

ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

Δανιά Κωνσταντίνα του Αριστείδη

A.M.: 42280

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ Γεώργιος Αλέξης

Πειραιάς, 2017

ΔΕΛΤΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ			
Κωδικός Εργασίας		Ακαδ. έτος	2016-2017
Τίτλος Εργασίας	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ		
Φοιτητ-ές / -ριες	Δανιά Κωνσταντίνα		
Τμήμα	Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.		
Επιβλ. Καθ.	Αλέξης Γεώργιος		
Ημερομηνία	22/6/2017		
Λέξεις κλειδιά	Ηλιακή, θερμική ενέργεια, φωτοβολταϊκά, υβριδικά συστήματα, απομακρυσμένη λειτουργία		
<p>Περίληψη : Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο εντοπισμός ανάπτυξης αυτόνομων συστημάτων παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία με την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών αλλά και των ηλιοθερμικών συστημάτων σε συνδυασμό με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στην αυτονομία των καταναλωτών. Αναλυτικότερα, μελετώνται τα ηλιοθερμικά συστήματα θέρμανσης νερού και χώρου που βρίσκονται στην αγορά, ενώ εν συνεχεία εκτιμάται στο σύνολο του ένα ηλιοθερμικό σύστημα. Ακολούθως, μελετώνται όλα τα συστατικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αλλά και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υδρογόνου, αφού αποτελεί σε υβριδική μορφή σύστημα εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Εκτενής αναφορά για τα κόστη των εμπορικών μοντέλων όλων των προαναφερθέντων συστημάτων πραγματοποιείται στο τέταρτο κεφάλαιο. Ενώ το πέμπτο κεφάλαιο αποτελείται από τις εκτιμήσεις άλλων εμπορικών μοντέλων παραγωγής ενέργειας με τελικό σκοπό τη σύγκριση τους με την επωφελέστερη ενεργειακά εκδοχή της αναλυθείσας μελέτης.</p>			

PROJECT INFORMATION SHEET			
<i>Code number</i>		<i>Academic year</i>	2016-2017
<i>Title</i>	PRODUCTION HEAT AND ELECTRICITY TO ISOLATED CONSUMERS USING SOLAR RADIATION		
<i>Students</i>	Dania Konstantina		
<i>Department</i>	Mechanical Engineering		
<i>Advisor</i>	Alexis Georgios		
<i>Date</i>	22/6/2017		
<i>Keywords</i>	Solar, thermal energy, photovoltaic, hybrid systems, remote application		
<p>Abstract: <i>The aim of this paper is to identify the development of autonomous systems for thermal and electrical energy generation. Solar radiation through the application of both photovoltaic and solar thermal systems combined with other renewable sources of energy can lead to consumer autonomy. More specifically, solar thermal water and space heating systems that are on the market are being studied and a solar thermal system is then assessed as a whole. Subsequently, all components of a photovoltaic system, as well as the production of electricity through hydrogen, are studied, since it is a hybrid system for the exploitation of solar radiation. Extensive reference for the costs of the commercial models of all the aforementioned systems is made in the fourth chapter. While the fifth chapter consists of estimates of other commercial models of energy production with the ultimate goal of comparing them with the most energy-efficient version of the analyzed study.</i></p>			

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της Πτυχιακής Εργασίας επιθυμώ να εκφράσω πρώτα από όλα τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση και τη συνεχή ενθάρρυνση κατά τη διάρκεια της παρούσας Εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στο σύντροφο μου για την υποστήριξή τους και την υπομονή τους στο πρόσωπό μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	<u>Εισαγωγή</u>	9
1.1	<u>Ηλιακή ακτινοβολία</u>	11
1.2	<u>Γεωμετρικές παράμετροι</u>	13
1.3	<u>Εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας</u>	16
1.3.1	<u>Το μοντέλο του Angstrom</u>	16
1.3.2	<u>Το μοντέλο του Hottel</u>	17
1.3.3	<u>Το μοντέλο της Ashrae</u>	18
1.3.4	<u>Τα μοντέλα του δείκτη αιθριότητας</u>	19
1.3.5	<u>Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο</u>	21
1.3.5.1	<u>Γεωμετρικός παράγοντας</u>	21
1.3.5.2	<u>Ισοτροπικό μοντέλο</u>	21
1.3.5.3	<u>Το ανισοτροπικό μοντέλο Klucher</u>	22
1.3.5.4	<u>Το μοντέλο του Hay</u>	22
2	<u>Παραγωγή θερμικής ενέργειας</u>	23
2.1	<u>Ενεργητικά ηλιοθερμικά συστήματα</u>	23
2.1.1	<u>Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης</u>	24
2.1.1.1	<u>Παθητικά συστήματα</u>	24
2.1.1.2	<u>Ενεργητικά συστήματα</u>	25
2.1.1.2.1	<u>Σύστημα αντλίας θερμότητας</u>	26
2.1.1.2.2	<u>Σύστημα θέρμανσης πισίνας</u>	26
2.1.1.2.3	<u>Σύστημα θέρμανσης νερού</u>	27
2.1.1.2.4	<u>Σύστημα ανοιχτού τύπου</u>	28
2.1.1.2.5	<u>Σύστημα κλειστού τύπου</u>	28
2.1.2	<u>Ηλιακά συστήματα θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης</u>	29
2.1.2.1.1	<u>Σύστημα αέρα θέρμανσης χώρου</u>	29
2.1.2.1.2	<u>Σύστημα νερού θέρμανσης χώρου</u>	30
2.2	<u>Ηλιακοί συλλέκτες</u>	31
2.2.1	<u>Επίπεδοι συλλέκτες</u>	32
2.2.1.1.1	<u>Αρχή λειτουργίας</u>	32
2.2.1.1.2	<u>Δομή επίπεδου συλλέκτη</u>	33
2.2.1.1.3	<u>Ενεργειακή ισορροπία ενός επίπεδου συλλέκτη</u>	34
2.2.2	<u>Συλλέκτες κενού</u>	37
2.2.2.1	<u>Αρχή λειτουργίας</u>	37
2.2.2.2	<u>Ενεργειακή ισορροπία συλλέκτη σωλήνωσης κενού</u>	38
2.2.3	<u>Συνθετικοί παραβολικοί συλλέκτες</u>	39
2.3	<u>Δεξαμενές αποταμίευσης θερμότητας</u>	40
2.4	<u>Εναλλάκτες θερμότητας</u>	41
2.5	<u>Σύστημα σωληνώσεων</u>	42
2.6	<u>Βοηθητική πηγή θερμότητας</u>	42

<u>3</u>	<u>Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας</u>	43
3.1	<u>Φωτοβολταϊκά συστήματα</u>	43
3.1.1	<u>Τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στοιχείων</u>	43
3.1.1.1	<u>Σύστημα πλέγματος</u>	43
3.1.1.2	<u>Σύστημα χωρίς την διάταξη πλέγματος</u>	44
3.1.2	<u>Φωτοβολταϊκά στοιχεία</u>	44
3.1.2.1	<u>Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου</u>	45
3.1.2.2	<u>Αρχή λειτουργίας</u>	47
3.1.2.3	<u>Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου</u>	48
3.1.2.4	<u>Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος</u>	51
3.1.3	<u>Ανιχνευτές μέγιστης ισχύος</u>	53
3.1.4	<u>Ελεγκτές φόρτισης</u>	53
3.1.5	<u>Μπαταρίες</u>	54
3.1.6	<u>Μετατροπείς DC/AC</u>	55
3.2	<u>Υδρογόνο</u>	56
3.2.1	<u>Παραγωγή υδρογόνου</u>	56
3.2.2	<u>Μεταφορά και αποθήκευση υδρογόνου</u>	58
3.2.3	<u>Κυψέλες καυσίμου</u>	59
3.3	<u>Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού συστήματος - κυψέλης υδρογόνου</u>	64
<u>4</u>	<u>Κοστολόγηση συστημάτων παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας</u>	67
4.1	<u>Κοστολόγιο ενός πλήρους συστήματος φωτοβολταϊκών</u>	67
4.1.1	<u>Δικαίωμα τοποθέτησης</u>	67
4.1.2	<u>Κόστη των κύρια μέρων ενός φωτοβολταϊκού οικιακού συστήματος</u>	67
4.1.2.1	<u>Φωτοβολταϊκό στοιχείο</u>	67
4.1.2.2	<u>Αναστροφέας – Inverter</u>	68
4.1.2.3	<u>Συσσωρευτές</u>	70
4.1.2.4	<u>Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκού συστήματος</u>	71
4.1.3	<u>Κοστολόγιο ενός πλήρους φωτοβολταϊκού συστήματος</u>	77
4.2	<u>Κοστολόγιο και υλικά κυψέλων υδρογόνου</u>	78
4.2.1	<u>Παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου</u>	78
4.2.2	<u>Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου</u>	79
4.2.3	<u>Κοστολόγιο</u>	81
4.3	<u>Κοστολόγιο και υλικά συστήματος ηλιοθερμικής ενέργειας</u>	81
4.3.1	<u>Κόστος στοιχείων ηλιοθερμικού συστήματος</u>	82
4.3.2	<u>Κοστολόγιο</u>	83
<u>5</u>	<u>Μοντέλα εκτίμησης</u>	85
5.1	<u>Υβριδικά φωτοβολταϊκά</u>	85
5.1.1	<u>Μοντελοποίηση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος</u>	87
5.2	<u>Υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας</u>	88

5.2.1	<u>Μοντελοποίηση αιολικού συστήματος</u>	89
5.3	<u>Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού/ανεμογεννήτριας</u>	91
5.4	<u>Μοντελοποίηση γεννήτριας diesel</u>	94
5.5	<u>Κριτήρια για την επιλογή υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας</u>	95
5.5.1	<u>Πιθανότητα απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability)</u>	95
5.6	<u>Ανάλυση κόστους</u>	96
6	<u>Συμπεράσματα</u>	97
	<u>Βιβλιογραφία</u>	99

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας	11
Σχήμα 1.2. Το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο στο εκλειπτικό επίπεδο	14
Σχήμα 1.3: Η θέση του ήλιου σε σχέση με κεκλιμένες επιφάνειες.....	15
Σχήμα 2.1. Απεικόνιση ηλιακού θερμοσίφωνα	25
Σχήμα 2.2. Απεικόνιση λειτουργίας ολοκληρωμένου συστήματος συλλέκτη-δεξαμενής	25
Σχήμα 2.3. Αντλία θερμότητας νερού χρήσης.....	26
Σχήμα 2.4. Σύστημα θέρμανσης νερού πισίνας με βοηθητικό θερμοαντήρα.....	27
Σχήμα 2.5. Σύστημα αέρα θέρμανσης νερού χρήσης.....	27
Σχήμα 2.6. Σύστημα θέρμανσης νερού ανοιχτού τύπου	28
Σχήμα 2.7. Σύστημα κλειστού τύπου θέρμανσης νερού	29
Σχήμα 2.8. Ολοκληρωμένο σύστημα αέρα θέρμανσης χώρου και νερό χρήσης.....	29
Σχήμα 2.9. Ολοκληρωμένο σύστημα νερού θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης	30
Σχήμα 2.10. Απεικόνιση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη και λειτουργίας αυτού.....	32
Σχήμα 2.11. Επίπεδος συλλέκτης με θερμοαπαγωγό μέσο τον αέρα.....	34
Σχήμα 2.12. Απεικόνιση δομής και λειτουργίας μιας σωλήνωσης κενού.....	37
Σχήμα 2.13. Συνθετικός παραβολικός συλλέκτης	39
Σχήμα 3.1. Σύστημα πλέγματος	43
Σχήμα 3.2. Μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου	46
Σχήμα 3.3. Πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου	46
Σχήμα 3.4. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου	49
Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V ενός Φ/B στοιχείου	50
Σχήμα 3.6: Αρχή λειτουργίας της PEM κυψέλης	60
Σχήμα 3.7: Αρχή λειτουργίας της AFC κυψέλης.....	61
Σχήμα 3.8: Αρχή λειτουργίας της PAFC κυψέλης.....	62
Σχήμα 3.9: Αρχή λειτουργίας της MCFC κυψέλης	63
Σχήμα 3.10: Αρχή λειτουργίας της SOFC κυψέλης.....	63
Σχήμα 3.11: Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού - κυψέλης υδρογόνου	65
Σχήμα 4.1. Αναστροφέας.....	68
Σχήμα 4.2. Διάγραμμα μετατροπής.....	69
Σχήμα 4.3: Συσσωρευτής.....	71
Σχήμα 4.4. Τύπος 'Α'	72

Σχήμα 4.5. Τύπος 'Κ'	72
Σχήμα 4.6. Τύπος 'Θ'	73
Σχήμα 4.7. Τύπος 'Λ'	73
Σχήμα 4.8. Τυπος 'Λ LIGHT'	74
Σχήμα 4.9. Τύπος 'ΣΙ'	74
Σχήμα 4.10. Τύπος 'ΣΙ XL'	74
Σχήμα 4.11. Τύπος "ΣΙΙ"	75
Σχήμα 4.12. Τύπος 'Ω'	75
Σχήμα 4.13. Τύπος 'Γ'	75
Σχήμα 4.14. Συστήματα ανίχνευσης ηλίου.....	76
Σχήμα 4.15. Ηλεκτρολύτης HydroFill Pro	79
Σχήμα 4.16. Οικιακή παραγωγή υδρογόνου	79
Σχήμα 4.17. Κυψέλη υδρογόνου.....	80
Σχήμα 4.18. Οικία με εγκατάσταση υδρογόνου	80
Σχήμα 4.19. Οικία με ηλιοθερμική ενέργεια	81
Σχήμα 4.20. Δοχείο αδρανείας-εναλλάκτης θερμότητας	82
Σχήμα 4.21. Ρυθμιστής παροχής.....	83
Σχήμα 4.22. Κατοικία στη Κέρκυρα	83
Σχήμα 5.1. Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.....	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Οι διορθωτικοί συντελεστές της άμεσης ακτινοβολίας.....	18
Πίνακας 4.1. Στοιχεία της εγκατάστασης στην οικία στην Κέρκυρα.	84

1 Εισαγωγή

Η υποβάθμιση του περιβάλλοντος και η εξάντληση των συμβατικών, μη ανανεώσιμων καυσίμων αποτελεί ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο πλανήτης μας. Το θέμα αυτό βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος Παγκόσμιων Οργανισμών, Κυβερνήσεων, Ερευνητικών Κέντρων, των ενδιαφερόμενων παραγωγών και χρηστών ενέργειας, αλλά και όλων των ενημερωμένων πολιτών.

Η αναζήτηση της απαραίτητης ενέργειας από τον άνθρωπο, η επάρκεια των αποθηκών/πηγών της, η βέβαιη και ταχεία εξάντληση μερικών από αυτές, οι βέλτιστοι τρόποι εκμετάλλευσης και εξοικονόμησής της, τα οικονομικά, κοινωνικά και ηθικά προβλήματα που δημιουργούνται από την ανισοβαρή, άλλοτε αλόγιστη και άλλοτε ανεπαρκή χρήση της, καθώς και η μεγάλη και αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τους μηχανισμούς και τα συστήματα μετατροπής και μεταφοράς της ενέργειας, συνιστούν το ενεργειακό/περιβαλλοντικό πρόβλημα. Ένα από τα κρισιμότερα, σήμερα, προβλήματα του ανθρώπου.

Για τον λόγο αυτόν, έχει ξεκινήσει μια παγκόσμια προσπάθεια για τη μείωση αυτών των επιπτώσεων, με την ορθολογική χρήση της ενέργειας και την εφαρμογή τεχνολογιών εξοικονόμησής της. Επίσης, με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων αυτών, προωθείται η εκμετάλλευση φιλικών προς το περιβάλλον (και τον άνθρωπο) Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(ΑΠΕ), συμβάλλοντας έτσι καθοριστικά στην αειφόρο ανάπτυξη.

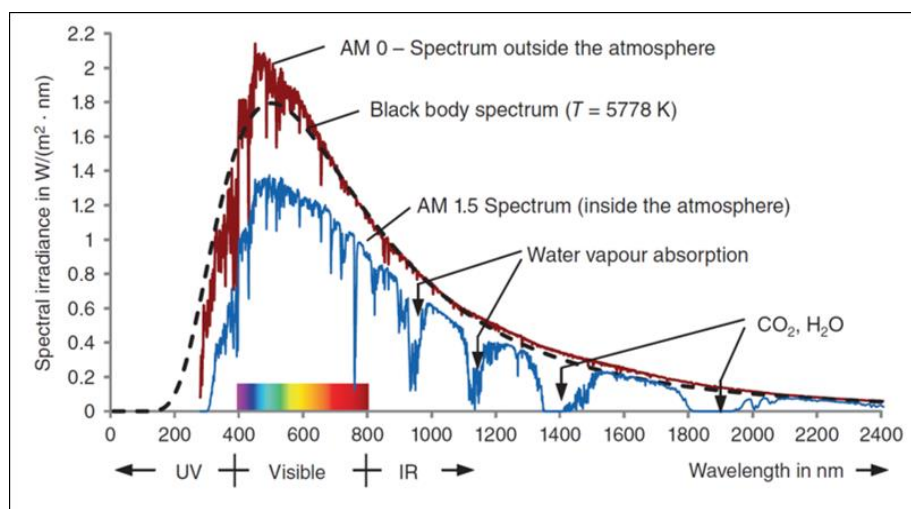
Αν και είναι γνωστό ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα με συγκριτικά πλεονεκτήματα ως προς τις μορφές ΑΠΕ, εντούτοις, δεν παρουσιάζει ποσοστό αξιοποίησής τους σε ικανοποιητικό βαθμό. Μεταξύ των παραγόντων που συμβάλλουν στη μη επιθυμητή αξιοποίηση των ΑΠΕ, μπορεί να αναφερθεί και η άγνοια-καχυποψία για την περιβαλλοντική συμβατότητα των έργων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν. Βέβαια, σε παγκόσμιο επίπεδο, γίνεται όλο και πιο έντονα αποδεκτό το γεγονός, ότι η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ συνδυάζεται και συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη, σε αντίθεση και πάντα σε σύγκριση με τα προβλήματα που προκαλούνται από την εξόρυξη και χρήση συμβατικών καυσίμων.

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της. Η ηλιακή ενέργεια έχει δύο σημαντικά μειονεκτήματα και τέσσερα εξίσου σημαντικά πλεονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα είναι ότι είναι διάχυτη σε όλη την επιφάνεια της γης και για να συγκεντρωθούν αξιόλογες ποσότητες χρειάζονται δαπανηρές εγκαταστάσεις και δεν είναι πάντα διαθέσιμη όταν χρειάζεται. Τα πλεονεκτήματα είναι ότι είναι απεριόριστη σε ποσότητα, έχει μηδαμινά έξοδα λειτουργίας, δεν υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης από την εκμετάλλευσή της και είναι ισοκατανεμημένη σε χώρες με το ίδιο γεωγραφικό πλάτος. Το ποσόν της εκπεμπόμενης ηλιακής ενέργειας εκτιμάται περίπου σε $1.5 \cdot 10^{18}$ kWh/έτος, και είναι 25,000 φορές μεγαλύτερο από τη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας που ανέρχεται σε $60 \cdot 10^{12}$ kWh/έτος. Παρόλα αυτά, είναι βέβαιο πως η ηλιακή ενέργεια έχει ένα «κόστος συλλογής», που καθορίζει τα όρια εφαρμογής της, με τα σημερινά δεδομένα κόστους θερμικής ενέργειας και προδιαγράφει το μελλοντικό πεδίο εφαρμογής της.

Σήμερα είναι κοινώς αποδεκτό ότι τα ηλιακά συστήματα παρέχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, συνεισφέροντας σε μια αειφόρο προοπτική των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

1.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία κατανέμεται σε ευρύ φάσμα μήκους κύματος. Η φασματική καμπύλη έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, πάνω στην επιφάνεια της αλλά και το ορατό τμήμα της θερμικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.1: Η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας [66].

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαχωρίζεται βάση του μήκους κύματος, της συχνότητας και τον αριθμό κυμάτων, η συχνότητα είναι αμετάβλητη όταν διαπερνά διάφορα υλικά σε αντίθεση με το μήκος κύματος. Η συχνότητα ορίζεται ως:

$$f = \frac{c_0}{\lambda_{\text{κενό}}} = \frac{c}{\lambda_{\text{υλικού}}} \quad (1.1)$$

Όπου $c_0=2.988*10^8$ m/s, η ταχύτητα κίνησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο κενό. Το μήκος κύματος έχει χρησιμοποιούμενες μονάδες το millimeter(mm), το micrometer(μm) το nanometer(nm) και το Angstrom($1\text{A}=10^{-4}\mu\text{m}$).

Η θερμική ακτινοβολία συμπεριλαμβάνει μήκη κύματος από 0.2-1000 μm ενώ το ορατό τμήμα είναι μεταξύ 0.39 και 0.77 μm . Το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα μικρά μήκη κύματος μεταξύ 0.30 με 4 μm καθώς το 99% της ηλιακής ενέργειας περικλείεται μεταξύ των 0.25 και έως 4 μm [1].

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίζεται σε άμεση και διάχυτη και κατά συνέπεια το άθροισμα τους ορίζει την ολική ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία συμβολίζεται με $G(\text{W}/\text{m}^2)$ για την στιγμιαία ένταση, με $I(\text{J}/\text{m}^2)$ κατά την ωριαία ακτινοβολία και με $H(\text{kWh}/\text{m}^2)$ η ημερήσια ή μηνιαία ακτινοβολία.

Η άμεση ακτινοβολία ορίζεται ως την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει απευθείας στην επιφάνεια της Γης χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από την απόσταση ήλιου-Γης, την απόκλιση του ηλίου, το ύψος του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση του εδάφους, την απορρόφηση και την διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα και συμβολίζεται με το δείκτη 'b'. Αντίστοιχα η διάχυτη ακτινοβολία ορίζεται ως την ηλιακή ακτινοβολία που έχει φθάσει στην επιφάνεια της Γης μετά από αλλαγή κατεύθυνσης είτε λόγω ανάκλασης είτε λόγω σκέδασης εντός της ατμόσφαιρας και συμβολίζεται με το δείκτη 's', αλλά είτε και ύστερα από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης και συμβολίζεται με το δείκτη 'r'. Η συνολική διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι το άθροισμα των δυο επιμέρους ακτινοβολιών, συμβολίζεται με το δείκτη 'd' και εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, την ποσότητα και την ποιότητα των νεφών που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα [1].

1.2 Γεωμετρικές παράμετροι

Ο ηλιακός χρόνος (HX) είναι μια απαραίτητη τιμή για τον υπολογισμό των ηλιακών γωνιών αλλά δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο (TX) έτσι πρέπει να διορθωθεί σύμφωνα με τη διαφορά του τοπικού μεσημβρινού (L_T) με το μεσημβρινό ($L_{στ}$) και της εξίσωσης χρόνου που περιλαμβάνει τις μεταβολές στο ρυθμό περιστροφής της Γης χρησιμοποιώντας σχέση του Watt. Ακόμα μια διόρθωση μπορεί να απαιτείται αν πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί για τη θερινή περίοδο (τελευταία Κυριακή Μαΐου-τελευταία Κυριακή Οκτωβρίου) με την αφαίρεση 60 min από την παρακάτω σχέση [2].

$$HX = TX \pm 4(L_{στ} - L_T) + E \text{ (min)} \quad (1.2)$$

Όπου το (+) ισχύει για το δυτικό ημισφαίριο και το (-) για το ανατολικό ενώ ο διορθωτικός συντελεστής E δίνεται από την σχέση:

$$E = 9.87 * \sin(2 * B) - 7.53 * \cos(B) - 1.5 * \sin(B) \quad (1.3)$$

Με $B = \frac{360 * (D-81)}{364}$ και το D, την Ιουλιανή μέρα του χρόνου.

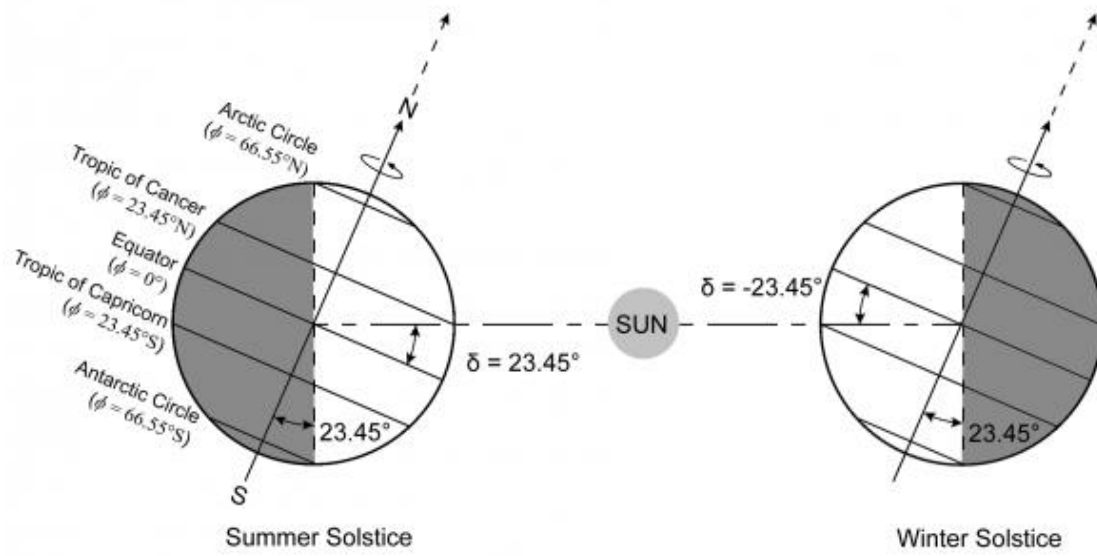
Η Γη κινείται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά με μια μικρή εκκεντρότητα έτσι η ετήσια πορεία της απόστασης Γης-ήλιου έχει ως αποτέλεσμα $\pm 3.4\%$ μεταβολή του ποσού της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Ο διορθωτικός συντελεστής εκκεντρότητας (E_o) υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$E_o = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360 * D}{365}\right) \quad (1.4)$$

Η περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της σε σχέση με τον ήλιο προκαλεί τις εποχιακές αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Η γωνία του κύριου άξονα της Γης και της κάθετου με το εκλειπτικό επίπεδο είναι σταθερή στις 23.5° . Η ηλιακή απόκλιση (δ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της Γης και του ήλιου με το ελλειπτικό επίπεδο και μεταβάλλεται κατά το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο από -23.5° έως $+23.5^\circ$ αντίστοιχα. Η γωνιακή θέση του ήλιου κατά το

μεσημέρι σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού μπορεί να οριστεί από την εξίσωση Cooper [2]:

$$\delta = 23.45 * \sin \left[\frac{360 * (D + 284)}{365} \right] \quad (1.5)$$



Σχήμα 1.2: Το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο στο εκλειπτικό επίπεδο [67].

Η ωριαία γωνία απόκλισης (ω) ορίζεται ως τη μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό λόγω της περιστροφής της Γης στον άξονα με 15° ανά ώρα λαμβάνοντας αρνητικές τιμές πριν το μεσημέρι και θετικές μετά. Έτσι ο υπολογισμός της γωνίας απόκλισης πραγματοποιείται με την παρακάτω σχέση [2]:

$$\omega = 15 * (HX - 12) \quad (1.6)$$

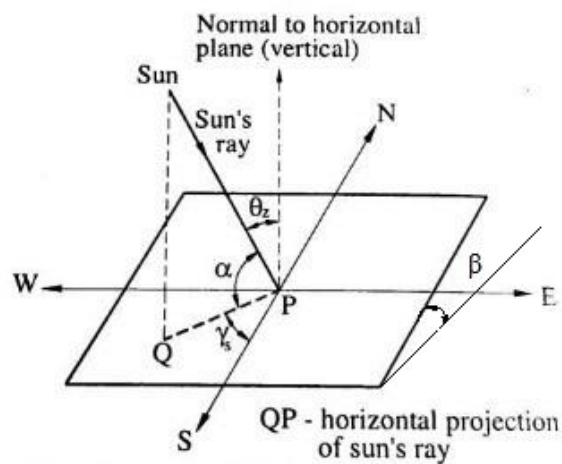
Η ζενιθιακή γωνία (θ_z) είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας που ενώνει τη θέση του παρατηρητή και του ήλιου, κυμαίνεται από 0° έως 90° . Το ηλιακό ύψος (α) είναι η συμπληρωματική γωνία της ζενιθιακής ($\alpha + \theta_z = 90^\circ$) καθώς και το ύψος του ήλιου πάνω από τον παρατηρητή. Η ζενιθιακή γωνία υπολογίζεται μέσω μιας τριγωνομετρικής σχέσης μεταξύ του ήλιου και της εκάστοτε οριζόντιας επιφάνειας [3].

$$\cos \theta_z = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) = \sin(\alpha) \quad (1.7)$$

Όπου φ , το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή που βόρεια του ισημερινού λαμβάνει θετικές τιμές ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$).

