²K)

h_{ro2} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο πίσω μέρος του Φ/Β (W/m²K)

Έχοντας υπολογίσει σταδιακά όλες τις παραπάνω σύνθετες θερμικές αντιστάσεις, αθροίζοντας τις παίρνουμε την θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού. Επομένως, από τις εξισώσεις (4.2), (4.3), (4.4) και (4.5), η ολική θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} R_{tot\Phi/B} &= R_{tot1} + R_{tot2} + R_{tot3} + R_{tot4} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} + \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_c \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i} + \frac{1}{h_{co2} + h_{ro2}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Επίσης ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου (Solar Cell) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_c = n_o \cdot [1 - \beta_o \cdot (T_{cu} - T_o)] \quad (4.7)$$

Όπου:

n_o : ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη - σταθερά

β_o : το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη - σταθερά

T_o : η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o = T_{amb} \approx 25^\circ\text{C}$ ή 298K) - σταθερά

T_{cu} : η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου (K)

Ο ενεργειακός ισολογισμός ή αλλιώς το ενεργειακό ισοζύγιο στο ηλιακό στοιχείο (Solar Cell) δίνει:

$$\frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} = \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \quad (4.8)$$

Από την εξίσωση (4.8), αντικαθιστώντας το n_c από την εξίσωση (4.7) έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot [1 - \beta_o \cdot (T_{cu} - T_o)] \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} &= \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{cu} - T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot (T_{cu} - T_o) + \frac{T_{cu} - T_{pu}}{R_{tot2}} &= \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{cu}}{R_{tot1}} - \frac{T_{amb}}{R_{tot1}} + n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_{cu} + n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \cdot T_o + \frac{T_{cu}}{R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} &= \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow \left[\frac{1}{R_{tot1}} + \frac{1}{R_{tot2}} - n_o \cdot \beta_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) \right] \cdot T_{cu} &= \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) - (n_o + n_o \cdot \beta_o \cdot T_o) \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t) + \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} + \frac{T_{amb}}{R_{tot1}} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω αλγεβρικές πράξεις μας οδήγησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$T_{cu} = \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot T_{pu}}{URL_1 + URL_2 - \beta_o \cdot n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)} \quad (4.9)$$

Όπου:

$$AL_1 = \alpha_c \cdot \tau_g \cdot \beta - (n_o + \beta_o \cdot n_o \cdot T_o) \cdot \tau_g \cdot \beta \quad (4.10)$$

$$URL_1 = \frac{1}{R_{tot1}} \quad (4.11)$$

$$URL_2 = \frac{1}{R_{tot2}} \quad (4.12)$$

Ο ενεργειακός ισολογισμός ή αλλιώς το ενεργειακό ισοζύγιο στην απορροφητική πλάκα (Absorber Plate) δίνει:

$$\frac{T_{cu}-T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) = \frac{T_{pu}-T_{iu}}{R_{tot3}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{T_{cu}}{R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) = \frac{T_{pu}}{R_{tot3}} - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} \quad (4.13)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.13) την T_{cu} από την εξίσωση (4.9) έχουμε το εξής:

$$\frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot T_{pu}}{URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) = \frac{T_{pu}}{R_{tot3}} - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot T_{pu}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} + a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) = \frac{T_{pu}}{R_{tot3}} - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{URL_2 \cdot T_{pu}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot2}} - \frac{T_{pu}}{R_{tot3}} = - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} - \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left[\frac{URL_2}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - \frac{1}{R_{tot2}} - \frac{1}{R_{tot3}} \right] \cdot T_{pu} = - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} - \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_{pu} = \frac{- \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} - \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t)}{\left(\frac{URL_2}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - \frac{1}{R_{tot2}} - \frac{1}{R_{tot3}} \right)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_{pu} = \frac{- \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} - \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t)}{\frac{URL_2 \cdot R_{tot3} - R_{tot2} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) - R_{tot3} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t))}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2} \cdot R_{tot3}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow T_{pu} = \frac{- \frac{T_{iu}}{R_{tot3}}}{\frac{URL_2 \cdot R_{tot3} - R_{tot2} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) - R_{tot3} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t))}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2} \cdot R_{tot3}}} +$$

$$+ \frac{\frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb}}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2}} - a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1-\beta) \cdot I(t)}{\frac{URL_2 \cdot R_{tot3} - R_{tot2} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) - R_{tot3} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t))}{(URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)) R_{tot2} \cdot R_{tot3}}}$$

Οι παραπάνω αλγεβρικές πράξεις μας οδήγησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$T_{pu} = \frac{T_{iu}}{URL_3} - \frac{AL_2}{URL_3} \quad (4.14)$$

Όπου:

$$URL_3 = \frac{-R_{tot3} \cdot URL_2}{R_{tot2} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_o \cdot n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t))} + \frac{R_{tot3}}{R_{tot2}} + 1 \quad (4.15)$$

$$AL_2 = \frac{-R_{tot3} \cdot [AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_a]}{R_{tot2} \cdot (URL_1 + URL_2 - \beta_o \cdot n_o \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t))} - R_{tot3} \cdot a_p \cdot \tau_g^2 \cdot (1 - \beta) \cdot I(t) \quad (4.16)$$

Επιπλέον, ο ενεργειακός ισολογισμός ή αλλιώς το ενεργειακό ισοζύγιο στην απορροφητική πλάκα (Absorber Plate) και το ρευστό στους αγωγούς ροής, με T_f την θερμοκρασία του ρευστού, δίνει το εξής:

$$\frac{T_{pu} - T_{iu}}{R_{tot3}} = F' \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) + \frac{T_{iu} - T_{amb}}{R_{tot4}} \quad (4.17)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.17) την T_{pu} από την εξίσωση (4.14) έχουμε το εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{T_{iu}}{URL_3} - \frac{AL_2}{URL_3} - T_{iu}}{R_{tot3}} &= F' \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) + \frac{T_{iu} - T_{amb}}{R_{tot4}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\frac{T_{iu}}{URL_3} - \frac{AL_2}{URL_3}}{R_{tot3}} - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} &= F' \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) + \frac{T_{iu}}{R_{tot4}} - \frac{T_{amb}}{R_{tot4}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{T_{iu}}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - \frac{AL_2}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - \frac{T_{iu}}{R_{tot3}} &= F' \cdot h_{pf} \cdot T_{iu} - F' \cdot h_{pf} \cdot T_f + \frac{T_{iu}}{R_{tot4}} - \frac{T_{amb}}{R_{tot4}} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{iu} \cdot \left(\frac{1}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - \frac{1}{R_{tot3}} - F' \cdot h_{pf} - \frac{1}{R_{tot4}} \right) &= \frac{AL_2}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - F' \cdot h_{pf} \cdot T_f - \frac{T_{amb}}{R_{tot4}} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{iu} &= \frac{\frac{AL_2}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - F' \cdot h_{pf} \cdot T_f - \frac{T_{amb}}{R_{tot4}}}{\frac{1}{URL_3 \cdot R_{tot3}} - \frac{1}{R_{tot3}} - F' \cdot h_{pf} - \frac{1}{R_{tot4}}} \Rightarrow \\ \Rightarrow T_{iu} &= \frac{\frac{T_{amb}}{R_{tot4}} - \frac{AL_2}{URL_3 \cdot R_{tot3}}}{F' \cdot h_{pf} + \frac{1}{R_{tot3}} + \frac{1}{R_{tot4}} - \frac{1}{URL_3 \cdot R_{tot3}}} + \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot T_f}{F' \cdot h_{pf} + \frac{1}{R_{tot3}} + \frac{1}{R_{tot4}} - \frac{1}{URL_3 \cdot R_{tot3}}} \end{aligned}$$

Οι παραπάνω αλγεβρικές πράξεις μας οδήγησαν στην παρακάτω εξίσωση:

$$T_{iu} = AL_3 + \frac{F \cdot h_{pf}}{URL_4} \cdot T_f \quad (4.18)$$

Όπου:

$$URL_4 = F \cdot h_{pf} + \frac{1}{R_{tot4}} + \frac{1}{R_{tot3}} - \frac{1}{URL_3 \cdot R_{tot3}} \quad (4.19)$$

$$AL_3 = \frac{\frac{T_a}{R_{tot4}} - \frac{AL_2}{URL_3 \cdot R_{tot3}}}{URL_4} \quad (4.20)$$

Η ενεργειακή εξίσωση για τη ροή του ρευστού στους αγωγούς ροής είναι η εξής:

$$\dot{m}_f \cdot c_{pf} \cdot \frac{dT_f}{dx} = F \cdot W \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) \quad (4.21)$$

Όπου:

\dot{m}_f : ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού (kg/s)

c_{pf} : θερμοχωρητικότητα του ρευστού (J/kgK)

F' : ο παράγοντας απόδοσης του φωτοβολταϊκού

W : το πλάτος του φωτοβολταϊκού στοιχείου (m)

h_{pf} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή από την πλάκα στο ρευστό (W/m²K)

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.21) την T_{iu} από την εξίσωση (4.18) έχουμε το εξής:

$$\dot{m}_f \cdot c_{pf} \cdot \frac{dT_f}{dx} = F \cdot W \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f \cdot c_{pf} \cdot \frac{dT_f}{dx} = F \cdot W \cdot h_{pf} \cdot \left(AL_3 + \frac{F \cdot h_{pf}}{URL_4} \cdot T_f - T_f \right)$$

Λύνοντας την προκύπτουσα γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης ως προς την θερμοκρασία του ρευστού, έχουμε για την θερμοκρασία εξόδου του ρευστού (T_{fo}) από το φωτοβολταϊκό στοιχείο το εξής:

$$T_{fo} = \left(T_{fin} + \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp \left(\frac{AL_4 \cdot A_{\phi}}{\dot{m}_f \cdot c_{pf}} \right) - \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \quad (4.22)$$

Όπου:

T_{fin} : η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο φωτοβολταϊκό (K)

A_ϕ : η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού

και

$$AL_4 = \frac{F'^2 \cdot h_{pf}^2}{URL_4} - F' \cdot h_{pf} \quad (4.23)$$

Η μέση θερμοκρασία του ρευστού (\bar{T}_f) στο φωτοβολταϊκό στοιχείο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\bar{T}_f = \frac{T_{fin} + T_{fo}}{2} \quad (4.24)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.24) την T_{fo} από την εξίσωση (4.22) έχουμε το εξής:

$$\bar{T}_f = \frac{T_{fin} + \left(T_{fin} + \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp\left(\frac{AL_4 \cdot A_\phi}{\dot{m}_f c_{pf}} \right) - \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4}}{2} \quad (4.25)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.18) την T_f με την \bar{T}_f από την εξίσωση (4.25) παίρνουμε την μέση τιμή της T_{iu} , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{iu} &= AL_3 + \frac{F' \cdot h_{pf}}{URL_4} \cdot \bar{T}_f \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{T}_{iu} &= AL_3 + \frac{F' \cdot h_{pf}}{URL_4} \cdot \frac{T_{fin} + \left(T_{fin} + \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp\left(\frac{AL_4 \cdot A_\phi}{\dot{m}_f c_{pf}} \right) - \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4}}{2} \quad (4.26) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.14) την T_{iu} με την \bar{T}_{iu} από την εξίσωση (4.26) παίρνουμε την μέση τιμή της T_{pu} , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{pu} &= \frac{\bar{T}_{iu}}{URL_3} - \frac{AL_2}{URL_3} \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{T}_{pu} &= \frac{AL_3 + \frac{F' \cdot h_{pf}}{URL_4} \cdot \frac{T_{fin} + \left(T_{fin} + \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp\left(\frac{AL_4 \cdot A_\phi}{\dot{m}_f c_{pf}} \right) - \frac{F' \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4}}{URL_3} - \frac{AL_2}{URL_3} \quad (4.27) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.9) την T_{pu} με την \bar{T}_{pu} από την εξίσωση (4.27) παίρνουμε την μέση τιμή της T_{cu} , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$\bar{T}_{cu} = \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot \bar{T}_{pu}}{URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bar{T}_{cu} = \frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot \left[\frac{AL_3 + URL_4}{URL_3} \cdot \frac{T_{fin} + \left(T_{fin} + \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp\left(\frac{AL_4 \cdot A_{\phi}}{\dot{m}_f \cdot c_{pf}}\right) - \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4}}{2} - \frac{AL_2}{URL_3} \right]}{URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)} \quad (4.28)$$

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$n_{el} = \tau_g \cdot \beta \cdot \bar{n}_c \quad (4.29)$$

Όπου:

\bar{n}_c : η μέση απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η μέση απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου που μπαίνει στην εξίσωση (4.29) θα βρεθεί αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.7) την T_{cu} με την \bar{T}_{cu} από την εξίσωση (4.28) και έχει ως εξής:

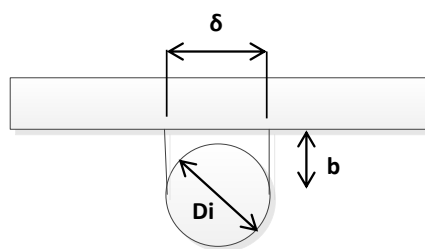
$$\bar{n}_c = n_0 \cdot [1 - \beta_0 \cdot (\bar{T}_{cu} - T_0)] =$$

$$= n_0 \cdot \left[1 - \beta_0 \cdot \left(\frac{AL_1 \cdot I(t) + URL_1 \cdot T_{amb} + URL_2 \cdot \left[\frac{AL_3 + URL_4}{URL_3} \cdot \frac{T_{fin} + \left(T_{fin} + \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4} \right) \cdot \exp\left(\frac{AL_4 \cdot A_{\phi}}{\dot{m}_f \cdot c_{pf}}\right) - \frac{F \cdot h_{pf} \cdot AL_3}{AL_4}}{2} - \frac{AL_2}{URL_3} \right]}{URL_1 + URL_2 - \beta_0 \cdot n_0 \cdot \tau_g \cdot \beta \cdot I(t)} - T_0 \right) \right] \quad (4.30)$$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_f c_{pf} (T_{fo} - T_{fin})}{A_{\phi} \cdot I(t)} \quad (4.31)$$

Ο υπολογισμός του όρου F' που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω γίνεται θεωρώντας την μετάβαση θερμότητας από την απορροφητική πλάκα (Absorber Plate) στους αγωγούς ροής (Flow Ducts) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Απορροφητική Πλάκα & Αγωγός Ροής

Η εξίσωση με βάση την οποία γίνεται ο υπολογισμός του παράγοντα F' είναι η εξής:

$$F' \cdot h_{pf} \cdot (T_{iu} - T_f) \cdot W = n \cdot \frac{T_{iu} - T_f}{\frac{b}{k_b \cdot \delta} + \frac{1}{h_{pf} \cdot \pi \cdot D_i}} \quad (4.32)$$

Όπου:

h_{pf} : ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από πλάκα στο ρευστό (W/m^2K)

δ : το πλάτος της κόλλησης (m)

b : το πάχος της κόλλησης (m)

k_b : ο συντελεστής αγωγιμότητας της κόλλησης (W/mK)

n : το πλήθος των αγωγών ροής του ρευστού του Φ/B

D_i : η εσωτερική διάμετρος του αγωγού ροής (m)

και

W : το πλάτος του Φ/B

4.3 Περίπτωση 1^η

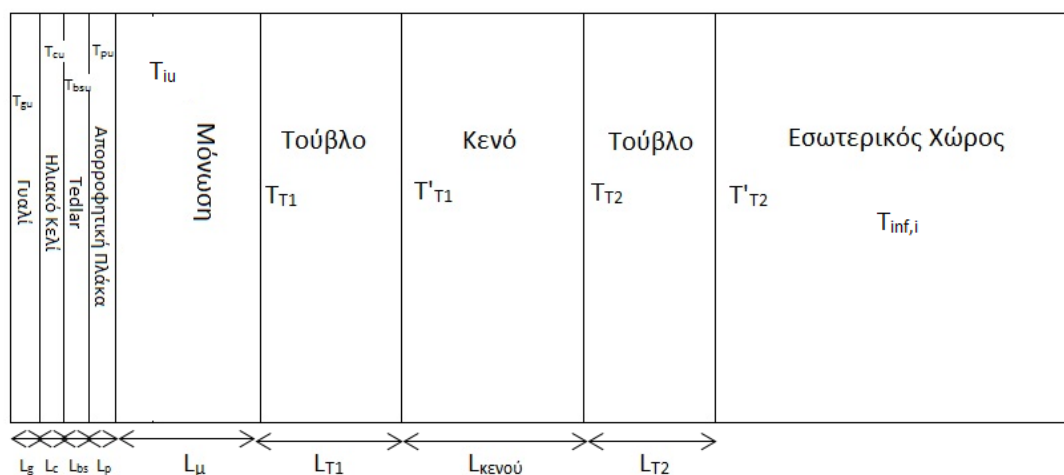
Η συγκεκριμένη περίπτωση έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3^ο)

4.4 Περίπτωση 2^η

Η περίπτωση αυτή έχει αναλυθεί επίσης σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3^ο).

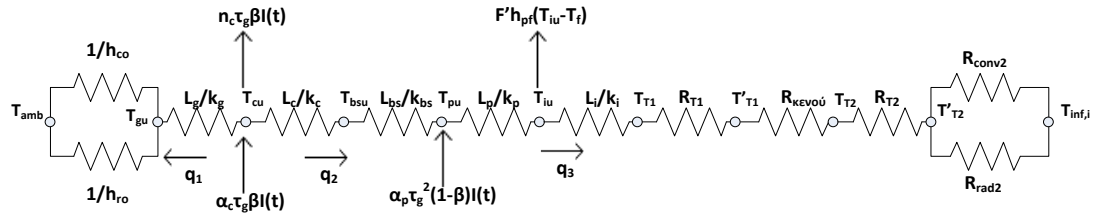
4.5 Περίπτωση 4^η

Τελευταία έχουμε την περίπτωση, στην οποία το υβριδικό φωτοβολταϊκό έχει τοποθετηθεί πάνω στον τοίχο της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή στον τοίχο χωρίς την εξωτερική μόνωση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, για να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση, αρκεί να προσθέσουμε την ολική θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού και την ολική θερμική αντίσταση της πρώτης περίπτωσης. Ωστόσο, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ορισμένες αλλαγές. Αυτές αφορούν τη μεταφορά θερμότητας από το πίσω μέρος του υβριδικού φωτοβολταϊκού, από το οποίο η μεταφορά θερμότητας θα γίνεται πλέον με αγωγή, καθώς όπως αναφέραμε το φωτοβολταϊκό είναι ενσωματωμένο πλέον στον τοίχο, αλλά και τη μεταφορά θερμότητας στο μπροστινό μέρος του τοίχου, η οποία για ευνόητους λόγους θα γίνεται με αγωγή. Παρακάτω δίνεται και το σχέδιο του τοίχου (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Τοίχος χωρίς Εξωτερική Μόνωση & με το Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Για αρχή και πριν πάμε να υπολογίσουμε την ολική θερμική αντίσταση του τοίχου της συγκεκριμένης περίπτωσης, σχεδιάσαμε μέσω του VISIO το δίκτυο των θερμικών αντιστάσεων (Σχήμα 4.6) που ακολουθεί:



Σχήμα 4.6: Δίκτυο Θερμικών Αντιστάσεων Τοίχου χωρίς Εξωτερική Μόνωση με το Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Ενσωματωμένο

Στο ανωτέρω δίκτυο (Σχήμα 4.6) α_c είναι η απορροφητικότητα του ηλιακού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, του ηλιακού στοιχείου και του Tedlar, n_c είναι ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού στοιχείου και α_p είναι η απορροφητικότητα της απορροφητικής πλάκας. Επίσης β είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας, ([1]). Επίσης, ο παράγοντας F' είναι συνάρτηση του πλάτους του φωτοβολταϊκού, της εσωτερικής διαμέτρου των αγωγών ροής, του πλήθους των αγωγών ροής και των χαρακτηριστικών της σύνδεσης των αγωγών ροής στην απορροφητική πλάκα.

Αρχικά, πηγαίνουμε να εφαρμόσουμε τις αλλαγές που αναφέραμε στο φωτοβολταϊκό. Ουσιαστικά η μόνη θερμική αντίσταση που θα χρειαστεί να πειράξουμε είναι η R_{tot4} , η οποία ορίζεται πλέον ως εξής:

$$R'_{tot4} = \frac{L_i}{k_i} \quad (4.33)$$

Επομένως, αθροίζοντας τις θερμικές αντιστάσεις R_{tot1} , R_{tot2} και R_{tot3} με την R'_{tot4} θα πάρουμε τη νέα θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού. Η θερμική αντίσταση του υβριδικού φωτοβολταϊκού θα αφορά πλέον τις θερμοκρασίες από την θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_{amb}=T_{inf,o}$) έως την θερμοκρασία της πρώτης στρώσης του τοίχου (T_{T1}), η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμοκρασία στο κάτω μέρος της μόνωσης του φωτοβολταϊκού (T_{ii}). Επομένως, από τις εξισώσεις (4.2), (4.3), (4.4) και (4.33) η ολική θερμική αντίσταση του φωτοβολταϊκού έχει ως εξής:

Από T_{amb} έως $T_{T1}=T_{ii}$:

$$\begin{aligned} R'_{tot\Phi/B} &= R_{tot1} + R_{tot2} + R_{tot3} + R'_{tot4} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{L_g}{k_g} + \frac{k_{bs} \cdot L_c + k_c \cdot L_{bs}}{k_c \cdot k_{bs}} + \frac{L_p}{k_p} + \frac{L_i}{k_i} = \\ &= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_c \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i} \quad (4.34) \end{aligned}$$

Συνεχίζουμε υπολογίζοντας τη νέα συνολική θερμική αντίσταση της πρώτης περίπτωσης, την οποία θα ορίσουμε ως $R'_{tot1ης}$ και αφορά τις θερμοκρασίες από την θερμοκρασία της πρώτης στρώσης του τοίχου (T_{T1}), η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την θερμοκρασία στο κάτω μέρος της μόνωσης του φωτοβολταϊκού (T_{ii}) έως την θερμοκρασία στο εσωτερικό του χώρου ($T_{inf,i}$). Ουσιαστικά η $R'_{tot1ης}$ ισούται με το άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων R''_{tot} και R'''_{tot} της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή της περίπτωσης που ο τοίχος δεν έχει εξωτερική μόνωση. Επομένως έχουμε:

Από $T_{T1}=T_{ii}$ έως $T_{inf,i}$:

$$R'_{tot1ης} = R''_{tot} + R'''_{tot} = R_{T1} + R_{κενο\acute{\upsilon}} + R_{T2} + R'''_{tot} = \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{κ}}{k_{κ}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} =$$

$$= \frac{(k_{κ}k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1}k_{T2} \cdot L_{κ} + k_{κ}k_{T1} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{T1}k_{T2} \cdot k_{κ}}{k_{T1}k_{T2} \cdot k_{κ} \cdot (h_{co2} + h_{ro2})} \quad (4.35)$$

Άρα από τις εξισώσεις (4.34) και (4.35) η ολική θερμική αντίσταση για την τρίτη περίπτωση είναι:

$$R_{tot3ης} = R'_{tot\Phi/B} + R'_{tot1ης} =$$

$$= \frac{1}{h_{co1} + h_{ro1}} + \frac{k_c \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_g + k_g \cdot k_{bs} \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_c + k_g \cdot k_c \cdot k_p \cdot k_i \cdot L_{bs} + k_i \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_p + k_p \cdot k_g \cdot k_c \cdot k_{bs} \cdot L_i}{k_g k_c k_{bs} k_p k_i} +$$

$$+ \frac{(k_{κ}k_{T2} \cdot L_{T1} + k_{T1}k_{T2} \cdot L_{κ} + k_{κ}k_{T1} \cdot L_{T2}) \cdot (h_{co2} + h_{ro2}) + k_{T1}k_{T2} \cdot k_{κ}}{k_{T1}k_{T2} \cdot k_{κ} \cdot (h_{co2} + h_{ro2})} \quad (4.36)$$

Ουσιαστικά, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο κάνουμε την ίδια ανάλυση με την περίπτωση που έχουμε μεμονωμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο και προκύπτουν πάλι οι εξισώσεις της παραγράφου 4.2.1 με ορισμένες τροποποιήσεις. Αυτές είναι:

$$R_{tot4} = \frac{L_i}{k_i} + \frac{L_{T1}}{k_{T1}} + \frac{L_{κ}}{k_{κ}} + \frac{L_{T2}}{k_{T2}} + \frac{1}{(h_{co2} + h_{ro2})} \quad (4.37)$$

$$AL_3 = \frac{\frac{T_{inf,i} - AL_2}{R_{tot4}} \cdot URL_3 \cdot R_{tot3}}{URL_4} \quad (4.38)$$

Η πυκνότητα θερμορροής (q) της τρίτης περίπτωσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{3ης} = q_3 = \frac{T_{inf,i} - \bar{T}_{iu}}{R_{tot4}} \quad (4.39)$$

Η εξίσωση (4.39) χρησιμοποιείται με χρήση της εξίσωσης (4.26) και των υπόλοιπων εξισώσεων της παραγράφου 4.2.1, λαμβάνοντας υπόψη τις τροποποιήσεις που εισάγονται με τις εξισώσεις (4.37) και (4.38).

Αν η υπολογιζόμενη πυκνότητα θερμορροής (q) από την εξίσωση (4.39) είναι θετική, τότε έχουμε θερμικό κέρδος στον χώρο. Αντίθετα, αν είναι αρνητική έχουμε θερμική απώλεια στον χώρο.