Η αζιμούθια γωνία επιφάνειας (γ_s) ορίζεται ως η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ευθείας που ενώνει ένα σημείο της επιφάνειας της Γης με το κέντρο του ηλιακού δίσκου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, λαμβάνοντας τιμές μηδενικές για το νότιο προσανατολισμό, αρνητικές για το ανατολικό και θετικές για δυτικό ($-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$).

Η κλίση β είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου της επιφάνειας και του οριζόντιου επιπέδου και λαμβάνει τιμές από 0° έως 180° [3].



Σχήμα 1.3: Η θέση του ήλιου σε σχέση με κεκλιμένες επιφάνειες [68].

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια κάθετη επιφάνεια στις ηλιακές ακτίνες στο όριο της ατμόσφαιρας ισούται με την εξής σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} * E_o \quad (1.8)$$

Όπου G_{sc} , η ηλιακή σταθερά ίση με 1367 W/m^2 και E_o , ο διορθωτικός συντελεστής εκκεντρότητας. Αντίστοιχα για μια οριζόντια επιφάνεια η εξίσωση θα διαμορφωνόταν ως εξής:

$$G_o = G_{sc} * E_o * \cos \theta_z \quad (1.9)$$

1.3 Εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού ηλιακής ακτινοβολίας

Η μελέτη ενός ηλιακού συστήματος απαιτεί δεδομένα και μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας για την καθορισμένη περιοχή καταγεγραμμένα από διάφορες υπηρεσίες με σκοπό την άντληση πληροφοριών. Η διαχείριση αυτών των μετρήσεων θα πραγματοποιηθεί με μοντέλα τα οποία αποδίδουν με σχετική ακρίβεια την ηλιακή ακτινοβολία μιας περιοχής σύμφωνα με τα δοθέντα στοιχεία. Τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε δυο κατηγορίες τα ατμοσφαιρικά και τα εμπειρικά. Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα βασίζονται σε κλιματολογικά στοιχεία και εξισώσεις που καταδεικνύουν τα φυσικά φαινόμενα που υφίστανται όταν η ηλιακή ακτινοβολία διατρέχει την ατμόσφαιρα. Τα εμπειρικά μοντέλα δημιουργούνται από τα διάφορα δεδομένα μιας περιοχής και μέσω εμπειρικών σχέσεων μπορούν να προσαρμοστούν και για άλλες περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά. Το κάθε μοντέλο επιλέγεται ανάλογα με τα υπάρχοντα δεδομένα και στοιχεία αλλά και την ακρίβεια πρόβλεψης.

1.3.1 Το μοντέλο του Angstrom

Το μοντέλο συσχετίζει τη μέση μηνιαία ημερήσια τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας (\bar{H}) προς τη μέση ημερήσια ακτινοβολία καθαρού ουρανού σε οριζόντιο επίπεδο (\bar{H}_c) σε μια συγκεκριμένη περιοχή με συγκεκριμένο μέσο ηλιοφάνειας, ως παραλλαγή αυτού ο Page αντικατέστησε τη μέση ημερήσια ακτινοβολία καθαρού ουρανού με την ημερήσια ακτινοβολία που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (\bar{H}_o). Η εξίσωση είναι η εξής:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (1.10)$$

Όπου n , η μέση μηνιαία ημερήσια ηλιοφάνεια της περιοχής για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, N , η μέση μηνιαία ηλιοφάνεια καθαρού ουρανού για τα ίδια δεδομένα με τη n από την ανατολή ως τη δύση του ηλίου με τη σχέση να ορίζεται ως:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (1.11)$$

Οι α και β είναι εμπειρικές σταθερές που για την Ελλάδα δίνονται κατά προσέγγιση [3]:

$$\alpha = 0.395 - 1.247 * \left(\frac{n}{N}\right) + 2.68 * \left(\frac{n}{N}\right)^2 - 1.674 * \left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (1.12)$$

$$b = 0.395 + 1.384 * \left(\frac{n}{N}\right) - 3.249 * \left(\frac{n}{N}\right)^2 + 2.055 * \left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (1.13)$$

1.3.2 Το μοντέλο του Hottel

Βάση του μοντέλου αυτού πραγματοποιείται ο υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$G_{cb} = G_{on} * \tau_b * \cos \theta_z \quad (1.14)$$

Με τ_b , ο δείκτης ακτινικής μεταφοράς ο οποίος εκφράζεται σαν το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας και δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_b = a_0 + a_1 * e^{\frac{-k}{\cos \theta_z}} \quad (1.15)$$

Οι σταθερές της εξίσωσης προσδιορίζονται ως ακολούθως:

$$a_0 = r_0 * a_2, a_1 = r_1 * a_3, k = r_k * k_1 \quad (1.16)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= 0.4237 - 0.00821 * (6 - z)^2, a_3 \\ &= 0.5055 + 0.00595 * (6.5 - z)^2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

$$k_1 = 0.2711 + 0.01858 * (2.5 - z)^2 \quad (1.18)$$

Όπου z, το ύψος της περιοχής σε km.

Πίνακας 1.1: Οι διορθωτικοί συντελεστές της άμεσης ακτινοβολίας

Κλιματολογικές συνθήκες	r₀	r₁	r_k
Τροπικό κλίμα	0.95	0.98	1.02
Μέσα γεωγραφικά πλάτη-καλοκαίρι	0.97	0.99	1.02
Βόρεια πλάτη-καλοκαίρι	0.99	0.99	1.01
Μέσα γεωγραφικά πλάτη-χειμώνα	1.03	1.01	1.00

Για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση με τον παράγοντα διάχυτης ακτινοβολίας (τ_d) να είναι εν συναρτήσει του δείκτη ακτινικής μεταφοράς [4]:

$$\tau_d = \frac{G_{cd}}{G_0} = 0.2710 - 0.2939 * \tau_b \quad (1.19)$$

1.3.3 Το μοντέλο της ASHRAE

Το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει την άμεση ακτινοβολία με καθαρό ουρανό σε οριζόντιο επίπεδο:

$$I_{bn} = A * e^{(-B * \sec \theta_z)} \quad (1.20)$$

Με A συμβολίζεται, η ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας (W/m^2) με μηδενική αέρια μάζα. Με B συμβολίζεται η οπτική διαπερατότητα όπου και οι δυο παράμετροι εξαρτώνται από την εποχιακή μεταβολή της απόστασης Γης-ήλιου και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υδρατμούς.

Η σχέση υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας είναι η παρακάτω ενώ δεν συμπεριλαμβάνει την ανακλώμενη διάχυτη ακτινοβολία [3]:

$$I_d = C * I_{bn} \quad (1.21)$$

Με C, να είναι εξαρτώμενη παράμετρος όπως το A, B.

Η ολική ακτινοβολία δίνεται με την εξίσωση:

$$I = I_{bn} * \cos \theta_z + I_d \quad (1.22)$$

1.3.4 Τα μοντέλα του δείκτη αιθριότητας

Ο δείκτης αιθριότητας (k_t) ορίζεται ως το πηλίκο της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (I) σε οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη τιμή στο όριο της ατμόσφαιρας (I_o):

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (1.23)$$

Ενώ το ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας (k_d) ορίζεται ως το πηλίκο της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας (I_d) στο οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία:

$$k_d = \frac{I_d}{I} \quad (1.24)$$

Σύμφωνα με τους Liu-Jordan η άμεση ακτινοβολία σε κάθετο επίπεδο (I_{bn}) συσχετίζεται με την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία (I_{on}) που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση Γης-ήλιου, μέσω του ακτινικού δείκτη μεταφοράς (τ_b):

$$I_{bn} = \tau_b * I_{on} \quad (1.25)$$

με

$$\tau_b = \frac{I - I_d}{I_{on} * \cos(\theta_z)} = \frac{I}{I_o} - \frac{I_d}{I} = k_t * \left(\frac{I_d}{I} * \frac{I}{I_o} \right) = k_t * (1 - k_d) \quad (1.26)$$

Σύμφωνα με τους Orgill-Hollands ο συσχετισμός μεταξύ του δείκτη ακτινικής μεταφοράς και του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας μας επιτρέπει τον υπολογισμό της διάχυτης αλλά και άμεσης ωριαίας ακτινοβολίας με σχέση που προέκυψε από δεδομένα σταθμών του Καναδά [5].

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.249 * k_t & , & k_t < 0.35 \\ 1.557 - 1.84 * k_t & , & 0.35 < k_t < 0.75 \\ 0.177 & , & k_t > 0.75 \end{cases} \quad (1.27)$$

Σύμφωνα με το ημιεμπειρικό μοντέλο Stauter-Klein όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πέντε περιοχές των ΗΠΑ αναπτύχθηκαν σχέσεις μεταξύ του ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας και του πηλίκου της ωριαίας ακτινοβολίας προς την ολική ακτινοβολία.

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.1 * \left(\frac{I}{I_o}\right) & , \quad 0 \leq \frac{I}{I_o} < 0.48 \\ 1.11 + 0.0396 * \left(\frac{I}{I_o}\right) - 0.789 * \left(\frac{I}{I_o}\right)^2 & , \quad 0.48 \leq \frac{I}{I_o} < 1.1 \\ 0.2 & , \quad \frac{I}{I_o} \geq 1.1 \end{cases} \quad (1.28)$$

Οι Collares-Pereira και Rabl εξήγαγαν σχέσεις για την ημερήσια τιμή ακτινοβολίας αλλά και για την μέση μηνιαία.

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 & , \quad k_t \leq 0.17 \\ 1.288 - 2.272 * k_t + 9.473 * k_t^2 - 21.865 * k_t^3 + 14.648 * k_t^4 & , \quad 0.17 < k_t < 0.75 \\ -0.54 * k_t + 0.632 & , \quad 0.75 < k_t < 0.8 \\ 0.2 & , \quad k_t \geq 0.8 \end{cases} \quad (1.29)$$

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00635 * (\omega_{ss} - 90) * (0.505 + 0.00455 * (\omega_{ss} - 90)) * \cos(115 * k_t - 103) \quad (1.30)$$

Όπου ω_{ss} , η ωριαία γωνία δύσης σε μοίρες.

Η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{I}{H} = \left(\frac{\pi}{24}\right) * \frac{(\alpha + \beta * \cos \omega) * (\cos \omega - \cos \omega_{ss})}{\sin \omega_{ss} - \left(\frac{2\pi\omega_{ss}}{360}\right) * \cos \omega_{ss}} \quad (1.31)$$

Όπου

$$\alpha = 0.409 + 0.5016 * \sin(\omega_{ss} - 60)$$

$$\beta = 0.6609 - 0.4767 * \sin(\omega_{ss} - 60)$$

Αντίστοιχα η διάχυτη ακτινοβολία ορίζεται ως εξής [5]:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\frac{\pi}{24} * (\cos \omega * \cos \omega_{ss})}{\sin \omega_{ss} - \left(\frac{2\pi\omega_{ss}}{360}\right) * \cos \omega_{ss}} \quad (1.32)$$

1.3.5 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

1.3.5.1 Γεωμετρικός παράγοντας

Ο υπολογισμός της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο ($I_{b,\beta}$) πραγματοποιείται με γνωστή την άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (I_b) μέσω του γεωμετρικού παράγοντα (r_b):

$$r_b = \frac{I_{b,\beta}}{I_b} = \left(\frac{(\cos(\varphi - \beta) * \cos \delta * \cos \omega) + (\sin(\varphi - \beta) * \sin \delta)}{(\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega) + (\sin \varphi * \sin \delta)} \right) \quad (1.33)$$

Όπου η εξίσωση ισχύει αν η κεκλιμένη επιφάνεια έχει νότιο προσανατολισμό με $\gamma_s=0$.

1.3.5.2 Ισοτροπικό μοντέλο

Κατά το ισοτροπικό μοντέλο υπολογίζεται η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο ως άθροισμα της διάχυτης συνιστώσας της ακτινοβολίας (I_s) και της ανακλώμενης (I_r), οι οποίες προέρχονται ομοιόμορφα από τον ουράνιο θόλο [2]:

$$I_{d,\beta} = I_s + I_r \quad (1.34)$$

Όπου

$$I_s = 0.5 * I_d * (1 + \cos \beta) \quad (1.35)$$

και

$$I_r = 0.5 * I * \rho * (1 - \cos \beta) \quad (1.36)$$

με ρ , την αντανакλαστικότητα της οποιασδήποτε επιφάνειας που προσκρούσει η ακτινοβολία, επί παραδείγματι $\rho=2$ για το έδαφος και $\rho=7$ για το χιόνι.

1.3.5.3 Το ανισοτροπικό μοντέλο Klucher

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο λαμβάνεται υπόψη η ηλιοπεριφερειακή περιοχή όπου τα ποσοστά της διάχυτης ακτινοβολίας είναι έντονα και μια περιοχή στον ορίζοντα που και εκεί υπάρχουν μεγάλα ποσοστά διάχυτης.

$$I_s = 0.5 * I_d * (1 + \cos \beta) * \left(1 + F * \sin^2 \left(\frac{\beta}{2}\right) * 1 + F * \cos^2 \theta * \sin^3 \theta_z\right) \quad (1.37)$$

$$\text{Με } F = 1 - \left(\frac{I_d}{I}\right)^2$$

1.3.5.4 Το μοντέλο του Hay

Το μοντέλο αυτό περιγράφει την ισοτροπικότητα της διάχυτης ακτινοβολίας αλλά και την ηλιοπεριφερειακή περιοχή:

$$I_s = I_d * \left[\frac{(I - I_d) * r_b}{I_o} + 0.5 * (1 + \cos \beta) * \left(1 - \frac{I - I_d}{I_o}\right) \right] \quad (1.38)$$

Η ημερήσια ακτινοβολία για το ηλιοπεριφερειακό μοντέλο είναι:

$$H_s = H_d * r_b \quad (1.39)$$

Η ημερήσια ακτινοβολία για το ισοτροπικό μοντέλο είναι:

$$H_s = 0.5 * H_d * (1 + \cos \beta) \quad (1.40)$$

2 Παραγωγή θερμικής ενέργειας

Η παραγωγή θερμικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη την ηλιακή ενέργεια χωρίζεται στα εξής δυο συστήματα, τα ενεργητικά που αναλύονται εκτενώς παρακάτω αλλά και στα παθητικά ηλιοθερμικά συστήματα, τα οποία στηρίζονται στη βιοκλιματική αρχιτεκτονική¹.

2.1 Ενεργητικά ηλιοθερμικά συστήματα

Το ηλιοθερμικό σύστημα έχει την ικανότητα παραγωγής θερμικής ενέργειας με σκοπό την θέρμανση ενός οικιακού ή βιομηχανικού χώρου ή τη θέρμανση του νερού χρήσης. Κάθε σύστημα από τα παραπάνω μπορεί να είναι ξεχωριστό ή combisystem, δηλαδή θέρμανση χώρου και νερού χρήσης ταυτοχρόνως. Η ταξινόμηση των ενεργητικών συστημάτων κατά το πρότυπο ISO/DIS 9488² (Technical Committee ISO/TC 180) είναι οι εξής:

- Τα αυτόνομα συστήματα χωρίς χρήση βοηθητικής πηγής, επί παραδείγματι αντλία θερμότητας.
- Τα συστήματα προθέρμανσης που χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του νερού με σκοπό τη τροφοδότηση του σε άλλα συμβατικά συστήματα θέρμανσης.
- Τα υβριδικά συστήματα στα οποία έχουμε τη χρήση βοηθητικής θερμαντικής πηγής ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα ή μη ηλιακής ενέργειας.

Ένα ενεργητικό σύστημα αποτελείται απαραίτητως από έναν ηλιακό συλλέκτη-συνήθως χρησιμοποιούμε έναν επίπεδο ή κενού και λιγότερο συχνά έναν συνθετικό παραβολικό, δεξαμενές αποθήκευσης ενέργειας, θερμικούς εναλλάκτες, σύστημα σωληνώσεων, θερμοστάτες, αντλίες ή ανεμιστήρες(ώστε να επιτευχθεί η εξαναγκασμένη κυκλοφορία του ρευστού) και τριοδικές βαλβίδες [41].

¹ Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική αφορά το σχεδιασμό κτιρίων και χώρων με βάση την τοποθεσία και το κλίμα με σκοπό την εξασφάλιση θερμικής άνεσης αλλά και οπτικής έχοντας αξιοποιήσει την ηλιακή ακτινοβολία αλλά και άλλα περιβαλλοντικά φαινόμενα [43].

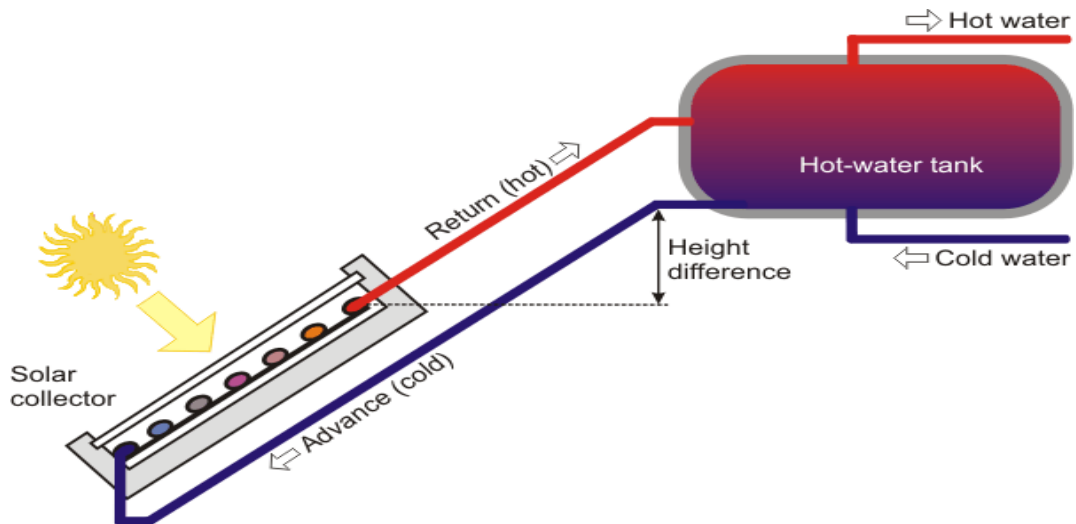
² Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποιήσεων (ISO) εξέδωσε το πρότυπο ISO 9488 με σκοπό τον ορισμό βασικών εννοιών που σχετίζονται με την ηλιακή ενέργεια όπως τα μέρη που απαρτίζουν ένα ενεργητικό σύστημα καθώς και την ηλιακή γεωμετρία, η οποία αναλύθηκε επί του πρώτου κεφαλαίου της παρούσας εργασίας.

2.1.1 Ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού χρήσης

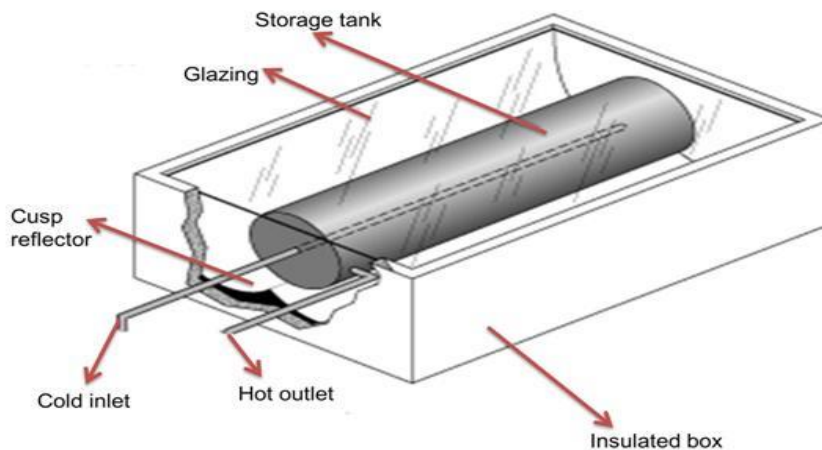
Τα συστήματα θέρμανσης νερού χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες σε αυτή του ανοιχτού τύπου και του κλειστού τύπου. Στο σύστημα ανοιχτού τύπου το νερό χρήσης θερμαίνεται απευθείας εντός του ηλιακού συλλέκτη σε αντίθεση με του κλειστού τύπου, όπου εντός του συλλέκτη θερμαίνεται το θερμοαπαγωγό ρευστό το οποίο με τη βοήθεια θερμικού εναλλάκτη μεταφέρει τη θερμότητα στο νερό. Άλλη μια κατηγοριοποίηση στην οποία υπόκεινται τα συστήματα θέρμανσης νερού είναι αυτή των παθητικών και ενεργητικών συστημάτων.

2.1.1.1 Παθητικά συστήματα

Κατά την έννοια του παθητικού συστήματος εννοείται ότι το νερό χρήσης θερμαίνεται με τη φυσική λειτουργία της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγιμότητας χωρίς τη μεσολάβηση μηχανικών συστημάτων και ηλεκτρικής πηγής. Τα συστήματα που λειτουργούν με αυτό τον τρόπο είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας(ανοιχτού και κλειστού τύπου) και το ολοκληρωμένο σύστημα συλλέκτη-δεξαμενής. Η δεξαμενή αποθήκευσης τοποθετείται οριζόντια πάνω από τον συλλέκτη και σε αυτόν διαρρέει κρύο νερό με την πρόσπτωση ακτινοβολίας το νερό θερμαίνεται και λόγω της χαμηλής του πυκνότητας ανέρχεται προς τη δεξαμενή και από εκεί προς την κατανάλωση. Η δεξαμενή γεμίζει ξανά με κρύο νερό και η διαδικασία είναι αέναη για όσο υπάρχει διαθεσιμότητα ακτινοβολίας. Όμως τα παθητικά έχουν το μειονέκτημα της πιθανής παρουσίασης ψύξης και υπερθέρμανσης του νερού για αυτό κατά τη κατασκευή του συστήματος συνιστούνται εκτονωτικές βαλβίδες, θερμαντήρες, θερμικοί εναλλάκτες και χρήση αντιψυκτικού διαλύματος. Ένα άλλο πρόβλημα είναι και η αντίστροφη θερμοσιφωνική κυκλοφορία κατά την οποία το αποθηκευμένο θερμό νερό της δεξαμενής χάνει τα ποσά θερμότητας του, για αυτό φροντίζεται κατά την κατασκευή του συστήματος ο συλλέκτης και η δεξαμενή να έχουν κάποιες πρακτικές αποστάσεις. Από την άλλη μεριά η δεξαμενή του ολοκληρωμένου συστήματος συνδυάζει συλλέκτη και δεξαμενή αποθήκευσης μαζί καθώς η δεξαμενή είναι τοποθετημένη εντός μονωμένου κουτιού και η ίδια είναι επικαλυμμένη με επίλεκτη επιφάνεια.



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση ηλιακού θερμοσίφωνα[73]



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση λειτουργίας ολοκληρωμένου συστήματος συλλέκτη-δεξαμενής[74]

2.1.1.2 Ενεργητικά συστήματα

Τα επονομαζόμενα συστήματα αναγκαστικής κυκλοφορίας διαθέτουν όπως προαναφέρθηκε ανεμιστήρες, αντλίες, τριοδικές βαλβίδες και κατανομείς ώστε να μεταφέρουν εντός του συστήματος το νερό ή το εκάστοτε εργαζόμενο ρευστό. Σε αντίθεση με τα παθητικά είναι λιγότερο αξιόπιστα λόγω παρεμβολής μηχανικών μέσων αλλά και πιο ακριβά. Όμως πλεονεκτούν στην αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος και του συντελεστή θερμικής απολαβής F_R . Στα ενεργητικά συστήματα συγκαταλέγονται τα συστήματα αντλίας θερμότητας, θέρμανσης πισίνας, αέρα και ανοιχτού, κλειστού τύπου [8].

2.1.1.2.1 Σύστημα αντλίας θερμότητας

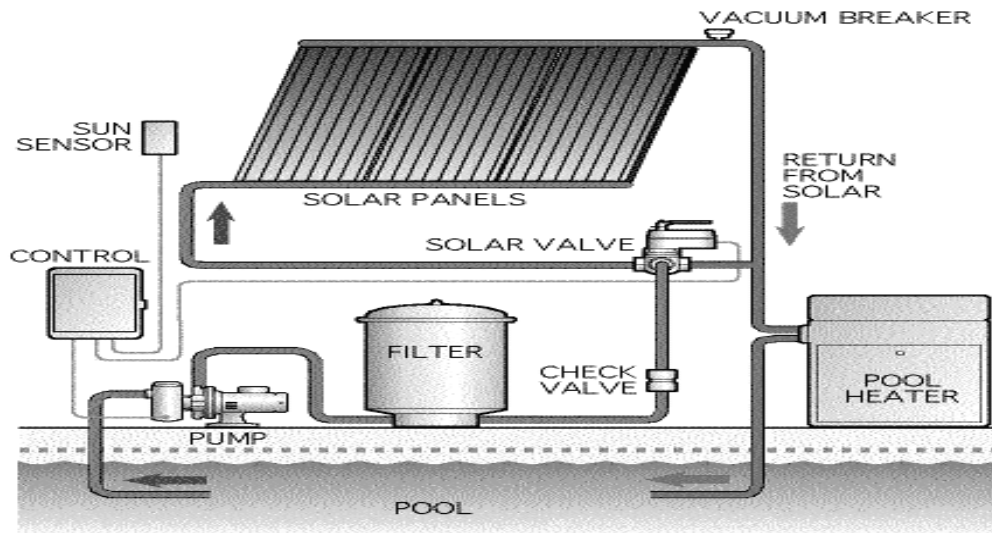
Η αντλία θερμότητας είναι ένα πολλά υποσχόμενο σύστημα με υψηλή απόδοση. Το σύστημα αποτελείται από τον συμπιεστή ο οποίος τροφοδοτείται από ηλεκτρική πηγή, τον ατμοποιητή και το συμπυκνωτή. Ο ατμοποιητής όπως και ο συμπυκνωτής είναι θερμικοί εναλλάκτες. Εντός του ατμοποιητή εισέρχεται ψυκτικό υγρό ο οποίος απορροφάει θερμότητα από το περιβάλλον και το εξερχόμενο ρευστό είναι πλέον αέριο. Εν συνεχεία, ο συμπιεστής αναρροφά το ψυκτικό αέριο το συμπιέζει και οδηγείται προς το συμπυκνωτή ο οποίος περιβάλλει τη δεξαμενή νερού. Τα ποσά θερμότητας του συμπυκνωτή αποβάλλονται και προσδίδονται στο νερό και μέσω μιας εκτονωτικής βαλβίδας το συμπυκνωμένο ψυκτικό υγρό επιστρέφει στον ατμοποιητή όπου και συνεχίζεται ο κύκλος θέρμανσης [44].



Σχήμα 2.3: Αντλία θερμότητας νερού χρήσης.[76]

2.1.1.2.2 Σύστημα θέρμανσης πισίνας

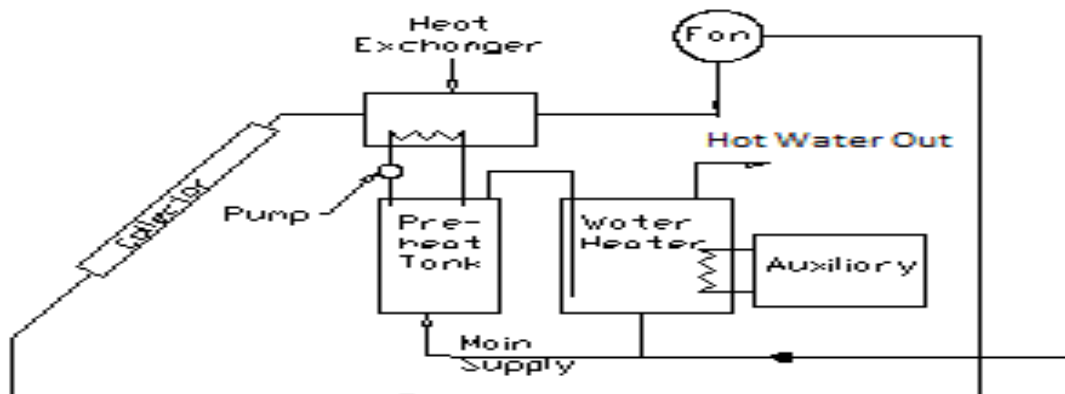
Η θέρμανση πισίνας αποτελεί μια απλή μορφή ανοιχτού τύπου ζέσης νερού. Ένα πίνακας λαμβάνει σήμα από το αισθητήριο ηλιακής ακτινοβολίας και ενεργοποιείται η αντλία της πισίνας η οποία στέλνει το νερό για φιλτράρισμα και στη συνέχεια προς τον ηλιακό συλλέκτη. Συνηθέστερη είναι η χρήση ηλιακού συλλέκτη χωρίς διαφανές κάλυμμα για μείωση κόστους του συστήματος. Αν θεωρείται απαραίτητο χρησιμοποιείται και βοηθητικός θερμαντήρας πριν επιστραφεί στην πισίνα. Το τεχνικό πρότυπο που αφορά την κατασκευή του παραπάνω συστήματος είναι το ISO/TR 12596:1995 [8].