Τέλος, η θερμορροή (Q) ή το προσαγόμενο ποσό θερμότητας στο χώρο της τρίτης περίπτωσης προκύπτει ως εξής:

$$Q_{3ης} = q_{3ης} \cdot A = q_3 \cdot A \quad (4.40)$$

Όπου:

A: η επιφάνεια του τοίχου σε m^2

4.6 Εύρεση της Θερμοκρασίας Εξόδου του Ρευστού Μετά από N Φωτοβολταϊκά Συνδεδεμένα σε Σειρά

Θεωρώντας την εξίσωση (4.22) προκύπτει ότι η θερμοκρασία εξόδου από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δίνεται από εξίσωση της μορφής:

$$T_{fo} = T_{fin} \cdot \exp(A1) + A2 \quad (4.41)$$

Για συστοιχία N φωτοβολταϊκών στοιχείων έχοντας ότι η έξοδος του 1^{ου} αποτελεί την είσοδο του 2^{ου} κ.ο.κ. προκύπτει για την θερμοκρασία εξόδου από το N-οστό φωτοβολταϊκό το εξής:

$$T_{fo,N} = T_{fin} \cdot \exp(N \cdot A1) + A2 \cdot \sum_0^{N-1} \exp(k \cdot A1) \quad (4.42)$$

Το άθροισμα αποτελεί άθροισμα όρων γεωμετρικής προόδου με λόγο $\exp(A1)$ και έτσι έχουμε:

$$T_{fo,N} = T_{fin} \cdot \exp(N \cdot A1) + A2 \cdot \frac{\exp(N \cdot A1) - 1}{\exp(A1) - 1} \quad (4.43)$$

Όπου:

N: ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων

4.7 Σύγκριση Συστοιχίας Παράλληλων Φωτοβολταϊκών Στοιχείων & Φωτοβολταϊκών Στοιχείων σε Σειρά

Εξετάζοντας τις εξισώσεις των παραγράφων 4.2.1 και 4.6 προκύπτει ότι αν έχουμε N όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά, το 2^ο θα εμφανίζει μειωμένη τιμή της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης σε σχέση με το 1^ο, ομοίως το N -οστό θα εμφανίζει μειωμένη ηλεκτρική και θερμική απόδοση σε σχέση με το $N-1$ στοιχείο. Αυτό συμβαίνει, διότι ανεβαίνουν τα επίπεδα της θερμοκρασίας του ρευστού, οπότε ελαττώνεται η θερμική απολαβή από αυτό και αυξανόμενης της θερμοκρασίας του ηλιακού στοιχείου πέφτει και ο βαθμός απόδοσης του. Αυτό δεν συμβαίνει σε μία συστοιχία εν παραλλήλω, όπου όλα τα όμοια φωτοβολταϊκά έχουν την ίδια απόδοση.

Κεφάλαιο 5^ο

Υπολογισμός της Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό (Κεφάλαιο 5^ο), μετά την παράθεση των βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, θα περιγραφεί ο τρόπος υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδη επιφάνεια, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στους αλγόριθμους προσομοίωσης της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών συστημάτων που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια (Κεφάλαια 3^ο και 4^ο).

5.2 Βασικές Έννοιες

5.2.1 Ηλιακή Σταθερά (G_{sc})

Η τροχιά της γης περί τον ήλιο είναι τέτοια ώστε η απόσταση μεταξύ τους μεταβάλλεται κατά +/- 1.7% περί τη μέση απόσταση γης – ηλίου, η οποία είναι 1.495×10^{11} m. Η ηλιακή σταθερά (G_{sc}) είναι η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που δέχεται εκτός ατμόσφαιρας από τον ήλιο η μονάδα επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, όταν η απόσταση γης – ηλίου λαμβάνει τη μέση τιμή της. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι: $G_{sc}=1353$ W/m².

5.2.2 Μεταβολή της Ηλιακής Ακτινοβολίας εκτός Ατμόσφαιρας

Η μεταβολή της απόστασης γης – ηλίου προκαλεί μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας κατά +/- 3% περί τη μέση τιμή της. Η ακτινοβολία (G_{on}), που δέχεται επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας, κάθετο στις ακτίνες, δίνεται από την σχέση:

$$G_{on}=G_{sc} \cdot \left[1+0.033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (5.1)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση n είναι η ημέρα του έτους (1 έως 365 ημέρες) και το όρισμα του συνημιτόνου είναι σε μοίρες.

5.2.3 Γωνία Ζενίθ (θ_z)

Η γωνία ζενίθ (θ_z) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου.

5.2.4 Ηλιακό Ύψος ($90 - \theta_z$)

Το ηλιακό ύψος ($90 - \theta_z$) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.

5.2.5 Αζιμούθιο Επιφάνειας (γ)

Το αζιμούθιο επιφάνειας (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Το εύρος τιμών του είναι $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, με $\gamma=0^\circ$ στο νότο, $\gamma=90^\circ$ στη δύση, $\gamma=180^\circ$ στο βορρά και $\gamma=-90^\circ$ στην ανατολή.

5.2.6 Αζιμούθιο Ηλίου (γ_s)

Το αζιμούθιο ηλίου (γ_s) είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

5.2.7 Κλίση Επιπέδου (β_1)

Η κλίση επιπέδου (β_1) είναι η γωνία που σχηματίζει μία επίπεδη επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο. Το εύρος τιμών της είναι $0^\circ \leq \beta_1 \leq 180^\circ$. Για το οριζόντιο επίπεδο είναι $\beta_1=0^\circ$, για το κατακόρυφο επίπεδο είναι $\beta_1=90^\circ$ και για $\beta_1 > 90^\circ$ το επίπεδο βλέπει προς τα κάτω.

5.2.8 Ηλιακός Χρόνος

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο ($t_{\text{ρολ}}$) που δείχνει το ρολοί. Η παρακάτω σχέση συνδέει τους δύο χρόνους:

$$\text{Ηλιακός Χρόνος} = t_{\text{ρολ}} + /- 4 \cdot (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E \quad (5.2)$$

Όπου:

L_{st} : το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού, στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (για την Ελλάδα είναι 30°)

L_{loc} : το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή

Η σχέση ισχύει με το θετικό πρόσημο (+) για τα δυτικά μήκη και με το αρνητικό πρόσημο (-) για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζεται σε min/μοίρα. Τέλος, $E(\text{min})$ είναι η εξίσωση του χρόνου, που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους από την παρακάτω σχέση:

$$E = 9.87 \cdot \sin 2B - 7.53 \cdot \cos B - 1.5 \cdot \sin B \quad (5.3)$$

Όπου:

$$B = \frac{360 \cdot (n-81)}{364}$$

n: η ημέρα του έτους (1 έως 365 ημέρες)

5.2.9 Ωριαία Γωνία (ω)

Η ωριαία γωνία (ω) είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό $15^\circ/\text{h} = 0.25^\circ/\text{min}$. Για την ωριαία γωνία ισχύει:

$$\omega = 0.25 \cdot (\text{min από το ηλιακό μεσημέρι}) \quad (5.4)$$

Λαμβάνεται $\omega > 0$ για μ.μ. και $\omega < 0$ για π.μ.

5.2.10 Ηλιακή Απόκλιση (δ)

Η ηλιακή απόκλιση (δ) είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Το εύρος τιμών της είναι $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$, με θετικές τιμές προς το βορρά. Η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left(\frac{360 \cdot (284+n)}{365} \right) \quad (5.5)$$

Όπου:

n: η ημέρα του έτους (1 έως 365 ημέρες)

5.2.11 Άμεσος Ακτινοβολία (G_b)

Η άμεσος ακτινοβολία είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη απευθείας από τον ήλιο, χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή (σε W/m^2) της αμέσου ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G_b , ενώ όταν έχουμε κεκλιμένο επίπεδο συμβολίζεται με G_{bT} . Για χρονική περίοδο μιας ώρας ή μιας ημέρας, αντί του συμβόλου G θα χρησιμοποιείται το σύμβολο I και H αντίστοιχα.

5.2.12 Διάχυτος Ακτινοβολία (G_d)

Η διάχυτος ακτινοβολία (G_d) είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.

5.2.13 Ολική Ακτινοβολία (G)

Η ολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της αμέσου και της διάχυτου ηλιακής ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένης και της ανακλώμενης ακτινοβολίας από παρακείμενες επιφάνειες. Η στιγμιαία τιμή (σε W/m^2) της ολικής ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με G , ενώ όταν έχουμε κεκλιμένο επίπεδο συμβολίζεται με G_T .

5.2.14 Ακτινοβολία Καθέτου Επιπέδου

Η ακτινοβολία καθέτου επιπέδου ή αλλιώς η κάθετος ακτινοβολία, είναι η ακτινοβολία που δέχεται επίπεδο, κάθετο στις ηλιακές ακτίνες. Δηλώνεται θέτοντας τον δείκτη n .

5.2.15 Αέριος Μάζα (m)

Η αέριος μάζα (m) είναι ο λόγος της οπτικής διαδρομής της αμέσου ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα προς την οπτική διαδρομή αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ.

Για $0^\circ \leq \theta_z \leq 70^\circ$ ισχύει:

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (5.6)$$

Για $\theta_z > 70^\circ$ η επίδραση της καμπυλότητας της γης γίνεται σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν. Έξω από την ατμόσφαιρα η αέριος μάζα λαμβάνεται $m=0$.

5.3 Γωνία πρόσπτωσης (θ)

Η γωνία πρόσπτωσης (θ) της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια. Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta_1 - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta_1 \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta_1 \cdot \cos\omega + \\ & + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta_1 \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\beta_1 \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (5.7) \end{aligned}$$

Όπου:

φ : το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

Οι υπόλοιπες γωνίες έχουν ορισθεί στην προηγούμενη παράγραφο (Παράγραφος 5.2).

Για οριζόντιες επιφάνειες η γωνία πρόσπτωσης (θ) ταυτίζεται με την γωνία ζενίθ (θ_z) και από την εξίσωση (5.7) προκύπτει το εξής:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad (5.8)$$

5.4 Άμεσος Ακτινοβολία Οριζόντιας & Κεκλιμένης Επιφάνειας

Αν G_b , G_{bT} και G_{bn} είναι η άμεσος ακτινοβολία που δέχεται το οριζόντιο, το κεκλιμένο και το κάθετο επίπεδο στις ηλιακές ακτίνες αντίστοιχα, ισχύουν οι εξισώσεις:

$$G_b = G_{bn} \cdot \cos\theta_z \quad (5.9)$$

$$G_{bT} = G_{bn} \cdot \cos\theta \quad (5.10)$$

Από τις δύο ανωτέρω εξισώσεις προκύπτει ο λόγος της αμέσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου (R_b), ο οποίος έχει ως εξής:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (5.11)$$

Όπου στην εξίσωση (5.11) ο αριθμητής και ο παρονομαστής υπολογίζονται από τις εξισώσεις της προηγούμενης παραγράφου (Παράγραφος 5.4).

5.5 Μέση Τιμή Ισχύος Ακτινοβολίας Οριζόντιας Επιφάνειας εκτός Ατμόσφαιρας

Η ακτινοβολία οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας (G_o), συνδέεται με την κάθετο ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας (G_{on}) ως εξής:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos\theta_z \quad (5.12)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5.1) και (5.8), λαμβάνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$G_o = G_{sc} \cdot \left[1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cdot (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) \quad (5.13)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση για χρονική περίοδο μίας ώρας, που καθορίζεται από τις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 , με $\omega_1 < \omega_2$, έχουμε την ενέργεια I_{oh} (σε $J/m^2/hr$) που δέχεται οριζόντια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας κατά την διάρκεια μιας ώρας:

$$I_{oh} = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) \right] \quad (5.14)$$

Η μέση τιμή της ισχύος ακτινοβολίας της οριζόντιας επιφάνειας εκτός ατμόσφαιρας για την ώρα που χαρακτηρίζεται από τις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 ($\omega_1 < \omega_2$) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_o \text{ (W/m}^2\text{)} = \frac{I_{oh}}{3600} \quad (5.15)$$

Ο υπολογισμός του ανωτέρω μεγέθους έγινε, καθώς οι συσχετίσεις που αποδίδουν την ακτινοβολία εντός ατμόσφαιρας και που δίνονται στις επόμενες παραγράφους, δίνονται στη βιβλιογραφία για τις ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας. Οπότε είναι φανερό ότι οι ίδιες συσχετίσεις μπορούν να εφαρμοστούν για τις μέσες τιμές ισχύος κατά τη διάρκεια μίας οποιασδήποτε ώρας.

5.6 Μέση Ωριαία Ισχύς Ακτινοβολίας Αίθριας Ατμόσφαιρας (Μέγιστη Ακτινοβολία)

Σε γενικές γραμμές, παρουσιάζει ενδιαφέρον ο καθορισμός μιας τυπικής «αίθριας» ατμόσφαιρας και ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης με συνθήκες τυπικής αίθριας ατμόσφαιρας.

Ο Hottel (1976) ανέπτυξε μια μέθοδο εκτίμησης της άμεσου ακτινοβολίας τυπικής αίθριας ατμόσφαιρας που λαμβάνει υπ' όψιν την γωνία ζενίθ (θ_z), το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας και τον τύπο του κλίματος. Η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για άμεσο ακτινοβολία (τ_b) υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_b = \frac{I_{cb}}{I_0} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot e^{\frac{-k}{\cos \theta_z}} \quad (5.16)$$

Όπου:

I_{cb} : η μέση ισχύς άμεσου ωριαίας ακτινοβολίας οριζόντιας επιφάνειας αίθριας ατμόσφαιρας

α_0 , α_1 και k : οι συντελεστές που υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$\alpha_0 = r_0 \cdot \alpha_0^* \quad (5.17)$$

$$\alpha_1 = r_1 \cdot \alpha_1^* \quad (5.18)$$

$$k = r_k \cdot k^* \quad (5.19)$$

Οι διορθωτικοί συντελεστές του τύπου κλίματος r_0 , r_1 και r_k για την Ελλάδα μπορούν να πάρουν τις τιμές 0.97, 0.99 και 1.02 αντίστοιχα για την καλοκαιρινή περίοδο, ενώ για την χειμερινή περίοδο μπορούν να πάρουν τις τιμές 1.03, 1.01 και 1.00 αντίστοιχα.