Σχήμα 2.4: Σύστημα θέρμανσης νερού πισίνας με βοηθητικό θερμαντήρα[79]

2.1.1.2.3 Σύστημα θέρμανσης νερού

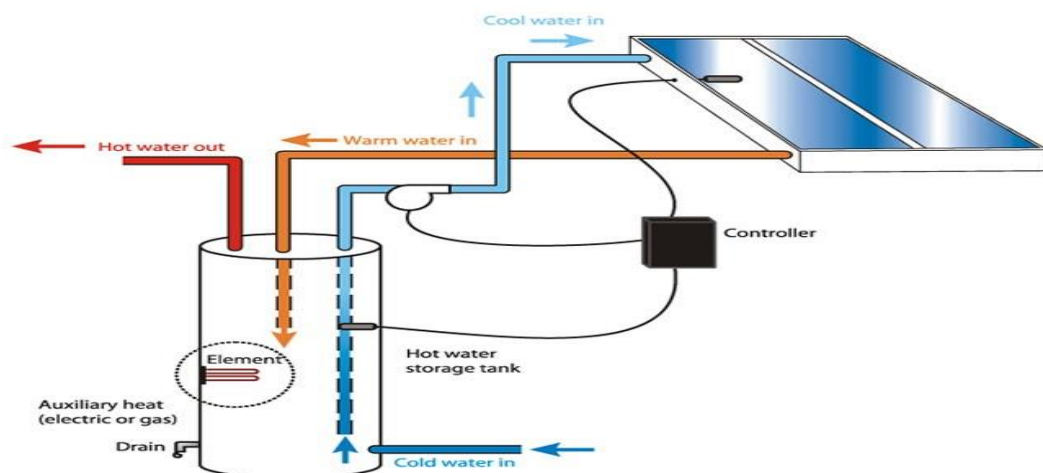
Στα συστήματα αέρα κλειστού τύπου ακολουθείται η παρακάτω λειτουργία. Οι ηλιακοί συλλέκτες διαθέτουν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας τον αέρα ο οποίος μέσω των αεραγωγών καταφθάνει στον εναλλάκτη θερμότητας αέρα-νερού όπου απομαστεύει τη θερμότητα του αέρα και την προσδίδει στο νερό της δεξαμενής προθέρμανσης. Το σύστημα ανάλογα με τους σκοπούς λειτουργίας του διαθέτει και φυγοκεντρικό ανεμιστήρα ο οποίος προωθεί τον αέρα. Στην συνέχεια το νερό καταλήγει στη δεύτερη δεξαμενή αποταμίευσης η οποία διαθέτει ως βοηθητική, θερμική ενέργεια μια ηλεκτρική αντίσταση βυθισμένη μέσα της. Φυσικά στο σύστημα αέρα απαιτείται χρήση ηλεκτρικής πηγής ώστε να τίθενται σε λειτουργία ο ανεμιστήρας, η αντλία, οι θερμοστάτες και η ηλεκτρική αντίσταση.



Σχήμα 2.5: Σύστημα αέρα θέρμανσης νερού χρήσης[74]

2.1.1.2.4 Σύστημα ανοιχτού τύπου

Στο σύστημα αυτό δεν υπάρχει εναλλάκτης θερμότητας εφόσον η θέρμανση του νερού πραγματοποιείται απευθείας από το συλλέκτη. Η αντλία μεταφέρει το κρύο νερό από το κάτω μέρος της δεξαμενής αποθήκευσης και μετά το πέρασμα του από τους συλλέκτες καταλήγει θερμό ξανά στη δεξαμενή. Μέσα στη δεξαμενή βρίσκεται βυθισμένη βοηθητική, ηλεκτρική πηγή. Η αντίστροφη θερμοσιφωνική κυκλοφορία αντιμετωπίζεται και σε αυτό το σύστημα, όμως εδώ ξεπερνιέται με τη χρήση μιας αντεπίστροφης βαλβίδας. Επίσης έχουμε να αντιμετωπίσουμε και το ζήτημα της υπερθέρμανσης και της ψύξης του νερού. Προς αποφυγή της υπερθέρμανσης διατίθεται τριοδική, ηλεκτροκίνητη βάνα η οποία προωθεί το νερό μέσα από τον ανεμιστήρα και το ψύχει. Όσον αφορά την ψύξη χρησιμοποιείται ένας θερμοστάτης για να ελέγχει το άνοιγμα της αντλίας ώστε να ανακυκλοφορήσει θερμό νερό από τη δεξαμενή, προληπτικά δε μπορεί να τοποθετηθεί και μια βαλβίδα απόρριψης πριν τους συλλέκτες.



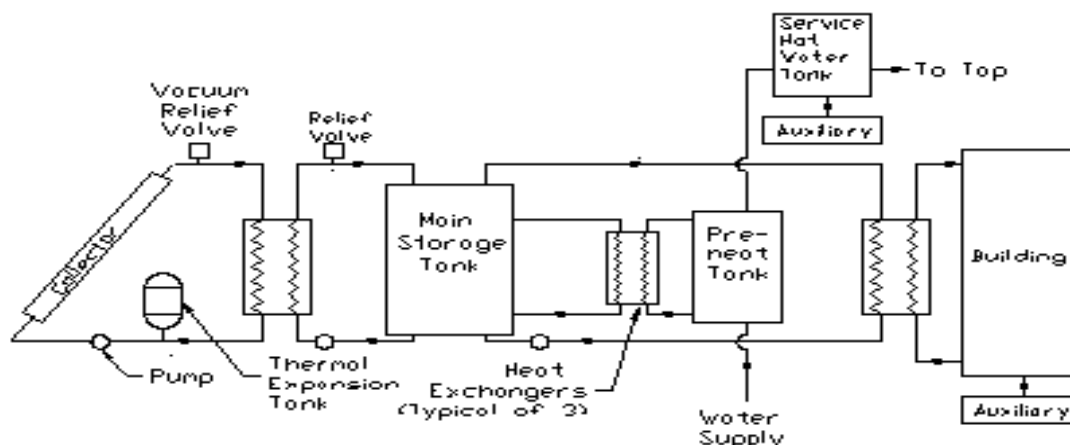
Σχήμα 2.6: Σύστημα θέρμανσης νερού ανοιχτού τύπου[80]

2.1.1.2.5 Σύστημα κλειστού τύπου

Στο σύστημα κλειστού τύπου οι συλλέκτες έχουν ως θερμοαπαγωγό ρευστό αντιψυκτικά διαλύματα τα οποία καταλήγουν στους εναλλάκτες θερμότητας. Οι εναλλάκτες είτε βρίσκονται εσωτερικά της κύριας δεξαμενής αποθήκευσης είτε εξωτερικά και προσδίδουν θερμότητα στο νερό χρήσης. Όπως είναι φυσικό λόγω της λειτουργίας του κλειστού κυκλώματος απαιτείται μια εκτονωτική βαλβίδα και ένα δοχείο εκτόνωσης αμέσως μετά τον εναλλάκτη [7].

2.1.2.2 Σύστημα νερού θέρμανσης χώρου

Στο κύκλωμα νερού θέρμανσης νερού χρήσης που έχει προαναφερθεί, έρχεται να προστεθεί η κύρια δεξαμενή αποταμίευσης, ο θερμικός εναλλάκτης μεταξύ αυτής και της δεξαμενής προθέρμανσης, ο θερμικός εναλλάκτης φορτίου και η βοηθητική πηγή θερμότητας. Ο θερμικός εναλλάκτης φορτίου είναι αυτός που μεταφέρει τη θερμότητα από τη δεξαμενή ζεστού νερού προς τον χώρο. Η ενεργοποίηση της βοηθητικής πηγής πραγματοποιείται από το πίνακα ελέγχου μέσω δυο θερμοστατών. Ο πρώτος θερμοστάτης ανιχνεύει τη θερμοκρασία του χώρου και ενεργοποιεί την αντλία φορτίου αν η δεξαμενή ζεστού νερού δεν μπορεί να καλύψει τα θερμικά φορτία του χώρου ο δεύτερος θερμοστάτης ενεργοποιεί τις τριοδικές βαλβίδες και τη βοηθητική πηγή. Η κατασκευή ενός συστήματος νερού μπορεί να μας δημιουργήσει τα γνωστά προβλήματα της υπερθέρμανσης και της ψύξης. Η υπερθέρμανση ξεπερνιέται με χρήση εκτονωτικών βαλβίδων στις δεξαμενές αποθήκευσης. Η ψύξη εκτός της χρήσης αντιψυκτικού διαλύματος απαιτεί και αποστράγγιση του συστήματος με τη χρήση αυτόματης εκκενωτικής βαλβίδας και αεραγωγού.



Σχήμα 2.9: Ολοκληρωμένο σύστημα νερού θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης[83].

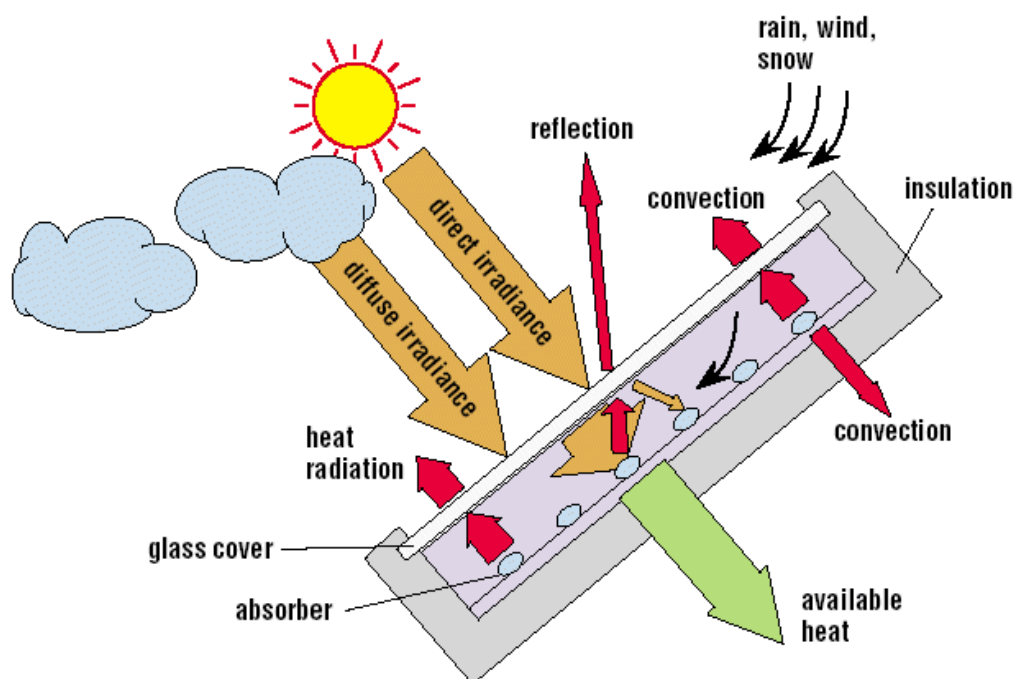
2.2 Ηλιακοί συλλέκτες

Οι συλλέκτες ηλιακής ενέργειας είναι συσκευές οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας σε εσωτερική ενέργεια του μεταφερόμενου μέσου. Η στοιχειώδης λειτουργία αυτού είναι η απορρόφηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, η μετατροπή αυτής σε θερμότητα και η μεταφορά της στο ρευστό που ρέει διαμέσου του συλλέκτη. Η απορροφούμενη ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από το ρευστό απευθείας στο ζεστό νερό χρήσης, στο χώρο ή στη δεξαμενή αποταμίευσης ενέργειας. Οι συλλέκτες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, στους μη συγκεντρωτικούς ή αλλιώς στάσιμους και στους συγκεντρωτικούς. Ένας μη συγκεντρωτικός συλλέκτης έχει την ίδια περιοχή σύλληψης και απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας σε αντίθεση με τους ηλιοανιχνευτικούς, συγκεντρωτικούς συλλέκτες οι οποίοι συνήθως διαθέτουν κοίλες επιφάνειες αντανάκλασης ώστε να συλλαμβάνουν και να συγκεντρώνουν την ηλιακή δέσμη της ακτινοβολίας σε μια μικρότερη περιοχή. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές μεγάλων θερμοκρασιών είτε ψύξης μέσω απορρόφησης. Οι συλλέκτες μπορούν επίσης να διακριθούν από το θερμοαπαγωγό ρευστό που τους περιρρέει. Η βασική κατηγοριοποίηση των ηλιακών συλλεκτών όμως αφορά την κίνηση και τη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Οι μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες χαρακτηρίζονται από τους παρακάτω τρεις τύπους: α) τους επίπεδους συλλέκτες (FPCs), β) τους συνθετικούς παραβολικούς συλλέκτες (CPCs), γ) τους συλλέκτες σωληνώσεων κενού (ETCs). Αντίστοιχα στην κατηγορία των συγκεντρωτικών εκπίπτουν οι εξής: α) οι γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel (LFRs), β) οι συλλέκτες κυλινδρικού κατόπτρου (CTCs), γ) οι συλλέκτες παραβολικού κατόπτρου (PTCs), δ) οι ανακλαστήρες παραβολικού τύπου (PDRs), ε) οι συλλέκτες ηλιοστατικού τομέα (HFCs) [2].

2.2.1 Επίπεδοι συλλέκτες

2.2.1.1 Αρχή λειτουργίας

Η ηλιακή ακτινοβολία περνάει μέσω του διάφανου καλύμματος και προσκρούει σε μια σκουρόχρωμη απορροφητική επιφάνεια με μεγάλη απορροφητικότητα, ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας απορροφάται από την πλάκα και μέσω του συστήματος σωλήνων κυκλοφορεί στο θερμοαπαγωγό ρευστό ώστε να μεταφερθεί εν συνεχεία προς χρήση ή αποθήκευση (Σχήμα 2.10). Το διαφανές κάλυμμα, το οποίο λειτουργεί ως προστατευτικό μέσο, καθώς και η μόνωση που βρίσκεται περιμετρικά του απορροφητήρα μειώνουν τις θερμικές απώλειες του προς το περιβάλλον. Η κύρια ιδιότητα του διάφανου καλύμματος είναι να μειώνει τις απώλειες της ακτινοβολίας από το συλλέκτη διότι το γυαλί είναι διαπερατό στην υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, αλλά είναι σχεδόν αδιαπέραστο από την υπέρυθη ακτινοβολία που εκλύεται από την απορροφητική πλάκα. Έτσι ο επίπεδος συλλέκτης βασίζει την λειτουργία του σε συνθήκες που αντιστοιχούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται για θέρμανση νερού χρήσης στον οικιακό αλλά και βιομηχανικό τομέα καθώς επίσης και για θέρμανση χώρων. Η δυνατότητα παραγωγής ζεστού νερού φθάνει τους 40-150°C ανάλογα με το συγκεκριμένο τύπο του συλλέκτη [1].



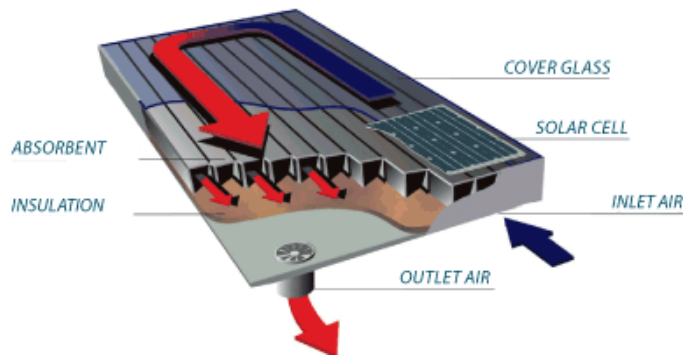
Σχήμα 2.10: Απεικόνιση επίπεδου ηλιακού συλλέκτη και λειτουργίας αυτού[69]

2.2.1.2 Δομή επίπεδου συλλέκτη

Συγκεντρωτικά τα κύρια μέρη ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη είναι τα εξής:

- Το διαφανές κάλυμμα, το οποίο μπορεί να είναι ένα ή περισσότερα φύλλα γυαλιού ή οποιοδήποτε άλλο υποκατάστατο υλικό που μπορεί να μεταβιβάσει την ακτινοβολία. Ανάλογα με τη χρήση του συλλέκτη και την απόδοση που θέλουμε στην αγορά βρίσκουμε και συλλέκτες χωρίς κάλυμμα.
- Οι δίοδοι του ρευστού για την απομάκρυνση θερμότητας, δηλαδή σωληνώσεις ή πτερύγια ή αγωγοί τα οποία διεξάγουν ή καθοδηγούν το θερμοαπαγωγό ρευστό από την εισροή στην εκροή. Οι σωληνώσεις που απαντούνται είναι τύπου σερπαντίνας ή ευθύγραμμου μονής ή διπλής ροής.
- Η απορροφητική πλάκα μπορεί να είναι επίπεδη, κυματοειδής ή αυλακωτή και πάνω σε αυτή ενσωματώνεται το σύστημα σωληνώσεων, πτερυγίων ή αγωγών. Η πλάκα συνήθως για αύξηση της αποδοτικότητάς της διαθέτει επιστροφή ενός στρώματος μεγάλης απορροφητικότητας και μικρής ικανότητας εκπομπής. Το στρώμα ονομάζεται επίλεκτο συλλεκτική επιφάνεια, η οποία επιτυγχάνεται με βαφή και ηλεκτρολυτική απόθεση οξειδίων συγκεκριμένων μετάλλων, χημικές και μηχανικές μέθοδοι διάνοιξης οπών και πτυχώσεων για τον εγκλωβισμό της ακτινοβολίας.
- Η μόνωση που χρησιμοποιείται για τη μείωση των θερμικών απωλειών του απορροφητήρα.
- Το πλαίσιο κατασκευάζεται από αντιδιαβρωτικό μέταλλο περιβάλλει τα παραπάνω στοιχεία προστατεύοντας τα από σκόνη, υγρασία και έντονα καιρικά φαινόμενα.

Οι επίπεδοι συλλέκτες με θερμοαπαγωγό μέσο τον αέρα δεν διαθέτουν σωληνώσεις αλλά αυλακώσεις και σε απλούστερες κατασκευές (απαντώνται και σε συλλέκτες νερού) το ρευστό ρέει κατά μήκος όλης της απορροφητικής πλάκας μεταξύ των δυο πλακών (Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.11. Επίπεδος συλλέκτης με θερμοαπαγωγό μέσω τον αέρα [65]

Μεταλλικά ή υφασμάτινα πλέγματα, λεπτά κυματοειδή μεταλλικά φύλλα ή πορώδεις απορροφητήρες μπορεί να χρησιμοποιούνται με επίλεκτες συλλεκτικές επιφάνειες οι οποίες εφαρμόζονται όταν υψηλά επίπεδα επίδοσης απαιτούνται. Η βασική απαίτηση αυτών των συστημάτων είναι η μεγάλη επιφάνεια επαφής μεταξύ της απορροφητικής πλάκας και του αέρα. Η θερμική ικανότητα του αέρα είναι μικρότερη από αυτή του νερού ως εκ τούτου μεγαλύτερα ποσά ροής αέρα απαιτούνται έχοντας ως αποτέλεσμα και μεγαλύτερη αντλητική ενέργεια. Όπως προαναφέρθηκε στην αγορά υπάρχουν και επίπεδοι συλλέκτες χωρίς διαφανές κάλυμμα χαμηλού κόστους, για εφαρμογές που η θερμοκρασία λειτουργίας τους έχει μικρή διαφορά από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτοί οι συλλέκτες διαθέτουν πλαστικό απορροφητικό φύλλο και στενά περάσματα για το ρευστό [8].

2.2.1.3 Ενεργειακή ισορροπία ενός επίπεδου συλλέκτη

Οι θερμικές απώλειες στον περιβάλλοντα χώρο λόγω της μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγιμότητας και συναγωγιμότητας από τα στοιχεία του συλλέκτη ορίζονται από τον συνολικό ισοδύναμο συντελεστή θερμικών απωλειών U_L . Η μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας του συλλέκτη T_{pm} και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a . Η απορροφούμενη ενέργεια από τον συλλέκτη αρχικά εξαρτάται από τα υλικά των στοιχείων του συλλέκτη, το τ το συντελεστή διαπερατότητας ακτινοβολίας του διαφανούς καλύμματος, το α το συντελεστή απορρόφησης ακτινοβολίας της απορροφητικής πλάκας και το συντελεστή θερμικής απολαβής F_R . Η ωφέλιμη ισχύς είναι η διαφορά μεταξύ της απορροφούμενης ενέργειας της κάθετα προσπίπτουσα ακτινοβολίας, έντασης H_T , από την επιφάνεια A_c και των

θερμικών απωλειών. Ενώ η σχέση ισοδυναμεί με τη παραγόμενη θερμική ενέργεια μέσω του ρευστού του συλλέκτη με T_o , θερμοκρασία εισόδου και T_i , θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το σύστημα σωληνώσεων :

$$\dot{Q} = F_R \cdot A_c [H_T \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)] = \dot{m} C_p (T_o - T_i) \quad (2.1)$$

Ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών U_L με μονάδα $W/m^2 \cdot ^\circ C$ υπολογίζεται σύμφωνα με τη παρακάτω σχέση:

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.2)$$

Ο U_t ορίζεται ως ο συντελεστής θερμικών απωλειών από το πάνω μέρος του συλλέκτη ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό των διαφανών καλυμμάτων του συλλέκτη N , την κλίση του συλλέκτη $\beta(^\circ)$, την ικανότητα εκπομπής του καλύμματος ε_g και του απορροφητήρα ε_p , τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος $T_a(K)$, τη μέση θερμοκρασία του συλλέκτη $T_{pm}(K)$ και τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας $h_w(W/m^2 \cdot ^\circ C)$:

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N + f)} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591N h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \quad (2.3)$$

Με τις παρακάτω εξισώσεις να χαρακτηρίζουν τους συντελεστές:

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$ στην περίπτωση που $0^\circ < \beta < 70^\circ$, ενώ αν ισχύει $70^\circ < \beta < 90^\circ$ θεωρούμε $\beta = 70^\circ$.

$$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right)$$

Ενώ γνωρίζουμε ότι είναι η σταθερά *Stefan-Boltzmann* $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$.

Ο συντελεστής θερμικών απωλειών από το κάτω μέρος του συλλέκτη U_b εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα k και το πάχος L της μόνωσης, καθώς και τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγιμότητας προς το περιβάλλον η οποία μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

$$U_b = \frac{k}{L}$$

Ο U_e συντελεστής θερμικών απωλειών των άκρων ορίζεται από τις απώλειες στην περιοχή των άκρων που προκύπτουν στην επιφάνεια του συλλέκτη A_c . Οι απώλειες των άκρων υπολογίζονται με γνωστά τα εξής μεγέθη, το l πάχος των άκρων, την περίμετρο P και το πάχος d του συλλέκτη.

$$U_e = \frac{k}{l} * P * d / A_c \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής θερμικής απολαβής F_R ορίζεται ως η ποσότητα η οποία συσχετίζει την πραγματική ωφέλιμη ενέργεια του συλλέκτη με τη ωφέλιμη ενέργεια αν όλη η επιφάνεια του συλλέκτη βρισκόταν στη θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού.

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής αποδοτικότητας F' είναι ο λόγος της πραγματικής ωφέλιμης ενέργειας προς την ενέργεια της συλλεκτικής επιφάνειας αν βρισκόταν στη θερμοκρασία του ρευστού στη συγκεκριμένη θέση. Ο συντελεστής εξαρτάται από εσωτερικά μεγέθη του συλλέκτη όπως την απόσταση μεταξύ των σωληνώσεων W , τη διάμετρο της σωλήνωσης D , την εσωτερική διάμετρο της σωλήνωσης D_i αλλά και από το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του τοίχους της σωλήνωσης h_{fi} .

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (2.6)$$

Με C_b , το δεσμό αγωγιμότητας μεταξύ των σωληνώσεων ο οποίος εξαρτάται από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k_b , το πλάτος b και το πάχος γ του δεσμού, $C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma}$.

Και το συντελεστή αποδοτικότητας πτερυγίων F ο οποίος προκύπτει σύμφωνα με τη μεταφορά θερμότητας σε πτερυγωτές επιφάνειες και το νόμο του Fourier,

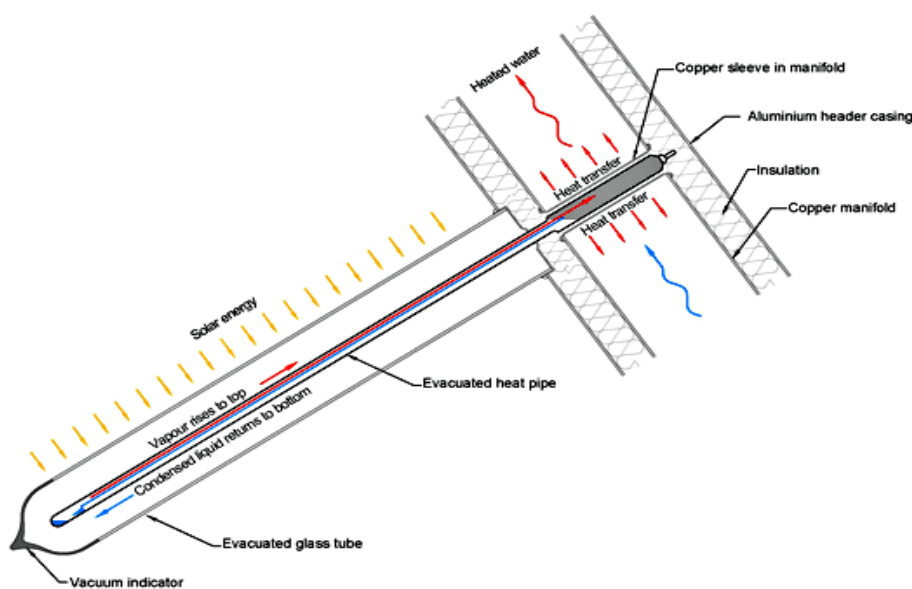
$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (2.7)$$

Ενώ η μεταβλητή m ορίζεται από τον ολικό συντελεστή θερμικών απωλειών U_L , το συντελεστή αγωγιμότητας του υλικού k και του πάχους δ του πτερυγίου $m = \sqrt{\frac{U_L}{k \cdot \delta}}$ [5].

2.2.2 Συλλέκτες κενού

2.2.2.1 Αρχή λειτουργίας

Κάθε σωλήνωση κενού αποτελείται από δυο γυάλινους σωλήνες, αρκετά σκληρούς, φτιαγμένους από βόριο-πυρίτιο ώστε να αντέχουν στις μεγάλες πιέσεις που δημιουργούνται λόγω της διαφοράς πίεσης. Μεταξύ των δυο σωλήνων αυτών βρίσκεται ο χώρος του κενού. Ο εξωτερικός σωλήνας διαθέτει μικρή ανακλαστικότητα και μεγάλη μεταδοτικότητα ώστε να διέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία. Η απορροφητική πλάκα διαθέτει επιλεκτική συλλεκτική επιφάνεια και ένας εσωτερικός, θερμός σωλήνας είναι συνδεδεμένος επάνω της. Το κομμάτι του θερμού σωλήνα που βρίσκεται μέσα στη σωλήνωση κενού συνιστά τον τομέα του ατμοποιητή όπου η θερμότητα απορροφάται και το ρευστό ατμοποιείται από την ηλιακή θερμότητα. Το κενό δημιουργείται ώστε να αναδημιουργείται το φαινόμενο του θερμού και οι εν κενώ συνθήκες να δρουν ως μόνωση, να μην επιτρέπουν τη διαφυγή της βραχυκύματης ακτινοβολίας από το σωλήνα. Στη συνέχεια ο ατμός φθάνει στον τομέα του συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται και απελευθερώνει τη λανθάνουσα θερμότητα του. Η παραπάνω διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη αφού το συμπυκνωμένο ρευστό επιστρέφει στο θερμό σωλήνα από τον κύριο σωλήνα του συλλέκτη [9].