Οι συντελεστές α_0^* , α_1^* και k^* υπολογίζονται για την τυπική αίθρια ατμόσφαιρα ορατότητας 23 km και για υψόμετρο A μικρότερο των 2.5 km από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\alpha_0^* = 0.4237 - 0.00821 \cdot (6-A)^2 \quad (5.20)$$

$$\alpha_1^* = 0.5055 + 0.00595 \cdot (6.5-A)^2 \quad (5.21)$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5-A)^2 \quad (5.22)$$

Για την εκτίμηση της μέσης ισχύος ολικής ακτινοβολίας αίθριας ατμόσφαιρας, εκτός από την άμεσο απαιτείται και η μέση ισχύς διάχυτου ακτινοβολίας αίθριας ατμόσφαιρας. Οι Liu και Jordan (1960), βασιζόμενοι σε δεδομένα, ανέπτυξαν την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$\tau_d = \frac{I_{cd}}{I_0} = 0.2710 - 0.293 \cdot \tau_b \quad (5.23)$$

Όπου:

τ_d : η ατμοσφαιρική διαπερατότητα για διάχυτο ακτινοβολία

I_{cd} : η μέση ωριαία ισχύς διάχυτου ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου αίθριας ατμόσφαιρας

5.7 Δείκτης Αιθριότητας

Στην βιβλιογραφία το μέγεθος του ωριαίου δείκτη αιθριότητας (K_t) ορίζεται ως εξής:

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (5.24)$$

Όπου:

I : η μέση ωριαία ισχύς ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου

5.8 Ανάλυση Μέσης Ισχύος Ολικής Ακτινοβολίας σε Άμεση & Διάχυτη

Για την ανάλυση της μέσης ισχύος ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη συνιστώσα έχουν αναπτυχθεί από διάφορους συγγραφείς διάφορες συσχετίσεις. Η ακόλουθη συσχέτιση θεωρείται ότι δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και αυτά είναι:

$$\frac{I_d}{I} = 1.00 - 0.1 \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right), \text{ όταν } 0 \leq \frac{I}{I_c} < 0.48 \quad (5.25)$$

$$\frac{I_d}{I} = 1.11 + 0.0396 \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right) - 0.789 \cdot \left(\frac{I}{I_c}\right)^2, \text{ όταν } 0.48 \leq \frac{I}{I_c} < 1.10 \quad (5.26)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.20, \text{ όταν } 1.10 \leq \frac{I}{I_c} \quad (5.27)$$

Όπου:

I_d : η μέση ωριαία ισχύς διάχυτου ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου

I : η μέση ωριαία ισχύς ολικής ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου

I_c : η μέση ωριαία ισχύς ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου αίθριας ατμόσφαιρας

Η μέση ωριαία ισχύς ακτινοβολίας οριζόντιου επιπέδου αίθριας ατμόσφαιρας υπολογίζεται ως εξής:

$$I_c = (\tau_b + \tau_d) \cdot I_{oh} \quad (5.28)$$

Από τις γνωστές τιμές των I και I_c υπολογίζεται η I_d (μέση ωριαία ισχύς διάχυτης ακτινοβολίας) ως εξής:

$$I_b = I - I_d \quad (5.29)$$

5.9 Υπολογισμός Μέσης Ισχύος Προσπίπτουσας Ακτινοβολίας Κεκλιμένων Επιφανειών

Σύμφωνα με το μοντέλο που ανέπτυξαν οι Liu και Jordan (1963), η μέση ισχύς προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας που δέχεται μία κεκλιμένη επιφάνεια δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta_1}{2} \right) + (I_b + I_d) \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta_1}{2} \quad (5.30)$$

Όπου:

ρ : η ανακλαστικότητα του εδάφους ($\rho=0.2$ για συνηθισμένα εδάφη)

Κεφάλαιο 6^ο

Προγράμματα Υπολογισμού για τις Περιπτώσεις που Εξετάζονται στο 4^ο Κεφάλαιο

6.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6^ο), αρχικά θα περιγραφούν τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και εκτελούν τους υπολογισμούς που αναφέρονται στις περιπτώσεις που περιγράφηκαν στις παραγράφους του 4^{ου} Κεφαλαίου. Δημιουργήθηκαν 4 προγράμματα σε αντίστοιχα βιβλία εργασίας του Excel, τα οποία μέσω της γλώσσας Excel Visual Basic εκτελούν τους υπολογισμούς που αναφέρονται στο 4^ο Κεφάλαιο, το οποίο έχει να κάνει με το Υβριδικό Φωτοβολταϊκό Σύστημα με Αγωγό Ροής (με Flow Duct). Κατόπιν, θα δοθούν υπό μορφή διαγραμμάτων και θα συζητηθούν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων, από τα οποία θα εξαχθούν συμπεράσματα.

6.2 Πρόγραμμα Υπολογισμού Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος με Αγωγό Ροής (με Flow Duct)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού, ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους που περιγράφουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο που βρίσκεται το φωτοβολταϊκό, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που είναι το φωτοβολταϊκό, τον προσανατολισμό του και την κλίση του ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

$T_{amb} \text{ } \textcircled{\text{C}}$	α_c	τ_g	β	n_o
5	0,9	0,95	0,89	0,15
α_p	$c_{pf} \text{ (Joule/kg/K)}$	β_o	$\beta_1 \text{ (deg)}$	ΜΗΝΑΣ
0,8	4180	0,0045	38	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	$\dot{m}_f \text{ (kg/sec)}$	$d_{tube} \text{ (m)}$	Width (m)	Length (m)
17	0,04	0,0125	1,176	1,7
Tube Number	$T_{finlet} \text{ } \textcircled{\text{C}}$	$L_g \text{ (m)}$	$k_g \text{ (W/m/K)}$	$L_i \text{ (m)}$
9	7	0,003	0,816	0,1
$k_i \text{ (W/m/K)}$	$L_p \text{ (m)}$	$k_p \text{ (W/m/K)}$	$h_{tot1} \text{ (W/m}^2\text{/K)}$	$h_{tot2} \text{ (W/m}^2\text{/K)}$
0,1	0,002	64	9,5	5,7
$\phi \text{ (deg)}$	$\gamma \text{ (deg)}$	K_t	$T_o \text{ } \textcircled{\text{C}}$	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)
38	0	1	25	0
$L_{bs} \text{ (m)}$	$k_{bs} \text{ (W/m/K)}$	$L_c \text{ (m)}$	$k_c \text{ (W/m/K)}$	
0,00013	1,4	0,003	0,816	

Σε αυτόν τον πίνακα α_c είναι η απορροφητικότητα του φωτοβολταϊκού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, β είναι η παράμετρος που περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο του 4^{ου} Κεφαλαίου και περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού που καλύπτεται με φωτοβολταϊκά κελιά, n_o είναι ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά), α_p είναι η απορροφητικότητα της πλάκας, β_o είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά) και T_o είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o = T_{amb} \approx 25^\circ\text{C}$ ή 298K) – σταθερά. Όλα τα παραπάνω δίνουν την εξάρτηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el}) από την θερμοκρασία του κελιού (T_{cu}), η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου. Επιπλέον, β_1 είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού ως προς το οριζόντιο επίπεδο, Tube Number είναι ο αριθμός των σωλήνων - αγωγών ροής και d_{tube} είναι η διάμετρος του σωλήνα - αγωγού ροής. Επίσης, τα μεγέθη L_{bs} , k_{bs} , L_c , k_c , L_g , k_g , L_p , k_p , L_i , k_i είναι τα πάχη και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των στοιχείων του υβριδικού φωτοβολταϊκού, όπως περιγράφονται στην ανάλυση του 4^{ου} Κεφαλαίου. Επιπρόσθετα, \dot{m}_f , c_{pf} και T_{finlet} είναι η παροχή του νερού, η θερμοχωρητικότητα του νερού και η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τέλος, δίνονται τα μεγέθη ϕ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμούθιο επιφάνειας) και K_t (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο), καθώς και ο ΜΗΝΑΣ, που είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ που είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού.

Οι τιμές των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως και οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του φωτοβολταϊκού h_{tot1} και h_{tot2} ($\text{W/m}^2\text{/K}$), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την δημοσίευση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ([2]), η οποία περιγράφει τέτοιες διατάξεις. Η τιμή για το h_f υπολογίζεται από το πρόγραμμα, όπου για στρωτή ροή λαμβάνεται η τιμή που δίνει η δημοσίευση ([2]), ενώ για τυρβώδη λαμβάνεται από συσχέτιση της βιβλιογραφίας για τυρβώδη ροή για μέσες

τιμές της συνεκτικότητας, του αριθμού Prandtl και του συντελεστή αγωγιμότητας του νερού.

Συνεπώς, όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)
4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5^{ου} Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_o
9. Υπολογίζονται οι α_o^* , α_1^* , k^*
10. Αποδίδονται τιμές στους r_o, r_1, r_k
11. Υπολογίζονται οι α_o, α_1, k
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b
17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για το υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Υπολογισμός της R_{tot3}
22. Υπολογισμός της R_{tot4}
23. Για κάθε ώρα της ημέρας υπολογισμού από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 4ου Κεφαλαίου (βήματα 24 έως 38)
24. Υπολογισμός του παράγοντα AL_1
25. Υπολογισμός των URL_1 και URL_2
26. Υπολογισμός του URL_3
27. Υπολογισμός του AL_2
28. Υπολογισμός του h_f και του F'
29. Υπολογισμός του URL_4
30. Υπολογισμός του AL_3
31. Υπολογισμός του AL_4
32. Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου του ρευστού T_{fo}
33. Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας του ρευστού \bar{T}_f
34. Υπολογισμός της T_{iu}
35. Υπολογισμός της T_{pu}
36. Υπολογισμός της T_{cu}

- 37. Υπολογισμός του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el})
- 38. Υπολογισμός του θερμικού βαθμού απόδοσης (η_{th})
- 39. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

6.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού Θερμικών Απωλειών Απλού Τοίχου (1^η Περίπτωση)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους του απλού τοίχου και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και τον προσανατολισμό του τοίχου. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα, ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

T_{amb} (°C)	T_{inside} (°C)	h_{tot1} (W/m ² /K)	h_{tot2} (W/m ² /K)	L_{T1} (m)
3	20	25	7,7	0,1
k_{T1} (W/m/K)	L_{T2} (m)	k_{T2} (W/m/K)	L_k (m)	ΜΗΝΑΣ
0,55	0,1	0,55	0,05	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ϕ (deg)	γ (deg)	K_r	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)
17	38	0	0,9	0
Width (m)	Length (m)			
3	3			

Σε αυτόν τον πίνακα L_{T1} , k_{T1} , L_{T2} , k_{T2} και L_k είναι τα πάχη των στρώσεων του τοίχου της 1^{ης} περίπτωσης, με δύο στρώσεις από τούβλο και ενδιάμεσο κενό και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας. Επιπλέον δίνονται τα μεγέθη ϕ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμούθιο επιφάνειας) και K_r (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο). Ο ΜΗΝΑΣ είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού, Width και Length είναι το πλάτος και ύψος του τοίχου αντίστοιχα. Τέλος, T_{amb} και T_{inside} είναι η εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία αντίστοιχα.

Οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του τοίχου h_{tot1} και h_{tot2} (W/m²/K), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την TOTEE 20701/2010.

Όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)
4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5ου Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_o
9. Υπολογίζονται οι α_o^* , α_1^* , k^*
10. Αποδίδονται τιμές στους r_o, r_1, r_k
11. Υπολογίζονται οι α_o, α_1, k
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b
17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για τον απλό τοίχο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 4ου Κεφαλαίου (βήματα 22 έως 23)
22. Υπολογισμός της q (W/m^2)
23. Υπολογισμός της Q (W)
24. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

6.4 Πρόγραμμα Υπολογισμού Θερμικών Απωλειών Τοίχου με Μόνωση (2^η Περίπτωση)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους του τοίχου με μόνωση και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τον προσανατολισμό του τοίχου. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα, ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

T_{amb} (°C)	T_{inside} (°C)	h_{tot1} (W/m²/K)	h_{tot2} (W/m²/K)	L_{T1} (m)
3	20	25	7,7	0,1
k_{T1} (W/m/K)	L_{T2} (m)	k_{T2} (W/m/K)	L_k (m)	ΜΗΝΑΣ
0,55	0,1	0,55	0,05	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	φ (deg)	γ (deg)	K_τ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)
17	38	0	0,9	0
Width (m)	Length (m)	K_μ (W/m/K)	L_μ (m)	
3	3	0,04	0,1	

Σε αυτόν τον πίνακα L_{T1}, k_{T1}, L_{T2}, k_{T2}, L_k, L_μ, k_μ είναι τα πάχη των στρώσεων του τοίχου της 2^{ης} περίπτωσης με δύο στρώσεις από τούβλο, ενδιάμεσο κενό και μόνωση στο εξωτερικό και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας. Επιπλέον δίνονται τα μεγέθη φ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμούθιο επιφάνειας) και K_τ (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο). Ο ΜΗΝΑΣ είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού, Width και Length είναι το πλάτος και ύψος του τοίχου αντίστοιχα. Τέλος, T_{amb} και T_{inside} είναι η εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία αντίστοιχα.

Οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του τοίχου h_{tot1} και h_{tot2} (W/m²/K), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την TOTEE 20701/2010.

Όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)
4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5ου Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα cosθ και cosθ_z
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_o
9. Υπολογίζονται οι α_o^{*}, α₁^{*}, κ^{*}
10. Αποδίδονται τιμές στους r_o, r₁, r_k
11. Υπολογίζονται οι α_o, α₁, κ
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b

17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για τον απλό τοίχο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 4ου Κεφαλαίου (βήματα 22 έως 23)
22. Υπολογισμός της q (W/m^2)
23. Υπολογισμός της Q (W)
24. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

6.5 Πρόγραμμα Υπολογισμού του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού σε Τοίχο χωρίς Μόνωση (3^η Περίπτωση)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους που περιγράφουν το υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο και τον απλό τοίχο και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο που βρίσκεται το υβριδικό φωτοβολταϊκό, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που είναι το φωτοβολταϊκό, τον προσανατολισμό του και την κλίση του ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα, ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

$T_{amb} \text{ } ^\circ\text{C}$	α_c	τ_g	β	n_o
3	0,9	0,95	0,89	0,15
a_p	c_{pf} (Joule/kg/K)	β_o	β_1 (deg)	ΜΗΝΑΣ
0,8	4180	0,0045	90	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	$\dot{m}f$ (kg/sec)	d_{tube} (m)	Width (m)	Length (m)
17	0,04	0,0125	3	3
Tube Number	$T_{finlet} \text{ } ^\circ\text{C}$	L_g (m)	k_g (W/m/K)	L_i (m)
9	7	0,003	0,816	0,1
k_i (W/m/K)	L_p (m)	k_p (W/m/K)	h_{tot1} (W/m ² /K)	h_{tot2} (W/m ² /K)
0,1	0,002	64	9,5	7,7
ϕ (deg)	γ (deg)	K_t	$T_o \text{ } ^\circ\text{C}$	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)
38	0	0,9	25	0
L_{bs} (m)	k_{bs} (W/m/K)	L_c (m)	k_c (W/m/K)	$T_{inside} \text{ } ^\circ\text{C}$
0,00013	1,4	0,003	0,816	20
L_{T1} (m)	k_{T1} (W/m/K)	L_{T2} (W/m/K)	k_{T2} (W/m/K)	L_k (m)
0,1	0,55	0,1	0,55	0,05

Σε αυτόν τον πίνακα α_c είναι η απορροφητικότητα του φωτοβολταϊκού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, β είναι η παράμετρος που περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο του 4^{ου} Κεφαλαίου και περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού που καλύπτεται με φωτοβολταϊκά κελιά, η_o είναι ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά), α_p είναι η απορροφητικότητα της πλάκας, β_o είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά) και T_o είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o=T_{amb}\approx 25^\circ\text{C}$ ή 298K) – σταθερά. Όλα τα παραπάνω δίνουν την εξάρτηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el}) από την θερμοκρασία του κελιού (T_{cu}), η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου. Επιπλέον, β_1 είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού ως προς το οριζόντιο επίπεδο, Tube Number είναι ο αριθμός των σωλήνων - αγωγών ροής και d_{tube} είναι η διάμετρος του σωλήνα - αγωγού ροής. Επίσης, τα μεγέθη L_{bs} , k_{bs} , L_c , k_c , L_g , k_g , L_p , k_p , L_i , k_i είναι τα πάχη και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των στοιχείων του υβριδικού φωτοβολταϊκού, όπως περιγράφονται στην ανάλυση του 4^{ου} Κεφαλαίου και L_{T1} , k_{T1} , L_{T2} , k_{T2} , L_k είναι τα πάχη των στρώσεων του απλού τοίχου με δύο στρώσεις από τούβλο και ενδιάμεσο κενό και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας. Επιπρόσθετα, \dot{m}_f , c_{pf} και T_{finlet} είναι η παροχή του νερού, η θερμοχωρητικότητα του νερού και η θερμοκρασία εισόδου του νερού στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τέλος, δίνονται τα μεγέθη ϕ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμουθιο επιφάνειας) και K_t (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο), καθώς και ο ΜΗΝΑΣ, που είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ που είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού.

Οι τιμές των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως και οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του φωτοβολταϊκού h_{tot1} και h_{tot2} ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την δημοσίευση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ([2]) και με την TOTEE 20701/2010 (h_{tot2}), που περιγράφουν τέτοιες διατάξεις. Η τιμή για το h_f υπολογίζεται από το πρόγραμμα όπου για στρωτή ροή λαμβάνεται η τιμή που δίνει η δημοσίευση ([2]), ενώ για τυρβώδη λαμβάνεται από συσχέτιση της βιβλιογραφίας για τυρβώδη ροή για μέσες τιμές της συνεκτικότητας, του αριθμού Prandtl και του συντελεστή αγωγιμότητας του νερού και η κλίση του φωτοβολταϊκού β_1 λαμβάνεται ίση με 90 μοίρες.

Όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

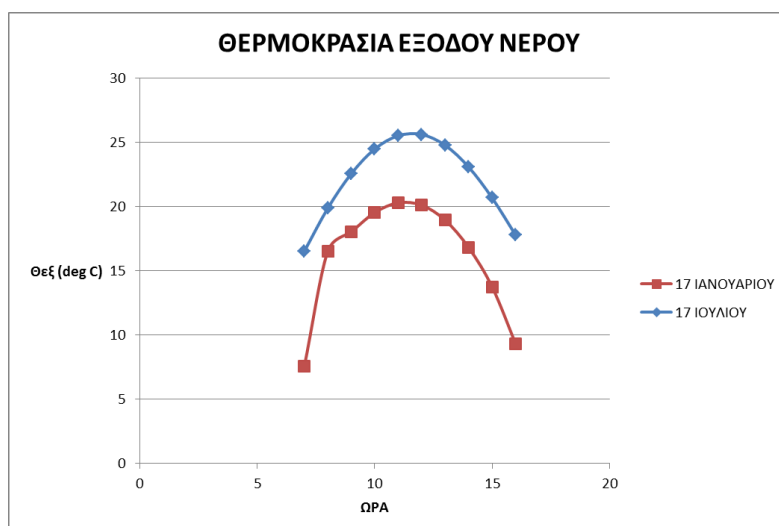
1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)
4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5ου Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_o

9. Υπολογίζονται οι $\alpha_o^*, \alpha_1^*, K^*$
10. Αποδίδονται τιμές στους r_o, r_1, Γ_k
11. Υπολογίζονται οι α_o, α_1, K
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b
17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για το υβριδικό φωτοβολταϊκό και τον απλό τοίχο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Υπολογισμός της R_{tot3}
22. Υπολογισμός της R_{tot4}
23. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 4^{ου} Κεφαλαίου (βήματα 24 έως 38)
24. Υπολογισμός του παράγοντα AL_1
25. Υπολογισμός των URL_1 και URL_2
26. Υπολογισμός του URL_3
27. Υπολογισμός του AL_2
28. Υπολογισμός του h_f και του F'
29. Υπολογισμός του URL_4
30. Υπολογισμός του AL_3
31. Υπολογισμός του AL_4
32. Υπολογισμός της θερμοκρασίας εξόδου ρευστού T_{fo}
33. Υπολογισμός της μέσης θερμοκρασίας ρευστού \bar{T}_f
34. Υπολογισμός της T_{iu}
35. Υπολογισμός της T_{pu}
36. Υπολογισμός της T_{cu}
37. Υπολογισμός του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el})
38. Υπολογισμός του θερμικού βαθμού απόδοσης (η_{th})
39. Υπολογισμός της Q (W) (θερμικές απώλειες τοίχου)
40. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

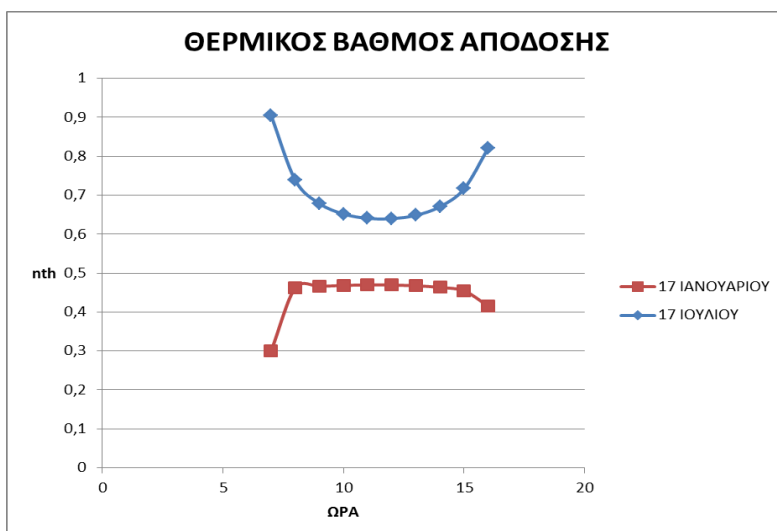
6.6 Αποτελέσματα Προγραμμάτων

6.6.1 Επίδραση της Εποχής του Έτους στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

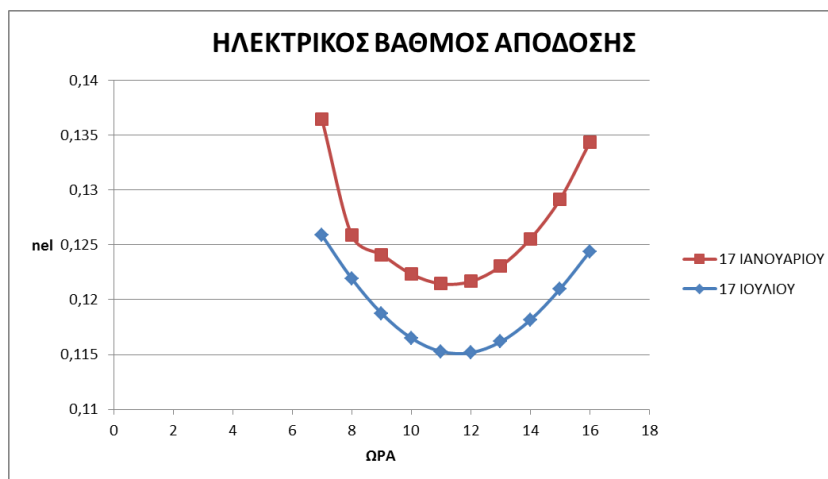
Το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχή ύδατος 0,02 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου και 35°C στις 17 Ιουλίου αντίστοιχα. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εξόδου παίρνει μεγαλύτερες τιμές το Καλοκαίρι και αυτό φυσικά οφείλεται στις αυξημένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που παρουσιάζονται την εποχή εκείνη και στην αυξημένη εξωτερική θερμοκρασία. Επίσης, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία εξόδου του νερού παρουσιάζει μέγιστο την ώρα που παρουσιάζεται μέγιστη τιμή στην ηλιακή ακτινοβολία.



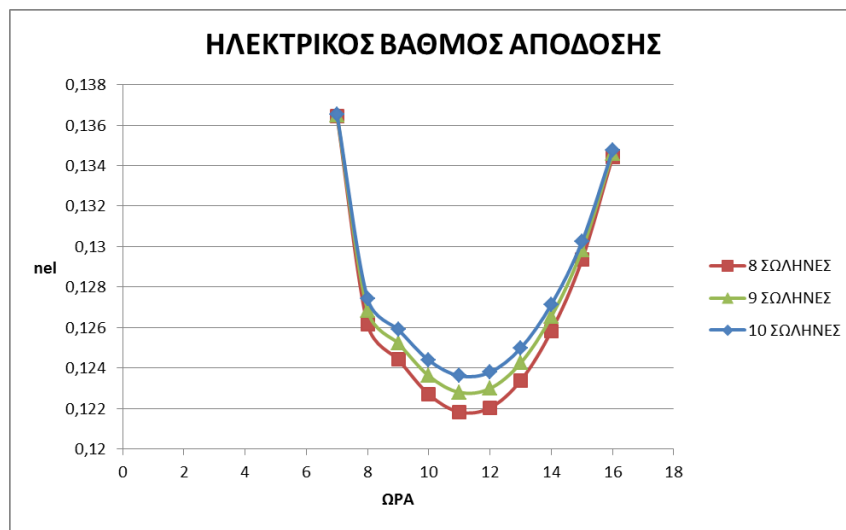
Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης παίρνει μεγαλύτερες τιμές το Καλοκαίρι και αυτό φυσικά οφείλεται στις αυξημένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που παρουσιάζονται εκείνη την εποχή και στην αυξημένη εξωτερική θερμοκρασία. Επίσης, παρατηρούμε ότι τον Χειμώνα ο θερμικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μέγιστο εκεί που παρουσιάζεται μέγιστη τιμή στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το Καλοκαίρι που έχουμε και πρόσδοση θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον εμφανίζεται εκεί που έχουμε τη μικρότερη τιμή στην ηλιακή ακτινοβολία (ελάχιστη τιμή στον παρονομαστή στη σχέση υπολογισμού του θερμικού βαθμού απόδοσης).



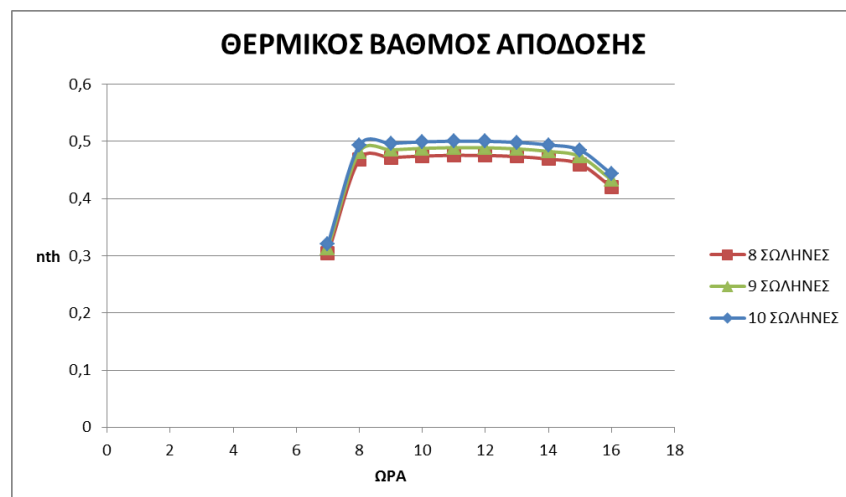
Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές το Χειμώνα από ότι το Καλοκαίρι και αυτό οφείλεται στα χαμηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας και εξωτερικής θερμοκρασίας που παρουσιάζονται το Χειμώνα, που οδηγούν σε αντίστοιχες χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας στο φωτοβολταϊκό κελί.

6.6.2 Επίδραση του Αριθμού Σωλήνων στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχή ύδατος 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 8, 9 και 10, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:



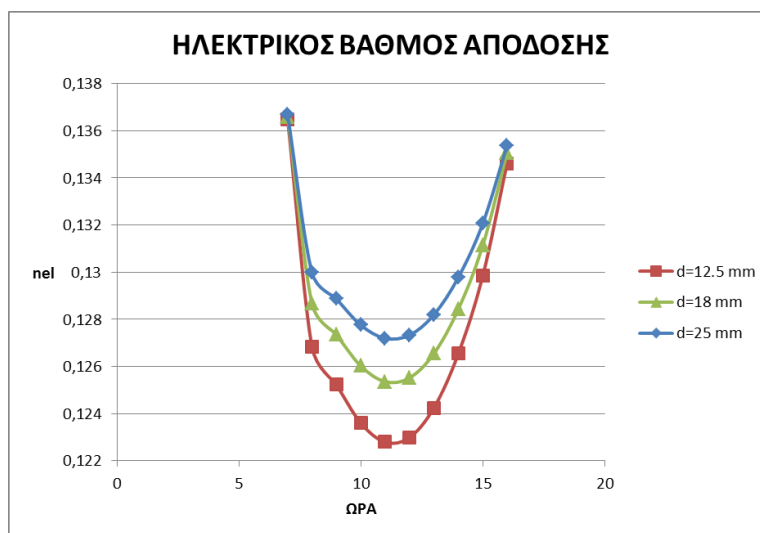
Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση του αριθμού των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ωστόσο, η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή.



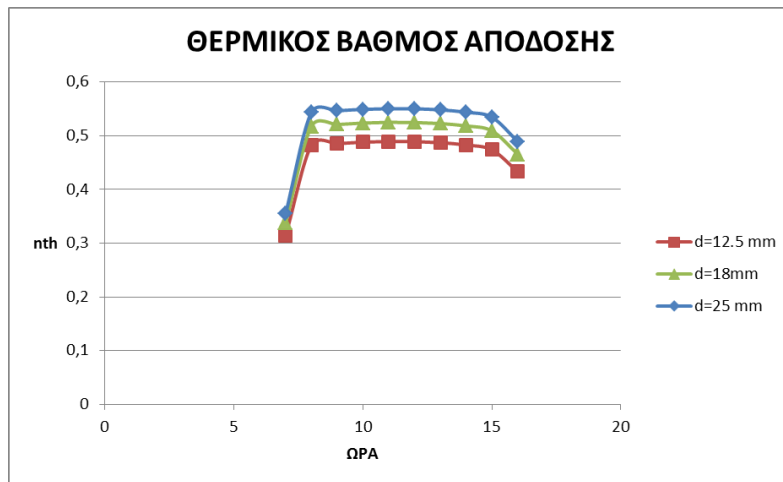
Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση του αριθμού των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ωστόσο, η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή.

6.6.3 Επίδραση της Διαμέτρου των Σωλήνων στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχή ύδατος 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρων 12,5 mm, 18 mm και 25 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:



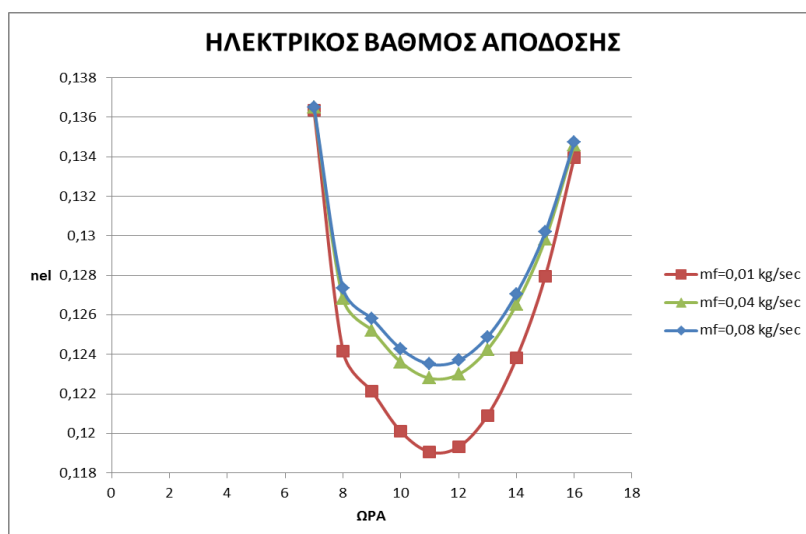
Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ωστόσο, η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή.



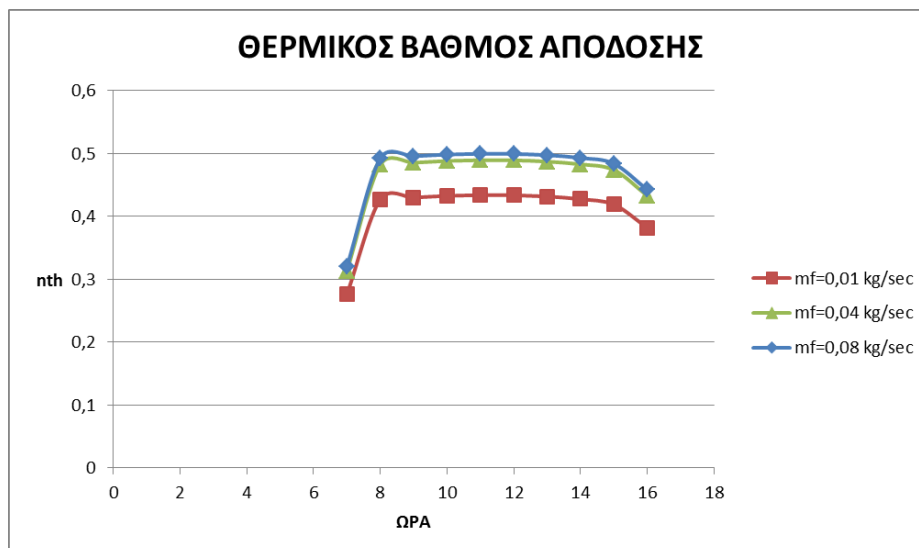
Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ωστόσο, και πάλι η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή.

6.6.4 Επίδραση της Παροχής Νερού στην Απόδοση του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Το πρόγραμμα υπολογισμού του φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχές νερού 0,01 kg/sec, 0,04 kg/sec και 0,08 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου. Τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω:



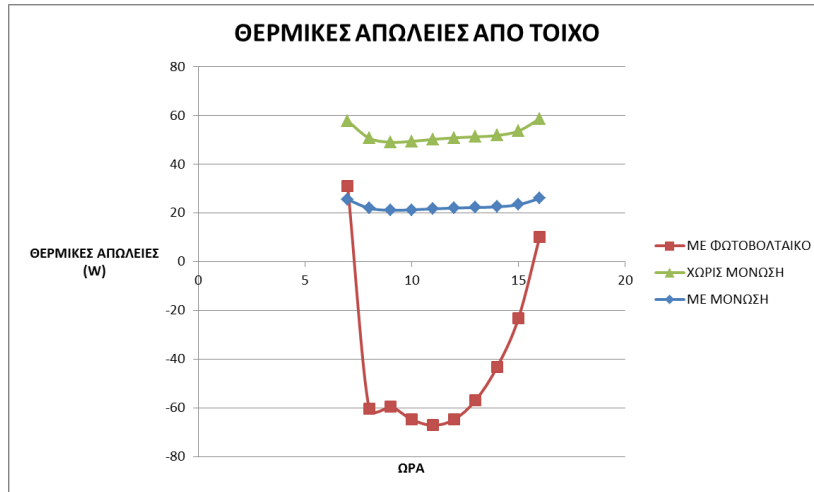
Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της παροχής του νερού και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της παροχής νερού ελαττώνεται η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού να ελαττώνεται.



Παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της παροχής του νερού και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της παροχής νερού μπορεί μεν να ελαττώνεται η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού, αλλά η αντίστοιχη αύξηση της παροχής ρευστού αυξάνει σαν τελικό αποτέλεσμα το δια του νερού συνολικά προσλαμβανόμενο ποσό θερμότητας.

6.6.5 Επίδραση της Ύπαρξης Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Στοιχείου στις Θερμικές Απώλειες μέσω Τοίχου

Το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου σε τοίχο μαζί με τα προγράμματα υπολογισμού θερμικών απωλειών απλού τοίχου και τοίχου με μόνωση τα χρησιμοποιήσαμε με παροχή νερού 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 90 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι τις ώρες που έχουμε σημαντικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας όταν έχουμε υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ο χώρος παρουσιάζει θερμικά κέρδη και αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών ποσών ακτινοβολούμενης ενέργειας που λαμβάνονται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Κεφάλαιο 7^ο

Προγράμματα Υπολογισμού για τις Περιπτώσεις που Εξετάζονται στο 3^ο Κεφάλαιο

7.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6^ο), αρχικά θα περιγραφούν τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και εκτελούν τους υπολογισμούς που αναφέρονται στις περιπτώσεις που περιγράφηκαν στις παραγράφους του 3^{ου} Κεφαλαίου. Δημιουργήθηκαν 4 προγράμματα σε αντίστοιχα βιβλία εργασίας του Excel, τα οποία μέσω της γλώσσας Excel Visual Basic εκτελούν τους υπολογισμούς που αναφέρονται στο 3^ο Κεφάλαιο, το οποίο έχει να κάνει με το Φωτοβολταϊκό Σύστημα χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct). Κατόπιν, θα δοθούν υπό μορφή διαγραμμάτων και θα συζητηθούν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την εφαρμογή αυτών των προγραμμάτων, από τα οποία θα εξαχθούν συμπεράσματα.

7.2 Πρόγραμμα Υπολογισμού Φωτοβολταϊκού Συστήματος χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους που περιγράφουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο που βρίσκεται το φωτοβολταϊκό, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που είναι το φωτοβολταϊκό, τον προσανατολισμό του και την κλίση του ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

T_{amb} (°C)	α_c	τ_g	β	n_o
5	0,9	0,95	0,89	0,15
α_p	ϕ (deg)	β_o	β_1 (deg)	ΜΗΝΑΣ
0,8	38	0,0045	38	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	γ (deg)	K_t	Width (m)	Length (m)
17	0	1	1,176	1,7
T_o (°C)	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)	L_g (m)	k_g (W/m/K)	L_i (m)
25	0	0,003	0,816	0,1
k_i (W/m/K)	L_p (m)	k_p (W/m/K)	h_{tot1} (W/m ² /K)	h_{tot2} (W/m ² /K)
0,1	0,002	64	9,5	5,7
L_{bs} (m)	k_{bs} (W/m/K)	L_c (m)	k_c (W/m/K)	
0,00013	1,4	0,003	0,816	

Σε αυτόν τον πίνακα α_c είναι η απορροφητικότητα του φωτοβολταϊκού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, β είναι η παράμετρος που περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο του 3^{ου} Κεφαλαίου και περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού που καλύπτεται με φωτοβολταϊκά κελιά, n_o είναι ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά), α_p είναι η απορροφητικότητα της πλάκας, β_o είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά) και T_o είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o = T_{amb} \approx 25^\circ\text{C}$ ή 298K) – σταθερά. Όλα τα παραπάνω δίνουν την εξάρτηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el}) από την θερμοκρασία του κελιού (T_{cu}), η οποία περιγράφεται από τις εξισώσεις του 3^{ου} Κεφαλαίου. Επιπλέον, β_1 είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τα μεγέθη L_{bs} , k_{bs} , L_c , k_c , L_g , k_g , L_p , k_p , L_i , k_i είναι τα πάχη και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των στοιχείων του φωτοβολταϊκού, όπως περιγράφονται στην ανάλυση του 3^{ου} Κεφαλαίου. Τέλος, δίνονται τα μεγέθη ϕ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμούθιο επιφάνειας) και K_t (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο), καθώς και ο ΜΗΝΑΣ, που είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ που είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού.