Σχήμα 2.12: Απεικόνιση δομής και λειτουργίας μιας σωλήνωσης κενού[41]

2.2.2.2 Ενεργειακή ισορροπία συλλέκτη σωλήνωσης κενού

Σε σταθερή κατάσταση η ωφέλιμη θερμική ισχύς του συλλέκτη κενού ακολουθεί την ίδια μορφή με τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη έτσι:

$$\dot{Q}_u = A_{ig} F_R (H_T - U_L (T_{ig} - T_a)) \quad (2.8)$$

Ο ολικός συντελεστής θερμικών απωλειών U_L υπολογίζεται από τις θερμικές αντιστάσεις μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού σωλήνα γυαλιού αλλά και μεταξύ του εξωτερικού σωλήνα με το περιβάλλον. Έτσι πρακτικά ο ολικός συντελεστής απωλειών ισούται με τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας της ακτινοβολίας του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα $h_{rad,og}$, τον συντελεστή συναγωγιμότητας του εξωτερικού σωλήνα h_{wp} και τον συντελεστή μεταφοράς ακτινοβολίας του εσωτερικού σωλήνα $h_{rad,in}$:

$$U_L = \varepsilon_{og} \cdot \sigma \frac{(T_{og}^4 - T_s^4)}{(T_{og} - T_a)} + \frac{A_{og}}{A_{ig}} \cdot 0,6 \cdot h_w + \varepsilon_{ig-og} \cdot \sigma \frac{(T_{ig}^4 - T_{og}^4)}{(T_{og} - T_{ig})} \quad (2.9)$$

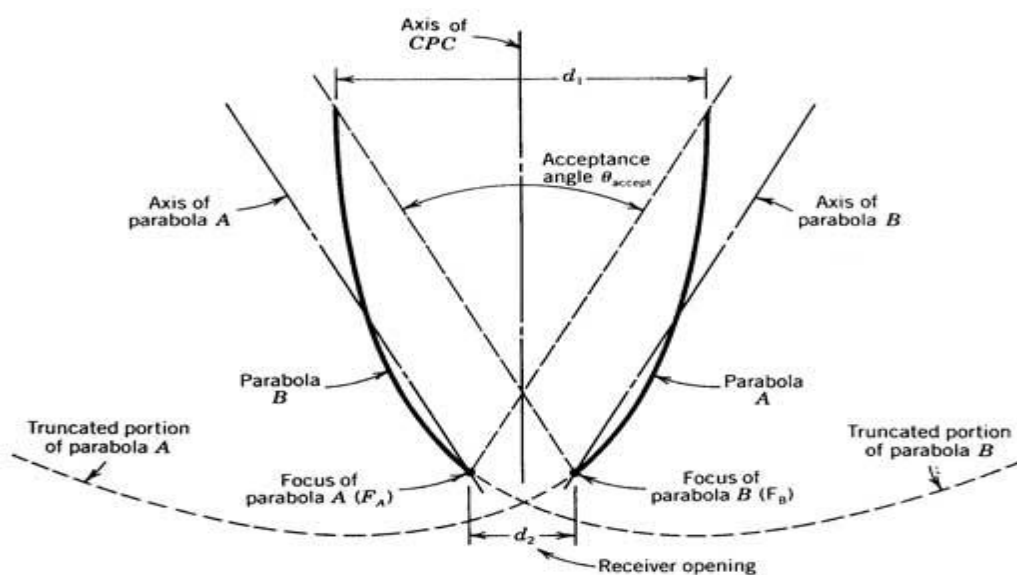
Με ε_{og} , η ικανότητα εκπομπής του εξωτερικού γυάλινου σωλήνα, T_{og} , η θερμοκρασία του εξωτερικού σωλήνα, T_a , η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, T_s , η θερμοκρασία του ουρανού σε συσχετισμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος $T_s = 0,0552 \cdot T_a$, A_{og} , η επιφάνεια του εξωτερικού σωλήνα, A_{ig} , η επιφάνεια του εσωτερικού σωλήνα, h_w , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας γύρω από τον εξωτερικό σωλήνα, ε_{ig-og} , η ικανότητα εκπομπής μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού σωλήνα $\varepsilon_{ig-og} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_{ig}} + \frac{A_{ig}}{A_{og}} \left(\frac{1}{A_{og}} - 1 \right) \right\}^1$, T_{ig} , η θερμοκρασία του εσωτερικού σωλήνα.

Ο συντελεστής θερμικής απολαβής F_R χαρακτηρίζεται από την παρακάτω εξίσωση [9]:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{og} - T_{ig})}{A_c (H_T - U_L (T_{ig} - T_{og}))} \quad (2.10)$$

2.2.3 Συνθετικοί παραβολικοί συλλέκτες

Ο συνθετικός παραβολικός συλλέκτης αποτελείται από ένα κάτοπτρο με δυο παραβολικά τμήματα με αυτό τον τρόπο κάθε εκτρεπόμενη ακτινοβολία είναι εκμεταλλεύσιμη. Ο κυλινδρικός απορροφητής περιβάλλεται από επίστρωση γυαλιού ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω συναγωγιμότητας από τον συλλεκτικό σωλήνα. Μεταξύ του σωλήνα και της επίστρωσης γυαλιού υπάρχουν συνθήκες κενού. Ο προαναφερόμενος απορροφητικός σωλήνας διαθέτει χρωματισμό μεγάλης απορροφητικότητας και μικρής ικανότητας εκπομπής συγκρατώντας έτσι τη θερμότητα και μεταφέροντας προς το θερμοαπαγωγό ρευστό. Η χρήση του συστήματος ανίχνευσης είναι διακοπτόμενη αφού ο λόγος συγκέντρωσης είναι χαμηλός και η ακτινοβολία συλλέγεται από μια ή παραπάνω ανακλάσεις στις παραβολικές επιφάνειες. Τα μοντέλα των συνθετικών παραβολικών συλλεκτών χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών αλλά είναι επιθυμητά και για ηλιακή, ψύξη με απορρόφηση [7].



Σχήμα 2.13: Συνθετικός παραβολικός συλλέκτης[42]

2.3 Δεξαμενές αποταμίευσης θερμότητας

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια πηγή ενέργειας η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο είτε κατά τη διάρκεια της ημέρας είτε λόγω των καιρικών φαινομένων. Η αξιοπιστία ενός ηλιακού συστήματος κρίνεται από τη χρήση μιας δεξαμενής αποταμίευσης ποσότητας ηλιακής θερμότητας ώστε ανά πάσα στιγμή το σύστημα να καλύπτει τις θερμικές ανάγκες των χρηστών.

Η μορφή δεξαμενής που χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα που έχουμε αναλύσει είναι οι δεξαμενές θερμού νερού, οι οποίες ονομάζονται και αισθητικοί αποταμιευτές θερμότητας αφού η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται με τη βοήθεια του νερού αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Πολλές δεξαμενές είναι στρωματοποιημένες έχοντας διαφορετική θερμοκρασία σε κάθε τομέα τους και χωρίζονται σε πολυκομβική μέθοδο και μέθοδο ροής πόματος. Αντίστοιχα στην ίδια κατηγορία εκπίπτει και η δεξαμενή βοτσαλωτής κλίνης που χρησιμοποιείται όπως προαναφέρθηκε σε συστήματα αέρα θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης. Στη δεξαμενή βοτσαλωτής κλίνης, η διαδικασία αναρρόφησης και πρόσδοσης θερμότητας δεν πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε αντίθεση με τη δεξαμενή θερμού νερού. Το μεγάλο πλεονέκτημα της παραπάνω δεξαμενής είναι ότι υπάρχει μεγάλος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και των βότσαλων καθώς επίσης επιτυγχάνεται και υψηλή θερμοκρασία διαστρωμάτωσης.

Η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης Q_s μιας μη στρωματοποιημένης δεξαμενής, με ροή μάζας νερού \dot{m} , συντελεστή θερμοχωρητικότητας C_p και διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου του ΔT_s , υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$Q_s = \dot{m} C_p \Delta T_s \quad (2.11)$$

Ενώ η ενεργειακή ισορροπία μιας μη στρωματοποιημένης δεξαμενής χαρακτηρίζεται από τη προσδιδόμενη ενέργεια στην δεξαμενή Q_u , η εξερχόμενη ενέργεια από τη δεξαμενή Q_{ls} , το συντελεστή θερμικών απωλειών της δεξαμενής U , την επιφάνεια της A και τη θερμοκρασία δεξαμενής T_s και T_a , η θερμοκρασία περιβάλλοντος που βρίσκεται η δεξαμενή [3].

$$\dot{m} C_p \frac{\Delta T_s}{dt} = Q_u - Q_{ls} - (U \cdot A)(T_s - T_a) \quad (2.12)$$

2.4 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι τύποι εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται είναι οι εναλλάκτες υγρού-υγρού και οι αέρα-υγρού. Οι εναλλάκτες μπορεί να είναι μονού ή διπλού τοιχώματος, εννοώντας ότι υπάρχει ένας ή δυο σωλήνες ροής αντίστοιχα. Στα συστήματα νερού θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης χρησιμοποιούνται οι εναλλάκτες θερμότητας υγρού-υγρού με το υγρό αυτό να είναι νερό και στα δυο ρεύματα ή νερό και ψυκτικό υγρό. Στα συστήματα αέρα χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι εναλλάκτες αέρα-νερού. Ο σχεδιασμός των εναλλακτών θερμότητας μπορεί να είναι είτε σπειροειδής και να βρίσκεται βυθισμένος εντός της δεξαμενής αποταμίευσης ή να βρίσκεται εκτός αυτής σε μορφή κελύφους-αυλών, παράλληλων σωλήνων αντιρροής.

Η μεταφορά θερμότητας σε ένα θερμικό εναλλάκτη λαμβάνει τη μορφή:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} \quad (2.13)$$

Με U , το συντελεστή θερμικών απωλειών του εναλλάκτη, A την επιφάνεια του και ΔT_{lm} , η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά. Η μέση λογαριθμική θερμοκρασιακή διαφορά αναπαριστά την ακριβή μέση θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των δυο ρευμάτων του εναλλάκτη θερμότητας και ορίζεται ως εξής:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o}} \quad (2.14)$$

Ορίζοντας για συνθήκες αντιρροής $\Delta T_i = T_{h,in} - T_{c,out}$ η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ζεστού ρευστού στην είσοδο από το κρύο ρευστό στην έξοδο και $\Delta T_o = T_{h,out} - T_{c,in}$ η θερμοκρασιακή διαφορά του ζεστού ρευστού κατά την έξοδο από το κρύο ρευστό κατά την είσοδο [45],[46].

2.5 Σύστημα σωληνώσεων

Οι θερμικές απώλειες του συστήματος σωληνώσεων ενός ηλιοθερμικού συστήματος ορίζονται από το συντελεστή θερμικών απωλειών στην συγκεκριμένη περιοχή, την επιφάνεια αυτής της περιοχής καθώς και τη θερμοκρασία του ρέοντος ρευστού T_a και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a .

$$Q_p = UA(T - T_a) \quad (2.15)$$

2.6 Βοηθητική πηγή θερμότητας

Κάθε σύστημα θέρμανσης χώρου και νερού χρήσης προαιρετικά μπορεί να διαθέτει βοηθητική πηγή ενέργειας από την οποία να τροφοδοτείται με θερμικά φορτία τα οποία δεν μπορούν να καλυφθούν μόνο από την ηλιακή ακτινοβολία. Ως βοηθητική πηγή συγκαταλέγονται οι θερμαντήρες, οι αντλίες θερμότητας, οι λέβητες φυσικού αερίου και πολλά ακόμα.

Απαραίτητο, λοιπόν, για τον προσδιορισμό της βοηθητικής ενέργειας που θα χρειαστούμε είναι να υπολογιστούν τα θερμικά φορτία που απαιτεί ο χώρος και το ζεστό νερό χρήσης. Για το θερμικό φορτίο του χώρου Q_{hl} και του ζεστού νερού Q_w ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις αντίστοιχα :

$$Q_{hl} = UA(T_R - T_a) \quad (2.16)$$

Με T_R , την απαιτούμενη θερμοκρασία και T_a , τη θερμοκρασία του χώρου σε °C.

$$Q_w = \dot{m}C_p(T_w - T_m) \quad (2.17)$$

Με T_w , την απαιτούμενη θερμοκρασία ζεστού νερού και T_m , τη θερμοκρασία του νερού από το δίκτυο σε °C.

3.1.1.1.2 Σύστημα χωρίς την διάταξη πλέγματος

Αυτά ονομάζονται διαφορετικά και ως αυτόνομα ηλιακά συστήματα, δεδομένου ότι δεν είναι συνδεδεμένα με ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Απαιτούν συνεχή πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια, απαιτώντας έτσι την αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες και χρησιμοποιώντας ακόμα και diesel εφεδρικές γεννήτριες. Οι μπαταρίες πρέπει να αντικατασταθούν και να είναι ποιοτικά καλές. Ωστόσο, το σύστημα αυτό έχει επιλεγεί ως μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση για να τροφοδοτήσει απομακρυσμένες περιοχές και όχι την επέκταση της κύριας γραμμής μεταφοράς ενέργειας σε αυτά τα μέρη.

Εν προκειμένω θα μελετηθεί το αυτόνομο σύστημα αφού η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υφίσταται σε απομονωμένο καταναλωτή αποκομμένο από ηλεκτροδοτικό δίκτυο [53].

3.1.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι συσκευές απευθείας μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς τη διαμεσολάβηση κινούμενων εξαρτημάτων ή κάποιας θερμικής μηχανής. Ένα ηλιακό στοιχείο αποτελείται από λεπτά στρώματα ημιαγωγίου υλικού, επικαλυμμένα με ανταντακλαστικό επίχρισμα ή ημιδιάφανο αγωγό, που καθώς εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο απάγεται από την εμπρόσθια και πίσω μεταλλική επαφή του κυττάρου ως συνεχές ρεύμα. Το εξαγόμενο ρεύμα από ένα στοιχείο είναι αρκετά μικρό έτσι πολλά κύτταρα ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας το πλαίσιο. Η τεχνολογία της φωτοβολταϊκής παραγωγής ενέργειας βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, μια ικανότητα που εκμεταλλεύονται οι ημιαγωγοί. Ως ημιαγωγοί συχνά χρησιμοποιούνται υλικά όπως το πυρίτιο (Si) με διάταξη μονοκρυσταλλική, πολυκρυσταλλική με τις αποδόσεις να κυμαίνονται στα 11-18%, άμορφη με απόδοση 4-6% και υβριδική-με δυο στρώσεις άμορφου πυριτίου και μία στρώση μονοκρυσταλλικού-με απόδοση έως και 19%. Η ικανότητα των ημιαγωγίων υλικών συναντάται και σε ενώσεις όπως ο δισελινιοϊνδιούχος χαλκός $(\text{Cu}(\text{InGa})(\text{Se,S})_2$ εν συντομία CIS) με το θειούχο κάδμιο (CdS) με απόδοση στα 8-9%, το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) με απόδοση 7-8% και το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs) με αποδόσεις που ξεπερνούν τα 25%. Σε εργαστηριακή έρευνα βρίσκονται τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου με αποδόσεις που αγγίζουν το 40% [8].

3.1.2.1 Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι φέτες πυριτίου, που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως 150-200 μm πάχους. Στην περίπτωση των λεπτών κυττάρων, τα στρώματα του υλικού του ημιαγωγού μετριούνται μόνο από 0,3 έως 2 μm πάχους και τοποθετούνται επί υποστρωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα ή γυαλί. Η λεπτότητα των στρωμάτων των ημιαγωγών αυξάνει το κόστος κατά πολύ.

Μια βασική διαφορά μεταξύ των κρυσταλλικών κυττάρων και των λεπτών φιλμ είναι η αποτελεσματικότητα μετατροπής τους. Το λεπτό φιλμ άμορφου πυριτίου φωτοβολταϊκής συστοιχίας, απαιτεί διπλάσιο από το χώρο από την κρυσταλλικού πυριτίου φωτοβολταϊκή συστοιχίας, όπως και η απόδοση της μονάδας του, έχει μειωθεί κατά το ήμισυ για την ίδια ονομαστική χωρητικότητα, υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής (STC) και τιμές της τάξεως των $1,000\text{W}/\text{m}^2$ από το φως του ήλιου, 25°C να είναι η θερμοκρασία των κυττάρων, και το φάσμα σε μάζα αέρα να είναι 1.5.

Ομοίως, σε κρυσταλλικές φωτοβολταϊκές μονάδες πυριτίου, η αποδοτικότητα της μονάδας είναι μικρότερη, από το άθροισμα της απόδοσης του συστατικού των κυττάρων, καθώς υπάρχουν κενά μεταξύ των κυττάρων και των κενών γύρω από το κύκλωμα. Αυτή η σπατάλη χώρου δεν παράγει ενέργεια μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση. Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας παίζουν επίσης ρόλο στη διαφοροποίηση των δύο φωτοβολταϊκών μονάδων. Βασικά οι τεχνολογίες των λεπτών φιλμ τείνει να έχει χαμηλότερο αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας σε σύγκριση με τις κρυσταλλικές τεχνολογίες.

Τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου αν και κατά λίγο χαμηλότερης απόδοσης από τα μονοκρυσταλλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αγορά καθώς το κόστος παραγωγής τους είναι οικονομικότερο και σε μορφή διάταξης κυψελών ισοδυναμούν σε απόδοση με τα μονοκρυσταλλικά [55].



Σχήμα 3.2: Μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου[87]



Σχήμα 3.3: Πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου[87]

3.1.2.2 Αρχή λειτουργίας

Κατά τη κβαντική θεωρία τα ηλεκτρόνια ενός απομονωμένου ατόμου πρέπει να βρίσκονται σε καθορισμένες και διακριτές ζώνες. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας μπορούν να σχηματίζουν δεσμούς με άλλα άτομα λόγω της χαλαρής σύνδεσης τους με τον πυρήνα του ατόμου. Αυτή η εξωτερική στοιβάδα ονομάζεται ζώνη σθένους και αποτελείται από τα ηλεκτρόνια σθένους. Τα ηλεκτρόνια σθένους που κατέχουν μεγαλύτερη ενέργεια είναι σε θέση να μεταπηδήσουν σε υψηλότερη ζώνη, τη ζώνη αγωγιμότητας η οποία είναι και υπεύθυνη για την αγωγιμότητα του ηλεκτρισμού αλλά και της θερμότητας. Το εύρος μεταξύ των δυο προαναφερθέντων ζωνών αναφέρεται ως ενεργειακό χάσμα, μετράται σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και διαφέρει για κάθε ημιαγωγό. Εν τούτοις, οι ημιαγωγοί είναι υλικά τα οποία διαθέτουν μια ζώνη σθένους εν μέρει πλήρης, ζώνη αγωγιμότητας άδεια ομοίως με τους μονωτές αλλά το ενεργειακό τους χάσμα είναι κατά πολύ στενότερο. Οι ημιαγωγοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τους ενδογενείς και τους εξωγενείς. Εκ της πρώτης κατηγορίας, τα ηλεκτρόνια σθένους με ένα θερμικό ή οπτικό έναυσμα είναι σε θέση να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας και να κινηθούν ελεύθερα εντός του κρυστάλλου ενώ στη δεύτερη κατηγορία τα ηλεκτρόνια εμπλουτίζονται με μικροποσότητες άλλων στοιχείων με σκοπό το ίδιο αποτέλεσμα. Στους ημιαγωγούς, αν το υλικό που εμπλουτίζεται έχει περισσότερα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους από όσα διαθέτει ο ημιαγωγός, τότε το υλικό αυτό ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n και έχει περίσσεια ηλεκτρονίων που είναι σε θέση να μεταβιβαστούν. Ενώ αν το υλικό που εμπλουτίζεται έχει λιγότερα ηλεκτρόνια τότε ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p και έχει οπές οι οποίες μπορούν να καταληφθούν από την περίσσεια ηλεκτρονίων. Επομένως με την ένωση αυτών των ημιαγωγών δημιουργείται η επαφή p-n όπου η περίσσεια ηλεκτρονίων έλκεται από τις οπές αφήνοντας έτσι την πλάκα n με θετικό φορτίο και κάποιες οπές, ενώ την πλάκα p με αρνητική φόρτιση. Στο σημείο επαφής τους σχηματίζεται πλέον λόγω φορτίσεων ένα ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό τύπου p προς τον τύπου n και όχι αντίστροφα, διαθέτοντας πλέον και τη λειτουργία της διόδου.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο πραγματοποιείται όταν ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο σθένους του ημιαγωγού προσδίδοντας του ενέργεια να μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας και να κινηθεί ελεύθερο. Παρά ταύτα για να συμβεί αυτό η ενέργεια του φωτονίου θα πρέπει να υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, αλλιώς ο

πλεονασμός ενέργειας που διαθέτει το ηλεκτρόνιο μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια αυξάνοντας τη θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές διατείνονται σε όλη τη δομή της επαφής p-n δημιουργώντας ηλεκτρικό πεδίο εγκάρσια αυτής. Με την πρόσπτωση φωτονίων στο ηλιακό κύτταρο δημιουργούνται κάποια ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών που αν βρίσκονται αρκετά κοντά στην επαφή p-n τότε δέχονται την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Απόρροια αυτού είναι να διαχωριστούν τα ζεύγη, τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς την πλευρά του τύπου n και οι οπές θα εκτραπούν προς τη πλευρά του τύπου p, πραγματοποιώντας έτσι την συσσώρευση των φορτίων στις δυο πλευρές δημιουργείται διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες τους [47],[48].

Η ενέργεια που μεταφέρει ένα πακέτο φωτονίων ισούται με:

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

Όπου h, η σταθερά Planck, $=6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s

c, η ταχύτητα του φωτός, $=3 \cdot 10^8$ m/s

λ , το μήκος κύματος του φωτός.

3.1.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου

Κάθε πρότυπο φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από την αντίσταση σειράς R_s , που συμβολίζει την εσωτερική αντίσταση κάθε στοιχείου, τη δίοδο, την εσωτερική παράλληλη αντίσταση της διόδου (R_p), το φωτόρρευμα (I_L), το ρεύμα το οποίο υφίσταται κατά τον διαχωρισμό των ηλεκτρονίων και των οπών και το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο (I_D) (σχήμα 3.4). Σύμφωνα με το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού η ένταση δικτύου, θεωρώντας αμελητέες τις αντιστάσεις σε σχέση με την αντίσταση του φορτίου, ισούται με την εξής σχέση:

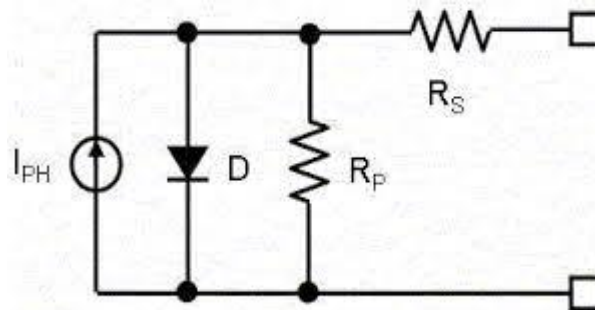
$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{e \cdot V}{k \cdot T_C}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Γνωρίζοντας ότι η σταθερά Boltzmann $k=1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K και η ηλεκτρική φόρτιση $e=1,602 \cdot 10^{-19}$ J/K.

Ενώ I_0 είναι το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (σκότους), V είναι η επιβαλλόμενη τάση ϕ/β στοιχείου και T_C (K) η θερμοκρασία του ϕ/β στοιχείου διδόμενη σε ($^{\circ}\text{C}$) από την παρακάτω σχέση:

$$T_c - T_a = \frac{NOCT - 20}{0,8} \cdot G (\text{kW}/\text{m}^2) \quad (3.3)$$

Καθώς T_a είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η NOCT είναι η θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί υπό ακτινοβολία $0,8 \text{ kW}/\text{m}^2$, θερμοκρασία αέρα 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s σε ανοικτό κύκλωμα. Το NOCT ενός πλαισίου καλύτερης λειτουργίας είναι 33°C , χειρότερης είναι 58°C και τυπικής λειτουργίας είναι 48°C .



Σχήμα 3.4: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου[86]

Αν η ωμική αντίσταση του φορτίου έχει μεγάλη τιμή τότε μειώνεται η ένταση και η τάση γίνεται μέγιστη, πλησιάζοντας έτσι τις συνθήκες του ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) όπου η τάση ανοιχτού κυκλώματος αντιστοιχεί στην πτώση τάσης διαμέσου της διόδου όταν την διαπερνά το φωτόρευμα, το οποίο πλέον ισούται με το ρεύμα διόδου αφού η ένταση δικτύου είναι μηδενική. Αντίστοιχα όταν η αντίσταση έχει μικρή τιμή τότε η ένταση είναι μέγιστη και η τάση που διαρρέει το στοιχείο να είναι αρκετά μικρή, με αποτέλεσμα το φωτοβολταϊκό να συμπεριφέρεται σαν κλειστό κύκλωμα, δηλαδή η ένταση του κλειστού κυκλώματος (I_{sc}) να ισούται πλέον με το φωτόρευμα και η τάση να είναι μηδενική. Στις δυο παραπάνω εκδοχές, ανοιχτού και κλειστού κυκλώματος, η ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μηδενική. Η μέγιστη ισχύς περνάει από το σημείο μέγιστης ισχύος όπου η αντίσταση του φορτίου είναι ιδανική (σχήμα3.5).

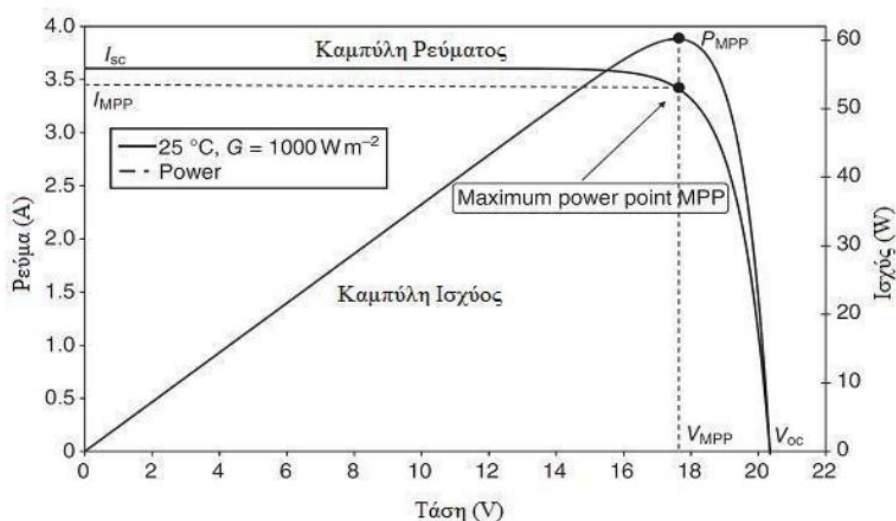
$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τη σχέση της έντασης δικτύου:

$$I_{max} = \frac{e \cdot T_c}{k \cdot T_c + e \cdot V_{max}} (I_{sc} + I_0) \quad (3.5)$$

και αντίστοιχα το V_{max} λαμβάνεται μέσω της επίλυσης της εξίσωσης

$$\exp\left(\frac{e \cdot V_{max}}{k \cdot T_c}\right) \cdot \left(1 + \frac{e \cdot V_{max}}{k \cdot T_c}\right) = 1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V ενός (Φ/B) στοιχείου [85]

Η μέγιστη ισχύς επίσης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του συντελεστή πληρότητας FF, η μέγιστη τιμή του οποίου για πυρίτιο είναι 0,88 (Σχέση 3.7). Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής πληρότητας αυξάνει όσο η χαρακτηριστική (I-V) προσομοιάζει την τετραγωνική μορφή. Τα καλής ποιότητας φ/β στοιχεία λαμβάνουν τιμές άνω του 0,7.

$$P_{max} = I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \quad (3.7)$$

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος ανάλογο προς την ακτινοβολία:

$$I_{sc}(G) = I_{sc} \cdot G \text{ (σε } kW/m^2) \quad (3.8)$$

Η τάση ανοικτού κυκλώματος λαμβάνεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T_c}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) = V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (3.9)$$

και η τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός πλαισίου ισούται επίσης με:

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}(STC) - [2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \cdot n_c \cdot (T_c - T_{STC})] \quad (3.10)$$

Όπου το ακρωνύμιο STC είναι οι συνθήκες κανονικής δοκιμής, με το πλαίσιο να υποβάλλεται σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 και η θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου να είναι 25°C . Ο συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι κατά προσέγγιση ίσος με $-2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ και ο n_c αριθμός των στοιχείων που απαρτίζουν το πλαίσιο.

Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (G) στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου (A) [47]:

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{G \cdot A} \quad (3.11)$$

3.1.2.4 Διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος

Ο αριθμός των ηλιακών στοιχείων σε ένα πλαίσιο ορίζεται από την τάση λειτουργίας του πλαισίου, η οποία με τη σειρά της πρέπει να ταιριάζει με την ονομαστική τάση του υποσυστήματος αποθήκευσης, δηλαδή τις μπαταρίες. Κατά την εν σειρά σύνδεση δυο όμοιων πλαισίων το ρεύμα παραμένει ίδιο ενώ η τάση διπλασιάζεται. Αντιστρόφως συμβαίνει στην εν παραλλήλω σύνδεση, όπου η τάση είναι η ίδια και το ρεύμα διπλασιάζεται. Κατά τα παραπάνω η εύρεση του αριθμού των εν σειρά πλαισίων δίδεται από το λόγο της τάσης λειτουργίας του συστήματος (V_{DC}) προς την τάση λειτουργίας ενός πλαισίου (V_M):

$$z_1 = \frac{V_{DC}}{V_M} \quad (3.12)$$

Η τάση λειτουργίας του συστήματος ορίζεται από το άθροισμα της τάσης λειτουργίας των συσσωρευτών και την αύξηση της τάσης για την εξασφάλιση της φόρτισης τους.

$$V_{DC} \geq V_{\Sigma} + \delta U \quad (3.13)$$

Το απαιτούμενο ρεύμα στο φορτίο (I_L) ισούται με το λόγο των ημερήσιων ενεργειακών αναγκών (E_{day}) προς την τάση λειτουργίας του συστήματος.

$$I_L = \frac{E_{day}}{24V_{DC}} \quad (3.14)$$

Η ημερήσια απαιτούμενη ισχύς για το φορτίο καθορίζεται από το ονομαστικό ρεύμα που απαιτεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (I_p), την τάση λειτουργίας και το PSH(peak sun hours), το οποίο αναφέρεται στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο πλαίσιο που λαμβάνει μέγιστες τιμές για κάποιες ώρες της ημέρας (kW/m^2).

$$E_{day}(Wh/day) = PSH \cdot I_p \cdot V_{DC} \quad (3.15)$$

Εξισώνοντας τις δυο παραπάνω σχέσεις γίνεται εμφανής η σχέση μεταξύ του ονομαστικού ρεύματος της φ/β γεννήτριας και του φορτίου:

$$I_p = \frac{24I_L}{PSH} \quad (3.16)$$

Έτσι ο αριθμός των εν παραλλήλω συνδεδεμένων φ/β πλαισίων εκφράζονται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$z_2 = (SF) \frac{I_p}{I_m} \quad (3.17)$$

Όπου I_m , το ονομαστικό ρεύμα που παρέχει κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο και SF, ο παράγοντας ταξινόμησης που εξισορροπεί το ενεργειακό έλλειμμα του συστήματος υπερεκτιμώντας το διαθέσιμο ρεύμα της διάταξης.

Το πλήθος των πλαισίων που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου είναι:

$$z = z_1 \cdot z_2 = \frac{E_{eff}}{E_{PV\ eff}} \quad (3.18)$$

Με E_{eff} , η απαιτούμενη ενεργή επιφάνεια που προκύπτει από τις ενεργειακές ανάγκες του φορτίου και ορίζεται ως το πηλίκο της ημερήσιας απαιτούμενης ισχύος προς την ενέργεια που προσδίδεται στο φορτίο ανά $1m^2$, $E_{eff} = \frac{E_{day}}{E_{PV}}$.

E_{PV} , η επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου είναι οι διαστάσεις του (μήκοςχπλάτος).

Η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια από τη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με απόδοση η και μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία H_T (kWh/m²) προκύπτει ως:

$$E_{PV\ month} = E_{PV\ eff} \cdot z \cdot \eta \cdot H_T \quad (3.20)$$

Ενώ η $E_{PV\ eff}$, η ενεργή επιφάνεια ενός φ/β είναι οι διαστάσεις (μήκος*πλάτος) συνυπολογισμένες με τον συντελεστή πλήρωσης, $E_{PV\ eff} = \text{μήκος} * \text{πλάτος} * FF$ [6].

3.1.3 Ανιχνευτές μέγιστης ισχύος

Οι ανιχνευτές μέγιστης ισχύος είναι μετατροπείς DC/DC υψηλής αποδοτικότητας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα κύκλωμα ελέγχου για να βρεθεί το μέγιστο σημείο ισχύος που προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.2.3. και φαίνεται στο σχήμα 3.5. της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V, με σκοπό να επιτρέψουν στο σύστημα του μετατροπέα να εξάγει τη μέγιστη ισχύ που είναι διαθέσιμη από τη φωτοβολταϊκή διάταξη. Οι μετατροπείς βελτιστοποιούν την τάση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αυξάνοντας, κατά αυτό τον τρόπο, το ρεύμα. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα ώστε να παράγεται η μέγιστη ενδεχόμενη ενέργεια, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία μεταφοράς της στις μπαταρίες ή το φορτίο ακόμα και κατά τις δυσμενέστερες συνθήκες (καιρικές και ενεργειακές) [50].

3.1.4 Ελεγκτές φόρτισης

Ο ελεγκτής ρυθμίζει την παραγόμενη ισχύ από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις ώστε να προληφθεί η υπερφόρτιση ή η οριακή εκφόρτιση των συσσωρευτών. Η επιλογή του ελεγκτή εξαρτάται από τη χωρητικότητα των μπαταριών, μπορεί να είναι παράλληλου τύπου ή σειράς. Το σύστημα δεν καταναλώνει ενέργεια και λειτουργεί σε δυο καταστάσεις στη φυσιολογική, όπου η τάση λειτουργίας της μπαταρίας κυμαίνεται στις επιθυμητές οριακές τιμές και στη κατάσταση υπερφόρτισης ή εκφόρτισης. Η αντιμετώπιση της δεύτερης κατάστασης προϋποθέτει τη χρήση ενός διακόπτη με κύκλο υστέρησης, όπως είναι ένας ηλεκτρονόμος (ρελέ) ή μια συσκευή στερεάς κατάστασης (π.χ. διπολικό τρανζίστορ). Όταν η τελική τάση αυξάνεται ξεπερνώντας τη ορισμένη οριακή τιμή $V_{max,off}$ και το απαιτούμενο ρεύμα από το φορτίο είναι λιγότερο από το παρεχόμενο των φ/β διατάξεων τότε οι μπαταρίες αποσυνδέονται από τα φωτοβολταϊκά προς αποφυγήν υπερφορτίσεως. Οι μπαταρίες επανασυνδέονται όταν η τάση μειωθεί και επανέλθει στην ορισμένη τιμή $V_{max,on}$. Αντιστοίχως, αν η τελική τάση μειωθεί κάτω από τη τιμή $V_{min,off}$ και το απαιτούμενο ρεύμα από το φορτίο είναι μεγαλύτερο από αυτό του

παρεχόμενου, τότε το φορτίο αποσυνδέεται και επανασυνδέεται στο σύστημα όταν η τάση φθάσει στη τιμή $V_{\min,on}$, έτσι προλαμβάνεται η εκτεταμένη εκφόρτιση των μπαταριών [51].

3.1.5 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες απαιτούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα ώστε να παρέχουν ρεύμα στο εκάστοτε φορτίο κατά τις νυχτερινές ώρες, μέρες κακοκαιρίας αλλά και όταν δεν ικανοποιούν τη ζήτηση. Το χαρακτηριστικό που θα πρέπει να πληρούν είναι να δέχονται επαναλαμβανόμενα το βάθος φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς αυτό να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής τους αλλά και την αποτελεσματικότητά τους. Η μπαταρία αυτή δεν θα πρέπει να εκφορτίζεται επίσης κάτω του 50%. Τέτοιου τύπου μπαταρίες είναι οι μολύβδου-οξέος, οι οποίες περιλαμβάνονται από δυο ηλεκτρόδια διοξειδίου του μολύβδου (άνοδος) και σπογγοειδούς μολύβδου (κάθοδος) που εμβαπτίζονται εντός αραιωμένου θειικού οξέος. Η ονομαστική χωρητικότητα μιας μπαταρίας είναι το ποσοστό των αμπερ-ωρών (Ah) που μπορούν να εξαχθούν σε μέγιστο από αυτήν υπό προκαθορισμένες συνθήκες εκφόρτισης, επίσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Q_{max} = \frac{d_0(E_y/8760)}{\eta_{db} \cdot DOD_L \cdot V_S} \quad (3.21)$$

Με d_0 , τις ημέρες ενεργειακής αυτονομίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, E_y , την ετήσια παραγόμενη ενέργεια, η_{db} , το βαθμό απόδοσης του κλάδου εκφόρτισης των συσσωρευτών, DOD_L , ο μέγιστος επιτρεπόμενος βαθμός εκφόρτισης των μπαταριών που προσεγγιστικά μπορεί να οριστεί από τον αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης των συσσωρευτών (n_c), $DOD_L \cdot n_{c_{max}} \leq 3000$.

Η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και της φόρτισης, αποφασίζει εάν η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης ή εκφόρτισης. Η ποσότητα φόρτισης της ‘τράπεζας’ μπαταριών κατά το χρόνο t μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_B(t) = E_B(t-1)(1-\sigma) + (E_{GA}(t) - E_L(t) / \eta_{inv}) \eta_{battery} \quad (3.22)$$

, όπου $E_B(t)$ και $E_B(t-1)$: οι ποσότητες φορτίου της ‘τράπεζας’ συσσωρευτών τη χρονική στιγμή t και $t-1$,

σ : είναι ο ωριαίος ρυθμός αυτοκατανάλωσης,

$E_{GA}(t)$: η συνολική ενέργεια που παράγεται από την ανανεώσιμη πηγή ενέργειας μετά την απώλεια ενέργειας στον ελεγκτή,

$E_L(t)$: είναι η ζήτηση φορτίου κατά τη χρονική στιγμή t ,

η_{inv} και $\eta_{battery}$: είναι η απόδοση του μετατροπέα και της τροφοδοσίας της ‘τράπεζας’ μπαταριών.

Η ποσότητα φόρτισης της τράπεζας μπαταριών υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$E_{B_{min}} \leq E_B(t) \leq E_{B_{max}} \quad (3.23)$$

, όπου $E_{B_{min}}$ και $E_{B_{max}}$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη ποσότητα φόρτισης της ‘τράπεζας’ μπαταριών [14],[52].

3.1.6 Μετατροπείς DC/AC

Ο αναστροφέας ή μετατροπέας DC/AC χρησιμοποιείται για να μετατρέψει το εισερχόμενο συνεχές ρεύμα από τη φωτοβολταϊκή διάταξη ή από τους συσσωρευτές στο εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου που παρέχει στο δίκτυο κατανάλωσης. Η έξοδος του μετατροπέα μπορεί είναι μονοφασική ή τριφασική. Η απόδοση του μετατροπέα ισούται με το λόγο της εξερχόμενης ισχύος (P_{out}) προς την εισερχόμενη (P_{in}):

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{AC} \cdot I_{AC} \cdot \cos\varphi}{V_{DC} \cdot I_{DC}} \quad (3.24)$$

Με $\cos\varphi$, τον συντελεστή ισχύος [51].

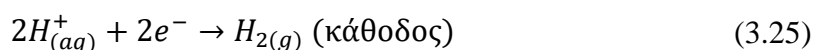
3.2 Υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι το πιο διαδεδομένο στοιχείο το οποίο όμως δεν απαντάται μόνο του στη φύση, δημιουργεί δεσμούς με το οξυγόνο (H₂O-νερό) τον άνθρακα και το άζωτο και συνυπάρχει σε ενεργά υλικά και ορυκτά καύσιμα. Θεωρείται ο πιο πολλά υποσχόμενος μεταφορέας ενέργειας τόσο ως προς την ενεργειακή κάλυψη αλλά όσο και ως προς την καθαρότητα, χωρίς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Καθώς επίσης είναι πιο αποδοτικό κατά 39% από τα ορυκτά καύσιμα σχετικά με τη μετατροπή του. Ένα σύστημα ενέργειας υδρογόνου μπορεί να παρέχεται και να προκύπτει σε τρεις διαφορετικούς τομείς πηγών ενέργειας- τα ορυκτά καύσιμα, την πυρηνική ενέργεια και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

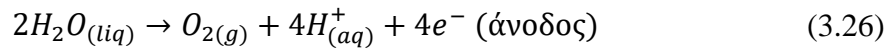
3.2.1 Παραγωγή υδρογόνου

Όπως προαναφέρθηκε παρόλη την αφθονία του υδρογόνου δεν βρίσκεται σε στοιχειώδη μορφή στη Γη, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται, να μελετούνται και να πραγματοποιούνται τεχνολογίες παραγωγής αυτού. Οι αποδοτικότερες και πιο διαδεδομένες είναι οι παρακάτω:

- ❖ Η ηλεκτρόλυση χαρακτηρίζεται από το διαχωρισμό του νερού με χρήση ηλεκτρισμού με απόδοση μετατροπής έως και 75%. Αν και οικονομική ως τεχνολογία θεωρείται ασύμφορη ενεργειακά και περιβαλλοντολογικά όταν ο ηλεκτρισμός που παρέχεται προκύπτει από ορυκτά καύσιμα. Σε αντιδιαστολή η απόδοση αυξάνεται όταν ο ηλεκτρισμός παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία θα μελετηθεί για το αυτόνομο, υβριδικό σύστημα του κεφαλαίου 3.3. Κατά την ηλεκτρόλυση, στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) ανάγονται ιόντα υδρογόνου σε υδρογόνο ενώ στην άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) το νερό οξειδώνεται σε οξυγόνο και πρωτόνια. Η χρήση καταλύτη είναι απαραίτητη για τη μείωση της τάσης η οποία δημιουργείται από τα τέσσερα εμπλεκόμενα ηλεκτρόνια στην κάθοδο και ισούται με 1,23V. Οι διεργασίες κατά την ηλεκτρόλυση περιγράφονται από τις παρακάτω αντιδράσεις:



και



Ένας σημαντικός παράγοντας απωλειών της ηλεκτρόλυσης παρουσιάζεται όταν υπάρχει χαμηλή ακτινοβολία και το ρεύμα του ηλεκτρολύτη ισούται με μηδέν, τότε πρέπει να προστατευτεί με κάποια τάση ενάντια στο καθοδικό δυναμικό που μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη διάβρωση. Προς αποφυγήν αυτού ο θερμοσυσσωρευτής απομονώνει τον ηλεκτρολύτη από το κύτταρο ηλεκτρόλυσης και εγχέει άζωτο στον ηλεκτρολύτη για την προστασία των ηλεκτροδίων.

$$V_o = E_o + \frac{R * T}{2F} \ln \frac{x_{H_2} * x_{O_2}^{0,5}}{x_{H_2O}} \quad (3.27)$$

Με V_o , το αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος του κυττάρου (V)

E_o , το σταθερό αντιστρεπτό δυναμικό του κυττάρου (V)

R, η σταθερά του ιδανικού αερίου ισούται με $8.3145 \text{ J/mol} * K$

F, η σταθερά του Faraday ισούται με $96,485 \text{ J/mol}$

x_i , το γραμμομοριακό κλάσμα των στοιχείων (g mole)

- ❖ Η αναμορφοποίηση χαρακτηρίζεται από το διαχωρισμό καύσιμου υδρογονάνθρακα με θέρμανση και ατμό, η οποία συναντάται σε σταθερές εφαρμογές και οχήματα. Τυπικά η θερμική διαδικασία διεξάγεται επί ενός καταλύτη με βάση νικελίου ο οποίος διαλαμβάνει αντίδραση με το φυσικό αέριο ή οποιοδήποτε άλλο ελαφρύ υδρογονάνθρακα με ατμό. Η διαδικασία χωρίζεται σε τρία στάδια που έχουν ως αποτέλεσμα την ανάμειξη του υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα και εν συνεχεία υποβάλλονται σε διαχωρισμό με την προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (PSA), προκύπτοντας καθαρό υδρογόνο.
- ❖ Η αεριοποίηση χαρακτηρίζεται από το διαχωρισμό των βαρέων υδρογονανθράκων και της βιομάζας σε υδρογόνο και σε αέρια για αναμορφοποίηση. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 1300°C - 1400°C και πιέσεις 10-100 bar με αποτέλεσμα ένα αέριο το οποίο μετά από σταδιακό διαχωρισμό αποδίδει υδρογόνο. Παρόμοια διεργασία ακολουθείται και με τον ατμό του βιοαερίου, που προέκυψε αναερόβια από τη βιομάζα.

- ❖ Οι θερμοχημικές διαδικασίες χρησιμοποιούν θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας (2000°K) από πυρηνικούς αντιδραστήρες ή συγκεντρωτικούς ηλιακούς συλλέκτες καθώς και χημικές αντιδράσεις θειικού οξέος με ηλεκτρόλυση στους 1000°K - 1200°K. Αυτές οι διαδικασίες απευθύνονται σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου.
- ❖ Η βιολογική παραγωγή χαρακτηρίζεται από φύκια και βακτήρια τα οποία παράγουν απευθείας υδρογόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες σε κλειστό φωτοβιοαντιδραστήρα. Ειδικότερα το υδρογόνο προκύπτει όταν τα φύκια στερούνται το θείο κατά τη φωτοσύνθεση. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά συμφέρουσα και βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο [42].

3.2.2 *Μεταφορά και αποθήκευση υδρογόνου*

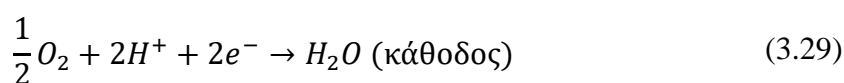
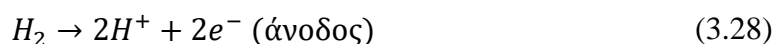
Η μεταφορά του υδρογόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί όπως και εφαρμόζεται με τις ίδιες σωληνώσεις που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο. Επίσης η διανομή είναι εφικτή και με φορηγά, τραίνα και φορηγίδες όταν το υδρογόνο βρίσκεται σε υγρή μορφή και κατά την κάλυψη της απόστασης ατμοποιείται στο χώρο. Μια εναλλακτική μορφή μεταφοράς είναι διάφορες ενώσεις και μεταλλικά υβρίδια που μπορούν να ενσωματώσουν στο μοριακό τους πλέγμα το υδρογόνο. Έτσι το υδρογόνο φθάνει στον ειδικό προορισμό του έτοιμο προς τροφοδοσία σε διατάξεις όπως το απαιτούν.

Κατά την αποθήκευση του υδρογόνου οι τεχνικές της χημικής αποθήκευσης και των μεταλλικών υβριδίων παραμένουν προσδόκιμες. Στη χημική αποθήκευση το υδρογόνο συνδυάζεται με χημικά όπως το τολουένιο (μεθυλοβενζόλιο) σχηματίζοντας μεθυλοκυκλοεξάνιο (MCH) εν προκειμένω. Το MCH είναι ρευστό κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση του σε πιέσεις και θερμοκρασίες περιβάλλοντος ενώ για την τελική χρήση του υδρογόνου θα πρέπει να αφυδρογονωθεί. Μια ακόμη πιθανή χημική αποθήκευση είναι η παραγωγή ρευστής αμμωνίας, η οποία περιέχεται ασυμπίεστη στους -33°C ή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος στα 10 bar πίεση. Μειονέκτημα της χημικής μεθόδου αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί η διαχείριση των χημικών αποβλήτων αλλά και οι υποδομές που απαιτούνται. Αντίστοιχα η αποθήκευση υδρογόνου στη μοριακή δομή μεταλλικών υβριδίων είναι μια βαριά και ακριβή μέθοδος που απαιτεί ψυκτικό κύκλωμα για το γέμισμα του πλέγματος. Η απλούστερη και οικονομικότερη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι τα δοχεία πίεσης και οι δεξαμενές αερίου με αέριο υδρογόνο όπου το υδρογόνο μπορεί να διατηρηθεί στα 200 bar πίεσης για μικρή ποσότητα και 700 bar για αποθήκευση ενεργειακής πυκνότητας. Τα σημαντικά

μειονεκτήματα της μεθόδου είναι επικινδυνότητα λόγω των υψηλών πιέσεων στις δεξαμενές αλλά και η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου, έχοντας έτσι χαμηλή απόδοση αποθήκευσης ενέργειας [42].

3.2.3 Κυψέλες καυσίμου

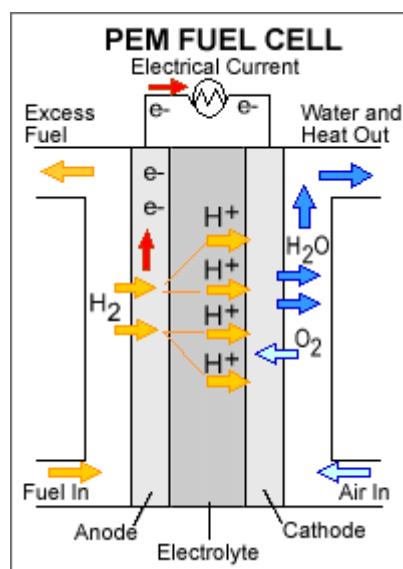
Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν το καύσιμο και τον αέρα απευθείας σε ηλεκτρισμό, θερμότητα και νερό μέσω ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Αντίθετα με συμβατικές μηχανές δεν καίνε καύσιμο ούτε διαθέτουν κινούμενα μέρη, με αποτέλεσμα ελάχιστες (σε περίπτωση χρήσης άλλου καυσίμου εκτός του νερού) έως μηδενικές εκπομπές ρύπων αλλά και λιγότερες απώλειες απόδοσης. Η αποτελεσματικότητά τους κυμαίνεται από το 40-60% ενώ μπορεί να φθάσει έως και το 85%. Η βασική αρχή της κυψέλης είναι το αντίστροφο της ηλεκτρόλυσης και έχουν την ίδια λειτουργία με μια μπαταρία χωρίς να ξεφορτίζουν ή να χρειάζονται φόρτιση. Το υδρογόνο οξειδώνεται στην άνοδο, η οποία είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο και το οξυγόνο ανάγεται στην κάθοδο. Στην κυψέλη υδρογόνου ένας καταλύτης στην άνοδο διαχωρίζει τα μόρια του υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια που παίρνουν διαφορετικά μονοπάτια προς την κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια διέρχονται σε ένα εσωτερικό κύκλωμα δημιουργώντας ροή ηλεκτρισμού και τα πρωτόνια περνούν μέσω του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο που ενώνονται με το οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια δημιουργώντας νερό και θερμότητα. Οι διεργασίες περιγράφονται στις παρακάτω αντιδράσεις [42]:



Διαφορετικά συστήματα κυψελών καυσίμου λειτουργούν σε θερμοκρασιακά επίπεδα που μπορούν να κυμαίνονται από θερμοκρασία δωματίου έως και 1000°C, επίσης διαφέρουν στο είδος του ηλεκτρολύτη που εμβαπτίζονται τα ηλεκτρόδια τους. Τα είδη των κυψελών καυσίμου είναι τα εξής:

- Πολυμερούς ηλεκτρολύτη μεμβράνης κυψέλη καυσίμου (PEM), ονομάζεται και μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, μεταφέρει υψηλής ισχύος πυκνότητα και προσφέρει σε σχέση με τις άλλες κυψέλες καυσίμου το πλεονέκτημα του χαμηλού βάρους και όγκου. Τα PEM χρησιμοποιούν ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη

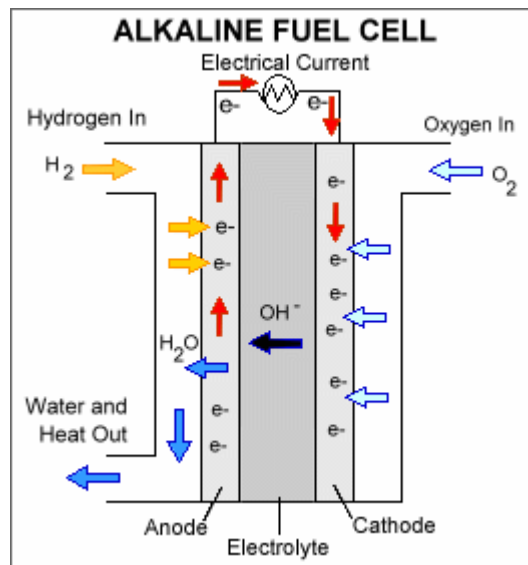
και πορώδη ανθρακικά ηλεκτρόδια που περιέχουν πλατίνα ή κράμα πλατίνας. Η λειτουργία τους κυμαίνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες γύρω στους 80° C, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος ζεστάματος, η κυψέλη να ξεκινάει τη λειτουργία της πιο γρήγορα, αλλά και τα επιμέρους εξαρτήματα της να μην φθείρονται έχοντας έτσι αύξηση της αντοχής της συσκευής. Μειονέκτημα της κυψέλης θεωρείται η χρήση ευγενούς μετάλλου για καταλύτη όπως η πλατίνα γεγονός που προσδίδει κόστος στο σύστημα. Η πλατίνα είναι ευαίσθητη στο μονοξείδιο του άνθρακα το οποίο προκύπτει εάν το υδρογόνο παρέχεται από υδρογονάνθρακα, κατά αυτό το λόγο απαιτείται η χρήση πρόσθετου αντιδραστήρα για τη μείωση της εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα. Οι κυψέλες καυσίμου PEM αποδεικνύονται ιδανικές για χρήση κυρίως στις μεταφορές αλλά και στις σταθερές εφαρμογές που επωφελούνται το γρήγορο ξεκίνημα καθώς και τη μεγάλη ισχύ που φέρουν σε σχέση με τον όγκο του.



Σχήμα 3.6: Αρχή λειτουργίας της PEM κυψέλης[85]

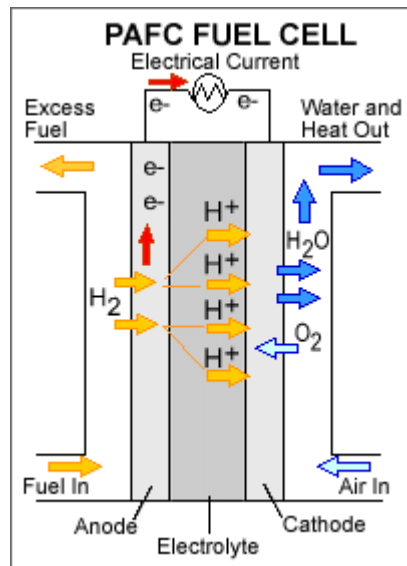
- Άμεσης μεθανόλης κυψέλη καυσίμου (DMFC), τροφοδοτείται με μεθανόλη που συνήθως είναι αναμειγμένη με νερό και τροφοδοτούν απευθείας την άνοδο της κυψέλης. Τα DMFCs δεν έχουν θέματα με την αποθήκευση του καυσίμου διότι η μεθανόλη έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο αλλά ούτε και με τη μεταφορά, διανομή καθώς το καύσιμο είναι ρευστό. Αυτές οι κυψέλες παρέχουν ενέργεια σε φορητές εφαρμογές.
- Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC), χρησιμοποιεί ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου μέσα στο νερό ως ηλεκτρολύτη και μια ποικιλία μη ευγενών μετάλλων ως

καταλύτες στην άνοδο και στην κάθοδο. Τα AFCs λειτουργούν και σε υψηλές αλλά και χαμηλές θερμοκρασίες, με τα υψηλών να κυμαίνονται στους 100°C και 250°C ενώ τα χαμηλών στους 23°C και 70°C. Οι κυψέλες τελευταίας τεχνολογίας διαθέτουν πολυμερή μεμβράνη αλκαλική και όχι όξινη όπως τα PEM ενώ η απόδοση που επιδεικνύουν σε διαστημικές εφαρμογές αγγίζει το 60%. Βασικό μειονέκτημα αυτών των κυψελών είναι ότι 'δηλητηριάζονται' από το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στον αέρα, παρουσιάζοντας ευαισθησία και μειώνοντας τη διάρκεια ζωής τους.



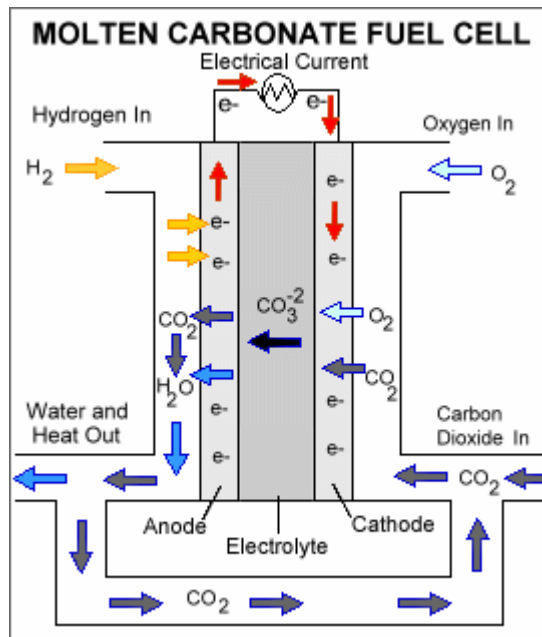
Σχήμα 3.7: Αρχή λειτουργίας της AFC κυψέλης[85]

- Φωσφορικού οξέος κυψέλη καυσίμου (PAFC), χρησιμοποιεί υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη, το οποίο βρίσκεται εντός δεμένης μήτρας από καρβίδιο του πυριτίου με τεφλόν, και πορώδη ανθρακικά ηλεκτρόδια που περιέχουν πλατίνα για καταλύτη. Αυτός ο τύπος κυψέλης χρησιμοποιείται ευρέως σε σταθερές εφαρμογές παραγωγής ενέργειας. Τα PAFCs δεν έχουν την ίδια ευαισθησία στις ακαθαρσίες από τα καύσιμα σε σχέση με τις λοιπές κυψέλες, διαθέτουν μεγάλη απόδοση σε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (πάνω από 85%) αλλά μόνα τους σε παραγωγή ηλεκτρισμού έχουν απόδοση από 37%-42%. Οι κυψέλες αυτές είναι ακριβότερες λόγω όγκου αφού απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες πλατίνας.



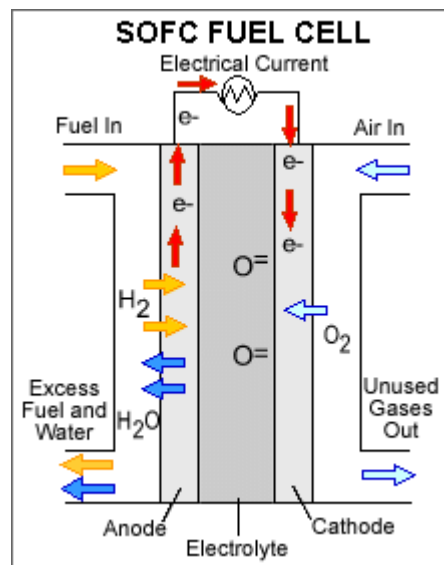
Σχήμα 3.8: Αρχή λειτουργίας της PAFC κυψέλης[85]

- Τετηγμένη ανθρακική κυψέλη καυσίμου (MCFCs), χρησιμοποιεί ως καταλύτη τετηγμένο μίγμα ανθρακικού άλατος που εναιωρείται σε μια πορώδης, αδρανώς χημικά, κεραμική μήτρα από οξείδιο του αργιλίου και λιθίου. Η θερμοκρασιακή τους λειτουργία είναι υψηλή καθώς αγγίζει τους 650°C με μη ευγενή μέταλλα να χρησιμοποιούνται ως καταλύτες στην άνοδο και κάθοδο. Όταν τα MCFCs συνδυαστούν με ένα στρόβιλο η απόδοση φθάνει και το 65% ενώ όταν η υπολειπόμενη θερμότητα συλληφθεί και χρησιμοποιηθεί εκ νέου η ολική απόδοση καυσίμου ανέρχεται στα 85%. Στις κυψέλες αυτές σε αντίθεση με τις λοιπές δεν απαιτείται εξωτερικός αναμορφωτής για τη μετατροπή φυσικού αερίου και βιαερίου σε υδρογόνο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται η μετατροπή του μεθανίου και λοιπών ελαφρών υδατανθράκων γίνεται εσωτερικά. Μοναδικό μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι η αντοχή και η διάρκεια ζωής εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας.



Σχήμα 3.9: Αρχή λειτουργίας της MCFC κυψέλης[85]

- Στερεού οξειδίου κυψέλη καυσίμου (SOFCs), χρησιμοποιεί ένα σκληρό, μη πορώδες, κεραμικό μίγμα ως ηλεκτρολύτη. Η αποδοτικότητα μετατροπής καυσίμου σε ηλεκτρισμό είναι 60% ενώ σε βελτιστοποιημένο, συμπαραγωγικό σύστημα μπορεί να φθάσει τα 85%. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (1000°C) δεν χρησιμοποιούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες. Ομοίως με τις MCFCs, οι κυψέλες αυτές μετατρέπουν εσωτερικά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών ποικίλα καύσιμα ενώ δεν έχουν ευαισθησία στο μονοξείδιο του άνθρακα και το θείο. Όμως η ανθεκτικότητα του εξοπλισμού τους είναι μειωμένη, απαιτείται θερμική θωράκιση και έχουν αργή εκκίνηση λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν.



Σχήμα 3.10: Αρχή λειτουργίας της SOFC κυψέλης[85]

- Αντιστρεπτή κυψέλη καυσίμου, χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να διαχωρίσουν το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο μέσω της ηλεκτρόλυσης. Η αντιστρεπτή κυψέλη μπορεί να παρέχει ενέργεια όποτε υπάρξει ζήτηση αλλά όταν οι συνθήκες δεν το επιτρέπουν (έντονοι άνεμοι, συννεφιά κλπ) τότε η κυψέλη μπορεί να αποθηκεύσει το υδρογόνο [49].

3.3 Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού συστήματος - κυψέλης υδρογόνου

Η σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος για απομονωμένους καταναλωτές τίθεται παρακάτω:

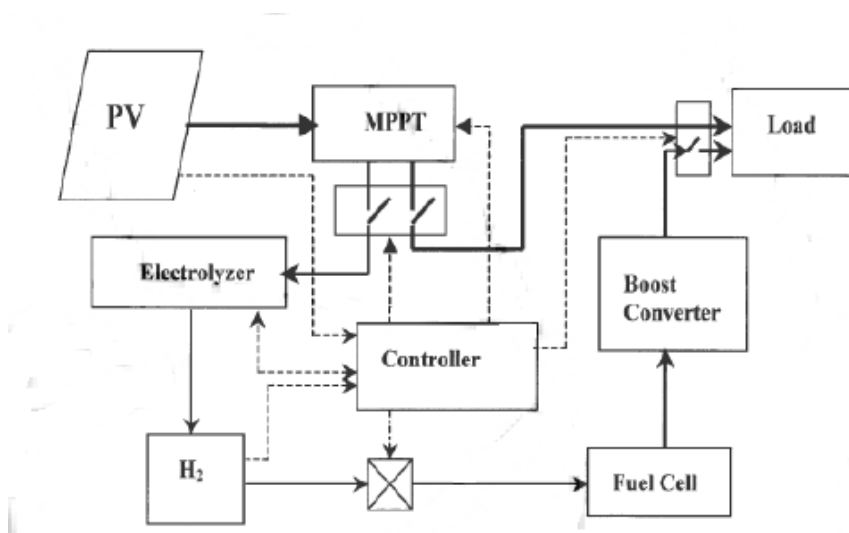
Υβριδικό σύστημα καλείται ένα σύνολο μονάδων που συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες ή/και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ο κύριος σκοπός που εξυπηρετούν τα υβριδικά συστήματα είναι να προμηθεύουν με ενέργεια απομονωμένες, μη συνδεδεμένες με το δίκτυο περιοχές όπου το κόστος σύνδεσης και διανομής σε τόσο μακρινές αποστάσεις είναι σημαντικά υψηλό. Είναι γνωστό ότι οι ΑΠΕ, είναι μεν πηγές φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν ως βάση τους τον ήλιο, τον άνεμο κ.α., αλλά εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή τα υβριδικά συστήματα έρχονται να καλύψουν με αποτελεσματικό τρόπο την αύξηση της διαθεσιμότητας ενέργειας σε απομονωμένους καταναλωτές. Έτσι τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί σχετικές τεχνολογίες με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μια από της εν λόγω τεχνολογίες είναι και το Υβριδικό σύστημα (Φ/Β) σύστημα – κυψέλη υδρογόνου. Η σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος για απομονωμένους καταναλωτές απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9.

Ως πλεονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

1. η υψηλή απόδοση, ιδιαίτερα κατά την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας
2. κατάλληλη για οικιακές εφαρμογές και
3. σχεδόν μηδενικά επίπεδα έκλυσης ρυπογόνων αερίων

Η τεχνολογία των (Φ/Β) στοιχείων είναι πλέον μια ώριμη τεχνολογία με μικρές μεν αποδόσεις αλλά με μηδενικό κόστος ηλιακής ενέργειας. Από τη άλλη πλευρά το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας του υδρογόνου είναι ότι αυτό δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση και ως εκ τούτου θα πρέπει να παραχθεί. Η παραγωγή υδρογόνου από Α.Π.Ε., κι η χρήση του σε κυψέλες καυσίμου, έχει ως μοναδικά παράγωγα προϊόντα νερό και θερμότητα.

Σε μικρή κλίμακα, μια (Φ/Β) συστοιχία συνοδευόμενη από έναν ηλεκτρολύτη και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, αποτελεί ένα ευέλικτο σύστημα που μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε τοποθεσία [11].



Σχήμα 3.11: Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού - κυψέλης υδρογόνου[11]

Όπως παρατηρείται το σύστημα ξεκινάει τη λειτουργία του με μια πολυκρυσταλλική φωτοβολταϊκή διάταξη και συνεχίζει τη ροή του προς τον ανιχνευτή μέγιστης ισχύος με σκοπό τη βελτιστοποίηση της τάσης λειτουργίας του συστήματος ενώ ταυτόχρονα διατίθεται δίοδος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς τον ελεγκτή φόρτισης ώστε το σύστημα να μην ξεπερνάει τις οριακές τιμές φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών. Έπειτα το εξαγόμενο ρεύμα παρέχεται προς τον ηλεκτρολύτη με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου και συνεχίζει προς το δοχείο αποθήκευσης του, το οποίο χρίζει ικανών διαστάσεων ώστε να αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου που έχουν παραχθεί σε ιδανικές συνθήκες και να διατηρεί κατά τις περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας μια σταθερή ροή υδρογόνου προς την κυψέλη πολυμερούς ηλεκτρολύτη

μεμβράνης και κατ' επέκταση μια σταθερή θερμική παροχή προς το φορτίο. Τέλος τοποθετείται ένας μετατροπέας ανύψωσης ώστε να διατίθεται αυξημένη τάση εξόδου προς το φορτίο.

4 Κοστολόγηση συστημάτων παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

4.1 Κοστολόγιο ενός πλήρους συστήματος φωτοβολταϊκών

Θα εξεταστεί αναλυτικά παρακάτω το κόστος των υλικών, το κόστος εγκατάστασης, καθώς και ποιοι έχουν το δικαίωμα να εγκαταστήσουν ένα μικρό φωτοβολταϊκό σύστημα.

4.1.1 Δικαίωμα τοποθέτησης

Η βασική προϋπόθεση για το ποιος μπορεί να βάλει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στο σπίτι του ή σε ένα ιδιωτικό χώρο αναλύεται ακολούθως.

Ένα μικρό φωτοβολταϊκό σύστημα μέχρι 10 kW μπορεί να εγκαταστήσει ένας ιδιώτης ή μια μικρή επιχείρηση που μπορεί να λάβει συμμετοχή σχετικά άμεσα στο υπάρχον πρόγραμμα των οικιακών φωτοβολταϊκών με απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει σύνδεση με τη Δ.Ε.Η. Συνεπώς το κτήριο ή μικρή επιχείρηση όπου θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό θα πρέπει να διαθέτει ένα κόμβο σύνδεσης με τη Δ.Ε.Η. Δικαίωμα συμμετοχής στο πρόγραμμα έχουν τα φυσικά πρόσωπα, οι μη επιτηδευματίες και φυσικά ή νομικά πρόσωπα επιτηδευματίες που κατατάσσονται στις πολύ μικρές επιχειρήσεις (με μέγιστο ανθρώπινο δυναμικό 10 άτομα και τζίρο έως και 2 εκατομμύρια ευρώ). Επίσης έχουν δικαίωμα συμμετοχής οι κύριοι κάτοχοι οριζόντιων ιδιοκτησιών εκπροσωπούμενοι από τον κύριο διαχειριστή έπειτα από συμφωνία του συνόλου, είτε ένας από αυτούς με τη παραχώρηση κοινόχρηστου χώρου από τους υπόλοιπους [55].

4.1.2 Κόστη των κύρια μέρων ενός φωτοβολταϊκού οικιακού συστήματος

4.1.2.1 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Στο υποκεφάλαιο 3.1.2.1. περί της δομής των φωτοβολταϊκών υπήρξε μια αναφορά για την διαφοροποίηση κόστους μεταξύ των δυο ευρύτερα χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών στοιχείων, παρακάτω θα αναφερθεί περαιτέρω αυτό αλλά και το κόστος το οποίο διαμορφώνεται για συγκεκριμένο εμπορικό μοντέλο.

Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικού στοιχείου είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone), και οι δυο μέθοδοι βασίζονται εξίσου στην εξαγωγή ράβδων πυριτίου.

Το εμπορικό μοντέλο το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα που μελετάται είναι τα Sharp NU-RD260 Mono 60 Cells με μέγιστη ισχύ P_{\max} 260W και κόστος άνευ Φ.Π.Α. 240€ [56].

Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής πολυκρυσταλλικού στοιχείου είναι η μέθοδος της απευθείας στερεοποίησης (directional solidification), η μέθοδος χύτευσης πυριτίου και η πιο εξελιγμένη μορφή του, η μέθοδος της ηλεκτρομαγνητικής χύτευσης (electromagnetic casting).

Το εμπορικό μοντέλο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα που μελετάται είναι τα Sharp ND-RC260 Poly 60 Cells με μέγιστη ισχύ P_{\max} 260W και κόστος άνευ Φ.Π.Α. 220€ [56].

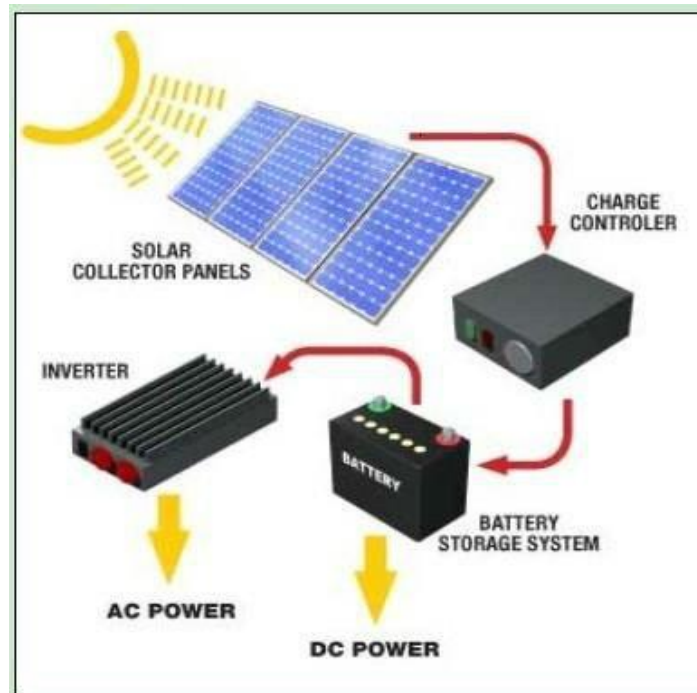
4.1.2.2 Αναστροφές – Inverter

Οι αναστροφείς διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο σε οποιοδήποτε σύστημα ηλιακής ενέργειας καθώς θεωρούνται οι εγκεφαλοι του φωτοβολταϊκού συστήματος, είτε για ένα σύστημα κατοικίας 2 kW είτε σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας 5 MW.



Σχήμα 4.1: Αναστροφές[56]

Οι τεχνολογίες αναστροφών έχουν βελτιωθεί σημαντικά, έτσι ώστε εκτός από τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, να παρέχουν και άλλες δυνατότητες και υπηρεσίες που εξασφαλίζουν ότι ο αναστροφέας, μπορεί να λειτουργήσει σε βέλτιστο επίπεδο απόδοσης, όπως η παρακολούθηση στοιχείων, οι προηγμένοι έλεγχοι χρήσης και η εφαρμοσμένη μηχανική σχεδίου συστημάτων.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα μετατροπής [64]

Οι κατασκευαστές αναστροφών παρέχουν επίσης υπηρεσίες που αφορούν μετά την εγκατάσταση του inverter, που είναι ακέραιες στη διατήρηση της ενεργειακής παραγωγής και παραμένουν σταθερές στο υψηλό επίπεδο της απόδοσης του προγράμματος, συμπεριλαμβανομένης της προληπτικής συντήρησης των O&M υπηρεσιών (Observations an Measurements) και του γρήγορου μέσου χρόνου απόκρισης επισκευής (MTTR).

Καθώς η τιμή των στοιχείων πέφτει, οι αναστροφείς και τα πρόσθετα τμήματα του συστήματος έχουν γίνει στόχος όσο αφορά τη μείωση τιμών, αναζητώντας έτσι την ανταγωνιστικότητα μέσω του EPC (Engineering, Procurement, and Construction).

Κατά συνέπεια, οι κατασκευαστές αναστροφών προσπαθούν συνεχώς να οδηγήσουν κάτω από την καμπύλη δαπανών τα προϊόντα. Μερικές επιχειρήσεις είναι σε θέση να το κάνουν αυτό επιτυχώς με τις τροποποιήσεις στις στρατηγικές κατασκευής και εγκαταστάσεις κατασκευής και οικοδόμησης, μέσα από τις αναδυόμενες ηλιακές

αγορές. Οι επιχειρήσεις έχουν λάβει την έννοια πυρήνων του σχεδίου της βιομηχανικής κρίσης, καθώς σχεδιάζουν ένα προϊόν έχοντας κάνει ένα γενικό πλάνο με σκοπό την παραγωγή περισσότερων τεμαχίων εύκολα και γρήγορα χωρίς να μειώνεται η απόδοση. Οι κατασκευαστές αναστροφέων έχουν την ικανότητα να επιτύχουν τη χαμηλότερου κόστους επιτυχία μέσω των καλά διατηρημένων συνεργασιών με τους προμηθευτές.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι με τον καιρό έχουν αυξηθεί σε διαστάσεις τα πλήρη ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, μερικοί ηλιακοί κατασκευαστές αναστροφέων έχουν αρχίσει να αναπτύσσουν μεγαλύτερους αναστροφείς 1.000VA που έχουν κατά πολύ μειωμένα κόστη. Ανάλογα με την αποδοτικότητα των συστοιχιών, ένα σύστημα 2 MW ανέρχεται πιθανώς σε 10 με 15 στρέμματα έκταση. Το προαναφερθέν σύστημα απαιτεί έναν αναστροφέα με πολύ μεγαλύτερες ικανότητες από αυτές που οι τρέχοντες τυποποιημένοι αναστροφείς έχουν [64].

Ένα ικανό μοντέλο αναστροφέα που μπορεί να δεχθεί μέχρι και 1000 kWp από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προτείνεται από τη γερμανική Westech Solar, με ισχύ 2.500VA καθαρού ημίτονου με ενσωματωμένο ελεγκτή φόρτισης, MPPT (ανιχνευτή μέγιστης ισχύος), χαμηλή αυτοκατανάλωση στα 1,3W και κόστος 600€ άνευ Φ.Π.Α [56].

4.1.2.3 Συσσωρευτές

Οι επαναφορτιζόμενες ηλιακές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα, εκτός δικτύου για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες ηλιακές μπαταρίες χρησιμοποιούν υγρά κελιά για την αποθήκευση ενέργειας, ενώ άλλες χρησιμοποιούν σφραγισμένες ή μπαταρίες κυττάρων τζελ.

Οι μπαταρίες NiMH προτιμώνται πιο συχνά, όταν πρόκειται για την ηλιακή ενέργεια, επειδή είναι καλύτερες από ό, τι οι πρότυπες μπαταρίες NiCad από την άποψη της φόρτισης και τους κύκλους απελευθέρωσης.

Κάθε μπαταρία έχει διαφορετικές απαιτήσεις θερμοκρασίας και γενικά συμπεριφορά μακροχρόνια, έτσι κάθε μπαταρία χρησιμοποιείται για συγκεκριμένους σκοπούς.

Ένας ιδανικός συσσωρευτής για μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ο Ultracell UnZ OPzV 2V 1800AH-C100 με χωρητικότητα 1800AH, ρυθμό εκφόρτισης 100 ωρών,

3.500 κύκλους εκφόρτισης και βαθμό εκφόρτισης 50%. Το κόστος αυτού ανέρχεται στα 700€ μη συμπεριλαμβανομένου του Φ.Π.Α [56].



Σχήμα 4.3: Συσσωρευτής [56]

4.1.2.4 Βάσεις στήριξης φωτοβολταϊκού συστήματος

Οι βάσεις στήριξης αφορούν τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και είναι αναπόσπαστο κομμάτι για ένα σύστημα, καθώς καθορίζουν σε ένα μεγάλο βαθμό την απόδοση του. Οι βάσεις στήριξης ουσιαστικά καθορίζουν τη θέση και την απόδοση των κυττάρων στο χώρο, διότι καθορίζουν την κατεύθυνση τους στο σημείο τοποθέτησης. Οι βάσεις στήριξης είναι μεταλλικές ράβδοι από γαλβανισμένο ατσάλι στις οποίες στηρίζονται. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις όπου μπορούν να τοποθετηθούν, για καλύτερη απόδοση ανάλογα και με την κάθε περίπτωση, ακολούθως παρουσιάζονται σχηματικά οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται καθώς και τα κόστη που προκύπτουν κατά την εγκατάστασή τους. Τα κόστη των μερών και της εργασίας εγκατάστασης δόθηκαν κατά προσέγγιση, με γνώμονα το μέγεθος του προαναφερθέντος μοντέλου στο υποκεφάλαιο 4.1.2.1-πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού Sharp ND-RC260 Poly 60 Cells διαστάσεων 165X99X5 cm-από το μηχανουργείο Β. Μπάτας & ΣΙΑ ΟΕ.



Alpha
A stroke of genius

Σχήμα 4.4: Τύπος 'Α'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Α υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 1500€.



Kappa
Aesthetics built in

Σχήμα 4.5: Τύπος 'Κ'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Κ υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 1700€.



Theta

Only the sun gets in

Σχήμα 4.6: Τύπος 'Θ'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Θ υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 1200€.



Lambda

Flat roof wizardry

Σχήμα 4.7: Τύπος 'Λ'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Λ υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 3200€.



Σχήμα 4.8: Τύπος 'Λ LIGHT'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Λ Light υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 3100€.



Σχήμα 4.9: Τύπος 'ΣΙ'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου ΣΙ υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 2600€.



Σχήμα 4.10: Τύπος 'ΣΙ XL'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου ΣΙ XL υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 5200€.



Σχήμα 4.11: Τύπος "ΣII"[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Σ II υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 7600€.



Σχήμα 4.12: Τύπος 'Ω'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου Ω υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 1850€.



Σχήμα 4.13: Τύπος 'I'[88]

Το κόστος της κατασκευής τύπου I υπολογίστηκε ενδεικτικά στα 2150€.

Το σύστημα ανίχνευσης ηλίου δυο αξόνων είναι άλλη μια προηγμένη τεχνολογία στήριξης η οποία μεγιστοποιεί την απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος έως και 40% του έκαστου στοιχείου. Οι άξονες κίνησης του παρακάτω μοντέλου καλύπτουν εύρος της γωνιάς ανύψωσης από 0°~75° και της αζιμούθιας γωνιάς από -120°~120°. Οι κινητήρες των δυο αξόνων καταναλώνουν 75 W έκαστος για να πραγματοποιήσουν την κλίση και την περιστροφή της διάταξης.

Το κόστος αυτού του συστήματος ανέρχεται στα 4000€ ενώ η χρήση του θα παρουσίαζε ενδιαφέρον σε εγκαταστάσεις βιομηχανικού επίπεδου ή πολύ μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα [58].



Σχήμα 4.14: Σύστημα ανίχνευσης ηλίου-Δύο αξόνων[58]

4.1.3 Κοστολόγιο ενός πλήρους φωτοβολταϊκού συστήματος

Το κόστος είναι ένα μεγάλο θέμα που τίθεται όσο αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς τις περισσότερες φορές είναι μεγάλο και πολλοί καταναλωτές δεν έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασής του.

Τα χρήματα που χρειάζεται η δόμηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος έχουν άμεση σχέση με την ισχύ του συστήματος που απαιτείται από τον εκάστοτε καταναλωτή. Το κόστος που προκύπτει για την εγκατάσταση ενός μικρού συστήματος, για παράδειγμα ένα φωτοβολταϊκό 200 W ισχύος μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος, έχει κόστος περίπου από 700€ μέχρι 1100€. Εάν αυξηθούν οι απαιτήσεις και επιθυμείται η εγκατάσταση συστήματος της τάξεως των 5 φωτοβολταϊκών από 200 W το καθένα δηλαδή 1 kW σύνολο απόδοση, τότε το κόστος θα είναι περίπου 2200€ με 3400€. Σε περίπτωση που θελήσουμε να εγκαταστήσουμε ένα σύστημα της τάξεως των 5 kW τότε το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 17,500€ μέχρι και 27,500€. Το μεγαλύτερο κόστος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος κατέχουν τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, καθώς καταλαμβάνουν το 50% με 70% του συνολικού κόστους του συστήματος το υπόλοιπο κόστος, καταλαμβάνουν οι λοιπές συσκευές καθώς επίσης οι καλωδιώσεις και οι ηλεκτρολογικοί πίνακες. Ανακεφαλαιώνοντας, το κόστος για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Ελλάδα είναι από 2200€ μέχρι 3400€ (τιμές μη συμπεριλαμβανομένου του ΦΠΑ) ανά kW ή 2.2 έως 3.4€ ανά Watt και αυξάνεται ανάλογα με την ισχύ του συστήματος [57].

4.2 Κοστολόγιο και υλικά κυψέλων υδρογόνου

Για την εγκατάσταση ενός τέτοιου οικιακού συστήματος ελήφθησαν πληροφορίες από Αμερικάνικες πηγές, καθώς στην Ελλάδα δεν χρησιμοποιείται ένα τέτοιο σύστημα για σπίτια μέχρι και σήμερα, φυσικά θα ήταν πάρα πολύ καλό να εξελιχθεί ένα τέτοιο σύστημα, απλά δεν υπάρχουν ακόμα οι απαραίτητες υποδομές στέγασης του. Εάν επιθυμείται ενεργειακή αυτονομία, η εγκατάσταση του συστήματος ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου πιθανά να γίνει diy (do-it-yourself) με εξαιρετική προσοχή και τεχνογνωσία ή να βρεθεί μια πεπειραμένη εταιρία να βοηθήσει στην τοποθέτηση. Η βιομηχανία παραγωγής των κυψελών καυσίμου υδρογόνου αλλάζει συχνά, με αποτέλεσμα το κόστος να είναι κυμαινόμενο για κάποιον που θέλει να εγκαταστήσει ένα τέτοιο σύστημα σπίτι του.

4.2.1 Παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου

Ένας ηλεκτρολύτης οικιακής χρήσης όπως ο HydroFill Pro της Horizon Fuel Cell Technologies μπορεί να τροφοδοτήσει κυψέλη υδρογόνου 2 W έως 30 W ισχύος, μπορεί επίσης να παράξει έως και 3L H₂/hour ενώ η τιμή του ανέρχεται στα 560€.

Σύμφωνα με τον εμπορικό ηλεκτρολύτη που παρουσιάστηκε παραπάνω τροφοδοτείται κυψέλη υδρογόνου PEM 30 W όπου παρέχει μέγιστη ροή υδρογόνου 0.42 L/min τότε:

$0,42 \text{ LPM H}_2 * 60 \text{ min/hour} * 16 \text{ hours/day}$ (οι ώρες που θεωρητικά δεν υπάρχει ηλιοφάνεια) = 403,2 L/day.

Έτσι το κόστος των δοχείων πίεσης ή των φιαλών μεταλλικών υβριδίων για την αποθήκευση του υδρογόνου μπορούν να κυμανθούν από 2400 έως και 4600€ αντίστοιχα [60].



Σχήμα 4.15: Ηλεκτρολύτης HydroFill Pro[60]



Σχήμα 4.16: Οικιακή παραγωγή υδρογόνου[90]

4.2.2 Κυψέλες υδρογόνου

Μια συστοιχία κυψελών καυσίμου PEM είναι το βασικό στοιχείο του συστήματος για να εξάγεται συνεχές ρεύμα μεταβλητού επιπέδου, που μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος για οικιακή χρήση με τη βοήθεια ενός αναστροφέα που ήδη έχει περιγραφεί διεξοδικά.

Οι κυψέλες καυσίμου κατέχουν το μειονέκτημα ότι δεν θα λειτουργήσουν υπό το μηδέν.



Σχήμα 4.28: Κυψέλη υδρογόνου [91]

Η ισχύς της κυψέλης υδρογόνου που θα εγκατασταθεί εξαρτάται αποκλειστικά από το τι ενέργεια ζητείται από το χώρο κατανάλωσης και από τις ανάγκες υποστήριξης του υβριδικού συστήματος. Το κόστος της κυψέλης που εξετάστηκε παραπάνω ισχύος 30 W είναι 900€ [59].



Σχήμα 4.29: Οικία με εγκατάσταση υδρογόνου[92]

4.2.3 Κοστολόγιο

Προς στιγμήν δεν υπάρχει εμπορικά διαθέσιμη επιλογή, καθώς ένα προσαρμοσμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα μπορεί να κοστίσει από 33000€ μέχρι 94000€. Εν κατακλείδι, το κόστος είναι πολύ μεγάλο για όποιον θέλει να εγκαταστήσει σύστημα κυψέλης υδρογόνου με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας [59].

4.3 Κοστολόγιο και υλικά συστήματος ηλιοθερμικής ενέργειας

Η ηλιακή θερμική ενέργεια είναι μια δοκιμασμένη ελεγμένη τεχνολογία, που έχει χρησιμοποιηθεί για αιώνες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του νερού και τα δωμάτια, για την ψύξη ή αφύγρανση του αέρα περιβάλλοντος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, καθώς και για σκοπούς ξήρανσης και το σημαντικότερο, μειώνει το κόστος της ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας, κάνει δηλαδή εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων με στόχο τη θέρμανση.

Γερμανικές εταιρείες ηλιακής θερμικής ενέργειας έχουν πολλά χρόνια εκτεταμένη εμπειρία στην παραγωγή, το σχεδιασμό και την κατασκευή των ηλιακών θερμικών ενεργειακών συστημάτων και των στοιχείων τους. Η βιομηχανία ηλιακής θερμικής ενέργειας στη Γερμανία είναι μεταξύ των ηγετών του κόσμου με το 90% να χρησιμοποιεί επίπεδους συλλέκτες.

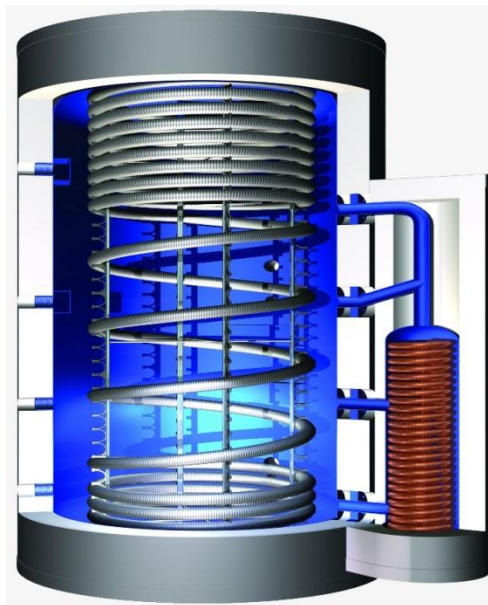


Σχήμα 4.19: Οικία με ηλιοθερμική ενέργεια [93]

4.3.1 Κόστος στοιχείων ηλιοθερμικού συστήματος

Ένα ηλιακό-θερμικό σύστημα όπως προαναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο αποτελείται από τα ακόλουθα λειτουργικά στοιχεία:

- Τον επίπεδο συλλέκτη MSFC100-2,72 με δείκτη απόδοσης $\eta_0=0,835$, απορροφητής επιλεκτικού τύπου (μπλε τιτανίου), επιφάνεια 2,72 m² και κόστος 470€.
- Την αντλία νερού στα ηλιοθερμικά συστήματα ενεργοποιείται μέσω των θερμοστατών για να παρέχεται συνεχώς στο χώρο το απαιτούμενο θερμικό φορτίο. Μια εμπορική, μικρής ισχύος αντλία κοστίζει έως και 400€.
- Τη δεξαμενή αποταμίευσης (δοχείο αδράνειας) Combi 1000lt και έναν εναλλάκτη θερμότητας της εταιρίας SICC κόστους 3000€.
- Ως βοηθητική πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο θερμαντήρας νερού NS2 ΧΕ τριπλής ενέργειας 800lt που διαθέτει δυο εναλλάκτες θερμότητας και έχει δυνατότητα σύνδεσης με αντλία θερμότητας. Το κόστος αυτής της συσκευής είναι 4000€.
- Το ρυθμιστή παροχής του ηλιακού-θερμικού συστήματος (π.χ. ελέγχου διαφοράς θερμοκρασίας) Trolli Plus 35 με ενσωματωμένο ροόμετρο 3-35l/min. Το κόστος αυτής της συσκευής ανέρχεται 700€ [62].



Σχήμα 4.20: Δοχείο αδράνειας-εναλλάκτης θερμότητας [97]



Σχήμα 4.21: Ρυθμιστής παροχής [95]

4.3.2 Κοστολόγιο

Το κόστος για ένα ηλιοθερμικό σύστημα δεν είναι πάντα πολύ υψηλό, εξαρτάται από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις που τίθενται. Οι πληροφορίες ολοκληρωμένων ηλιοθερμικών συστημάτων ελήφθησαν από μια πρότυπη κατοικία, με ηλιοθερμική ενέργεια και υποβοήθηση από λέβητα πετρελαίου, στην Κέρκυρα όπου φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.22: Κατοικία στη Κέρκυρα [98]

Το κόστος, την απόσβεση και άλλα στοιχεία τα βλέπουμε παρακάτω πάντα βάση πληροφοριών από την εταιρία Andrianos A.E [63].

Πίνακας 4.1: Στοιχεία της εγκατάστασης στην οικία στην Κέρκυρα

Οικία	15,3 m² συλλεκτών	Απόσβεση: χρόνια: 7,5
Εμβαδό/Κλίνες: 200 m²/4 ZNX, θέρμανση χώρου	Δοχείο 1000lt	Προϋπολογισμός: 14000 €
Υποβοήθηση θέρμανσης:	% Ηλιακής κάλυψης: 50%	Ετήσια Ενεργ. Εξοικ.: 1845 €
Λέβητας πετρελαίου	Μείωση εκπομπών: 3.888 kgCO ₂	Συνολική Εξοικ. (25 έτη): 28375 €

Το παραπάνω σύστημα, λοιπόν, παρουσιάζει ένα ικανοποιητικό κόστος 14000€ με σημαντική εξοικονόμηση κόστους, απόσβεσης κατασκευής αλλά και μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της οικίας. Το σύστημα αυτό θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί όσο αφορά τις εκπομπές CO₂ με τη θερμική υποβοήθηση αντλίας θερμότητας χώρου διασυνδεδεμένης στο θερμαντήρα νερού και κατ' επέκταση με την ηλιοθερμική διάταξη.

5 Μοντέλα εκτιμήσεις ενεργειακής παραγωγής

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια καθίστανται δημοφιλή για τις εξ'αποστάσεως εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής εξαιτίας της προόδου των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της συνεχούς αύξησης των τιμών των πετρελαϊκών προϊόντων. Οι οικονομικές πτυχές αυτών των τεχνολογιών είναι αρκετά υποσχόμενες ώστε να συμπεριληφθούν στην ανάπτυξη δυνατοτήτων παραγωγής ενέργειας για τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Οι προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα των ηλιακών, αιολικών και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πρέπει να συνεχιστούν, βελτιώνοντας τις επιδόσεις τους, θεσπίζοντας τεχνικές για την ακριβή πρόβλεψη της παραγωγής τους και την αξιόπιστη ενσωμάτωσή τους με άλλες συμβατικές πηγές παραγωγής.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται μοντέλα και μεθοδολογίες αξιολόγησής τους. Οι τάσεις στο σχεδιασμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δείχνουν ότι τα υβριδικά συστήματα PV/αιολικής ενέργειας κερδίζουν δημοτικότητα. Εξετάζονται τα θέματα που σχετίζονται με τη διείσδυση αυτών των ενεργειακών συστημάτων στο σημερινό δίκτυο διανομής.

5.1 Υβριδικά φωτοβολταϊκά

Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τα καλύτερα προσαρμοσμένα για να μειώσουν την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιώντας τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει φωτοβολταϊκή γεννήτρια, γεννήτρια ντίζελ και/ή σύστημα μπαταρίας. Η αποθήκευση μπαταριών αυξάνει την ευελιξία του συστήματος ελέγχου και προσθέτει στη συνολική διαθεσιμότητα του συστήματος.

Αυτά τα ενεργειακά συστήματα έχουν καλές προοπτικές κυρίως στα ζεστά κλίματα. Αυτά τα ενεργειακά συστήματα χαρακτηρίζονται ως μία από τις οικονομικά αποδοτικές λύσεις, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των απομακρυσμένων περιοχών. Σήμερα έχει αποδειχθεί η οικονομική βιωσιμότητα του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας και αποδείχθηκε η χρησιμότητά της για μικρά χωριά έως 100 οικογένειες.

Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα που περιλαμβάνουν πιθανολογικές ή αιτιοκρατικές αναλύσεις, για να αξιολογηθεί η απόδοση του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος και να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός φωτοβολταϊκού με ντίζελ. Τα ενεργειακά συστήματα που έχουν σχεδιαστεί περιλαμβάνουν τόσο το σύστημα με την αποθήκευση της μπαταρίας όσο και το σύστημα χωρίς αποθήκευση μπαταρίας.

Μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη η μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης μπαταριών σε σχέση με την κατάσταση του φορτίου, το βέλτιστο μέγεθος του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο El-Hefnawi χρησιμοποίησε μαθηματική τεχνική για τον υπολογισμό του ελάχιστου αριθμού ημερών αποθήκευσης και του ελάχιστου αριθμού φωτοβολταϊκών συστοιχιών για υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα [17]. Οι Shrestha και Goel έδειξαν μια μέθοδο για να βρουν το βέλτιστο συνδυασμό μεγέθους συστοιχίας φωτοβολταϊκών και μπαταρίας για την κάλυψη του φορτίου ψύξης, χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα τόσο για την ηλιακή ακτινοβολία όσο και για το φορτίο [18].

Το υβριδικό σύστημα της μπαταρίας PV μπορεί επίσης να διαμορφωθεί με μια επαναληπτική τεχνική βελτιστοποίησης. Στην επαναληπτική τεχνική βελτιστοποίησης, ο βέλτιστος συνδυασμός μπορεί να αποφασιστεί με βάση το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να δικαιολογηθεί με βάση την απόσταση από την πλησιέστερη γραμμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γωνία κλίσης και αζιμούθιου για βέλτιστες επιδόσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση, δηλαδή γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικού μήκος και την εποχή. Οι Bhuiyan και Asgar βελτιστοποίησαν σύστημα φωτοβολταϊκών συσσωρευτών για τη Ντάκα, Μπανγκλαντές σε σχέση με την ισχύ εξόδου για διαφορετική γωνία κλίσης και αζιμούθιου για βέλτιστη απόδοση της υβριδικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης [20].

Η απόδοση του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος αξιολογείται με βάση την αξιοπιστία της τροφοδοσίας υπό πολύ διαφορετικές συνθήκες. Η αξιοπιστία εκφράζεται με την πιθανότητα απώλειας τροφοδοσίας. Οι Egido και Lorenzo εξέτασαν τις μεθόδους υπολογισμού της χωρητικότητας των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και της αποθήκευσης της μπαταρίας βασισμένοι στο αναλυτικό μοντέλο βασισμένο στην πιθανότητα απώλειας φορτίου [22].

Οι Notton *et al.* [23] παρουσίασαν το μαθηματικό μοντέλο για τη διαστασιολόγηση του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση πάλι την πιθανότητα απώλειας φορτίου. Οι συγγραφείς επισήμαναν ότι η βέλτιστη λύση μπορεί να επιτευχθεί εάν το

φωτοβολταϊκό συμβάλλει στο 75% των ενεργειακών αναγκών. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι επίσης μια από τις παραμέτρους λήψης αποφάσεων.

Οι Marwali *et al.* [24] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών συστοιχιών με βάση την οποία το μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης υπολογίζεται με βάση τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας που δεν πληρούνται.

Ο Wichert παρουσίασε αναθεωρημένες πρακτικές λειτουργίας του συστήματος φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο συγγραφέας έχει επισημάνει την ανάγκη για σύστημα αποθήκευσης ενέργειας χωρίς συντήρηση, πλήρως αυτόματη διαχείριση ενέργειας και αξιοπιστία των συσκευών κλιματισμού για την αύξηση της ανταγωνιστικότητας αυτών των συστημάτων [25].

5.1.1 Μοντελοποίηση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος

Η ενέργεια εισόδου στο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια υπολογίζεται ως:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + (I_b + I_d) R_r \quad (5.1)$$

, όπου I_b και I_d είναι άμεσες κανονικές και διάχυτες ηλιακές ακτινοβολίες και

R_d και R_r είναι οι παράγοντες κλίσης για το διάχυτο και ανακλώμενο τμήμα των ηλιακών ακτινοβολιών [7].

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που υπολογίζεται κατ'αυτόν τον τρόπο εξαρτάται από τη θέση του ήλιου στον ουρανό, η οποία ποικίλλει από μήνα σε μήνα. Η ωριαία ισχύς εξόδου από φωτοβολταϊκά συστήματα με περιοχή $A_{PV}(m^2)$ σε μέση ημέρα του μήνα j , όταν η συνολική ηλιακή ακτινοβολία της τεχνολογίας της πληροφορίας (kWh / m^2) προσπίπτει πάνω στη Φ / B επιφάνεια, δίνεται από [5.2]:

$$P_{sj} = I_{Tj} \eta A_{PV} \quad (5.2)$$

, όπου η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (5.3):

$$\eta = \eta_m \eta_{pc} P_f \quad (5.3)$$

και η απόδοση της μονάδας από την (5.4):

$$\eta_m = \eta_T [1 - \beta(T_c - T_r)] \quad (5.4)$$

, όπου η_T : είναι η απόδοση αναφοράς της μονάδας,

η_{pc} :είναι η απόδοση συντήρησης ισχύος,

P_f : ο συντελεστής συσσώρευσης,

b: ο συντελεστής θερμοκρασίας απόδοσης της συστοιχίας

T_r : η θερμοκρασία αναφορά για την απόδοση των Φ/B και

T_c : η μέση θερμοκρασία των Φ/B και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$T_c = T_a + \frac{a\tau}{U_L} I_T \quad (5.5)$$

, όπου T_a : είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος εκείνη τη στιγμή,

$$U_L / a\tau = I_{T,NOCT} / (NOCT - T_{a,NOCT}) \quad (5.6)$$

, όπου NOCT (normal operation cell temperature): κανονική θερμοκρασία λειτουργίας του $\Phi/B= 20^\circ\text{C}$,

$I_{T,NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$, για ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

5.2 Υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας αποτελεσματικά και οικονομικά, το επιλεγμένο μέρος θα πρέπει να έχει καλές δυνατότητες αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, απαιτούνται μελέτες τεχνικής σκοπιμότητας και μελέτες οικονομικής βιωσιμότητας, πέραν της χωρητικότητας που απαιτείται.

Προκειμένου να προβλεφθεί η απόδοση της γεννήτριας ανεμογεννητριών, έχουν αναφερθεί σε έρευνες μοντέλα πρόβλεψης βασισμένα στην ανάλυση παλινδρόμησης, τεχνική προσομοίωσης Monte-Carlo και νευρωνικού δικτύου. Ο συντελεστής χωρητικότητας της ανεμογεννήτριας επίσης αποτελεί μία από τις καθοριστικές παραμέτρους με βάση τον οποίο επιλέγεται ένας συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας στην επιλεγμένη περιοχή, ως βασικό συστατικό του υβριδικού ανέμου.

Ο βέλτιστος προγραμματισμός τοποθεσίας για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην παραγωγή αιολικής ενέργειας. Επίσης έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία υβριδικές μελέτες ελέγχου του συστήματος αιολικής ενέργειας.

Ο Celik ανέπτυξε απλοποιημένη μέθοδο για την εκτίμηση της μηνιαίας απόδοσης του συστήματος των συστημάτων αιολικής ενέργειας [26]. Η μέθοδος απαιτεί τις παραμέτρους κατανομής ταχύτητας ανέμου Weibull σε μηνιαία βάση, την αναλογία

ενέργειας προς φορτίο και το λόγο μπαταρίας προς φορτίο και κάποιο μοντέλο παραμέτρων ως είσοδο. Το μοντέλο καταλήγει σε μηνιαία αυτονομία του συστήματος. Η προσέγγιση έχει βρεθεί χρήσιμη για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος απουσίας ωριαίων δεδομένων ανέμου.

Η εφεδρική μπαταρία στο υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας αυξάνει τη διαθεσιμότητά της. Οι Elhadidy και Shaahid υπολόγισαν το βέλτιστο μέγεθος αποθήκευσης της μπαταρίας για το υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας μελετώντας τις επιπτώσεις της μεταβολής της χωρητικότητας, αποθήκευσης της μπαταρίας στην παραγωγή υβριδικής ενέργειας [13],[14].

Επίσης αναφέρθηκε από ερευνητές συναλλαγή μεταξύ του μεγέθους της χωρητικότητας αποθήκευσης και της ισχύος ντίτζελ που απαιτείται για το φορτίο υποθέτοντας ότι οι παραγωγοί ανέφεραν σταθερή παραγωγή αιολικής ενέργειας. Τα υβριδικά συστήματα αιολικής ενέργειας αξιολογήθηκαν επίσης βάσει της πιθανότητας απώλειας φορτίου. Για μια δεδομένη πιθανότητα απώλειας φορτίου, μπορούν επίσης να βρεθούν ο βέλτιστος συνδυασμός ανέμου, μπαταρίας και ντίτζελ. Επίσης αναφέρεται το δυναμικό διείσδυσης του αιολικού συστήματος στο δίκτυο.

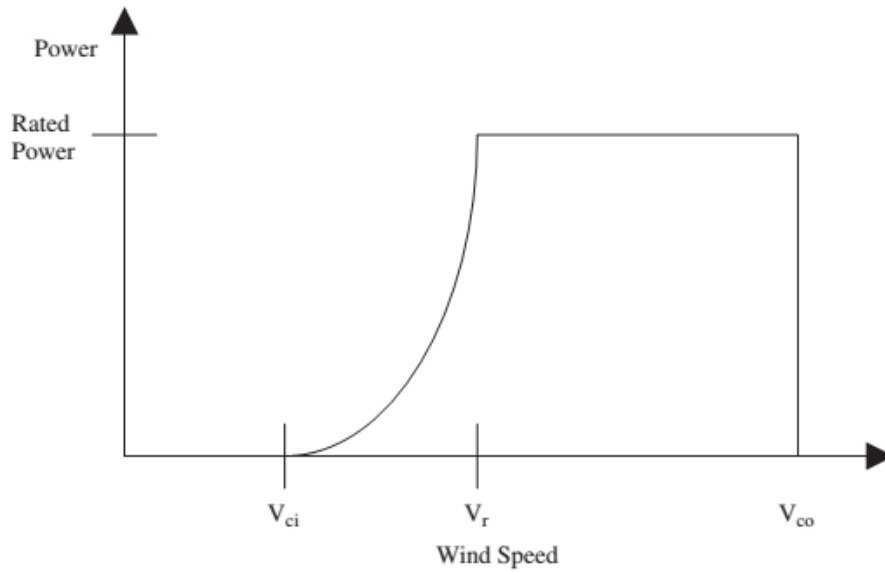
5.2.1 Μοντελοποίηση αιολικού συστήματος

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας ανεμογεννητριών σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του κέντρου του στροβίλου και τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας του στροβίλου. Η ταχύτητα ανέμου στη πλήμνη του κέντρου του στροβίλου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση ισχύος:

$$V_z = V_i \left[\frac{Z}{Z_i} \right]^x \quad (5.7)$$

όπου V_z και V_i είναι η ταχύτητα του ανέμου στην πλήμνη Z και στο ύψος αναφοράς Z_i , αντίστοιχα και το x είναι ο εκθέτης της εξίσωσης ισχύος.

Στο Σχήμα 5.1 αντικατοπτρίζονται τα χαρακτηριστικά του ανεμοστροβίλου. Η ισχύς στην έξοδο P_w (kW/m^2) από την γεννήτρια ανεμογεννητριών μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:



Σχήμα 5.1. Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας[27].

$$\begin{aligned}
 P_w &= 0, & V < V_{ci}, \\
 P_w &= aV^3 - bP_r, & V_{ci} < V < V_r, \\
 P_w &= P_r, & V_r < V < V_{co}, \\
 P_w &= 0, & V > V_{co},
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

, όπου
$$\alpha = P_r / (V_r^3 - V_{ci}^3) \tag{5.9}$$

$$b = V_{ci}^3 / (V_r^3 - V_{ci}^3) \tag{5.10}$$

P_r : ονομαστική ισχύς και

V_r , V_{ci} και V_{co} : η ονομαστική, της έντασης και της διακοπής ταχύτητας, αντίστοιχα.

Η πραγματική ισχύς που διατίθεται από την ανεμογεννήτρια δίνεται από την εξίσωση (5.11):

$$P = P_w A_w \eta \tag{5.11}$$

, όπου A_w : είναι η συνολική περιοχή σάρωσης

η : είναι η απόδοση της γεννήτριας και των αντίστοιχων μετατροπέων

5.3 Υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκού/ανεμογεννήτριας

Ανεξάρτητα από μόνα τους η εμπορική φωτοβολταϊκή ή αιολική ενέργεια, δεν παράγουν αξιοποιήσιμη σημαντική ενέργεια για μεγάλο μέρος του χρόνου κατά τη διάρκεια του έτους. Ο συνδυασμός Φ/Β και ανεμογεννήτριας σε ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα μειώνει τις απαιτήσεις της ‘τράπεζας’ μπαταριών και του πετρελαίου. Η σκοπιμότητα του υβριδικού συστήματος, Φ/Β/αιολικής ενέργειας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία και το δυναμικό αιολικής ενέργειας που διατίθενται στην περιοχή. Έχουν αναφερθεί διάφορες μελέτες σκοπιμότητας και επιδόσεων για την αξιολόγηση της επιλογής των υβριδικών φωτοβολταϊκών /συστημάτων αιολικής ενέργειας.

Επίσης σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν η επιφάνεια των συστοιχιών PV, ο αριθμός ανεμογεννητριών και η μπαταρία. Η χωρητικότητα αποθήκευσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών/ανεμογεννητριών, ενώ ‘ικανοποιείται’ το φορτίο. Οι Nehrir *et al.* [28] παρουσίασαν την προσέγγιση της μοντελοποίησης μέσω υπολογιστών για την αξιολόγηση της γενικής απόδοσης του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας.

Ο Celik πρότεινε μια τεχνική για την αξιολόγηση της απόδοσης του υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών/αιολικών συστημάτων χρησιμοποιώντας συνθετικά δεδομένα καιρού [29]. Οι Kolhe συζήτησαν διεξοδικά το αναλυτικό μοντέλο για την πρόβλεψη της απόδοσης υβριδικών συστημάτων Φ/Β/αιολικής ενέργειας με αποθήκευση ενέργειας υδρογόνου για μακροχρόνια χρήση [30].

Το βέλτιστο μέγεθος του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί σε ωριαία βάση ή με βάση την μέση ημερήσια ισχύ ανά μήνα, την ημέρα της ελάχιστης φωτοβολταϊκής ισχύος ανά μήνα και την ημέρα της ελάχιστης αιολικής ενέργειας ανά μήνα.

Οι Ai *et al.* [31] παρουσίασαν μια μέθοδο για το βέλτιστο μέγεθος του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας. Η απόδοση των υβριδικών φωτοβολταϊκών/αιολικής ενέργειας συγκρίθηκε σε ωριαία βάση, καθορίζοντας τη χωρητικότητα των ανεμογεννητριών, την ετήσια πιθανότητα απώλειας φορτίου με διαφορετική χωρητικότητα φωτοβολταϊκών συστοιχιών και ‘τράπεζας’ μπαταριών. Η συναλλαγή καμπύλης μεταξύ ‘τράπεζας’ μπαταρίας και χωρητικότητας φωτοβολταϊκών

συστοιχιών για δεδομένη πιθανότητα απώλειας φορτίου βοηθάει να βρεθεί η βέλτιστη διαμόρφωση με το ελάχιστο κόστος.

Από τους ερευνητές έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης, για να σχεδιάσουν το υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών/αιολικών συστημάτων, όπως ο γραμμικός προγραμματισμός, η πιθανολογική προσέγγιση, η επαναληπτική τεχνική, ο δυναμικός προγραμματισμός και ο πολλαπλός στόχος.

Προκειμένου να υπολογιστούν οι συνέπειες της αξιοπιστίας/κόστους του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας σε μικρά απομονωμένα συστήματα ισχύος, οι Karki και Billinton παρουσίασαν την προσέγγιση Monte-Carlo [32]. Οι Samarakou *et al.* [33] συνέκριναν τα αποτελέσματα δύο τεχνικών βελτιστοποίησης με βάση το Simplex και έναν άλλο αλγόριθμο για το υβριδικό σύστημα PV/αιολικής ενέργειας.

Οι Al-Ashwal και Moghram παρουσίασαν μια μέθοδο αξιολόγησης βάσει της πιθανότητας απώλειας φορτίου για να αποφασίσουν τη βέλτιστη αναλογία δυναμικότητας φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών σε ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκής/αιολικής ενέργειας [34].

Ο βέλτιστος συνδυασμός συστημάτων επιλέχθηκε με βάση το κόστος κεφαλαίου και το ετήσιο επίπεδο αυτονομίας. Το επίπεδο αυτονομίας του συστήματος ορίζεται σε όρους πιθανότητας απώλειας φορτίου και χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί η διαμόρφωση του συστήματος.

Οι Protogeropoulos *et al.* [36] ανέπτυξαν γενική μεθοδολογία εξετάζοντας παράγοντες σχεδιασμού, όπως η αυτονομία, το μέγεθος και το βαθμό βελτιστοποίησης. Οι συγγραφείς υπολογίζουν επίσης τις απαιτήσεις μεγέθους μπαταρίας για να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο της αυτονομίας χρησιμοποιώντας μοντέλο προσομοίωσης απόδοσης συστήματος.

Παρατηρείται ότι για επίτευξη υψηλής αυτονομίας, απαιτείται μια γεννήτρια εφεδρείας η οποία μειώνει τη χωρητικότητα αποθήκευσης της μπαταρίας. Οι Hennet και Samarakou συζήτησαν την προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση των υβριδικών φωτοβολταϊκών/σύστημα αιολικής ενέργειας/συσσωρευτή με συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας και υπολόγισαν τη βέλτιστη διαμόρφωση με βάση την πιθανότητα απώλειας φορτίου.

Οι μηνιαίοι συνδυασμοί ηλιακών και αιολικών πόρων οδηγούν σε ηλιακό μεροληπτό μήνα, ανεμομεροληπτό μήνα και μήνες ακόμη και με ηλιακή και αιολική ενέργεια. Το συνολικό κόστος συστήματος και το κόστος της μονάδας που παράγεται για μια

διάρκεια ζωής του συστήματος μπορεί να αναλυθεί σε σχέση με την ετήσια απόδοση του συστήματος.

Ο Celik παρουσίασε μια τεχνοοικονομική ανάλυση με βάση την ηλιακή ενέργεια και μερικούς μήνες αέρος για αυτόνομο υβριδικό σύστημα Φ/Β/αιολικής ενέργειας. Παρατηρήθηκε ότι ο βέλτιστος συνδυασμός του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας παρέχει υψηλότερη απόδοση συστήματος από ό,τι είτε από το ενιαίο σύστημα, για το ίδιο κόστος συστήματος και χωρητικότητα αποθήκευσης μπαταρίας. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το μέγεθος της χωρητικότητας αποθήκευσης της μπαταρίας επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος των μεμονωμένων φωτοβολταϊκών και αιολικής ενέργειας συστημάτων.

Οι Chedid και Rahman παρουσίασαν το σχεδιασμό ελεγκτών που παρακολουθεί τη λειτουργία ενός αυτόνομου ή συνδεδεμένου στο δίκτυο σύστημα [37]. Ο ελεγκτής καθορίζει την διαθέσιμη ενέργεια από κάθε στοιχείο του συστήματος και την περιβαλλοντική πίστωση του συστήματος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπόρεσε να δώσει το κόστος παραγωγής, άγνωστες ενέργειες, και το φορτίο μπαταρίας και τις απολεσθείσες ζημίες.

Το μοντέλο υποστήριξης ακριβείας για υβριδικό σύστημα Φ/Β/αιολικής ενέργειας συζητήθηκε από τους Chedid βάσει πολιτικών, κοινωνικών, τεχνικών και οικονομικών ζητημάτων. Οι συγγραφείς ποσοτικοποίησαν διάφορες αποκλίσεις απόψεις, πρακτικές, γεγονότα που οδηγούν σε σύγχυση και αβεβαιότητα στο σχεδιασμό του υβριδικού συστήματος Φ/Β/αιολικής ενέργειας χρησιμοποιώντας αναλυτική ιεραρχική μέθοδο.

Τέλος, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν μέθοδο αντισταθμιστικού κινδύνου για τη δημιουργία πολλαπλών σχεδίων και απέκτησαν τις καμπύλες αντιστάθμισης για να διαχωρίσουν ισχυρά και κατώτερα σχέδια με βάση το φαινόμενο συχνότητας, υπό κανονικές αποφάσεις. Επίσης διεξήχθησαν αναλύσεις κινδύνου για εναλλακτικές επιλογές σε περίπτωση εμφάνισης επικίνδυνων χαρακτηριστικών.

Τα υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών/αιολικής ενέργειας σχεδιάζονται επίσης όχι μόνο για την κάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για την κάλυψη των αναγκών γλυκού νερού μέσω της αφαλάτωσης. Οι Sontag και Lange επιχείρησαν να βελτιώσουν τις προοπτικές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με το σύστημα παροχής ενέργειας, για τις απαιτήσεις ενέργειας και θέρμανσης ενός συγκροτήματος οικιών [39].

Οι παραπάνω μελέτες αποδεικνύουν ότι το υβριδικό φωτοβολταϊκό/αιολικό σύστημα είναι πολύ ελπιδοφόρο παγκοσμίως. Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του συστήματος, η

συνεισφορά του Φ/B είναι μικρή σε σχέση με το μερίδιο του ανέμου. Παρατηρείται ότι ο λόγος Φ/B προς αιολική ενέργεια σε υβριδικό Φ/B/ανεμογεννήτρια σύστημα πρέπει να είναι τουλάχιστον 70% για να έχει το χαμηλότερο κόστος.

5.4 Μοντελοποίηση γεννήτριας diesel

Στην περίπτωση που οι απαιτήσεις φορτίου δεν ικανοποιούνται από το σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή από τις μπαταρίες (λόγω της κατάστασης φόρτισης), τότε οι απαιτήσεις φορτίου πληρούνται από τη λειτουργία της γεννήτριας ντίζελ στο σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργεια. Η επιλογή της γεννήτριας ντίζελ εξαρτάται από τον τύπο και τη φύση του φορτίου. Για να καθοριστεί η ονομαστική χωρητικότητα της γεννήτριας που πρόκειται να εγκατασταθεί, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο περιπτώσεις:

- 1) Εάν η γεννήτρια πετρελαίου συνδέεται απευθείας με το φορτίο, τότε η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το μέγιστο φορτίο και
- 2) Εάν η γεννήτρια ντίζελ χρησιμοποιείται ως φορτιστής μπαταρίας, ο μέγιστος επιτρεπόμενος βαθμός εκφόρτισης των μπαταριών πρέπει να είναι προσεγγιστικά στο 20% τότε το ρεύμα που παράγεται από τη γεννήτρια δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το $C_{Ah} \cdot V_{\Sigma} / 5 \cdot \eta_{db}$, όπου το C_{Ah} είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας κατά 1 ώρα.

Η απόδοση της γεννήτριας diesel δίνεται από την εξίσωση (5.12):

$$\eta_{overall} = \eta_{brake\ thermal} \times \eta_{generator} \quad (5.12)$$

όπου $\eta_{brake\ thermal}$: η θερμική απόδοση των φρένων του κινητήρα ντίζελ.

Κανονικά, οι γεννήτριες ντίζελ διαμορφώνονται στον έλεγχο του υβριδικού συστήματος ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη αυτονομία. Παρατηρείται ότι εάν η γεννήτρια λειτουργεί στο 70-90% του πλήρους φορτίου τότε είναι οικονομική. Ελλείψει ζήτησης αιχμής, οι γεννήτριες ντίζελ χρησιμοποιούνται συνήθως για την ικανοποίηση των απαιτήσεων φορτίου και για τη φόρτιση της μπαταρίας [17].

5.5 Κριτήρια για την επιλογή υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Διάφοροι ερευνητές αξιολόγησαν υβριδικό σύστημα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους όπως η αναλογία ενέργειας προς φορτίο, ο λόγος μπαταρίας προς φορτίο και η μη διαθεσιμότητα ενέργειας. Προκειμένου να επιλεγεί ένας βέλτιστος συνδυασμός ενός υβριδικού συστήματος για την ικανοποίηση της ζήτησης, η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με βάση την αξιοπιστία και την οικονομία της τροφοδοσίας. Η αξιοπιστία του συστήματος εκφράζεται σε όρους απώλειας πιθανότητας φορτίου ή αυτονομίας και καθαρής παρούσας αξίας. Οι συνήθεις μέθοδοι αξιολόγησης του υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ως εξής:

5.5.1 Πιθανότητα απώλειας φορτίου (*Loss of Load Probability*)

Η απώλεια πιθανότητας φορτίου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^n \text{hours}(I_{\text{supply}}(t) < I_{\text{needed}}(t))}{n} \quad (5.13)$$

όπου

$$I_{\text{needed}}(t) = \frac{L(t) - P_w(t) - P_{PV}(t)}{V_L} \eta(I_{\text{battery}}(t)) \quad (5.14)$$

$$I_{\text{supply}}(t) = \min(I_{\text{max}} = \frac{0,2SOC}{\Delta t}, \frac{SOC(t)\sigma - SOC_{\text{min}}}{\Delta t}) \quad (5.15)$$

Όπου: $I_{\text{needed}}(t)$: το ρεύμα που απαιτείται για το φορτίο για χρόνο t

$I_{\text{supply}}(t)$: το ρεύμα που παρέχεται από το υβριδικό σύστημα στην ώρα t

n: είναι ο αριθμός των δειγμάτων

V_L : είναι η ονομαστική τάση που απαιτείται από το σύστημα

L(t): είναι οι απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου στην ώρα t

$P_w(t)$: είναι η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια στην ώρα t

$P_{PV}(t)$: είναι η ισχύς που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές μονάδες στην ώρα t

Παρατηρείται ότι αυτός ο τύπος ανάλυσης βοηθά τον σχεδιαστή του συστήματος να ανακαλύψει την πιθανότητα απώλειας φορτίου για το υβριδικό σύστημα. Αν η πιθανότητα απώλειας φορτίου είναι χαμηλό τότε αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό κόστος του συστήματος και το αντίστροφο.

5.6 Ανάλυση κόστους

Το κόστος του κύκλου ζωής (Life Cycle Cost), χρησιμοποιείται συνήθως για να αποφασιστεί η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος. Το σύστημα με χαμηλότερο LCC προτιμάται πάντοτε. Το LCC υπολογίζεται είτε με είτε χωρίς λογιστική απόσβεση του συστήματος ακολουθώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$PV = \sum_{k=1}^t \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (5.16)$$

$$PV_D = (C+m)_{pv} + (C+m)_{wind} + (C+m)_{battery} + (C+m)_{diesel} - D \quad (5.17)$$

Όπου: PV και PV_D : η παρούσα αξία του συστήματος χωρίς και με την υποτίμηση

t : ο χρόνος ανάλυσης

i : το επιτόκιο ανά έτος

C_t : το κόστος κατά το έτος t

m : το κόστος συντήρησης του συστήματος και

D : η παρούσα αξία της απόσβεσης

Αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει εκτεταμένα το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται ως τον όρο για να αξιολογήσουν τη διαμόρφωση του υβριδικού συστήματος, στην προκαθορισμένη πιθανότητα απώλειας φορτίου. Το κόστος ανά kWh θεωρείται χρήσιμο για την αξιολόγηση του υβριδικού συστήματος. Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ανά kWh δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{cost, } \text{€ / kWh} = \frac{C_{actual}}{electricity} \quad (5.18)$$

όπου το C_{actual} είναι το κόστος εγκατάστασης και η ηλεκτρική ενέργεια είναι η μέση παραγωγή για το χρόνο εγκατάστασης t .

6 Συμπεράσματα

Τα υβριδικά συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναγνωρίζονται κυρίως για εφαρμογές σε απομακρυσμένες περιοχές και σήμερα είναι οικονομικά αποδοτικές για την επέκταση του δικτύου. Αν και, το κόστος και η τεχνολογική εξέλιξη των υβριδικών συστημάτων σήμερα είναι ενθαρρυντική, τα συστήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παραμένουν μια δαπανηρή πηγή.

Ένα υβριδικό σύστημα παρέχει προοπτικές ενσωμάτωσης στη χωρητικότητα παραγωγής ενέργειας για τη βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ενσωμάτωση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος της συμβατικής παραγωγής και παρέχει επίσης χώρο στην αγορά για διείσδυση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Για να εισαχθεί το υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο υφιστάμενο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να πραγματοποιηθεί μελέτη σκοπιμότητας σε βάθος και να ελεγχθεί η τεχνική ανταγωνιστικότητα. Τα επίπεδα διείσδυσης στη βάση του δικτύου είναι το μέλλον του υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής στην παραγωγική ικανότητα μιας χώρας. Επίσης, παρουσιάζει μελλοντική εξέλιξη, η οποία θα επιτρέψει την περαιτέρω επέκταση της αγοράς, τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Ο τρόπος λειτουργίας τους που προτείνεται σήμερα από εφαρμόσιμες τεχνολογίες είναι ο εξής: κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων ημερών, το υβριδικό σύστημα θα τροφοδοτήσει αυτόματα το σπίτι και ταυτόχρονα θα φορτίσει τις μπαταρίες. Εάν το Φ/Β παράγει περισσότερη ενέργεια από ότι το φορτίο μπορεί να το χρησιμοποιήσει ή/και μπορεί να φορτίσει στις μπαταρίες, η πλεονάζουσα ισχύς θα πωληθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Όταν ο ήλιος δεν είναι ή είναι εν μέρει διαθέσιμος, το υβριδικό μπορεί να διανείμει την ενέργεια του για να τροφοδοτήσει πρώτα το φορτίο και να στείλει όλη την πρόσθετη ισχύ στις μπαταρίες για φόρτιση. Όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες και το φορτίο είναι επαρκώς τροφοδοτούμενο, οποιαδήποτε πρόσθετη ενέργεια θα τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Εάν το φωτοβολταϊκό δεν μπορεί να παράγει επαρκή ενέργεια για να τροφοδοτήσει το φορτίο ή να φορτίσει τις μπαταρίες, το πλέγμα θα ενεργοποιηθεί για να τροφοδοτήσει το φορτίο σε ώρες εκτός αιχμής και όλη η ισχύς από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση των μπαταριών για χρήση σε ώρες αιχμής.

Τη νύχτα, όταν δεν παράγεται ηλιακή ενέργεια, η ‘τράπεζα’ συσσωρευτών θα τροφοδοτήσει το φορτίο κατά τους χρόνους αιχμής. Αν το σπίτι χρησιμοποιεί περισσότερη ενέργεια από ότι η ‘τράπεζα’ μπαταρίας μπορεί να τροφοδοτήσει το φορτίο για όλη τη νύχτα, το πλέγμα θα εμπλακεί για υποστήριξη φορτίου. Εάν το υβριδικό διαπιστώσει ότι δεν είναι σε θέση να τροφοδοτήσει το φορτίο από τις μπαταρίες το επόμενο πρωί, το πλέγμα θα χρησιμοποιηθεί αργά το βράδυ (χρόνος εκτός αιχμής) για να φορτιστεί την ‘τράπεζα’ μπαταριών για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα μπορεί να στηρίξει το φορτίο κατά τη διάρκεια της αιχμής κατά την πρωινή χρήση.

Ωστόσο το πιο ιδανικό υβριδικό σύστημα από άποψη απόδοσης είναι το σύστημα Φ/Β-ηλεκτρολύτης νερού-κυψέλη καυσίμου υδρογόνου-συσσωρευτής. Το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β μπορεί να χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση νερού με στόχο την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Με τη σειρά τους το υδρογόνο με το οξυγόνο μπορούν να τροφοδοτούνται σε κυψέλη καυσίμου και να παράγεται ρεύμα και θερμότητα με απόδοση έως 65%³. Οι συσσωρευτές μπορούν να χρησιμεύουν για την αποθήκευση ενέργειας για να χρησιμοποιείται σε ώρες αιχμής ή τις νυχτερινές ώρες. Ωστόσο το υψηλό κόστος των κυψελών καυσίμου λόγω κόστους καταλύτη, αλλά και των κυψελών ηλεκτρόλυσης αποτελούν ένα σημαντικό παρεμποδιστικό παράγοντα.

³ DOE Hydrogen Program, στην έκθεση προόδου που εκδόθηκε το 2007 από το Αμερικάνικο Υπουργείο Περιβάλλοντος σε σύμπραξη με το Ινστιτούτο Battelle Memorial υπήρξε εκτενής μελέτη για σταθερές εγκαταστάσεις, συστημάτων υποβοήθησης PEM fuel cells. Η έκθεση αναφερόταν στην ισχύ (kW) του συστήματος, στο turn key κόστος της εγκατάστασης, της μετέπειτα συντήρησης, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα[65].

Βιβλιογραφία

Βιβλία

1. **Duffie, J.A., Beckam W.A.** (1980) *Solar engineering of thermal processes*. 2nd ed., New York: John Wiley & Sons.
2. **Kalogirou, S.** (2009) *Solar energy engineering: processes and systems*. 1st ed., London: Elsevier.
3. **Sukhatme, S.P., Nayak J.K.** (2008) *Solar Energy: Principles of thermal collection and storage*. 3rd ed., New Delhi: Tata McGraw-Hill.
4. **Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie** (2005) *Planning and installing solar thermal systems*. London: James & James/ Earthscan.
5. **Markvart, T., Επιμέλεια: Σκούντζος, Π.** (2003) *Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια*. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.
6. **Καλδέλλης, Ι.Κ., Σπυρόπουλος, Γ.Χ., Καββαδίας Κ.Α.** (2007) *Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Αθ. Σταμούλη.

Άρθρα από επιστημονικά περιοδικά (journals)

7. **S.A. Klein, J.A. Duffie, W.A. Beckam** (1975) *A design procedure for solar heating systems*.
8. **S. Kalogirou** (2004) Elsevier. *Solar thermal collectors and applications*.
9. **A.I. Owaid, M. Tariq, H. Issa, H. Sabeeh, M. Ali** (2014) *Impact Journals. The heat losses experimentally in the evacuated tube solar collector system in Baghdad-Iraq climate*.
10. **Dr. Yongchareon, W.** (2004) *Hydrogen for future fuels*.
11. **Maharia, V.K., Dalal, G.** (2014) *International Journal of Science and Research. Hybrid PV/fuel cell system design and stimulation*.
12. **Karaki SH, Chedid RB, Ramadan R.** (1999) *IEEE Transactions on Energy Conversion. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems*.
13. **Shaahid S, Elhadidy M.** (2003) *Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+ diesel+ battery) power systems in hot climates*.
14. **Shaahid S, Elhadidy M.** (2004) *Prospects of autonomous/stand-alone hybrid (photo-voltaic+ diesel+ battery) power systems in commercial applications in hot regions*.

15. **Valente LCG, de Almeida SCAb.** (1998) *Economic analysis of a diesel/photovoltaic hybrid system for decentralized power generation in northern Brazil.*
16. **Muselli M, Notton G, Poggi P, Louche A.** (2000) *PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations.*
17. **El-Hefnawi SH.** (1998) *Photovoltaic diesel-generator hybrid power system sizing.*
18. **Shrestha G, Goel L.** (1998) IEEE Transactions on Energy Conversion. *A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations.*
19. **Kellogg W, Nehrir M, Venkataramanan G, Gerez V.** (1998) IEEE Transactions on Energy Conversion. *Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems.*
20. **Bhuiyan M, Asgar MA.** (2003) *Sizing of a stand-alone photovoltaic power system at Dhaka.*
21. **Abouzahr I, Ramakumar R.** (1991) IEEE Transactions on Energy Conversion. *Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems: a closed form solution approach.*
22. **Egido M, Lorenzo E.** (1992) Solar Energy Materials and Solar Cells. *The sizing of stand alone PV-system: A review and a proposed new method.*
23. **Notton G, Muselli M, Louche A.** (1996) *Autonomous hybrid photovoltaic power plant using a back-up generator: a case study in a Mediterranean Island.*
24. **Marwali M, Shahidehpour S, Daneshdoost M.** (1997) IEEE Transactions on Energy Conversion. *Probabilistic production costing for photovoltaics-utility systems with battery storage.*
25. **Wichert B.** (1997) Renewable and Sustainable Energy Reviews. *PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation—a review of current practice and future developments.*
26. **Celik A.** (2003) *A simplified model for estimating the monthly performance of autonomous wind energy systems with battery storage.*
27. **Chedid R, Akiki H, Rahman S.** (1998) IEEE Transactions on Energy Conversion. *A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems.*
28. **Nehrir MH, LaMeres BJ, Venkataramanan G, Gerez V, Alvarado L.** (2000) IEEE Transactions on Energy Conversion. *An approach to evaluate the general performance of stand-alone wind/photovoltaic generating systems.*

29. **Celik A.** (2002) *Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems.*
30. **Kolhe M, Agbossou K, Hamelin J, Bose T.** (2003) *Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen.*
31. **Ai B, Yang H, Shen H, Liao X.** (2003) *Computer-aided design of PV/wind hybrid system. Renewable Energy.*
32. **Karki R, Billinton R.** (2004) *IEEE Transactions on Energy Conversion. Cost-effective wind energy utilization for reliable power supply.*
33. **Hennet J, Samarakou M.** (1986) *International Journal of Energy Research. Optimization of a combined wind and solar power plant.*
34. **Al-Ashwal A, Moghram I.** (1997) *Proportion assessment of combined PV-wind generating systems.*
35. **Gomaa S, Seoud AA, Kheiralla H.** (1995) *Design and analysis of photovoltaic and wind energy hybrid systems in Alexandria, Egypt.*
36. **Protogeropoulos C, Brinkworth B, Marshall R.** (2006) *International Journal of Energy Research. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage.*
37. **Chedid R, Rahman S.** (1997) *IEEE Transactions on Energy Conversion. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems.*
38. **Manolakos D, Papadakis G, Papantonis D, Kyritsis S.** (2001) *A simulation-optimisation programme for designing hybrid energy systems for supplying electricity and fresh water through desalination to remote areas: case study: the Merssini village, Donoussa island, Aegean Sea, Greece.*
39. **Sontag R, Lange A.** (2003) *Cost effectiveness of decentralized energy supply systems taking solar and wind utilization plants into account.*
40. **Nag P.** (2002) *New York, USA: Tata McGraw-Hill Education Power plant engineering.*

Διπλωματικές εργασίες-Διδακτορικές διατριβές

41. **Γεωργίου, Z.** (2009) *Σχεδιασμός θερμικού ηλιακού συστήματος για τα μετεωρολογικά δεδομένα της Πάτρας. Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.*

42. **Nikolaos, P.** (2008) *The participation of hydrogen in energy generation: Use of hydrogen for domestic and transportation sector. Research title, Technological Educational Institute of Piraeus.*

Πηγές από το διαδίκτυο

43. **(CRES) ΚΑΠΕ** *Βιοκλιματικός σχεδιασμός στην Ελλάδα: Ενεργειακή απόδοση και κατευθύνσεις εφαρμογής.*
<http://www.cres.gr/kape/education/bioclimate_brochure.pdf>
44. **(HOPO) Home Power** *Heat-pump water heaters.*
<<http://www.homepower.com/articles/solar-water-heating/domestic-hot-water/heat-pump-water-heaters>>
45. **Greitzer, E. M., Spakovszky, Z. S., Waitz, I. A.** (2007) *Heat exchangers.*
<<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node131.html>>
46. **(ENGSA) Energy Saver** *Heat exchangers for solar water heating systems.*
<<http://energy.gov/energysaver/articles/heat-exchangers-solar-water-heating-systems>>
47. **(CRES) ΚΑΠΕ** *Ηλιακή ενέργεια-Φωτοβολταϊκά.*
<<http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/prodes3/prodesPV2.pdf>>
48. **(PVEDU) PV Education** *Nominal operating cell temperature.*
<<http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/nominal-operating-cell-temperature>>
49. **(OFENRE) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy** *Types of fuel cells.*
<<http://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>>
50. **(NREL) Solar Photovoltaic Technology Basics**
<http://www.nrel.gov/learning/re_photovoltaics.html>
51. **(CSJ) The Caspian Sea Journal** *Investigation of Energy Revenue by Photovoltaic System Evidence from erection of Nazarbayev University*
<http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/pv_techfocus.pdf>
52. **(EMA) Energy Market Authority** *ENHANCEMENTS TO THE REGULATORY FRAMEWORK FOR INTERMITTENT GENERATION SOURCES IN THE NATIONAL ELECTRICITY MARKET OF SINGAPORE*
<http://www.ema.gov.sg/images/files/EMA%20Solar%20Handbook_Apr%202011.pdf>

53. **(EI)Energy Informative** *Grid-Tied, Off-Grid and Hybrid Solar Systems*
<<http://energyinformative.org/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems/>>
54. **(FCS) Commercial Fuel Cell Components** *What You Need for a Fuel Cell Powered Home* <<http://fuelcellsetc.com/2015/03/what-you-need-for-a-fuel-cell-powered-home/>>
55. **(SE)Helios Systems** *Φωτοβολταϊκά Συστήματα Φωτοβολταϊκά σε Στέγες - Επιδότηση kWh - Κοςτος - Οδηγός επένδυσης*
<http://www.selasenergy.gr/odigos_mikron_sustimaton.php#bookmark4>
56. **(GEP)Green Energy Parts** <<http://www.greenenergyparts.com/>>
57. **(ME)MP Energy** *Προσφορές για αυτόνομα φωτοβολταϊκά* < <http://www.mp-energy.gr/προσφορες/αυτονομα-συστηματα.html> >
58. **(RT)Runsol-Tracker** *Two Axis Solar Tracker* < <http://runsol-tracker.en.made-in-china.com/product/OBXnhCSHcwWo/China-Two-Axis-Solar-Tracker.html>>
59. **(FCE)Fuel Cells Etc** *Commercial Fuel Cell Components*
<<http://fuelcellsetc.com/2015/03/what-you-need-for-a-fuel-cell-powered-home/>>
60. **(FCS)Fuel Cells Store** *Hydrogen Equipment*
<<http://www.fuelcellstore.com/horizon-hydrofill-pro-fch-020>>
61. **(HSD)Hydrogen Energy Systems LLC** *Hydrogen Fuel Cost vs Gasoline*
<<http://heshydrogen.com/hydrogen-fuel-cost-vs-gasoline/>>
62. **(MG)Γαυριελάτο Μ. Ε.Π.Ε.** *Συστήματα Ηλιακής Υποβοήθησης Θέρμανσης*
<http://www.mgavrielatos.gr/Hliaki_thermans.html>
63. **(AND)World Leading Energy Saving Technologies** *Επενδύστε στην Ηλιοθερμία TiSUN για τη μέγιστη Εξοικονόμηση Ενέργειας, Ηλιοθερμία σε οικία στην Κέρκυρα*
<<http://www.andrianos.gr/gr/hliothermia>>
64. **(SPW)Solar Power World** <<http://www.solarpowerworldonline.com/2013/04/how-do-solar-inverters-work/>>

Δημοσίευση της Ευρωπαϊκής Ένωσης και Ηνωμένων Πολιτειών

65. **EUROPEAN COMMISSION.** Community research. *Hydrogen energy and fuel cells: A vision of our future.* Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.

DOE HYDROGEN PROGRAM. FY Progress Report. *Economic Analysis of Stationary PEMFC Systems.* Battelle Memorial Institute, 2007.

https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/vii_g_3_stone.pdf

Πηγές εικόνων

66. http://www.textbook-pv.org/figures/figure_2.2.png
67. <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/part-1-solar-astronomy>
68. <http://www.slideshare.net/Bhargav5508/earth-sun-angle>
69. <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals4/figure1.gif>
70. <http://en.ssolar.com/SolarEnergy2010/>
71. <http://dogstarsolar.net/homework/solar-hot-water-basics/>
72. http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09_files/image011.jpg
73. <http://gr.solarsupplier-china.com/solar-system/on-grid-solar-system.html>
74. <http://www.appropedia.org/images/f/fe/Thermosyphon.gif>
75. http://solar365.com/sites/default/files/field/insertable_image/Tank-style_ICS_collector.JPG
76. <http://www.energymatters.com.au/solar-hot-water/solar-heat-pumps/>
77. <http://bestsubcontractor.com/wp-content/uploads/2011/09/Swimming-Pool-Solar-Lights-Diagram-Guide.gif>
78. http://www.inbalance-energy.co.uk/images/active_open_loop_system.jpg
79. <http://www.wisehomedesign.com/images/ActiveIndirectOneTankSystem.jpg>
80. http://home.earthlink.net/~jschwytzer/air_solar_system.gif
81. http://home.earthlink.net/~jschwytzer/solar_system.gif
82. <http://sustainable-sources.com/images/heatcoolsolar2.gif>
83. <http://www.ijoart.org/papers/Modeling-of-PV-Array-and-Analysis-of-Different-Parameters.html>
84. http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273171
85. <http://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
86. http://www.enterprisrobotics.com/ER_Details.asp?ID=735
87. <http://www.eshops.gr/media/catalog/product/cache/11/thumbnail/960x/a50a30a0489cdab61a1021e067d28302/1/u/luxor-100w-12v.jpg>
88. http://www.inbalance-energy.co.uk/solar_pv_mounting_systems/roof_integrated_solar_pv_mounting_systems.html
89. <https://media.licdn.com/mpr/mpr/AAEAAQAAAAAAAAZTAAAJDUwZTNjN2JhLWNkOWYtNGE3ZC05ZTA3LWQ3Nm00Nzk2MzNjYg.jpg>
90. http://x.pstatic.gr/cman_img_f/809099919340275270.jpg

91. <https://i.ytimg.com/vi/b9Xwp6BLnQw/hqdefault.jpg>
92. https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTAItP6eLtbXaxbHwIF_fg-HnozljVKEPJNU7fsfnpuLsF1ZSGTwA
93. <http://www.klimatika.gr/files/systimata-iliothermias-dedietrich1.jpg>
94. http://www.4green.gr/jpg/4GREEN/390/NEWS/iliothermia_t151.jpg
95. http://www.mgavrielatos.gr/Barberi_files/Trolli-1.jpg
96. <http://runsol-tracker.en.made-in-china.com/product/OBXnhCSHcwWo/China-Two-Axis-Solar-Tracker.html>
97. <http://www.andrianos.gr/images/arthra-deltiatupou/pro-clean-tisun.jpg>
98. http://www.andrianos.gr/media/k2/items/cache/e303e2027514497aaa0603a129a3eb42_XL.jpg