Οι τιμές των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως και οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του φωτοβολταϊκού h_{tot1} και h_{tot2} (W/m²/K), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την δημοσίευση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ([2]), η οποία περιγράφει τέτοιες διατάξεις.

Συνεπώς, όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)

4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5^{ου} Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_o
9. Υπολογίζονται οι α_o^* , α_1^* , k^*
10. Αποδίδονται τιμές στους r_o, r_1, r_k
11. Υπολογίζονται οι α_o, α_1, k
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b
17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για το φωτοβολταϊκό στοιχείο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 3^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Υπολογισμός της R_{tot3}
22. Για κάθε ώρα της ημέρας υπολογισμού από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 3ου Κεφαλαίου (βήματα 23 έως 30)
23. Υπολογισμός του παράγοντα AL_1
24. Υπολογισμός των URL_1 και URL_2
25. Υπολογισμός του URL_3
26. Υπολογισμός του AL_2
27. Υπολογισμός της T_{pu}
28. Υπολογισμός της T_{cu}
29. Υπολογισμός του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el})
30. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

7.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού του Φωτοβολταϊκού σε Τοίχο χωρίς Μόνωση (3^η Περίπτωση)

Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογισμού ο χειριστής το μόνο που κάνει είναι να εισάγει τις τιμές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους που περιγράφουν το φωτοβολταϊκό στοιχείο και τον απλό τοίχο και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ημέρα του έτους, το υψόμετρο που βρίσκεται το φωτοβολταϊκό, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου που είναι το φωτοβολταϊκό, τον προσανατολισμό του και την κλίση του ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα δεδομένα εισάγονται στο φύλλο εργασίας του αντίστοιχου βιβλίου εργασίας σε πίνακα, ο οποίος δίνεται κατωτέρω:

DATA INSERTION

$T_{amb} \text{ }^{\circ}\text{C}$	α_c	τ_g	β	n_o
5	0,9	0,95	0,89	0,15
α_p	ϕ (deg)	β_o	β_1 (deg)	ΜΗΝΑΣ
0,8	38	0,0045	90	1
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ Α	γ (deg)	K_{τ}	Width (m)	Length (m)
17	0	1	3	3
$T_o \text{ }^{\circ}\text{C}$	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (km)	L_g (m)	k_g (W/m/K)	L_i (m)
25	0	0,003	0,816	0,1
k_i (W/m/K)	L_p (m)	k_p (W/m/K)	h_{tot1} (W/m ² /K)	h_{tot2} (W/m ² /K)
0,1	0,002	64	9,5	7,7
L_{bs} (m)	k_{bs} (W/m/K)	L_c (m)	k_c (W/m/K)	$T_{inside} \text{ }^{\circ}\text{C}$
0,00013	1,4	0,003	0,816	20
L_{T1} (m)	k_{T1} (W/m/K)	L_{T2} (W/m/K)	k_{T2} (W/m/K)	L_k (m)
0,1	0,55	0,1	0,55	0,05

Σε αυτόν τον πίνακα α_c είναι η απορροφητικότητα του φωτοβολταϊκού κελιού, τ_g είναι η διαπερατότητα του γυαλιού, β είναι η παράμετρος που περιγράφεται στην αντίστοιχη παράγραφο του 3^{ου} Κεφαλαίου και περιγράφει το ποσοστό της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού που καλύπτεται με φωτοβολταϊκά κελιά, n_o είναι ο βαθμός απόδοσης σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά), α_p είναι η απορροφητικότητα της πλάκας, β_o είναι το ποσοστό της επιφάνειας του ηλιακού στοιχείου που έχει στοιχεία μετατροπής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη δοκιμαστική συνθήκη (σταθερά) και T_o είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T_o = T_{amb} \approx 25^{\circ}\text{C}$ ή 298K) – σταθερά. Επιπλέον, β_1 είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τα μεγέθη L_{bs} , k_{bs} , L_c , k_c , L_g , k_g , L_p , k_p , L_i , k_i είναι τα πάχη και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των στοιχείων του φωτοβολταϊκού, όπως περιγράφονται στην ανάλυση του 3^{ου} Κεφαλαίου και L_{T1} , k_{T1} , L_{T2} , k_{T2} , L_k είναι τα πάχη των στρώσεων του απλού τοίχου με δύο στρώσεις από τούβλο και ενδιάμεσο κενό και οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας. Τέλος, δίνονται τα μεγέθη ϕ (γεωγραφικό πλάτος), γ (αζιμούθιο επιφάνειας) και K_{τ} (ωριαίος δείκτης αιθριότητας) που περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5^ο), καθώς και ο ΜΗΝΑΣ, που είναι ο μήνας υπολογισμού και η ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ που είναι η αντίστοιχη ημέρα του μήνα υπολογισμού.

Οι τιμές των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, όπως και οι τιμές των ολικών συντελεστών μεταφοράς θερμότητας από τις πλευρές του φωτοβολταϊκού h_{tot1} και h_{tot2} (W/m²/K), λήφθηκαν να είναι σύμφωνες με την δημοσίευση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ([2]) και με την ΤΟΤΕΕ 20701/2010 (h_{tot2}), που περιγράφουν τέτοιες διατάξεις. Η κλίση του φωτοβολταϊκού β_1 λαμβάνεται ίση με 90 μοίρες.

Όταν ο χειριστής πατήσει το κουμπί «ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ» στο φύλλο εργασίας γίνονται αυτόματα οι υπολογισμοί και η παράθεση των αποτελεσμάτων. Οι υπολογισμοί που γίνονται είναι οι ακόλουθοι:

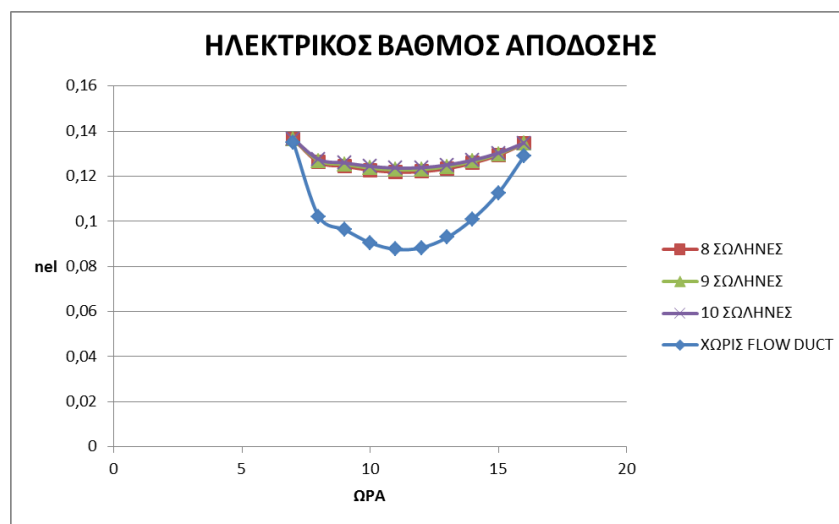
1. Οι μεταβλητές παίρνουν τις τιμές τους από τον πίνακα του φύλλου εργασίας
2. Από την ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ και τον ΜΗΝΑ υπολογίζεται η ημέρα του έτους
3. Υπολογίζεται η γωνία δ (Εξίσωση 5^{ου} Κεφαλαίου)
4. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 5ου Κεφαλαίου (βήματα 5 έως 17)
5. Υπολογίζεται η ωριαία γωνία ω
6. Υπολογίζονται τα $\cos\theta$ και $\cos\theta_z$
7. Υπολογίζεται ο R_b
8. Υπολογίζεται η I_0
9. Υπολογίζονται οι α_0^* , α_1^* , κ^*
10. Αποδίδονται τιμές στους r_0, r_1, r_k
11. Υπολογίζονται οι $\alpha_0, \alpha_1, \kappa$
12. Υπολογίζονται οι τ_b, τ_d
13. Υπολογίζεται η I
14. Υπολογίζεται η I_c
15. Υπολογίζεται η I_d
16. Υπολογίζεται η I_b
17. Υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολούμενη ισχύς I_t
18. Για το φωτοβολταϊκό και τον απλό τοίχο υπολογίζονται από τις εξισώσεις του 3^{ου} Κεφαλαίου
19. Υπολογισμός της R_{tot1}
20. Υπολογισμός της R_{tot2}
21. Υπολογισμός της R_{tot3}
22. Για κάθε ώρα της ημέρας από τις 07:00 π.μ. μέχρι τις 18:00 μ.μ. γίνονται οι υπολογισμοί από τις εξισώσεις του 3^{ου} Κεφαλαίου (βήματα 23 έως 31)
23. Υπολογισμός του παράγοντα AL_1
24. Υπολογισμός των URL_1 και URL_2
25. Υπολογισμός του URL_3
26. Υπολογισμός του AL_2
27. Υπολογισμός της T_{pu}
28. Υπολογισμός της T_{cu}
29. Υπολογισμός του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (η_{el})
30. Υπολογισμός της Q (W) (θερμικές απώλειες τοίχου)
31. Απόδοση των αποτελεσμάτων στο φύλλο εργασίας

7.4 Αποτελέσματα Προγραμμάτων

7.4.1 Σύγκριση του Ηλεκτρικού Βαθμού Απόδοσης μεταξύ του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού με Αγωγό Ροής (με Flow Duct) & του Φωτοβολταϊκού χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)

7.4.1.1 Επίδραση του Αριθμού Σωλήνων στην Απόδοση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

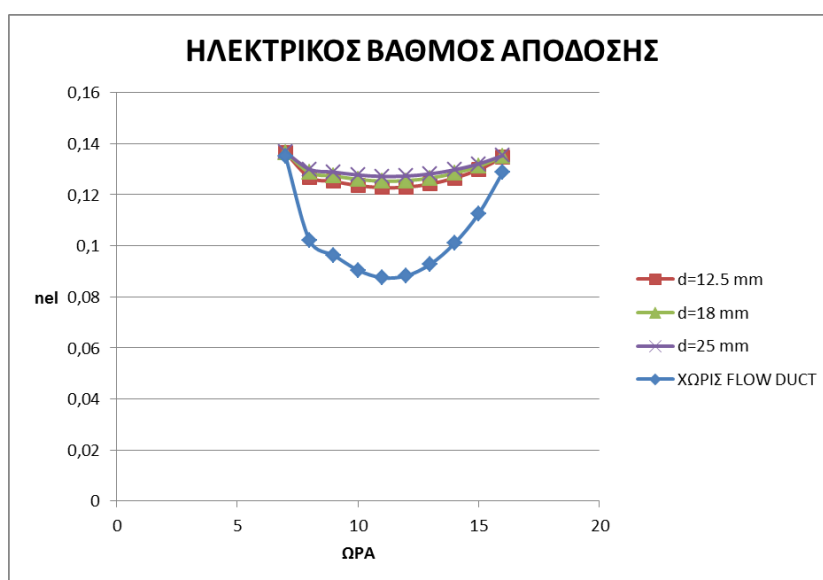
Αρχικά, το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχή ύδατος 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 8, 9 και 10, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου. Επίσης, λάβαμε τα αποτελέσματα από ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκό χωρίς αγωγό ροής με χρήση του αντίστοιχου προγράμματος για την ίδια ημέρα του έτους και την ίδια εξωτερική θερμοκρασία, με ίδιο προσανατολισμό και κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το αντίστοιχο διάγραμμα του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση του αριθμού των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με αγωγό ροής. Ωστόσο, η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή. Επίσης, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct) είναι μεγαλύτερος από τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του απλού φωτοβολταϊκού, γιατί η ύπαρξη της ροής του νερού έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού.

7.4.1.2 Επίδραση της Διαμέτρου των Σωλήνων στην Απόδοση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

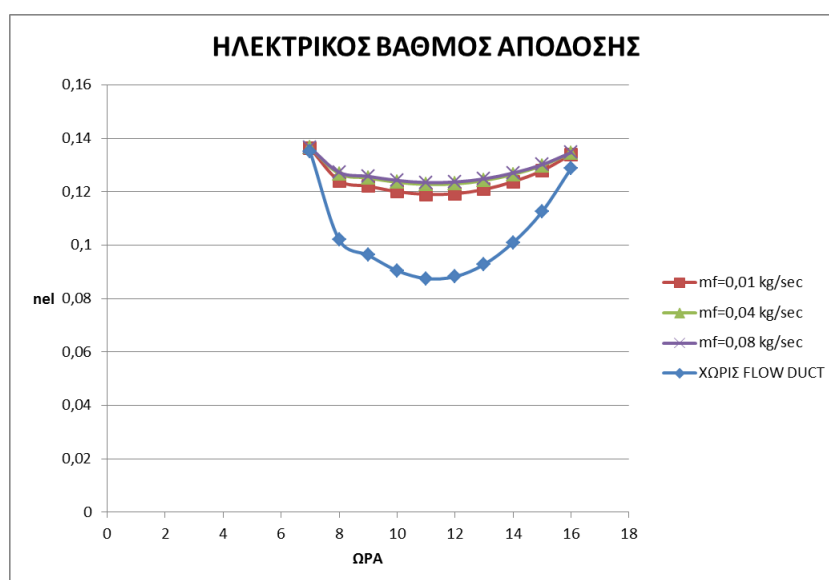
Επίσης, το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου το χρησιμοποιήσαμε με παροχή ύδατος 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρων 12,5 mm, 18 mm και 25 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 και λάβαμε τα αποτελέσματα από ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκό χωρίς αγωγό ροής (flow duct) με χρήση του αντίστοιχου προγράμματος για την ίδια ημέρα του έτους και την ίδια εξωτερική θερμοκρασία, με ίδιο προσανατολισμό και κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το αντίστοιχο διάγραμμα του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων αυξάνεται ο παράγοντας απόδοσης F' του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με αγωγό ροής. Ωστόσο, η αύξηση σαν απόλυτη τιμή είναι μικρή. Επίσης, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct) είναι μεγαλύτερος από τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του απλού φωτοβολταϊκού, γιατί η ύπαρξη ροής του νερού έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού.

7.4.1.3 Επίδραση της Παροχής Νερού στην Απόδοση των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

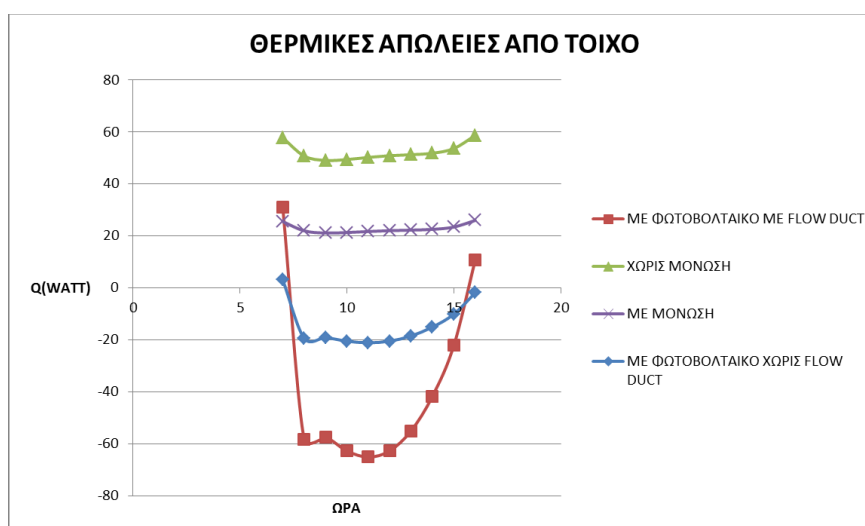
Τέλος, το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με αγωγό ροής (flow duct) το χρησιμοποιήσαμε με παροχές νερού 0,01 kg/sec, 0,04 kg/sec και 0,08 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 38 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου και λάβαμε τα αποτελέσματα από ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκό χωρίς αγωγό ροής (flow duct) με χρήση του αντίστοιχου προγράμματος για την ίδια ημέρα του έτους και την ίδια εξωτερική θερμοκρασία, με ίδιο προσανατολισμό και κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το αντίστοιχο διάγραμμα του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης παρουσιάζεται παρακάτω:



Παρατηρούμε ότι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνεται με αύξηση της παροχής του νερού και αυτό γίνεται γιατί με αύξηση της παροχής νερού ελαττώνεται η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού να ελαττώνεται. Επίσης, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct) είναι μεγαλύτερος από τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του απλού φωτοβολταϊκού, γιατί η ύπαρξη ροής του νερού έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού.

7.4.2 Σύγκριση των Θερμικών Απωλειών μέσω Τοίχου για τις περιπτώσεις του Υβριδικού Φωτοβολταϊκού με Αγωγό Ροής (με Flow Duct) & του Φωτοβολταϊκού χωρίς Αγωγό Ροής (χωρίς Flow Duct)

Το πρόγραμμα υπολογισμού του υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με αγωγό ροής (flow duct) σε τοίχο μαζί με τα προγράμματα υπολογισμού θερμικών απωλειών απλού τοίχου και τοίχου με μόνωση τα χρησιμοποιήσαμε με παροχή νερού 0,04 kg/sec, για νότιο προσανατολισμό, για κλίση φωτοβολταϊκού 90 μοίρες, για αριθμό σωλήνων ίσο με 9, διαμέτρου 12,5 mm και για εξωτερική θερμοκρασία 5°C στις 17 Ιανουαρίου και λάβαμε τα αποτελέσματα από ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών φωτοβολταϊκό χωρίς αγωγό ροής (flow duct), σε τοίχο, με χρήση του αντίστοιχου προγράμματος, για την ίδια ημέρα του έτους και την ίδια εξωτερική θερμοκρασία, με ίδιο προσανατολισμό και κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Το αντίστοιχο διάγραμμα των θερμικών απωλειών από τον τοίχο παρουσιάζεται:



Παρατηρούμε ότι τις ώρες που έχουμε σημαντικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας όταν έχουμε φωτοβολταϊκό στοιχείο, είτε με αγωγό ροής, είτε χωρίς, ο χώρος παρουσιάζει θερμικά κέρδη και αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών ποσών ακτινοβολούμενης ενέργειας που λαμβάνονται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Ωστόσο, το θερμικό κέρδος είναι αυξημένο στην περίπτωση του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct), γιατί η ροή νερού έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένο ποσό θερμότητας να ρέει προς τη πλευρά του αγωγού ροής για να θερμανθεί το νερό, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένα ποσά θερμότητας να ρέουν και προς τον χώρο σε σύγκριση με αυτά που έχουμε στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού χωρίς αγωγό ροής (flow duct).

7.5 Γενικά Συμπεράσματα

Στην εποχή μας, που χαρακτηριστικό της είναι η ενεργειακή κρίση και η στροφή της τεχνολογίας προς την χρήση ήπιων μορφών ενέργειας, προς αντικατάσταση των συμβατικών μορφών ενέργειας, αναπτύσσεται η έρευνα για τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, τόσο για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και για τη χρήση τους και για τη χρήση ενέργειας για θέρμανση νερού χρήσης ή και τη θέρμανση χώρων, ιδίως τα τελευταία χρόνια.

Από την ανάλυση που έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία, μοντελοποιήθηκε και αναλύθηκε η συμπεριφορά τόσο του απλού φωτοβολταϊκού στοιχείου, όσο και του καινοτόμου υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με αγωγό ροής (flow duct), του οποίου η χρήση επιφέρει την παραγωγή τόσο ηλεκτρικής όσο και θερμικής ενέργειας.

Από τα αποτελέσματα που εξαχθήκαν στις αντίστοιχες παραγράφους του Κεφαλαίου 6 και του Κεφαλαίου 7 της παρούσας εργασίας είναι φανερό ότι το υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο με αγωγό ροής παρουσιάζει καλύτερη απόδοση από το αντίστοιχο απλό φωτοβολταϊκό ως προς τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct) είναι μεγαλύτερος από τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης του απλού φωτοβολταϊκού, καθώς η ύπαρξη ροής του νερού έχει σαν αποτέλεσμα την μικρότερη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κελιού και έτσι την αυξημένη τιμή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης.

Επίσης, ο θερμικός βαθμός απόδοσης του υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής αυξάνεται, όπως και ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, με αύξηση του αριθμού των σωλήνων, της παροχής ρευστού και της διαμέτρου των σωλήνων. Θα πρέπει όμως να ληφθούν υπόψιν οι περιορισμοί που τίθενται από πλευράς επιπέδου έντασης θορύβου από τη ροή του νερού, για την εκλογή της κατάλληλης παροχής για κάθε χρήση, όπως και οι οποιεσδήποτε κατασκευαστικές δυσκολίες από την υπέρμετρη αύξηση του αριθμού σωλήνων και της διαμέτρου τους, οι οποίες άλλωστε περιορίζονται και από τις διαστάσεις του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Τέλος, εξετάσθηκε η περίπτωση τόσο της τοποθέτησης απλού φωτοβολταϊκού στοιχείου σε απλό τοίχο, με δύο στρώσεις από τούβλο και ενδιάμεσο κενό, όσο και της τοποθέτησης φωτοβολταϊκού στον ίδιο τοίχο και έγινε η σύγκριση των θερμικών απωλειών που εμφανίζονται από τον τοίχο αυτό για τις ώρες με ηλιοφάνεια μία χειμερινή ημέρα του έτους, σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται από τον ίδιο τοίχο χωρίς φωτοβολταϊκό στοιχείο και για την περίπτωση που σε αυτόν τον τοίχο έχει τοποθετηθεί εξωτερική μόνωση.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αν τοποθετηθεί φωτοβολταϊκό σε τοίχο μπορεί κάποιες ώρες της ημέρας να έχουμε θερμικά κέρδη αντί για θερμικές απώλειες, οπότε θα έχουμε και αντίστοιχη οικονομία στο σύστημα θέρμανσης του αντίστοιχου χώρου. Η οικονομία είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση τοποθέτησης υβριδικού φωτοβολταϊκού με αγωγό ροής (flow duct), γιατί η ροή νερού έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένο ποσό θερμότητας να ρέει προς τη πλευρά του αγωγού ροής για να θερμανθεί το νερό, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα

αυξημένα ποσά θερμότητας να ρέουν και προς τον χώρο σε σύγκριση με αυτά που έχουμε στην περίπτωση φωτοβολταϊκού χωρίς αγωγό ροής (flow duct).

Ενδιαφέρον για μελλοντική έρευνα θα έχει η χρήση των αναπτυσσόμενων προγραμμάτων σε αυτήν την εργασία, με αντίστοιχα προγράμματα για λοιπά θερμικά στοιχεία, όπως εναλλάκτες θερμότητας – δεξαμενές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά συστοιχίας φωτοβολταϊκών στοιχείων με αγωγό ροής σε συνδυασμό με αυτά τα θερμικά στοιχεία για την εκμετάλλευση θερμού νερού χρήσης ή και θέρμανσης χώρων, με αντίστοιχες διατάξεις με αυτές που έχουν αναπτυχθεί από τη χρήση ηλιακών συλλεκτών.

Εν κατακλείδι, σε κάθε περίπτωση η χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, με ή χωρίς αγωγό ροής (flow duct), έχει να αποφέρει μόνο θετικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις εκμετάλλευσης και χρήσης της ηλιακής ενέργειας για οικιακούς σκοπούς.

Πηγές Διαδικτύου

<https://www.safetyengineer.gr/fotovoltaika.html>

<http://www.hellenic-college.gr/works/helcolpedia/projects/energy/production/photovoltaic-kiratzis-2013.pdf>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC>

<http://www.selasenergy.gr/history.php>

https://imegsevee.gr/wp-content/uploads/2018/01/fotovoltaika_systimata.pdf

<http://www.ostrisolar.gr/index.php/2011-03-04-23-37-35>

<http://www.glazette.com/Glass-Knowledge-Bank-71/Photovoltaic-Glass.html>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114000780>

Βιβλιογραφία

- 1) Analytical Expression of Temperature Dependent Electrical Efficiency of N-PVT Water Collectors Connected in Series, Shyam, G.N. Tiwari & I.M. Al-Helal, Solar Energy 114 (2015) 61-76
 - A. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology Delhi, Hauz Khas, New Delhi 110016, India
 - B. Department of Agricultural Engineering, College of Food & Agricultural Sciences, King Saud University, P.O. Box 2460, Riyadh 11451, Saudi Arabia
 - C. Received 1 December 2013, Received in Revised Form 9 January 2015, Accepted 21 January 2015, Available Online 11 February 2015, Communicated by: Associate Editor Brian Norton
- 2) Ηλιακή Ενέργεια: Συνιστώσες της Ηλιακής Θερμικής Διαδικασίας. Ανδρέας Ε. Μοσχάτος. Εκδόσεις Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος
- 3) Fundamentals of Heat and Mass Transfer Third Edition. Frank P. Incropera, David P. De Witt. John Wiley and Sons
- 4) Θερμικά Ηλιακά Συστήματα Μέρος 1ο. Κίμων Α. Αντωνόπουλος. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- 5) An Active Cooling System for Photovoltaic Modules, H.G. Teo, P.S. Lee & M.N.A. Hawlader

- A. Energy Studies Institute, National University of Singapore, 29 Heng Mui Keng Terrace, Block A #10-01, Singapore 119620, Singapore
 - B. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 9 Engineering Drive 1, Singapore 117576, Singapore
- 6) Solar Energy for Zero Energy Buildings – A Comparison between Solar Thermal, PV and Photovoltaic-Thermal (PV/T) Systems, C. Good, I. Andresen & A.G. Hestnes
- A. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Architectural
 - B. Design, History and Technology, Alfred Getz vei 3, NO-7491 Trondheim, Norway
- 7) Optimization Design Method and Experimental Validation of a Solar PVT Cogeneration System Based on Building Energy Demand, Chao Zhou ID , Ruobing Liang and Jili Zhang *
- A. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China
 - B. dutzhouchao@mail.dlut.edu.cn (C.Z.); liangrb@dlut.edu.cn (R.L.)
 - C. * Correspondence: zjldlut@dlut.edu.cn; Tel.: +86-411-84706203
 - D. Received: 7 July 2017; Accepted: 24 August 2017; Published: 28 August 2017
 - E. Optimization Design Method and Experimental Validation of a Solar PVT Cogeneration System Based on Building Energy Demand, Chao Zhou ID , Ruobing Liang and Jili Zhang *
- 8) Διπλωματική Εργασία Μπατίλα Ιωάννη, Μελέτη-Κατασκευή & Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού Συστήματος σε Κτιριακές Εγκαταστάσεις
- A. Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Εφαρμοσμένης Φυσικής, Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας