

ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ

**ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΘΕΩΡΗΤΩΝ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ**

Α. ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΚΤΗΡΙΩΝ

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ: ΔΕ4
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Α΄ έκδοση

Αθήνα, Ιούνιος 2011

Ομάδα εργασίας θεματικής ενότητας ΔΕ4:

Βραχόπουλος Γρ. Μιχάλης	Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Χαλκίδας
Γαγλία Γ. Αθηνά	Μηχανολόγος μηχανικός Ε.Μ.Π. Μ.Sc, Ομάδα Εξοικονόμηση Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
Καββαδίας Α. Κοσμάς	Μηχανολόγος Μηχανικός ΤΕ, MSc. Καθηγητής Εφαρμογών, Εργαστήριο Ήπιων μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Πειραιά.
Καλδέλης Κ. Ιωάννης	Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός Καθηγητής, Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Πειραιά.
Μπαλαράς Α. Κωνσταντίνος	Δρ Μηχανολόγος Μηχανικός Δ/ντης Ερευνών, Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Α.Π.Ε.).....	4
1.1.	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ Α.Π.Ε.	5
1.2.	ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ Α.Π.Ε. ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ.....	6
2.	ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	7
2.1.	ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ	8
2.1.1.	Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης	10
2.1.2.	Τυπικές Εγκαταστάσεις.....	12
2.1.3.	Αποδόσεις Ηλιακών Συλλεκτών.....	14
2.2.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ - Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ F.....	16
2.3.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ COMBI (ΖΕΣΤΟ ΝΕΡΟ ΧΡΗΣΗΣ & ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΧΩΡΩΝ)	20
2.4.	ΗΛΙΑΚΗ ΨΥΞΗ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ COMBI-PLUS.....	22
2.5.	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ.....	28
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	32
3.	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	35
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
3.2.	ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	36
3.3.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	38
3.4.	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	40
3.5.	ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	44
3.6.	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	45
3.7.	ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ.....	49
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	49
4.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ.....	52
4.1.	ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	53
4.2.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ.....	55
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60
5.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.	61
5.1.	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ.....	61
5.1.1.	Κατανομή θερμοκρασίας στο υπέδαφος.	62
5.1.1.1.	Γεωλογικοί παράμετροι που επιδρούν στα θερμικά χαρακτηριστικά εδαφών και πετρωμάτων	62
5.1.1.2.	Σχέσεις που συνδέουν τις φυσικές και θερμικές ιδιότητες των εδαφών.....	62
5.1.2.	Κωδικοποίηση των γήινων υπεδαφικών υλικών για θερμική αξιοποίηση	65
5.2.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ	66
5.2.1.	Κλειστά συστήματα	66
5.2.1.1.	Οριζόντιοι Γεωθερμικοί Εναλλάκτες θερμότητας	66
5.2.1.2.	Κατακόρυφοι Γεωθερμικοί Εναλλάκτες θερμότητας	66
5.2.2.	Δίκτυα Ανοικτού Κυκλώματος	68
5.2.3.	Οι γεωλογικοί σχηματισμοί και ο ρόλος τους στη λειτουργία της υπεδαφικής θερμικής αποθήκης.....	69
5.2.4.	Μέθοδος προσδιορισμού της αποδοτικότητας του υπεδάφους	70
5.3.	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	70

5.4.	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ	72
5.4.1.	Υπολογιστικό Παράδειγμα	74
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77
6.	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	80
6.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	80
6.2.	ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	82
6.3.	ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ	84
6.4.	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	87
6.5.	Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ	89
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	91

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (Α.Π.Ε.)

Η εξοικονόμηση (ορθολογική χρήση) της ενέργειας σε συνδυασμό με την χρήση συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) ή Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Η.Μ.Ε.) στα κτήρια αποτελούν τις πιο ρεαλιστικές λύσεις στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουμε [1]. Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας χαρακτηρίζονται οι εξής:

1. Ηλιακή Ενέργεια, η οποία αξιοποιείται με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και με τη χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλιακοί συλλέκτες είναι τα πλέον διαδεδομένα συστήματα Α.Π.Ε. στις κατοικίες, οι οποίοι συνεχώς αυξάνονται. Ιδιαίτερα οι νέες κατοικίες, διαθέτουν όλες τις απαραίτητες υποδομές για την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών. Τα Φ/Β είναι μια τεχνολογία αρκετά δαπανηρή και για το λόγο αυτό δεν έχουν διαδοθεί αρκετά στον οικιακό τομέα, αλλά με τη συνεχή μείωση του κόστους τους και τις σχετικές επιδοτήσεις για ηλεκτροπαραγωγή σε μικρές εγκαταστάσεις μέχρι 10kW, έχει σημειωθεί αλματώδης αύξηση και στις εφαρμογές στα κτήρια.
2. Αιολική Ενέργεια, η οποία αξιοποιείται κυρίως με τη χρήση ανεμογεννητριών (Α/Γ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στα κτήρια έχουν γίνει ελάχιστες εφαρμογές και κυρίως σε κατοικίες απομονωμένων περιοχών. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία Α/Γ αστικού περιβάλλοντος με όλες τις προδιαγραφές για εφαρμογές σε κτήρια. Μέχρι σήμερα έχουν εγκατασταθεί Α/Γ αστικού περιβάλλοντος σε περιορισμένο αριθμό μονοκατοικιών. Το κόστος τους παραμένει αρκετά υψηλό, αλλά οι αποδόσεις τους είναι αρκετά ικανοποιητικές.
3. Βιομάζα, η οποία αξιοποιείται ιδιαίτερα στον οικιακό τομέα, για τη θέρμανση χώρων και το μαγείρεμα. Η ενέργεια ανακτάται κυρίως από την καύση γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων. Η σημερινή τεχνολογία αξιοποιεί τη βιομάζα ακόμα και μέσω συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ).
4. Γεωθερμική Ενέργεια, η οποία παράγεται με την εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας. Στα κτήρια, οι εφαρμογές στοχεύουν κυρίως στην εκμετάλλευση της χαμηλής ενθαλπίας με τη χρήση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Η αξιοποίηση των γεωθερμικών πεδίων στα κτήρια είναι περιορισμένη, αν και την τελευταία δεκαετία γίνονται αρκετές εφαρμογές σε πολλές περιοχές της Ελλάδας.
5. Υδροηλεκτρική Ενέργεια, η οποία αφορά στην αξιοποίηση της υδραυλικής ενέργειας των τρεχούμενων υδάτων, και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσω υδροστροβίλων. Σήμερα δε χρησιμοποιούνται συστήματα αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας στα κτήρια. Παλαιότερα, σε πολλές αγροτικές περιοχές της Ελλάδας, υπήρχαν οι λεγόμενοι νερόμυλοι οι οποίοι χρησίμευαν σε διάφορες αγροτικές δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα το άλεσμα.
6. Κυματική Ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσω ειδικών συστημάτων εκμετάλλευση της κίνησης των κυμάτων και ρευμάτων της θάλασσας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κυματική ενέργεια αξιοποιείται από ελάχιστες χώρες, ενώ στην Ελλάδα δεν έχουμε τέτοιες εφαρμογές, εκτός από μικρές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς λόγους.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε., είναι η παραγωγή ενέργειας από μια πηγή που είναι ανεξάντλητη και δε ρυπαίνει το περιβάλλον (εκτός από ορισμένες κατηγορίες βιομάζας). Παράλληλα οι Α.Π.Ε. μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα, και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλα για χρήση σε απομονωμένες περιοχές. Η χρήση των Α.Π.Ε. μειώνει την εξάρτηση μιας χώρας από τα συμβατικά καύσιμα.

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα των Α.Π.Ε. είναι κυρίως το υψηλό κόστος και η διακύμανση της διαθεσιμότητάς τους. Το υψηλό κόστος προέρχεται από την υψηλή τεχνολογία κατασκευής σε

συνάρτηση με τη χαμηλή απόδοση των συστημάτων. Το κόστος των συστημάτων Α.Π.Ε. σχεδόν διπλασιάζεται όταν εγκαθίσταται μαζί με συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ Α.Π.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 28/2009 για την προώθηση των Α.Π.Ε. καθορίζει ως στόχο τη συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% μέχρι το έτος 2020. Το ποσοστό αύξησης σε κάθε χώρα μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) καθορίζεται στο 5,5% από τα επίπεδα του 2005, ενώ η υπολειπόμενη αύξηση υπολογίζεται σύμφωνα με το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν ανά κάτοικο (από 10% για τη Μάλτα έως 49% για τη Σουηδία).

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με τον Ν.3851/2010 για την επιτάχυνση της ανάπτυξης των Α.Π.Ε. (ΦΕΚ 85/Α/4.6.2010) ο εθνικός στόχος για τις Α.Π.Ε. καθορίζεται μέχρι το 2020 στο 20% για τη συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, στο 40% για τη συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, και στο 20% για τη συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη.

Επίσης, σύμφωνα με το Ν.3851/2010 είναι πλέον υποχρεωτική για τα νέα κτήρια η κάλυψη τουλάχιστον 60% των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης από **ηλιοθερμικά συστήματα**, Α.Π.Ε. ή υψηλών αποδόσεων αντλιών θερμότητας (ΑΘ), ενώ τα νέα κτήρια θα είναι σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης από το 2020 (και τα δημόσια κτήρια από το 2015) καλύπτοντας το σύνολο της πρωτογενούς ενεργειακής κατανάλωσής τους από Α.Π.Ε., συμπαραγωγή, τηλεθέρμανση και υψηλής απόδοσης ΑΘ.

Ο Ν.3468/2006 "Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης και λοιπές διατάξεις" (ΦΕΚ 129/Α/27.6.2006) προωθεί στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας την ηλεκτροπαραγωγή από Α.Π.Ε. και συμπαραγωγή, και συμπληρώνεται από τον Ν.3734/2009 "Προώθηση της συμπαραγωγής δύο ή περισσότερων χρήσιμων μορφών ενέργειας, ρύθμιση ζητημάτων σχετικών με το Υδροηλεκτρικό Έργο Μεσοχώρας και άλλες διατάξεις" (ΦΕΚ 8/Α/28.1.2009).

Για την ενίσχυση εγκατάστασης **Φ/Β** μέχρι 10kWp στα κτήρια, έχει εκδοθεί Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ Β' 1079/4.6.2009 "Ειδικό πρόγραμμα ανάπτυξης Φ/Β συστημάτων σε κτηριακές εγκαταστάσεις και ιδίως σε δώματα και στέγες κτηρίων". Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα απλουστεύονται οι διαδικασίες έκδοσης άδειας, εγκατάστασης, σύνδεσης με τη ΔΕΗ και έναρξης λειτουργίας Φ/Β μέχρι 10kWp στα κτήρια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διατίθεται στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης σε ιδιαίτερα ελκυστική τιμή πώλησης.

Το νομοθετικό πλαίσιο για την αξιοποίηση του **γεωθερμικού δυναμικού** της χώρας καλύπτεται από το Ν.3175/2003 (ΦΕΚ 207/Α/29.8.2003) "Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις". Η Υπουργική Απόφαση Δ9ΒΔ/Φ166/οικ18508/5552/207 (ΦΕΚ1595/25.10.2004) καθορίζει τις απαιτήσεις και διαδικασίες έκδοσης άδειας εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χώρων με την εκμετάλλευση της γεωθερμίας και των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Συναφούς περιεχομένου είναι και η Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Φ166/οικ8411/ΓΔΦΠ2373/117 (ΦΕΚ 635/Β/12.5.2005) που καθορίζει τους όρους και τις διαδικασίες εκμίσθωσης του δικαιώματος του Δημοσίου για τη διαχείριση των γεωθερμικών πεδίων της χώρας. Ο χαρακτηρισμός και υπαγωγή σε κατηγορίες των γεωθερμικών πεδίων της χώρας περιλαμβάνεται στην Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Δ/Φ166/12647/ΓΔΦΠ3557/193 (ΦΕΚ 1012/Β/8.7.2005).

1.2. ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ Α.Π.Ε. ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Η εξοικονόμηση (ορθολογική χρήση) ενέργειας σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση των Α.Π.Ε. στα κτήρια, αποτελούν τις πιο ρεαλιστικές λύσεις στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα. Η Ελλάδα με το υψηλό ηλιακό δυναμικό, σημαντικό αιολικό δυναμικό, πλούσιο γεωθερμικό δυναμικό σε ορισμένες περιοχές και μεγάλη παραγωγή βιομάζας, αποτελεί μια ιδιαίτερα ευνοημένη περιοχή για την επιτυχή εφαρμογή των Α.Π.Ε.. Ευνοείται ακόμη η ανάπτυξή τους λόγω του μεγάλου αριθμού απομονωμένων περιοχών και μικρών κοινοτήτων (νησιά και ορεινά μέρη).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι σύμφωνα με το Ν.3851/2010 τα νέα κτήρια θα είναι σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης από το 2020 (και τα δημόσια κτήρια από το 2015) είναι πλέον επιβεβλημένη η εκμετάλλευση των Α.Π.Ε. σε συνδυασμό με τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτηρίων.

Τα βασικότερα **προβλήματα** που αφορούν στην εφαρμογή των **Α.Π.Ε.** περιλαμβάνουν:

- το **υψηλό κόστος** (η αρχική επένδυση σε μερικές εφαρμογές είναι υψηλή αν και με τη συνεχιζόμενη έρευνα σε αυτούς τους τομείς, την τυποποίηση παραγωγής συστημάτων και την αύξηση της απόδοσής τους, το κόστος τους γίνεται όλο και περισσότερο ανταγωνιστικό, ιδιαίτερα εάν συμπεριλάβουμε και το έμμεσο κόστος των συμβατικών πηγών ενέργειας),
- την **εξάρτηση από φυσικά φαινόμενα** τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα το ενεργειακό δυναμικό των Α.Π.Ε. να μεταβάλλεται χρονικά. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά με την αποθήκευση ενέργειας.
- τις **χαμηλές αποδόσεις**, καθώς τα περισσότερα συστήματα που εκμεταλλεύονται τις Α.Π.Ε. είναι σχετικά χαμηλών αποδόσεων, αλλά με τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη που παρουσιάζει ο τομέας των ΑΠΕ, η απόδοση των συστημάτων αυτών βελτιώνεται σημαντικά.

Το ενεργειακό πρόβλημα δε λύνεται πλήρως με την εφαρμογή των Α.Π.Ε. δεδομένου ότι ορισμένες τεχνολογίες έχουν υψηλό αρχικό κόστος, προβλήματα στην ενσωμάτωση στα κτήρια, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις, έλλειψη τεχνογνωσίας στη μελέτη και εγκατάστασή τους. Μπορούν όμως να συμβάλουν σημαντικά στην επίλυση του ενεργειακού προβλήματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις και ειδικότερα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια, βασικός στόχος πρέπει να είναι πάντα η μείωση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Η απλή αντικατάσταση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων ή της ηλεκτρικής ενέργειας με ηλιακή ενέργεια (ή άλλες Α.Π.Ε.) μπορεί να είναι περιβαλλοντικά αποδεκτή, αλλά είναι προφανές ότι δεν θα είναι οικονομικά βιώσιμη. Η σπατάλη της ηλιακής ενέργειας είναι το ίδιο απαγορευτική όπως οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Εφαρμόζοντας σωστό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και μελέτη του κτηρίου και των ηλεκτρομηχανολογικών (Η/Μ) εγκαταστάσεων, εξασφαλίζοντας σωστή κατασκευή και λειτουργία, μειώνοντας τις θερμικές απώλειες το χειμώνα και τα ηλιακά κέρδη το καλοκαίρι, χρησιμοποιώντας ενεργειακά αποδοτικά συστήματα και τεχνολογίες, η ενεργειακή απόδοση των κτηρίων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά [2].

Ο ρυθμός εγκατάστασης συστημάτων για την εκμετάλλευση των Α.Π.Ε. θα εξαρτηθεί από τις μελλοντικές τιμές των συμβατικών ενεργειακών πρώτων υλών και τη γενικότερη ενεργειακή και οικονομική πολιτική που ασκεί κάθε χώρα. Στη δεκαετία του 1980, το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των Α.Π.Ε. μειώθηκε, σε αντίθεση με τα όσα συνέβησαν κατά την προηγούμενη δεκαετία. Πλέον διανύουμε μια περίοδο σχετικής ισορροπίας, με συνεχώς αυξανόμενο το ενδιαφέρον για τις Α.Π.Ε. σε πολλές χώρες, κυρίως λόγω των προβλημάτων που έχουν προκύψει από τη ρύπανση του περιβάλλοντος και το ενδιαφέρον για την εξασφάλιση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα σε χώρες με μικρά αποθέματα ορυκτών καυσίμων.

2. ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η εκμετάλλευσή της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας γίνεται με διάφορους τύπους ηλιακών συλλεκτών. Οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν όλες τις διατάξεις που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, παγιδεύοντας την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα.

Σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 (ενότητα 5.3.1), τα συστήματα ηλιακών συλλεκτών, χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας με την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Αυτή η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) ή/και για τη θέρμανση χώρων ή/και για ψύξη (ηλιακός κλιματισμός). Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών, που μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα κτήριο, ανάλογα με τη χρήση και τη διαθέσιμη επιφάνεια εγκατάστασης.

Σύμφωνα με τις προσθήκες, τροποποιήσεις και διευκρινήσεις που δημοσιεύθηκαν το 2011 για την αναθεώρηση-επανεκδοση της ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 (ενότητα 5.3.1), κατά τη μελέτη διαστασιολόγησης (σχεδιασμού) του συστήματος ηλιακών συλλεκτών, που είναι υποχρεωτική για τα νέα και ριζικά ανακαινιζόμενα κτήρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μεθοδολογίες όπως, η ωριαία προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος, οι μέθοδοι που αναφέρονται στο πρότυπο του ΕΛΟΤ [3], η μέθοδος καμπυλών f [4] και οποιαδήποτε άλλη αναγνωρισμένη αναλυτική ή μη μέθοδος εφαρμόζεται μέχρι σήμερα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται στη μελέτη, θα πρέπει να τεκμηριώνονται με κατάλληλο πιστοποιητικό, σύμφωνα με τις μεθόδους δομικών και πιστοποίησης του ΕΛΟΤ. Στη μελέτη διαστασιολόγησης του συστήματος ηλιακών συλλεκτών πρέπει να προσδιορίζεται η μέθοδος και να παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα υπολογισμών που χρησιμοποιήθηκαν. Για τη "Μελέτη Ενεργειακής Απόδοσης" σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Ν.3661/2008 και του ΚΕΝΑΚ, είναι υποχρεωτική η αναφορά των αποτελεσμάτων για την τεκμηρίωση του ποσοστού κάλυψης του φορτίου ΖΝΧ.

Η συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια συλλεκτών για θέρμανση νερού στην ΕΕ υπολογίζεται ότι είναι $43 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ (με δυναμικό που φτάνει τα $1,4 \cdot 10^9 \text{ m}^2$) η οποία ισοδυναμεί με $30,2 \text{ GW}_{\text{th}}$ [5]. Στην Ελλάδα, η εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών εκτιμάται σε $4,1 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ ή $2,9 \text{ GW}_{\text{th}}$. Διεθνώς, η Κύπρος έχει την υψηλότερη συνολική εγκατεστημένη θερμική ισχύ ανά κάτοικο ($554,0 \text{ kW}_{\text{th}}$ ανά 1000 κατοίκους) και ακολουθούν το Ισραήλ ($390,9 \text{ kW}_{\text{th}}$ ανά 1000 κατοίκους), τα νησιά Barbados ($323,9 \text{ kW}_{\text{th}}$ ανά 1000 κατοίκους), η Αυστρία ($314,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ ανά 1000 κατοίκους) και πέμπτη η Ελλάδα ($265,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ ανά 1000 κατοίκους).

Η Ελλάδα υπήρξε πρωτοπόρος στον Ευρωπαϊκό χώρο από τη δεκαετία του '70 στην ανάπτυξη των ηλιακών συστημάτων θέρμανσης νερού με αξιόλογη βιομηχανία. Σύμφωνα με την Ένωση Βιομηχανιών Ηλιακής Ενέργειας (ΕΒΗΕ), το 40% της βιομηχανικής παραγωγής εξάγεται σε απαιτητικές αγορές σε χώρες εντός και εκτός της ΕΕ. Σήμερα ο κλάδος απασχολεί περί τα 3.500 άτομα. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα στην Ελλάδα υποκαθιστούν κυρίως ηλεκτρική ενέργεια (περί το 3% της κατανάλωσης σήμερα) τόσο στην ηπειρωτική χώρα όσο και στα νησιά και μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές CO_2 με οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη συμβάλλοντας στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού καθώς και στην εκπλήρωση των εθνικών στόχων. Εάν δεν υπήρχαν τα θερμικά ηλιακά συστήματα εκτιμάται ότι θα χρειαζόνταν επιπλέον η κατασκευή και λειτουργία μιας ακόμη θερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 600MW τουλάχιστον.

Άμεσα, υπάρχουν μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω ανάπτυξης των ηλιακών θερμικών στην Ελλάδα. Σύμφωνα με την ΕΒΗΕ, στην Κύπρο αναλογούν περί τα $0,94 \text{ m}^2$ ηλιακού συλλέκτη ανά κάτοικο ενώ στην Ελλάδα μόνο $0,32 \text{ m}^2$ /κάτοικο και με παρόμοιες συνθήκες. Το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών είναι θερμοσιφωνικού τύπου και αφορά ΖΝΧ για κατοικίες που αντιπροσωπεύει το 98%, ενώ μόλις 2% είναι κεντρικά συστήματα σε μερικά μεγάλα ξενοδοχεία, νοσοκομεία και ορισμένες

βιομηχανικές μονάδες. Συνεπώς, υπάρχουν πολύ καλές προϋποθέσεις για σημαντική ανάπτυξη των ηλιακών συστημάτων τόσο για παραγωγή ΖΝΧ όσο και για θέρμανση ή και ψύξη χώρων στα Ελληνικά κτήρια.

2.1. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ

Όταν η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με ανεξάρτητα συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν συμβατικό ενεργειακό εξοπλισμό (πχ αντλίες, κυκλοφορητές) για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή και γενικότερα εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, τότε τα συστήματα αυτά ονομάζονται **ενεργητικά ηλιακά συστήματα**. Απαιτούνται συστήματα συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακοί συλλέκτες) που είναι από κατασκευαστικής και λειτουργικής πλευράς πιο σύνθετα σε σχέση με τα παθητικά ηλιακά συστήματα. Επίσης σε μεγάλες εγκαταστάσεις απαιτούνται κυκλοφορητές ή αντλίες (που καταναλώνουν κάποια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας) για τη μεταφορά της θερμότητας στο δίκτυο της εγκατάστασης (παραγωγή, αποθήκευση και κατανάλωση). Επίσης προσφέρουν περισσότερες δυνατότητες στον έλεγχο των επιμέρους λειτουργιών, της παραγόμενης θερμότητας, των θερμοκρασιών λειτουργίας κλπ.

Τα ενεργητικά θερμικά ηλιακά συστήματα επιτυγχάνουν μεγαλύτερα ποσοστά εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας και επιτρέπουν καλύτερο έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας και απόδοσής τους και περιλαμβάνουν:

- σύστημα συλλογής της ηλιακής ενέργειας (ηλιακοί συλλέκτες)
- σύστημα αποθήκευσης
- βοηθητικό σύστημα παραγωγής θερμότητας
- κυκλοφορητές και συστήματα ελέγχου σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου, εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής και το φορτίο, δηλαδή την εφαρμογή και τις επιθυμητές θερμοκρασίες. Οι ηλιακοί συλλέκτες διακρίνονται στους:

- επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες και
- συγκεντρωτικούς συλλέκτες.

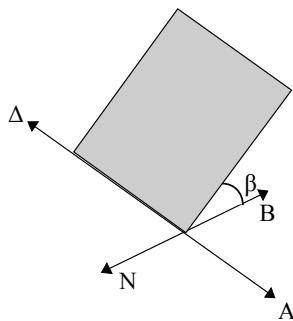
Οι **επίπεδοι** ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται με κατάλληλη κλίση "β" και προσανατολισμό (σχήμα 2.1), ώστε να μεγιστοποιείται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη, και συνήθως παραμένουν σταθεροί. Χρησιμοποιούνται για χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες. Αν και δε συνηθίζεται, οι επίπεδοι συλλέκτες μπορούν να κινούνται για να ακολουθούν την ημερήσια πορεία του ήλιου (αζιμούθιο), με σταθερή κλίση της επιφάνειας - ένας άξονας ελευθερίας (σχήμα 2.2) ή και με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του για το διαφορετικό ηλιακό ύψος - δύο άξονες ελευθερίας (σχήμα 2.3), συλλέγοντας τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία που είναι διαθέσιμη σε μια περιοχή.

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2010 (ενότητα 5.3.1) και την πρώτη αναθεώρηση-επανεκδόσή της το 2011, το κτήριο αναφοράς καλύπτει το 15% των αναγκών για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης με χρήση ηλιακών συλλεκτών. Ο ηλιακός συλλέκτης του κτηρίου αναφοράς είναι επίπεδος, επιλεκτικός, με μέσο ετήσιο συντελεστή ηλιακής αξιοποίησης 0,33, νότιο προσανατολισμό και συντελεστή σκίασης 1 (πλήρης απουσία σκίασης). Η βέλτιστη κλίση εγκατάστασης των ηλιακών συλλεκτών για την Ελλάδα εξαρτάται από την εποχική χρήση:

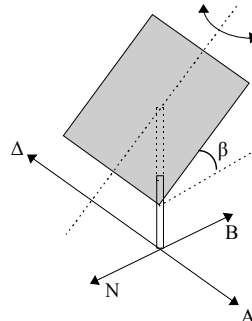
- για ετήσια χρήση $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} \pm 5^\circ$,

- για χειμερινή χρήση $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} + 15^\circ$,
- για θερινή χρήση $\beta = \text{γεωγραφικό πλάτος} - 20^\circ$.

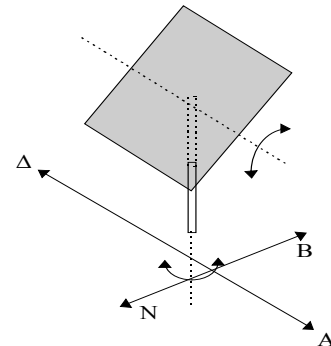
Ο βέλτιστος προσανατολισμός για τους ηλιακούς συλλέκτες είναι ο νότιος με μικρή απόκλιση $\pm 5^\circ$.



Σχήμα 2.1. Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, με νότιο προσανατολισμό, σταθερή κλίση.

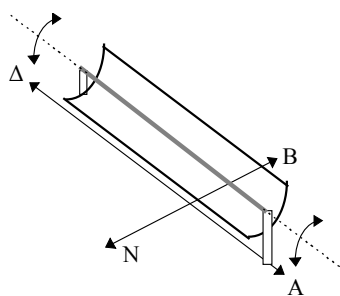


Σχήμα 2.2. Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, ένα άξονα ελευθερίας (αζιμούθιο), σταθερή κλίση.

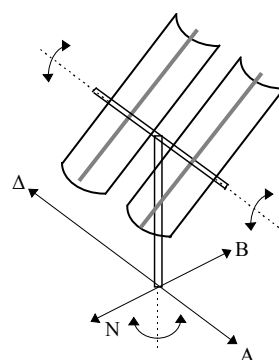


Σχήμα 2.3. Επίπεδος ηλιακός συλλέκτης, δυο άξονες ελευθερίας (αζιμούθιο, ηλιακό ύψος).

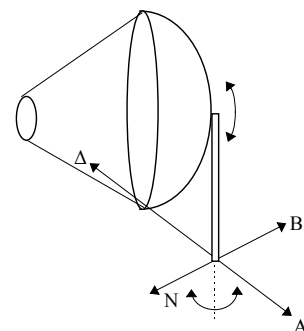
Όλοι οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες για να λειτουργήσουν κινούνται και ακολουθούν την πορεία του ήλιου, συγκεντρώνοντας με αντανάκλαση την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια περιοχή εστίασης. Η κίνηση των συλλεκτών μπορεί να γίνεται γύρω από ένα άξονα ελευθερίας (σχήμα 2.4) ή δυο άξονες ελευθερίας (σχήμα 2.5). Οι γραμμικού τύπου συγκεντρωτικοί συλλέκτες συγκεντρώνουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στους σωλήνες (όπου κυκλοφορεί το θερμοαπαγωγό ρευστό) που διατρέχουν το σημείο εστίασης, κατά μήκος των συλλεκτών. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες σημειακής εστίασης, συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σημείο. Οι συλλέκτες έχουν συνήθως μεγάλης διαμέτρου αντανάκλαστικά κάτοπτρα. Στο δοχείο που γίνεται η εστίαση της ηλιακής ακτινοβολίας, κυκλοφορεί το θερμοαπαγωγό μέσο (πχ λάδι), μέσα σε σωλήνες που τοποθετούνται σε σπείρες εσωτερικά του δοχείου. Εναλλακτικά, η παραγωγή θερμικής ενέργειας και η μετατροπή της μετά σε ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να γίνει άμεσα χρησιμοποιώντας μια μηχανή Stirling, που τοποθετείται στο σημείο εστίασης του συλλέκτη.



Σχήμα 2.4. Συγκεντρωτικός ηλιακός συλλέκτης γραμμικού τύπου, με ένα άξονα ελευθερίας (ανατολή-δύση).



Σχήμα 2.5. Συγκεντρωτικοί ηλιακοί συλλέκτες γραμμικού τύπου (αριστερά) και σημειακής εστίασης (δεξιά), με δυο άξονες ελευθερίας.



Συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία, αυξάνεται σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που συλλέγεται, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες στις επιφάνειες εστίασης. Το μέγεθος και το κόστος παραγωγής των συγκεντρωτικών συλλεκτών είναι πολύ

υψηλότερο από τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, απαιτούν πολύπλοκους μηχανισμούς κίνησης, και έχουν γενικότερα πολύ υψηλότερο κόστος συντήρησης. Οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα τη παραγωγή ατμού που χρησιμοποιείται σε ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες.

Επειδή η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει ημερήσια περιοδικότητα και εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, σε κάθε εφαρμογή είναι απαραίτητο ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και ένα βοηθητικό συμβατικό σύστημα παραγωγής θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό, αποθηκεύεται η θερμότητα που δεν απαιτείται κατά τη διάρκεια της ημέρας έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας ή κατά τις περιόδους νέφωσης. Ανάλογα με το είδος και το μέγεθος της αποθήκης θερμότητας, μπορούν να καλυφθούν ημερήσια φορτία ή ακόμη και εποχιακές ανάγκες.

Το συμβατικό σύστημα παραγωγής θερμότητας, το οποίο λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια (πχ ηλεκτρικός θερμοσίφωνας) ή λέβητα (φυσικού αερίου ή πετρελαίου), χρησιμοποιείται για να καλύπτει το φορτίο όταν η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Για παράδειγμα, τα boiler κεντρικών εγκαταστάσεων ζεστού νερού είναι διπλής (π.χ. σύνδεση με τον ηλιακό συλλέκτη και ηλεκτρική αντίσταση) ή τριπλής ενέργειας (π.χ. σύνδεση με τον ηλιακό συλλέκτη, ηλεκτρική αντίσταση και το λέβητα).

2.1.1. Επίπεδος Ηλιακός Συλλέκτης

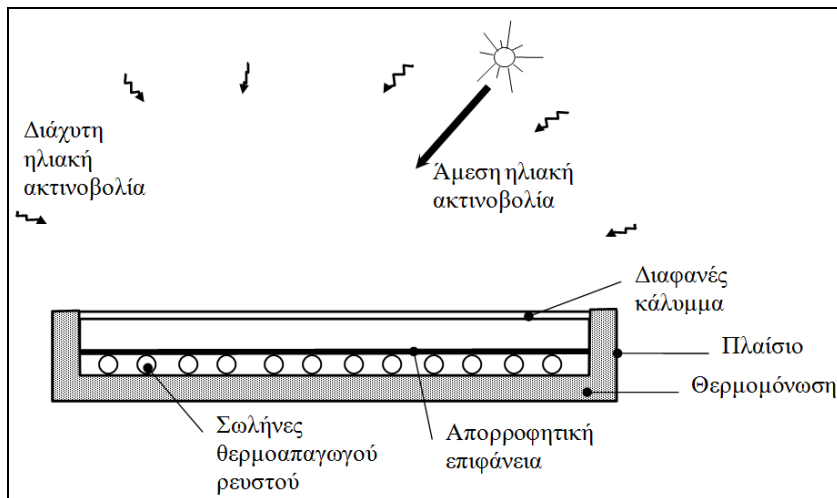
Ο επίπεδος ηλιακός συλλέκτης είναι ο πλέον συνηθισμένος τύπος συλλέκτη που συνήθως χρησιμοποιείται για την παραγωγή ΖΝΧ (ηλιακός θερμοσίφωνας). Εκμεταλλεύονται την άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που απαιτούν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (50-80°C).

Οι υψηλότερες αποδόσεις παρουσιάζονται όταν έχουμε υψηλά ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας (πχ αίθρια ημέρα), αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και σε μια συννεφιασμένη ημέρα (πχ μόνο διάχυτη ακτινοβολία) αλλά με χαμηλότερες αποδόσεις. Η κλίση του συλλέκτη πρέπει να επιτρέπει την όσο το δυνατόν πιο κάθετη πρόσπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη, αυξάνοντας έτσι την ένταση της εκμεταλλεύσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα βασικά τμήματα ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη (σχήμα 2.6) είναι:

- Ο απορροφητής: περιλαμβάνει την απορροφητική επιφάνεια και τους σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το θερμοαπογωγό ρευστό. Συνήθως χρησιμοποιείται χαλκός για τους σωλήνες και για την πλάκα απορρόφησης ή αλουμίνιο μόνο για την πλάκα απορρόφησης με επιλεκτική βαφή, προσφέροντας πολύ καλή απόδοση. Ο απορροφητής έχει μαύρο χρώμα, έτσι ώστε να μειώνονται οι ανακλάσεις στην επιφάνειά του.
- Το κάλυμμα: αποτελείται από μια διαφανή επιφάνεια και λειτουργεί σαν προστατευτικό κάλυμμα και μειώνει τις θερμικές απώλειες του απορροφητήρα προς το περιβάλλον από την κύρια πλευρά του συλλέκτη. Συνήθως χρησιμοποιείται απλό τζάμι (τουλάχιστον 3mm), ενώ σε περιοχές με πολύ αντίξοες καιρικές συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και διπλό τζάμι για πρόσθετη μείωση θερμικών απωλειών, αν και παράλληλα μειώνεται και η διαπερατότητα του καλύμματος. Το διαφανές κάλυμμα πρέπει να είναι όσο το δυνατό διαπερατό στη μικρού κύματος ηλιακή ακτινοβολία και μη διαπερατό στη μεγάλου μήκους θερμική ακτινοβολία. Σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, χρησιμοποιούνται συλλέκτες χωρίς κάλυμμα (π.χ. για θέρμανση νερού πισίνας), μειώνοντας έτσι το κόστος κατασκευής αυτού του είδους των συλλεκτών.
- Η θερμομόνωση του απορροφητή: μειώνει τις θερμικές απώλειες από την πίσω πλευρά του συλλέκτη.

- Το πλαίσιο του συλλέκτη: πρέπει να είναι στεγανό και αντιδιαβρωτικό (π.χ. αλουμίνιο).



Σχήμα 2.6. Τομή τυπικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για παραγωγή ζεστού νερού.

Η χρήση απλών ηλιακών συλλεκτών **χωρίς κάλυμμα** και θερμομόνωση του απορροφητή (μικρής διαμέτρου μαύροι πλαστικοί σωλήνες), αποτελεί την πλέον οικονομική κατασκευή και χρησιμοποιείται για εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (μέχρι 30°C) όπως στην περίπτωση θέρμανσης νερού για πισίνες. Η απόδοση αυτών των συλλεκτών επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου (αυξάνονται οι απώλειες) αφού δεν υπάρχει το προστατευτικό διαφανές κάλυμμα και δεν προσφέρονται για εφαρμογές σε περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος ή υψηλά θερμικά φορτία.

Ένας άλλος τύπος συλλέκτη είναι ο επίπεδος **συλλέκτης κενού**. Αποτελείται από πολλούς γυάλινους σωλήνες, κάθε ένας από τους οποίους περιέχει μια μαύρη μεταλλική ή άλλη απορροφητική επιφάνεια, από τους οποίους περνάει το θερμοαπαγωγό μέσο. Στο γυάλινο σωλήνα δημιουργείται κενό αέρος. Η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το γυαλί του σωλήνα, απορροφάται από την μαύρη επιφάνεια και η θερμότητα παγιδεύεται. Το θερμοαπαγωγό μέσο, νερό ή αέρας, που περνάει και έρχεται σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, απάγει την θερμότητα που έχει συλλεχθεί. Το κενό είναι πολύ καλό μονωτικό, αφού η θερμότητα από τον απορροφητήρα προς το γυάλινο κάλυμμα (και από εκεί προς το περιβάλλον) μεταδίδεται μόνο με ακτινοβολία. Συνεπώς, οι απώλειες θερμότητας των σωλήνων κενού προς το περιβάλλον είναι πολύ μικρές και ως εκ τούτου επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες από άλλου τύπου συλλέκτες, ακόμη και το χειμώνα με τις χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Οι συλλέκτες κενού έχουν υψηλότερες αποδόσεις, αλλά μεγαλύτερο κόστος αγοράς.

Οι **ηλιακοί συλλέκτες αέρα** χρησιμοποιούν αέρα ως θερμοαπαγωγό ρευστό, ο οποίος από τους εσωτερικούς χώρους κυκλοφορεί μέσα στον ηλιακό συλλέκτη και αφού θερμανθεί επιστρέφει και αποδίδεται στο χώρο. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξωτερικός αέρας ο οποίος θερμαίνεται και αποδίδεται στους εσωτερικούς χώρους. Επίσης μπορεί να γίνει παραγωγή ζεστού νερού, παρεμβάλλοντας έναν εναλλάκτη αέρα/νερού. Οι ηλιακοί συλλέκτες αέρα δεν είναι τόσο διαδεδομένοι.

2.1.2. Τυπικές Εγκαταστάσεις

Η θέρμανση του νερού πισίνας με τη χρήση ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα (σχήμα 2.7) εφαρμόζεται με επιτυχία, εδώ και πολλά χρόνια. Η τοποθέτησή τους γίνεται εύκολα και έχουν μικρό σχετικά κόστος.



Σχήμα 2.7. Απλοί πλαστικοί ηλιακοί συλλέκτες τοποθετημένοι οριζόντια για την θέρμανση του νερού πισίνας σε ξενοδοχείο.

Για τους τυπικούς ηλιακούς συλλέκτες παραγωγής ZNX, η δεξαμενή αποθήκευσης (θερμαντήρας) τοποθετείται στο πάνω μέρος του συλλέκτη. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η κυκλοφορία του νερού που γίνεται με φυσικό τρόπο, λόγω της διαφοράς ειδικού βάρους ζεστού-κρύου νερού. Εσωτερικά τοποθετείται μια ράβδος μαγνησίου, για την προστασία του δοχείου από διαβρώσεις. Επίσης εσωτερικά συνήθως τοποθετείται και μια ηλεκτρική αντίσταση για να καλύπτει το φορτίο θέρμανσης νερού, όταν ο ηλιακός συλλέκτης δεν αποδίδει ικανοποιητικά. Ουσιαστικά δημιουργείται ένας θερμοσίφωνας (θερμαντήρας) διπλής ενέργειας (ηλιακής και ηλεκτρικής ενέργειας). Συνήθως, το δοχείο τοποθετείται στο πάνω μέρος του ηλιακού συλλέκτη, οριζόντια (σχήμα 2.8α) ή κατακόρυφα (σχήμα 2.8β).



(α)



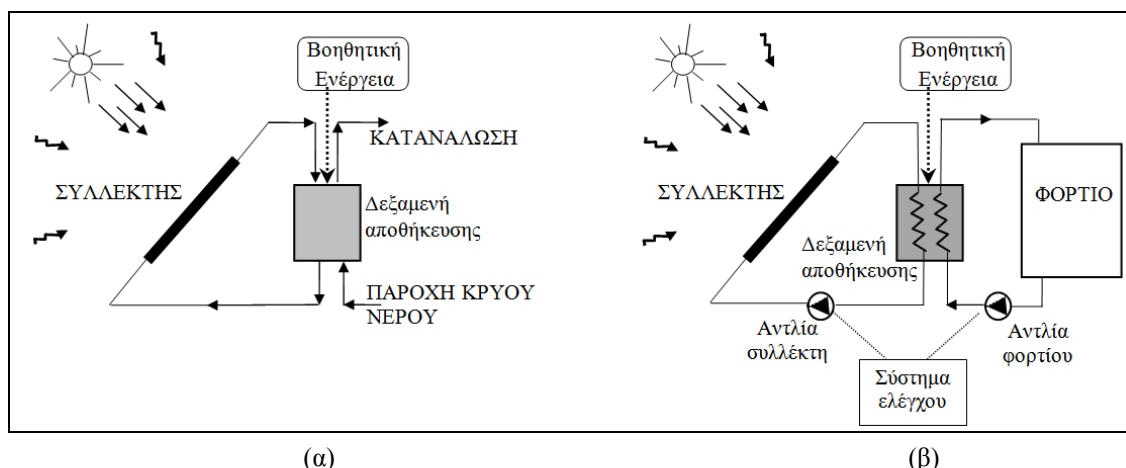
(β)

Σχήμα 2.8. Οριζόντια (αριστερά) και κατακόρυφη (δεξιά) τοποθέτηση δοχείου αποθήκευσης νερού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για παραγωγή ζεστού νερού με φυσική κυκλοφορία.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του συλλέκτη μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία αποδίδεται στο θερμοαπαγωγό ρευστό που κυκλοφορεί στο συλλέκτη. Το είδος του θερμοαπαγωγού ρευστού εξαρτάται από την εφαρμογή. Τα συνηθέστερα θερμοαπαγωγά ρευστά για

τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες είναι το νερό (ή μίγμα νερού με άλλες ουσίες για αντιδιαβρωτική και αντιπαγετική προστασία) και ο αέρας, η κυκλοφορία του ζεστού αέρα γίνεται με φυσικό τρόπο).

Στους απλούς ηλιακούς θερμοσίφωνες, η κυκλοφορία του ζεστού νερού γίνεται με φυσικό τρόπο μεταξύ του συλλέκτη και της αποθήκης νερού (θερμοσίφωνα) και με τη διαφορά πίεσης του δικτύου προς την κατανάλωση (σχήμα 2.9α). Για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, ο έλεγχος της λειτουργίας των συστημάτων γίνεται από κάποιο είδος ηλεκτρονικών αυτοματισμών, που ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να είναι απλές μετρήσεις της θερμοκρασίας σε επιμέρους στάδια, έτσι ώστε να ελέγχεται η λειτουργία κυκλοφορητών (σχήμα 2.9β), ή και η ρύθμιση της κίνησης των συλλεκτών, εάν υπάρχει.



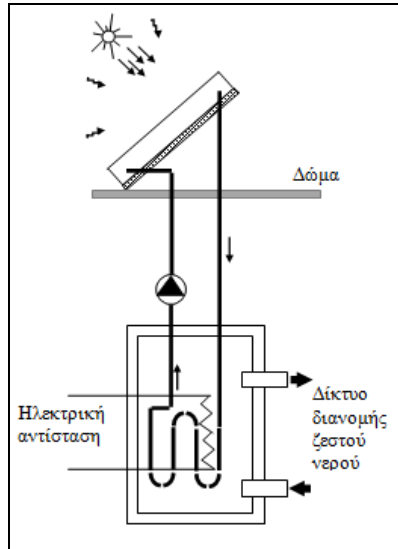
Σχήμα 2.9. Αντιπροσωπευτικές διατάξεις ηλιακών συστημάτων παραγωγής ζεστού νερού.

Για παράδειγμα, όταν η θερμοκρασία της δεξαμενής είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από το συλλέκτη, τότε τίθεται σε λειτουργία η αντλία του συλλέκτη και το ρευστό κυκλοφορεί μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης. Όταν η θερμοκρασία εξόδου από το συλλέκτη είναι μικρότερη από την θερμοκρασία της δεξαμενής, τότε σταματάει η κυκλοφορία του ρευστού μέσα από το συλλέκτη. Παρόμοιοι έλεγχοι γίνονται για τη δυνατότητα άντλησης του νερού από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Όταν η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή θερμοκρασία του φορτίου, τότε το φορτίο καλύπτεται από τη δεξαμενή. Για τις περιόδους που αυτό δεν ισχύει, τότε υπάρχει το συμβατικό σύστημα (π.χ. ηλεκτρική αντίσταση ή καυστήρας) που τίθεται σε λειτουργία για να καλύψει το φορτίο.

Η αποθήκη νερού για κεντρικές εγκαταστάσεις μπορεί να τοποθετηθεί και σε άλλο σημείο, μακριά από το σημείο συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. στο υπόγειο). Στην περίπτωση αυτή (σχήμα 2.10) χρησιμοποιείται αντλία, για να κυκλοφορεί το θερμοαπογωγό μέσο έτσι ώστε να μεταφερθεί η συλλεγόμενη θερμότητα και να αποδοθεί στη δεξαμενή αποθήκευσης. Απαιτείται επίσης σύστημα αυτοματισμού και ελέγχου της λειτουργίας. Το boiler στο σχήμα 2.10 είναι διπλής ενέργειας (π.χ. με ηλεκτρική αντίσταση για παραγωγή ζεστού νερού όταν η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία δεν επαρκεί) ενώ μπορεί να συνδεθεί και με το λέβητα (τριπλής ενέργειας).

Τα δίκτυα διανομής ΖΝΧ διαθέτουν θερμομόνωση σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις της ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010. Επίσης, το μήκος των σωληνώσεων πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο για να μειωθούν οι όποιες απώλειες θερμότητας από τους σωλήνες κυκλοφορίας του ρευστού.

Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ένα κεντρικό σύστημα θέρμανσης χώρων, που συνδέεται με ένα υποδαπέδιο σύστημα ή μονάδες στοιχείων ανεμιστήρα (fan coils), όπου απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου $40\pm 45^{\circ}\text{C}$).



Σχήμα 2.10. Κεντρική εγκατάσταση με ανεξάρτητη αποθήκη ζεστού νερού (μπόϊλερ διπλής ενέργειας).

2.1.3. Αποδόσεις Ηλιακών Συλλεκτών

Το ωφέλιμο ενεργειακό κέρδος από έναν επίπεδο ηλιακό συλλέκτη, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, είναι η διαφορά του ποσού της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τον απορροφητήρα και των απωλειών ενέργειας στο περιβάλλον. Ο υπολογισμός της ωφέλιμης θερμικής ισχύος δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \underbrace{A_c \cdot G_T \cdot F_R(\tau\alpha)_n}_{\text{κέρδη}} - \underbrace{A_c \cdot F_R U_L \cdot (T_{\text{εισ}} - T_a)}_{\text{απώλειες}} \quad (2.1)$$

όπου:

"Q" ωφέλιμη συλλεγόμενη θερμική ισχύς (W)

"A_c" επιφάνεια συλλέκτη (m²)

"G_T" ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του συλλέκτη (W/m²)

"F_R" συντελεστής θερμικής απολαβής του συλλέκτη

"T" διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος του συλλέκτη στην ηλιακή ακτινοβολία

"α" απορροφητικότητα του απορροφητήρα στην ηλιακή ακτινοβολία

"U_L" συνολικός ισοδύναμος συντελεστής ενεργειακών απωλειών του συλλέκτη (W/m²/°C)

"T_{εισ}" θερμοκρασία του ρευστού στην είσοδο του συλλέκτη (°C)

"T_α" θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

Οι συντελεστές "(τα)_n" με δείκτη "n", αναφέρονται σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων ενός συλλέκτη (F_R(τα)_n και F_RU_L) προκύπτουν από τις δοκιμές απόδοσης και πιστοποίησης του συγκεκριμένου συλλέκτη από αναγνωρισμένο εργαστήριο δοκιμών (πχ Κέντρο Δοκιμών Ηλιακών Συλλεκτών του Δημόκριτου). Μερικές αντιπροσωπευτικές τιμές για κάποιους τύπους συλλεκτών δίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους απόδοσης διάφορων τύπων ηλιακών συλλεκτών.

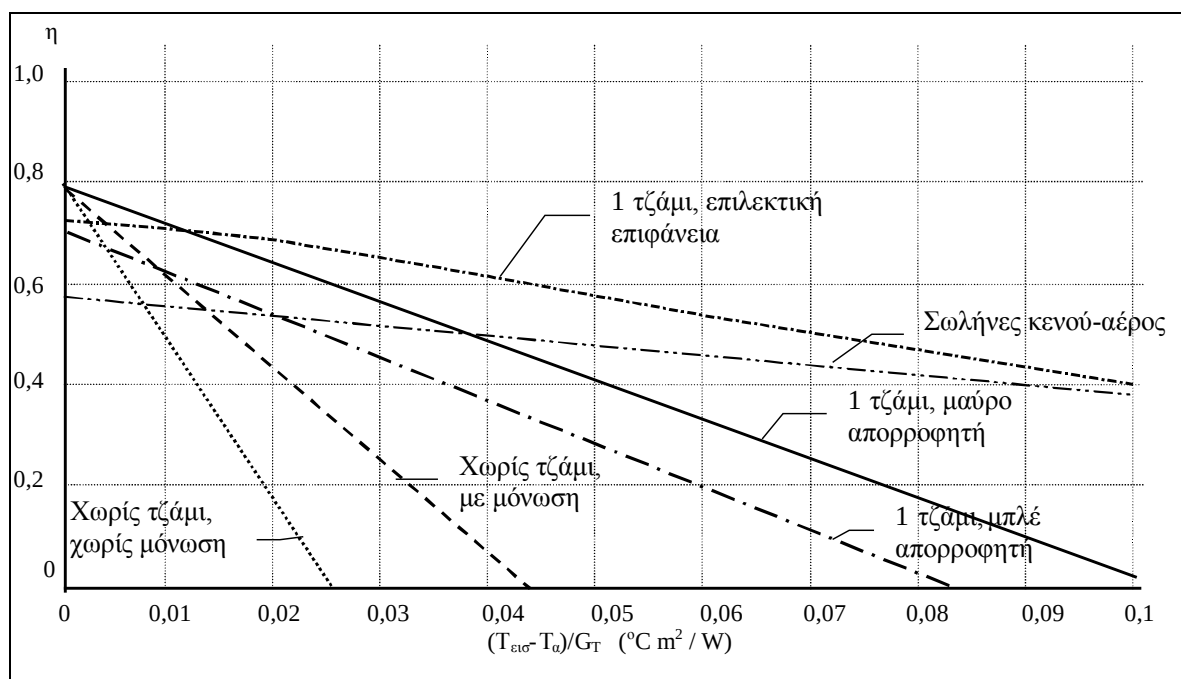
Περιγραφή ηλιακού συλλέκτη νερού	$F_R(\tau\alpha)_n$	$F_R U_L$ [W/m ² .C]
Μαύρο χρώμα, 1 υαλοπίνακα	0,82	7,5
Μαύρο χρώμα, 2 υαλοπίνακες ή επιλεκτική επιφάνεια με 1 υαλοπίνακα	0,75	5
Σωλήνες κενού-αέρος	0,57	1,82
Απλός συλλέκτης (πλαστικοί σωλήνες) χωρίς κάλυμμα και μόνωση (ταχύτητα ανέμου 2,2 m/s)	0,86	21,5

Η ΕΒΗΕ έχει ως μέλη 23 βιομηχανίες παραγωγής ηλιακών συστημάτων που παράγουν τα προϊόντα τους σε δικό τους εργοστάσιο. Τα προϊόντα των ελληνικών βιομηχανιών έχουν ελεγχθεί από αναγνωρισμένα εργαστήρια στην ΕΕ σύμφωνα με τα ισχύοντα διεθνή ή ευρωπαϊκά πρότυπα ενώ οι ηλιακοί θερμοσίφωνες και τα μπόιλερ (θερμαντήρες) διαθέτουν την υποχρεωτική από το νόμο σήμανση CE και την αντίστοιχη έκθεση από αναγνωρισμένο εργαστήριο δοκιμών. Είναι αναγκαίο οι κατασκευαστές του εξοπλισμού να χρησιμοποιούν τα ευρωπαϊκά πρότυπα για τα προϊόντα που διαθέτουν στην αγορά, ενώ η προώθηση του Ευρωπαϊκού Σήματος Ποιότητας Θερμικών Ηλιακών Προϊόντων (Solar Keymark), κρίνεται επιτακτική.

Ως βαθμός απόδοσης του ηλιακού συλλέκτη, ορίζεται ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσής του, για δεδομένη τιμή έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και εξωτερική θερμοκρασία. Η στιγμιαία απόδοση ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{Q}{A_c \cdot G_T} = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha)_n - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_{\text{εισ}} - T_a)}{G_T} \quad (2.2)$$

Αν ο συντελεστής U_L υποθέσουμε ότι παραμένει σταθερός, τότε η απόδοση του συλλέκτη σε συνάρτηση με το πηλίκο $(T_{\text{εισ}} - T_a)/G_T$ είναι μια γραμμική σχέση, με κλίση $-F_R U_L$. Η ευθεία τέμνει τον γ-άξονα στο σημείο $F_R(\tau\alpha)_n$. Χαρακτηριστικές καμπύλες απόδοσης διάφορων τύπων συλλεκτών παρουσιάζονται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11. Τυπικές καμπύλες απόδοσης διαφορετικών τύπων ηλιακών συλλεκτών.

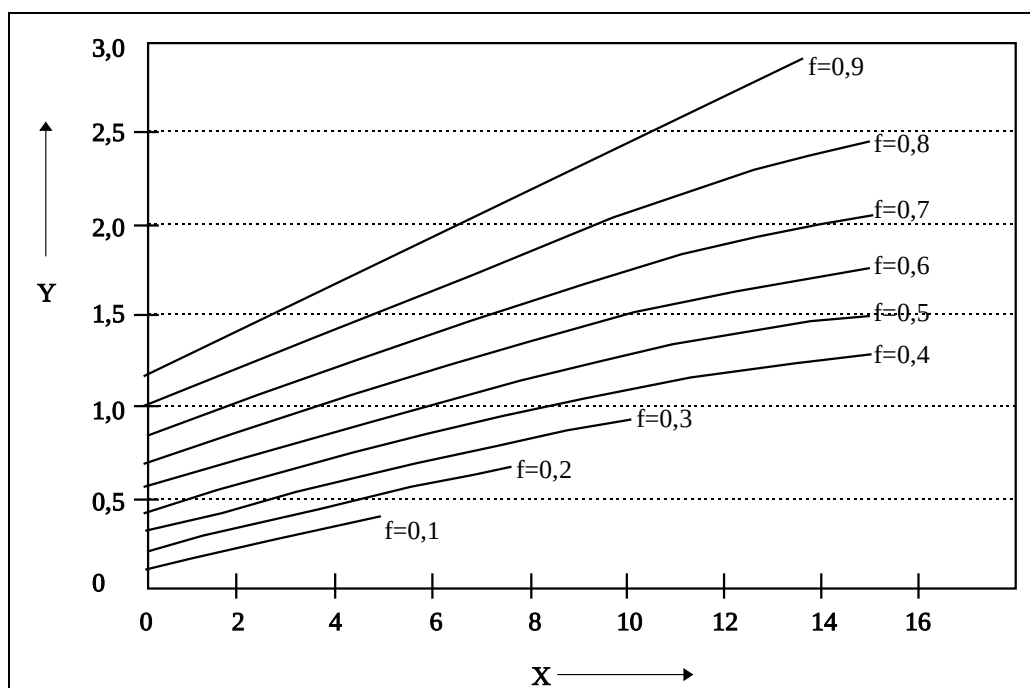
Στις περισσότερες εφαρμογές ηλιακών συλλεκτών, επιλέγεται η κλίση του συλλέκτη ώστε να βλέπει όσο το δυνατόν πιο κάθετα τις ηλιακές ακτίνες. Στην επιλογή της κλίσης του συλλέκτη, βασικός παράγοντας είναι η περίοδος χρήσης του και η περιοχή εγκατάστασής του.

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την ΤΟΤΕΕ 20701-1/2010 (ενότητα 5.3.1), ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών μεταβάλλεται ανάλογα με την παλαιότητα και την κατάσταση λειτουργίας τους. Σε περίπτωση σημαντικής και εμφανούς πλημμελούς συντήρησης (π.χ. ύπαρξη διαρροών κ.λπ.), καθώς και φθορών στη συλλεκτική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, ο συντελεστής ηλιακής αξιοποίησης του ηλιακού συλλέκτη μειώνεται κατά 20%.

Εκτός του στιγμιαίου βαθμού απόδοσης υπάρχει και ο μακροχρόνιος βαθμός απόδοσης ή αλλιώς συντελεστής κάλυψης "f" και αναφέρεται στο ποσό απαιτούμενης ενέργειας που μπορεί να καλύψει ο συλλέκτης, σε μια δεδομένη περιοχή, και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Αναλυτική παρουσίαση για τον υπολογισμό του συντελεστή κάλυψης γίνεται στην επόμενη ενότητα.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ - Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ F

Για να αξιολογηθεί η απόδοση ενός κεντρικού συστήματος ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με συγκεκριμένη ζήτηση φορτίου (θέρμανση χώρων ή/και ΖΝΧ), έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι. Η πιο γνωστή μέθοδος υπολογισμού είναι η μέθοδος καμπυλών f [6-8] που έχει επίσης ενσωματωθεί στο εθνικό και ευρωπαϊκό πρότυπο [3].



Σχήμα 2.12. Οι καμπύλες f σε συνάρτηση με τις παραμέτρους X και Y.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μηνιαίας και ετήσιας θερμικής απόδοσης ενεργητικών ηλιακών συστημάτων υπολογίζοντας το ποσοστό του ολικού θερμικού φορτίου που θα καλυφθεί από την ηλιακή ενέργεια. Η βασική παράμετρος είναι η επιφάνεια των συλλεκτών. Δευτερεύουσες παράμετροι είναι ο τύπος του συλλέκτη, η δυνατότητα αποθήκευσης, ο ρυθμός ροής μάζας και το μέγεθος των εναλλακτών που χρησιμοποιούνται στην πλευρά του συλλέκτη και του

φορτίου. Η τελική σχέση που χρησιμοποιείται στην μέθοδο αυτή, υπολογίζει το συντελεστή κάλυψης f (το ποσοστό του μηνιαίου θερμικού φορτίου για θέρμανση χώρων και ΖΝΧ που καλύπτεται από την ηλιακή ενέργεια) σε σχέση με δυο αδιάστατες παραμέτρους: (α) Η πρώτη παράμετρος συνδέεται με το πηλίκο των απωλειών του συλλέκτη προς το θερμικό φορτίο, (β) Η δεύτερη παράμετρος συνδέεται με το πηλίκο της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας προς το θερμικό φορτίο.

Το ποσοστό κάλυψης f του μηνιαίου θερμικού φορτίου υπολογίζεται από το σχήμα 2.12 ή τη σχέση 2.3, μέσω των συντελεστών "X" και "Y".

$$f = 1029 \cdot Y - 0,065 \cdot X - 0,245 \cdot Y^2 + 0,0018 \cdot X^2 + 0,0215 \cdot Y^3 \quad (2.3)$$

όπου τα "X" και "Y" παίρνουν τιμές μεταξύ των διαστημάτων " $0 < Y < 3$ " και " $0 < X < 18$ ".

Ο συντελεστής "X" εκφράζει το ποσό των ενεργειακών απωλειών προς το συνολικό θερμικό φορτίο του μήνα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X = \left(\frac{A_c}{L} \right) \cdot F_R \cdot U_L \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot (T_{\alpha\alpha\phi} - \bar{T}_\alpha) \cdot \Delta t \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (2.4)$$

Ο συντελεστής "Y" εκφράζει το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αξιοποιήσει ο ηλιακός συλλέκτης προς το συνολικό θερμικό φορτίο του μήνα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Y = \left(\frac{A_c}{L} \right) \cdot F_R (\tau\alpha)_n \cdot \left(\frac{F'_R}{F_R} \right) \cdot \left(\frac{\bar{\tau\alpha}}{(\tau\alpha)_n} \right) \cdot \bar{H}_\beta \cdot k_3 \quad (2.5)$$

όπου:

"A_c" επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών (m²). Σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2010, η συνήθης πρακτική είναι η εγκατάσταση 1m² απλού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για κάθε άτομο, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε ΖΝΧ. Αντίστοιχα, για τη θέρμανση χώρων αντιστοιχεί 1m² επίπεδου απλού ηλιακού συλλέκτη για θερμικό φορτίο 700W (≈600kcal/h).

"L" μέσο μηνιαίο φορτίο (J) για την παραγωγή ΖΝΧ (LZNX) ή/και θέρμανση χώρων "L_θ". Το απαιτούμενο μηνιαίο φορτίο για παροχή ζεστού νερού "L_{ZNX}" υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{ZNX} = N \cdot HK_{ZNX} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{ZNX} - T_K) \quad (2.6)$$

όπου:

"N" αριθμός ημερών του εκάστοτε μήνα

"HK_{ZNX}" μέση ημερήσια κατανάλωση ζεστού νερού σε (lt/ημέρα) σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2010

"ρ" πυκνότητα του νερού (περίπου 1kg/lt αν και η τιμή μεταβάλλεται λίγο με την θερμοκρασία)

"C_p" ειδική θερμότητα του νερού (419J/kg/°C),

"T_{ZNX}" επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού (°C) σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2010

"T_κ" θερμοκρασία νερού δικτύου (°C) σύμφωνα με την TOTEE 20701-3/2010

Το απαιτούμενο μηνιαίο φορτίο για τη θέρμανση χώρων είναι ανάλογο των βαθμοημερών θέρμανσης στη διάρκεια του μήνα σε (J) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{\Theta} = 24 \cdot 3600 \cdot (U \cdot A) \cdot DD \cdot k \quad (2.7)$$

όπου:

"(U · A)" το γινόμενο του συντελεστή θερμοπερατότητας "U" επί το εμβαδό επιφάνειας του κελύφους του κτηρίου "A" σε (W/°C), σύμφωνα με την TOTEE 20701-2/2010

"DD" αριθμός βαθμοημερών θέρμανσης του μήνα με βάση την επιθυμητή θερμοκρασία θέρμανσης χώρων (°C.ημέρα) σύμφωνα με την TOTEE 20701-3/2010

"k" συντελεστής λειτουργίας του κτηρίου, για παράδειγμα, για 24ωρη συνεχή λειτουργία "k=1" και για διακοπτόμενη λειτουργία 8÷16 ώρες ημερήσια "k=0,70÷0,85". Σε περίπτωση χρήσης των ηλιακών συλλεκτών για ZNX και θέρμανση χώρων, οι θερμικές απώλειες στο δίκτυο μεταφοράς νερού μπορεί να είναι σημαντικές (10÷20% ανάλογα με τη θερμομόνωση των σωλήνων του δικτύου) σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2010. Σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται το απαιτούμενο θερμικό φορτίο ανάλογα με την εγκατάσταση. Στην περίπτωση χρήσης των ηλιακών συλλεκτών για παραγωγή ZNX σε μικρές εγκαταστάσεις, οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες.

"F_RU_L, F_R(τα)_n" χαρακτηριστικά μεγέθη του συλλέκτη που δίνονται από τον κατασκευαστή. Αντιπροσωπευτικές τιμές για ηλιακούς συλλέκτες δίνονται στον Πίνακα 2.1.

"F_R'/F_R" διορθωτικός συντελεστής συλλέκτη-εναλλάκτη σε περίπτωση που παρεμβάλλεται εναλλάκτης θερμότητας όπως σε κλειστό σύστημα ηλιακού συλλέκτη. Το πηλίκο αυτό παίρνει τιμές από 0÷1 και εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες της επιφάνειας συναλλαγής και τις θερμοκρασίες των δύο ρευσμάτων. Συνήθης τιμή της παραμέτρου αυτής είναι 0.80÷0.95.

"T_{αναφ}" θερμοκρασία αναφοράς (100°C)

"T_α" μέση μηνιαία θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας (°C) σύμφωνα με την TOTEE 20701-3/2010,

"Δt" χρονική περίοδος κάθε μήνα (s),

"(τα)/(τα)_n" διορθωτικός συντελεστής λόγω της θέσης του συλλέκτη και της εποχής του έτους, που ορίζεται ως το πηλίκο του γινομένου της μέσης μηνιαίας τιμής της διαπερατότητας "t" και απορροφητικότητας "α" προς την αντίστοιχη τιμή με δείκτη "n" που αναφέρεται σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου. Για συλλέκτες με μονό και διπλό τζάμι, ο συντελεστής υπολογίζεται συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης "θ" της ηλιακής ακτινοβολίας κατά το ηλιακό μεσημέρι της τυπικής ημέρας για κάθε μήνα [4], σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 1 - 0.0044 \cdot \theta + 0.00022 \cdot \theta^2 - 3.31 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3 \text{ μονό τζάμι} \quad (2.8)$$

$$(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 0.99065 - 0.000567 \cdot \theta + 8.2488 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 - 2.26787 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3 \text{ διπλό τζάμι} \quad (2.9)$$

$$(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n = 0,99 \text{ συλλέκτες χωρίς κάλυμμα και συλλέκτες κενού} \quad (2.10)$$

" $\overline{H}_\beta$ " μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη ανά μονάδα επιφανείας ($J/m^2/μήνα$) σύμφωνα με την TOTE 20701-3/2010,

" k_1 " διορθωτικός συντελεστής χωρητικότητας αποθήκης (δεξαμενής). Η μέθοδος των καμπυλών f έχει αναπτυχθεί για ανηγμένη χωρητικότητα δεξαμενής $75 lt/m^2$. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ότι " $k_1=1$ ". Σε διαφορετικές περιπτώσεις, ο διορθωτικός συντελεστής υπολογίζεται ως:

$$k_1 = \left[\frac{75}{M} \right]^{0,25} \quad (2.11)$$

όπου:

" M " ο ανηγμένος όγκος της δεξαμενής ανά τετραγωνικό μέτρο συλλεκτικής επιφάνειας (lt/m^2)

" k_2 " διορθωτικός συντελεστής ζεστού νερού. Η μέθοδος των καμπυλών f έχει αναπτυχθεί, θεωρώντας ότι το φορτίο για το ZNX είναι πολύ μικρό σε σχέση με το θερμικό φορτίο για τη θέρμανση χώρου. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής " k_2 " είναι ίσος με 1. Εάν οι υπολογισμοί αφορούν μόνο τη θέρμανση ZNX τότε ο " k_2 " υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_2 = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ZNX} + 3,86 \cdot T_k - 2,32 \cdot T_\alpha}{100 - T_\alpha} \quad (2.12)$$

όπου:

" T_α " μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ C$) σύμφωνα με την TOTE 20701-3/2010,

" T_{ZNX} " επιθυμητή θερμοκρασία ζεστού νερού ($^\circ C$) σύμφωνα με την TOTE 20701-1/2010,

" T_k " θερμοκρασία νερού δικτύου ($^\circ C$) σύμφωνα με την TOTE 20701-3/2010.

" k_3 " διορθωτικός συντελεστής για τον εναλλάκτη θερμότητας φορτίου. Το μέγεθος του εναλλάκτη φορτίου επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Όταν μειώνεται το μέγεθος του εναλλάκτη η θερμοκρασία της δεξαμενής πρέπει να αυξηθεί για να μπορέσει να καλύπτει τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη θερμοκρασία εισόδου του υγρού στους συλλέκτες, με ταυτόχρονη μείωση της απόδοσής τους. Η παράμετρος που αντιπροσωπεύει το μέγεθος του εναλλάκτη είναι το γινόμενο " $\epsilon \cdot C_{min}/(U_L \cdot A_c)$ ", όπου " ϵ " βαθμός εκμετάλλευσης του εναλλάκτη, " C_{min} " η μικρότερη θερμική παροχή μεταξύ

εργαζόμενου μέσου στο συλλέκτη και νερό που του κυκλώματος θέρμανσης-σύστημα δεξαμενής ($W/m^2/^{\circ}C$). Οι καμπύλες f έχουν αναπτυχθεί για " $\varepsilon \cdot C_{min}/(U \cdot A)=2$ ". Σε αυτήν τη περίπτωση ισχύει ότι " $k_3=1$ ". Για εναλλάκτες διαφορετικού μεγέθους, ο διορθωτικός συντελεστής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k_3 = 0,39 + 0,65 \cdot \exp \frac{-0,139 \cdot (U_L \cdot A_C)}{\varepsilon \cdot C_{min}} \quad (2.14)$$

Για παραγωγή ZNX, ο συντελεστής παίρνει τιμή ίση με τη μονάδα ($k_3=1$) επειδή δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης φορτίου.

Η μέση μηνιαία ωφέλιμη ενέργεια είναι το γινόμενο του f επί το μέσο μηνιαίο θερμικό φορτίο L , για κάθε μήνα. Η **μέση ετήσια κάλυψη F** , είναι το πηλίκο του αθροίσματος των τιμών της μέσης μηνιαίας ωφέλιμης ενέργειας προς το μέσο ετήσιο φορτίο και υπολογίζεται από τη σχέση:

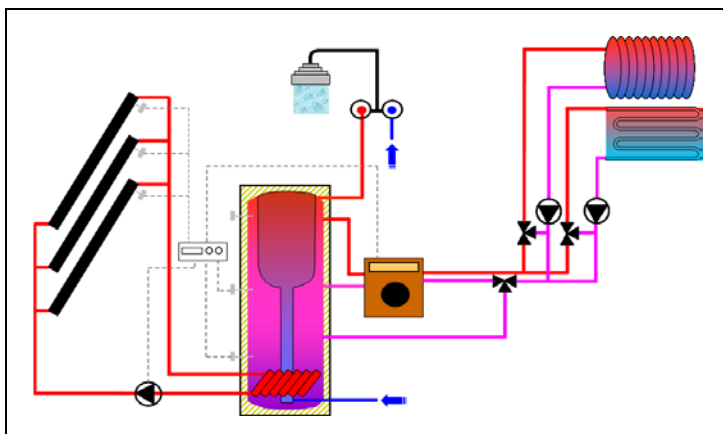
$$F = \frac{\sum (L_i \cdot f_i)}{\sum (L_i)} \quad \text{όπου } i = 1-12 \quad (2.15)$$

2.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ COMBI (ΖΕΣΤΟ ΝΕΡΟ ΧΡΗΣΗΣ & ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΧΩΡΩΝ)

Στην Ελλάδα οι περισσότερες εγκαταστάσεις ηλιακών συλλεκτών είναι αυτόνομοι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες για την παραγωγή ZNX, που εξυπηρετούν ένα νοικοκυριό, ή κεντρικές εγκαταστάσεις ZNX σε κτήρια του τριτογενή τομέα (π.χ. ξενοδοχεία). Στο εξωτερικό, συνηθίζονται κεντρικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ZNX σε συνδυασμό με τη θέρμανση χώρων (**συστήματα combi**), εκμεταλλευόμενοι το ίδιο πεδίο ηλιακών συλλεκτών. Στην Ελλάδα, περίπου 5% της συνολικής αγοράς θερμικών ηλιακών εγκαταστάσεων είναι συστήματα combi, φτάνοντας 40% της αγοράς ηλιακών στην Αυστρία, 35% στην Ελβετία, 20% στην Ολλανδία, 15% στη Δανία και 5% στη Γαλλία. Στην ευρωπαϊκή αγορά, περίπου το 15% των ηλιακών θερμικών εγκαταστάσεων που ήταν σε λειτουργία το 2009 αφορούσαν συστήματα combi [5].

- Ζεστό Νερό Χρήσης (ZNX)
 - Θέρμανση Χώρων
- } **Ηλιακά
Συστήματα Combi**

Μια τυπική εγκατάσταση ηλιακού συστήματος combi (σχήμα 2.13) αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες, μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού και ένα εφεδρικό σύστημα θέρμανσης (πχ λέβητα). Προφανώς, ένα σύστημα combi απαιτεί μεγαλύτερη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών σε σχέση με ένα σύστημα παραγωγής ZNX προκειμένου να καλύψει τα απαιτούμενα φορτία. Η εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας και ένα ανεξάρτητο μπόιλερ ZNX. Μπορούν όμως να συνδυαστούν σε ένα δοχείο με κάθετη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι διαφορετικές θερμοκρασιακές απαιτήσεις για ZNX και θέρμανση χώρων.



Σχήμα 2.13. Τυπική διάταξη συστήματος combi για την παραγωγή ZNX και θέρμανσης χώρων.

Σε ετήσια βάση, η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών (αποδιδόμενη θερμότητα προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία) κυμαίνεται μεταξύ 40÷55% και εξαρτάται από τον τύπο του συλλέκτη, την αποθήκη του ζεστού νερού και το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης [9]. Ο μέσος ετήσιος συντελεστής εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες από τη δεξαμενή θερμότητας και την απορριπτόμενη θερμότητα, κυμαίνεται από 20÷25%. Ανάλογα με το μέγεθος του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών, τη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής και τα φορτία, τα συστήματα combi μπορούν να καλύψουν 10÷60% των συνολικών φορτίων για ZNX και θέρμανση χώρων στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη [9]. Για παράδειγμα, στην Αυστρία για μια κατοικία η απαιτούμενη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών συστήματος combi είναι 12÷20 m² [10]. Για ένα κτήριο με καλή θερμομόνωση, το ποσοστό κάλυψης μπορεί να φτάσει το 40% των συνολικών θερμικών φορτίων. Εγκαταστάσεις με μεγαλύτερη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και δεξαμενή αποθήκευσης μπορούν να καλύψουν το 50÷70% των θερμικών απαιτήσεων.

Για την αξιολόγηση και σύγκριση των αποδόσεων διαφορετικών συστημάτων combi, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που ανέπτυξε η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA Task 26 www.iea-shc.org/task26). Ακολουθώντας τις συγκεκριμένες μεθόδους σε συνδυασμό με την επεξεργασία των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από τη λειτουργία εγκαταστάσεων combi προκύπτουν πρακτικά συμπεράσματα [11].

Συνήθως, τα συστήματα combi απαιτούν συγκεκριμένη μελέτη και σχεδιασμό έτσι ώστε να αποφεύγονται λειτουργικά προβλήματα το καλοκαίρι, εξαιτίας του μεγάλου πεδίου ηλιακών συλλεκτών σε σχέση με τα χαμηλά θερμικά φορτία, που έχουν σαν αποτέλεσμα την υπερθέρμανση. Για παράδειγμα, ο κατάλληλος συνδυασμός του πεδίου των ηλιακών συλλεκτών με ένα δοχείο αδράνειας μέσω αυτορυθμιζόμενου κυκλοφορητή ώστε το θερμοαπαγωγό ρευστό να κυκλοφορεί μέσα από τους ηλιακούς συλλέκτες για να προκύψει η κατάλληλη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των συλλεκτών και του δοχείου αδράνειας για την μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, η χρήση ψυκτικών διατάξεων στο κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, η χρήση κυκλώματος απόρριψης θερμότητας, κ.ά. [12]. Για να επιτευχθεί υψηλός συντελεστής απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών, απαιτείται χαμηλή θερμοκρασία επιστροφής από το κύκλωμα θέρμανσης χώρων. Για παράδειγμα, μια μέση αύξηση της θερμοκρασίας επιστροφής κατά 10°C από το σύστημα θέρμανσης θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών κατά 25÷40% ώστε να προκύψει η ίδια απόδοση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει επίσης να δοθεί στην κατάλληλη θερμομόνωση των δοχείων αποθήκευσης ζεστού νερού, εφόσον χρησιμοποιηθούν.

2.4. ΗΛΙΑΚΗ ΨΥΞΗ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ COMBI-PLUS

Δεδομένου ότι τα μέγιστα ψυκτικά φορτία το καλοκαίρι συμπίπτουν με την υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας, προσφέρεται μια πολύ καλή ευκαιρία για τη χρήση των ηλιακών θερμικών συστημάτων σε συνδυασμό με θερμικούς ψύκτες. Συνεπώς, η εκμετάλλευση των ηλιακών θερμικών συστημάτων μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για ZNX, θέρμανση και ψύξη χώρων. Τα συστήματα αυτά είναι συνήθως γνωστά και ως “solar **combi-plus**”.



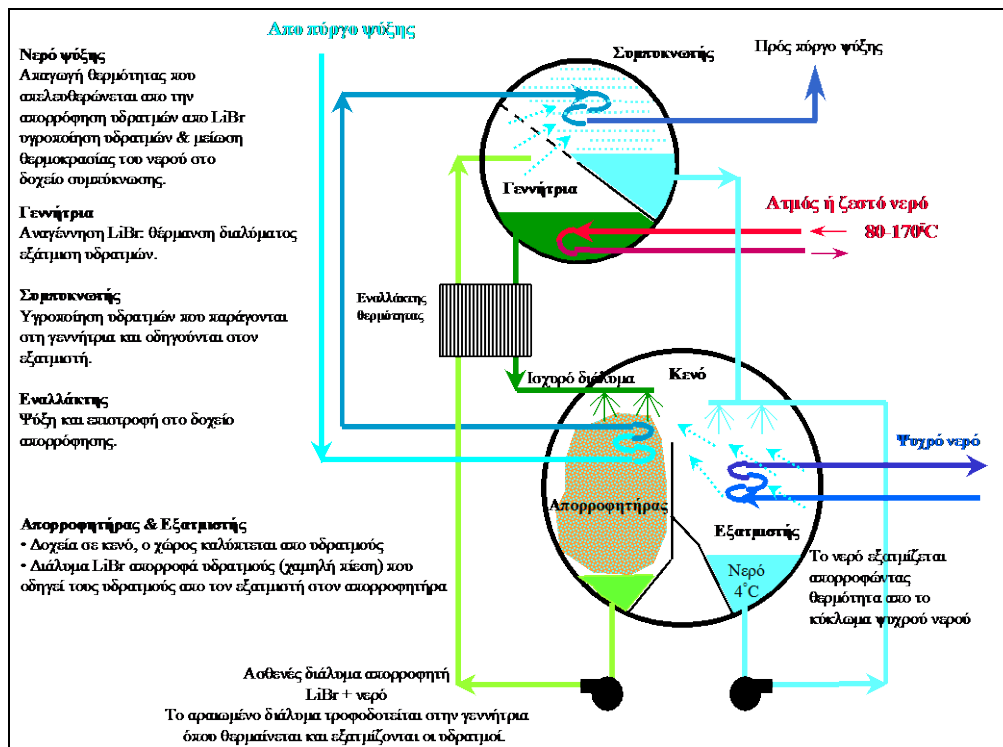
Δεδομένου ότι τα μέγιστα ψυκτικά φορτία το καλοκαίρι συμπίπτουν με την υψηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας, προσφέρεται μια πολύ καλή ευκαιρία για τη χρήση των ηλιακών θερμικών συστημάτων σε συνδυασμό με θερμικούς ψύκτες. Συνεπώς, η εκμετάλλευση των ηλιακών θερμικών συστημάτων μπορεί να καλύψει τις ανάγκες για ZNX, θέρμανση και ψύξη χώρων. Τα συστήματα αυτά είναι συνήθως γνωστά και ως “solar **combi-plus**”.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας σε εφαρμογές κλιματισμού (ηλιακός κλιματισμός) έχει προχωρήσει αρκετά τα τελευταία χρόνια, λόγω της προόδου στο σχεδιασμό των επιμέρους συστημάτων και των βελτιωμένων αποδόσεων, ενώ παράλληλα έχει αποκτηθεί σημαντική εμπειρία από τις διάφορες εφαρμογές [13-16].

Οι βασικές αρχές της ηλιακής ψύξης κατοχυρώθηκαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στη Γαλλία από τον Ferdinand Carré (1859) και η πρώτη μηχανή διατέθηκε στο εμπόριο από τον Edmond Carré το 1886. Ωστόσο, οι σύγχρονες εμπορικές εφαρμογές του ηλιακού κλιματισμού είναι σχετικά πρόσφατες.

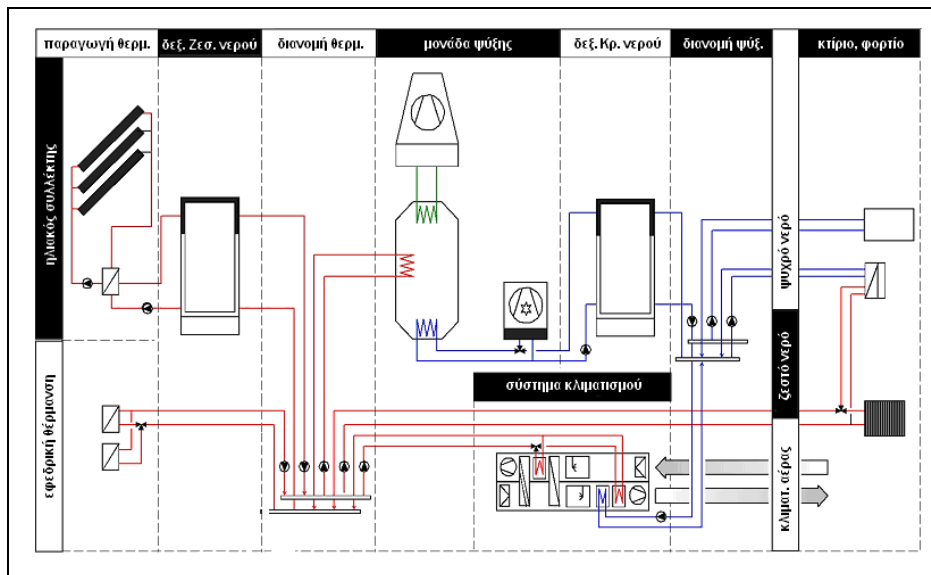
Οι βασικές τεχνολογίες ηλιακού κλιματισμού περιλαμβάνουν: 1) **κλειστού κύκλου** συστήματα, όπως ψύκτες **απορρόφησης** και **προσρόφησης** με: (α) υγρά μέσα απορρόφησης, όπως τα συστήματα με νερό ως ψυκτικό μέσο και υδατικό διάλυμα βρωμιούχου λιθίου ως μέσο απορρόφησης ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) ή ως ψυκτικό μέσο την αμμωνία και μέσο απορρόφησης το νερό ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), και (β) στερεά μέσα απορρόφησης, όπως τα συστήματα με νερό ως ψυκτικό μέσο και μέσο απορρόφησης πηκτωμα πυριτίου ($\text{H}_2\text{O}/\text{silica gel}$) ή της νέας τεχνολογίας συστήματα που βρίσκονται ακόμη στο στάδιο έρευνας, όπως για παράδειγμα, αμμωνία ως ψυκτικό μέσο και άλατα ή άλλες θερμοχημικές διαδικασίες. 2) **ανοικτού κύκλου** συστήματα, με: (α) στερεά αφυγραντικά υλικά απορρόφησης, όπως οι τροχοί αφύγρανσης, σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες αέρα ή νερού και (β) υγρά αφυγραντικά υλικά απορρόφησης σε νέας τεχνολογίας συστήματα που βρίσκονται ακόμη στο στάδιο έρευνας.

Οι **ψύκτες απορρόφησης** $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ είναι τα πλέον διαδεδομένα συστήματα. Ο βασικός κύκλος λειτουργίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.14. Είναι επίσης δυνατή η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας από το συμπυκνωτή για να τροφοδοτήσει επιπλέον στάδια απορρόφησης και να διπλασιαστεί ή να τριπλασιαστεί η ποσότητα του ψυκτικού μέσου που αφαιρείται από το διάλυμα.



Σχήμα 2.14. Βασικά στάδια λειτουργίας του μονοβάθμιου κύκλου απορρόφησης ηλιακού ψύκτη.

Μια τυπική εγκατάσταση ηλιακού κλιματισμού (σχήμα 2.15) αποτελείται από: (α) ηλιακούς συλλέκτες (παρέχουν την απαιτούμενη θερμότητα για τη λειτουργία του ψύκτη), (β) μια δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού, (γ) τη μονάδα ψύξης, (δ) το σύστημα κλιματισμού και (ε) το εφεδρικό σύστημα θέρμανσης – ψύξης (ενσωματώνεται στην εγκατάσταση είτε ως εφεδρική θέρμανση, είτε ως εφεδρικός ψύκτης ή και τα δύο).



Σχήμα 2.15. Τυπική διάταξη ηλιακού κλιματισμού με διαφορετικό εξοπλισμό [13].

Οι μονοβάθμιοι ψύκτες απορρόφησης (με COP από 0,7÷0,8) και διβάθμιοι (με COP από 1,0÷1,2) αποτελούν σήμερα δοκιμασμένη και εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία. Η έρευνα επικεντρώνεται πλέον σε ψύκτες τριών και τεσσάρων βαθμίδων, οι οποίοι μπορούν να πετύχουν βελτιωμένες αποδόσεις, με

COP λειτουργίας από $1,7 \div 2,2$ πλησιάζοντας έτσι τις αποδόσεις των συμβατικών ψυκτών συμπίεσης. Νέοι κύκλοι ατμού-απορρόφησης καθώς επίσης και ψυκτικά ρευστά λειτουργίας έχουν ερευνηθεί εκτενώς τα τελευταία χρόνια. Οι εμπορικά διαθέσιμοι ψύκτες απορρόφησης κυμαίνονται από μέσης ψυκτικής ισχύος μηχανήματα ($40 \div 100\text{kW}$) μέχρι μεγάλες μονάδες ($>300\text{kW}$). Με δεδομένη όμως τη συνεχιζόμενη αύξηση των απαιτήσεων για κλιματισμό σε κατοικίες και μικρά κτήρια, υπάρχει μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για μικρής ισχύος μηχανήματα ($<10\text{kW}$).

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η οικονομική βιωσιμότητα των ηλιακών συστημάτων, εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως για παράδειγμα το εποχιακό φορτίο, το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, το αρχικό και λειτουργικό κόστος των ηλιακών συλλεκτών ανάλογα με τον τύπο ηλιακού συλλέκτη, την αποθήκευση θερμότητας, το βοηθητικό εξοπλισμό και τους απαιτούμενους αυτοματισμούς, τη συντήρηση και τον έλεγχο λειτουργίας. Το αρχικό κόστος των ηλιακών θερμικών συστημάτων συνήθως αυξάνεται με την αύξηση της επιθυμητής θερμοκρασίας εξόδου από τους συλλέκτες. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία εισόδου στο συλλέκτη, τόσο μικρότερη είναι η απόδοσή του και συνήθως χρειάζεται μεγαλύτερη συλλεκτική επιφάνεια για να αποδοθεί η ισοδύναμη ενέργεια. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις, η δυνατότητα εκμετάλλευσης των ηλιακών συλλεκτών όλο το χρόνο για την παραγωγή ZNX και την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης-ψύξης, βελτιώνει την οικονομική βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων.

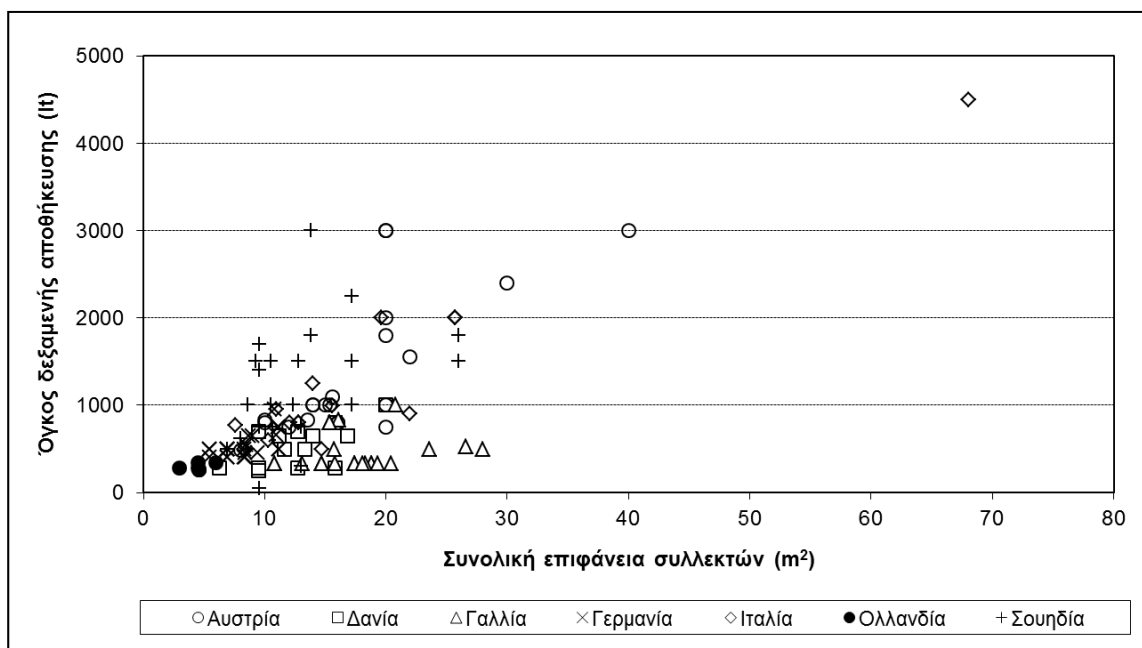
Το κόστος των ηλιακών συλλεκτών για παραγωγή ZNX είναι περίπου 800€ με 120lt δοχείο αποθήκευσης νερού, περίπου 1000€ με δοχείο 160lt και περίπου 1500€ με δοχείο 200lt.

Για την τελική επιλογή της απαιτούμενης επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών απαιτείται οικονομοτεχνική ανάλυση προκειμένου να επιλεγεί η βιωσιμότερη λύση ανάλογα με την κλιματική ζώνη και τα συνολικά θερμικά φορτία. Συνήθως, αυτό οδηγεί στην επιλογή επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών καλύπτοντας μέρος του θερμικού φορτίου θέρμανσης χώρων, με την οικονομικότερη εφαρμογή. Για παράδειγμα, για τη θέρμανση χώρου μιας κατοικίας 100m^2 , η απαιτούμενη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών είναι περίπου 30m^2 . Προφανώς απαιτείται μέριμνα ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ελεύθερη επιφάνεια για την εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών, με κατάλληλη κλίση και προσανατολισμό, χωρίς να σκιάζονται.

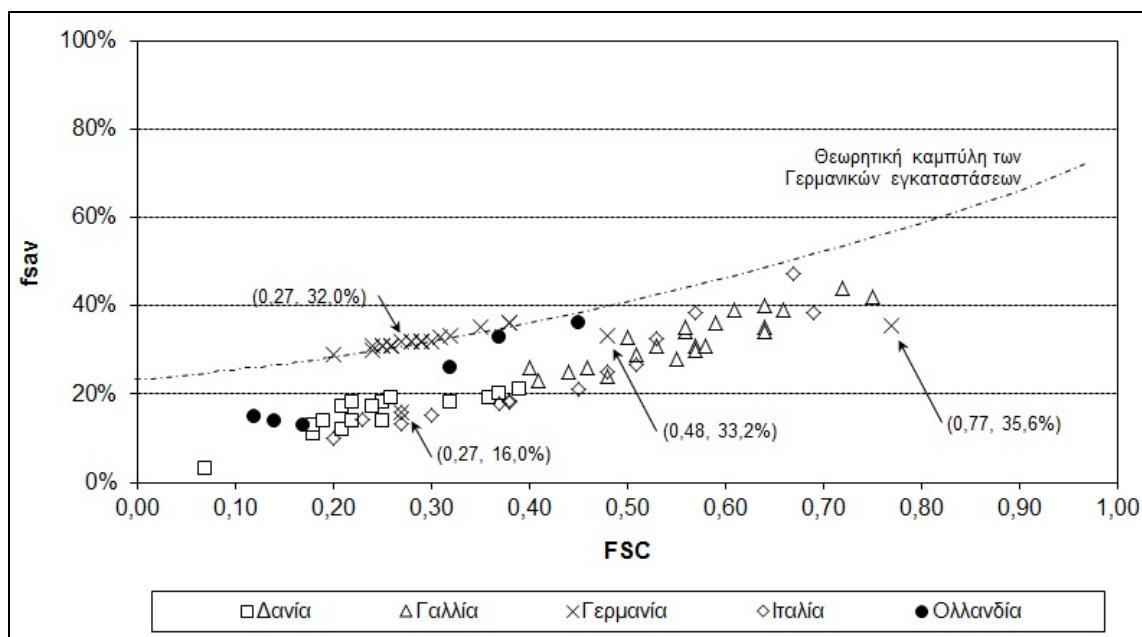
Για τα συστήματα **combi**, στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η συνολική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και ο συνολικός όγκος των δεξαμενών αποθήκευσης θερμότητας και ZNX από διάφορες εφαρμογές σε επτά ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως σε κτήρια κατοικιών [17]. Ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακών συλλεκτών εξαρτάται από τις συνθήκες σχεδιασμού και τα φορτία (σε σχέση με τις βαθμομέρες θέρμανσης-BHΘ) και κυμαίνεται από $75,9\text{lt/m}^2$ στην Αυστρία (BHΘ=3838), $42,8\text{lt/m}^2$ στη Δανία (BHΘ=3000), $26,8\text{lt/m}^2$ στη Γαλλία (BHΘ=3170), $65,3\text{lt/m}^2$ στη Γερμανία (BHΘ=3576), $69,9\text{lt/m}^2$ στην Ιταλία (BHΘ=2623), $66,8\text{lt/m}^2$ στην Ολλανδία (BHΘ=3504), και $116,7\text{lt/m}^2$ στην Σουηδία (BHΘ=4521). Το μέσο κόστος των εγκαταστάσεων είναι 765€ ανά μονάδα επιφάνειας συλλεκτών, αν και υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος και του επιμέρους κόστους του εξοπλισμού, των εργατικών για την εγκατάσταση, των εφεδρικών συστημάτων κ.α.

Μια απλή μέθοδος για να μπορούν να χαρακτηριστούν και να συγκριθούν τα διαφορετικά συστήματα combi (λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και φορτία) βασίζεται στη χρήση ενός αδιάστατου συντελεστή που ονομάζεται Κλασματική Ηλιακή Κατανάλωση (Fractional Solar Consumption, FSC) [18]. Το FSC ορίζεται ως το πηλίκο της

διαθέσιμης θερμότητας που αποδίδεται από ένα σύστημα (εκμεταλλεύσιμη ηλιακή ενέργεια από μια συγκεκριμένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών) προς τη συνολική απαιτούμενη θερμότητα χωρίς το ηλιακό σύστημα combi.



Σχήμα 2.16. Συνολική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών και συνολικός όγκος δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας και ZNX, συστημάτων combi σε διάφορες ευρωπαϊκές εφαρμογές.



Σχήμα 2.17. Συσχέτιση της μέγιστης θεωρητικής τιμής του συντελεστή για την κλασματική ηλιακή κατανάλωση (FSC) με την πραγματική κλασματική εξοικονόμηση ενέργειας (fsav). Οι εφαρμογές αντιστοιχούν με αυτές του σχήματος 2.16.

Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η πραγματική κλασματική εξοικονόμηση ενέργειας (fractional thermal energy savings, fsav) προς τη μέγιστη θεωρητική τιμή FSC, σύμφωνα με τις πραγματικές επιτόπου ετήσιες μετρήσεις που έγιναν στις ίδιες εγκαταστάσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.16

(μετρήσεις από την Αυστρία και τη Σουηδία δεν ήταν διαθέσιμες). Συγκρίνοντας την πραγματική τιμή f_{sav} με την μέγιστη θεωρητική τιμή FSC, προκύπτει μια καλή ένδειξη της αποτελεσματικότητας του συστήματος combi. Όσο πιο κοντά είναι οι τιμές του f_{sav} και FSC, τόσο πιο αποτελεσματικά μετατρέπει το σύστημα την εκμεταλλεύσιμη ηλιακή ενέργεια σε πραγματική εξοικονόμηση εφεδρικής ενέργειας. Ουσιαστικά, ο συντελεστής FSC αποκαλύπτει τη δυνητικά διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια που θα μπορούσε να αποδοθεί από το σύστημα (μέγιστο ποσοστό ηλιακής κάλυψης). Πρακτικά όλες οι Γερμανικές εγκαταστάσεις έχουν τον ίδιο σχεδιασμό του συστήματος και μηχανήματα, χρησιμοποιώντας μια ενιαία μονάδα που περιλαμβάνει όλο τον επιμέρους εξοπλισμό (π.χ. εφεδρικό λέβητα συμπίκνωσης, πλακοειδή εναλλάκτη ZNX με πρωτεύοντα κυκλοφορητή, εναλλάκτη θερμότητας με το κύκλωμα του ηλιακού συλλέκτη). Η αντίστοιχη θεωρητική καμπύλη για το συγκεκριμένο σύστημα όπως προέκυψε από σειρά προσομοιώσεων (IEA Task 26 www.iea-shc.org/task26), παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17. Εγκαταστάσεις με καλό σχεδιασμό και υψηλή απόδοση συστήματος παρουσιάζουν συμπεριφορά κοντά στη θεωρητική καμπύλη. Το ακραίο δεδομένο (0,77, 35,6%) αντιστοιχεί σε διαφορετικό (άγνωστο) σχεδιασμό συστήματος απ' ότι οι υπόλοιπες γερμανικές εγκαταστάσεις.

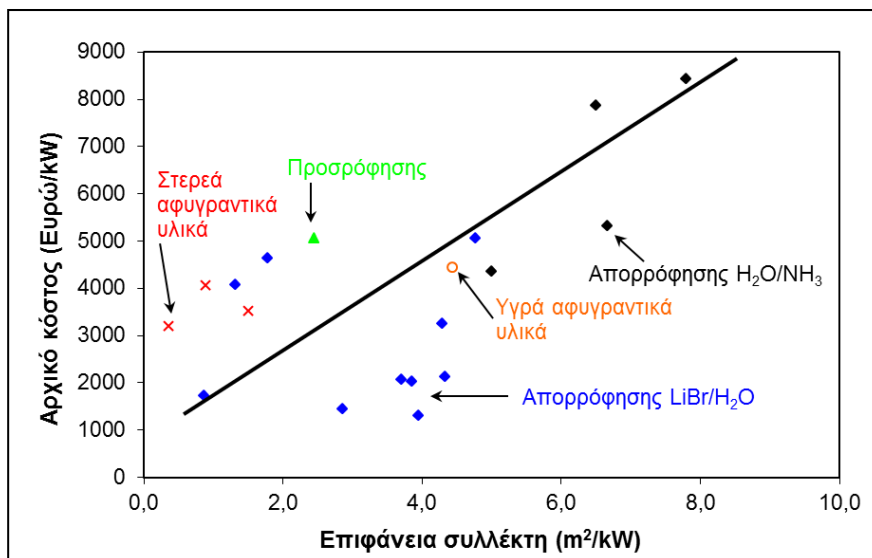
Για ένα μικρό πηλίκο του όγκου της αποθήκης ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακού συλλέκτη, το δυναμικό της θερμικής αποθήκης είναι πολύ χαμηλό με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του συλλέκτη και συνεπώς μικρότερο f_{sav} . Αυτό αναδεικνύεται από την εγκατάσταση (0,48, 33,2%) με ένα πηλίκο 64,7 lt/m^2 . Μικρότερο f_{sav} προκύπτει για εγκαταστάσεις με το ίδιο FSC εάν υπάρχει υψηλό ετήσιο συνολικό θερμικό φορτίο (ZNX και θέρμανση χώρων) ανά μονάδα επιφάνειας ηλιακού συλλέκτη. Αυτό αναδεικνύεται από την εγκατάσταση (0,27, 16,0%) με 3332 kWh/m^2 , συγκρινόμενη με 2424 kWh/m^2 για την εγκατάσταση (0,27, 32,0%).

Σχετικά με τον **ηλιακό κλιματισμό**, τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική πρόοδος στην Ευρώπη αλλά και διεθνώς. Στα πλαίσια Ευρωπαϊκών και εθνικών προγραμμάτων έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες συστημάτων και μηχανημάτων, αντιμετωπίστηκαν επιμέρους προβλήματα λειτουργίας, βελτιώθηκαν οι αποδόσεις των, και ολοκληρώθηκαν διαφορετικές εγκαταστάσεις σε διαφορετικής χρήσης κτήρια προσφέροντας την απαραίτητη εμπειρία για τη δημιουργία τυποποιημένων λύσεων. Σύμφωνα με διαθέσιμα και αξιόπιστα στοιχεία από 54 τυπικές εφαρμογές ηλιακού κλιματισμού στην Ευρώπη [14], έχουν προκύψει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων και τις αποδόσεις τους, οι οποίες συνοψίζονται στη συνέχεια.

Στα μονοβάθμια **συστήματα απορρόφησης** ο συντελεστής θερμικής απόδοσης (COP) κυμαίνεται μεταξύ 0,50÷0,73. Για τα συστήματα $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ η μέση τιμή είναι 0,66 ενώ για συστήματα $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ η μέση τιμή είναι 0,60. Στα διβάθμια συστήματα απορρόφησης το COP πλησιάζει το 1,3. Γενικά, η οδηγός θερμοκρασία (η μέση θερμοκρασία του ρευστού μεταξύ της εισόδου και εξόδου του θερμικού συστήματος) κυμαίνεται μεταξύ 60÷165°C. Για την πλειοψηφία των εφαρμογών, δεδομένου ότι η απαιτούμενη θερμοκρασία είναι μικρότερη από 97°C, χρησιμοποιούνται επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες. Τα **συστήματα προσρόφησης** έχουν χαμηλότερο COP, με μέση τιμή 0,59. Δεδομένου όμως ότι λειτουργούν σε χαμηλότερη οδηγό θερμοκρασία (μεταξύ 52,5÷82°C) και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες λειτουργίας, ο συντελεστής απόδοσης Carnot-CEF (ορίζεται ως το πηλίκο της θερμικής απόδοσης COP προς το COP ενός κύκλου Carnot που λειτουργεί κάτω από τις ίδιες εξωτερικές συνθήκες) έχει σχετικά υψηλή μέση τιμή (CEF=0,38), υψηλότερη από τη μέση τιμή των αξιολογούμενων εφαρμογών (CEF=0,31). Όταν το σύστημα λειτουργεί με τη χαμηλότερη οδηγό θερμοκρασία (52,5°C), το CEF μπορεί να φθάσει στην υψηλότερη τιμή του (0,54).

Οι επίπεδοι ηλιακοί **συλλέκτες** χρησιμοποιούνται στο 63% των υφιστάμενων εγκαταστάσεων που αξιολογήθηκαν. Άλλοι τύποι που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν συλλέκτες κενού (21%), παραβολικούς χωρίς μηχανισμό κίνησης (10%) και τέλος σύνθετους παραβολικούς συλλέκτες με

μηχανισμό κίνησης (σε πολύ μικρό αριθμό εφαρμογών). Η μέση ειδική επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών για όλες τις εφαρμογές ήταν $3,6\text{m}^2/\text{kW}$ ψυκτικής ισχύος, ενώ η πλειοψηφία κυμαίνονταν από $0,5\div 5,5\text{m}^2/\text{kW}$. Σε περιπτώσεις χρήσης ηλιακών συλλεκτών κενού απαιτείται επιφάνεια συλλεκτών της τάξης $0,3\div 2,7\text{m}^2/\text{kW}$. Τα συστήματα προσρόφησης και απορρόφησης συνήθως απαιτούν επιφάνεια επίπεδων ηλιακών συλλεκτών μεγαλύτερη από $2\text{m}^2/\text{kW}$ και μικρότερη από $5\text{m}^2/\text{kW}$. Γενικά, τα συστήματα $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ απαιτούν μεγαλύτερες επιφάνειες ηλιακών συλλεκτών από τα συστήματα $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ γεγονός που αυξάνει το κόστος των συγκεκριμένων εγκαταστάσεων (σχήμα 2.18).



Σχήμα 2.18. Αρχικό κόστος σε συνάρτηση της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών.

Το μέσο αρχικό **κόστος** όλων των υφιστάμενων εγκαταστάσεων που αξιολογήθηκαν είναι περίπου $4000\text{€}/\text{kW}$. Το κόστος ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ψυκτική ισχύ της μονάδας, τον τύπο ηλιακών συλλεκτών, το στάδιο ανάπτυξης και την αρχή λειτουργίας του συστήματος. Τα συστήματα απορρόφησης με $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ έχουν το χαμηλότερο μέσο αρχικό κόστος ($3100\text{€}/\text{kW}$), ενώ τα συστήματα απορρόφησης $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ έχουν το υψηλότερο κόστος ($6500\text{€}/\text{kW}$). Τα συστήματα προσρόφησης κοστίζουν κατά μέσο όρο $3500\text{€}/\text{kW}$.

Σύμφωνα με διαθέσιμα στοιχεία για την πραγματική απόδοση των διαφόρων εφαρμογών, το μέσο ετήσιο COP είναι 0,58 δηλαδή λίγο μικρότερο από το COP για τις συνθήκες σχεδιασμού (0,65). Η μέση ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας για το βοηθητικό εξοπλισμό (πχ ανεμιστήρες και αντλίες) ανά kW ψυκτικής ισχύος για τα συστήματα που αξιολογήθηκαν είναι περίπου $225\text{ W}/\text{kW}$. Κατά μέσο όρο οι συνολικές απώλειες από το βοηθητικό εξοπλισμό είναι περίπου 22,5%. Η μέση κατανάλωση νερού είναι $5,3\text{kg}/\text{h}$ ανά kW μέσης ψυκτικής ισχύος. Για την πλειοψηφία των εφαρμογών η κατανάλωση νερού κυμαίνεται μεταξύ 4,0 και $6,0\text{kg}/\text{h}$ ανά kW ψυκτικής ισχύος.

Είναι γεγονός ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης συστημάτων combi-plus παραμένει υψηλό σε σχέση με συμβατικά συστήματα κλιματισμού. Σύμφωνα με την υπάρχουσα εμπειρία έχει αποδειχτεί ότι οι υποστηρικτικές πολιτικές είναι απαραίτητες στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των νέων τεχνολογιών, όπως ήδη έγινε σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες με τα θερμικά ηλιακά [19]. Όταν αναπτυχθεί η αγορά και επιτευχθεί η κρίσιμη μάζα, τα υποστηρικτικά μέτρα μπορούν σταδιακά να μειωθούν μέχρι η αγορά να καταστεί βιώσιμη και ανταγωνιστική.

2.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ

Στο τέλος του 2009, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ηλιακών συλλεκτών ήταν περίπου $172,4\text{GW}_{\text{th}}$, συμπεριλαμβανομένων των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με κάλυμμα ($55,1\text{GW}_{\text{th}}$ ή $78,6 \cdot 10^6\text{m}^2$) και ηλιακούς συλλέκτες κενού ($96,4\text{GW}_{\text{th}}$ ή $137,7 \cdot 10^6\text{m}^2$), πλαστικούς ηλιακούς συλλέκτες χωρίς κάλυμμα για θέρμανση νερού για πισίνες ($19,7\text{GW}_{\text{th}}$ ή $28,2 \cdot 10^6\text{m}^2$) και $1,2\text{GW}_{\text{th}}$ ή $1,7 \cdot 10^6\text{m}^2$ συλλέκτες αέρα [5].

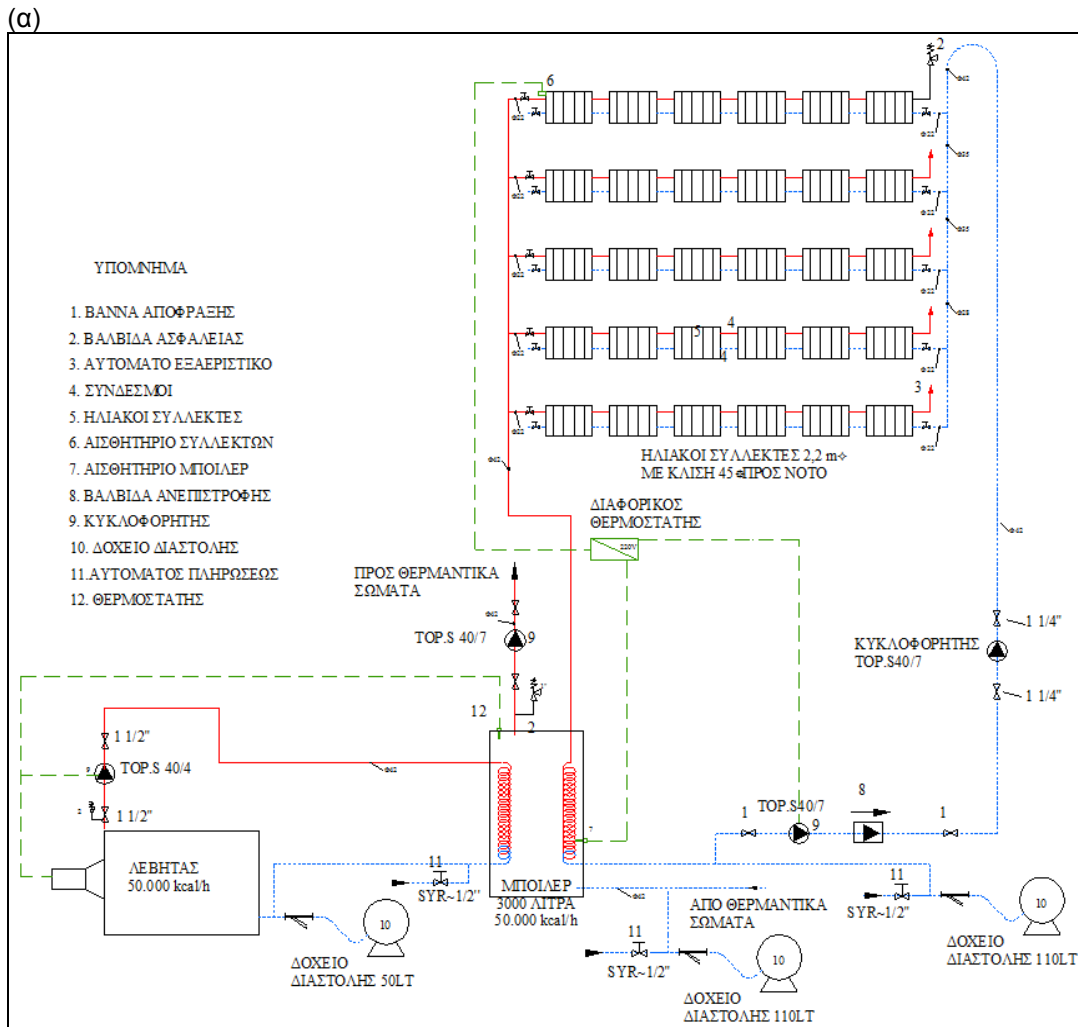
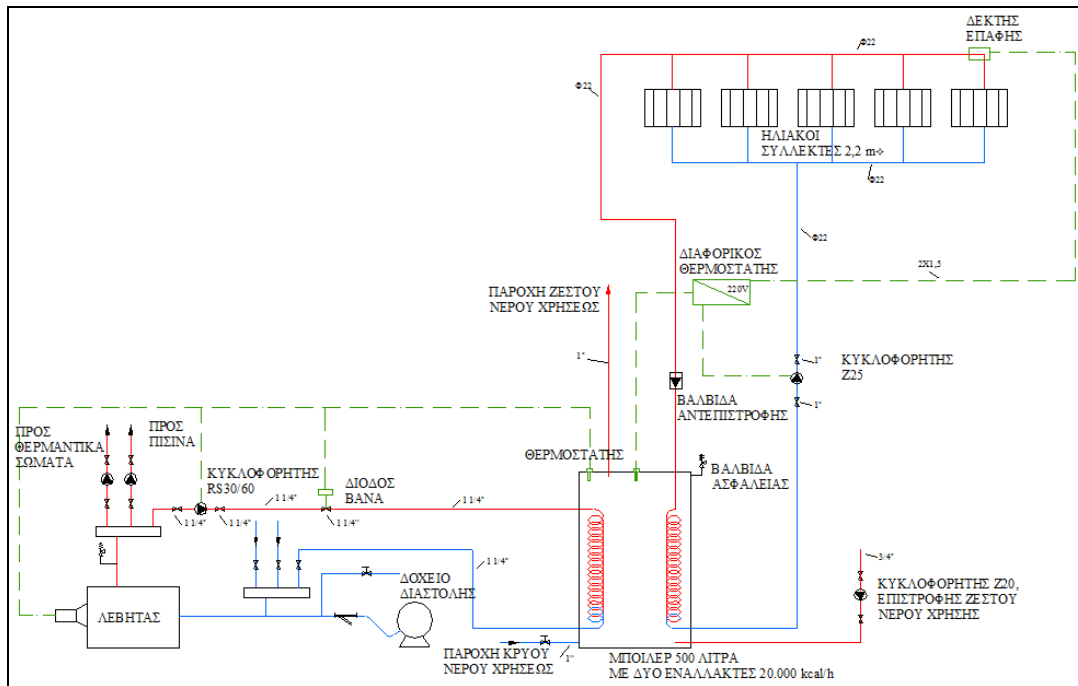
Η μεγαλύτερη αγορά των ηλιακών συλλεκτών χωρίς κάλυμμα είναι η Β. Αμερική (ΗΠΑ και Καναδά) με συνολική εγκατεστημένη ισχύ $12,9\text{GW}_{\text{th}}$, και ακολουθεί η Αυστραλία και η Νέα Ζηλανδία ($3,3\text{GW}_{\text{th}}$). Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες με κάλυμμα και οι συλλέκτες κενού, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ZNX και θέρμανση χώρων, κυριαρχούν στην αγορά της Κίνας ($101,5\text{GW}_{\text{th}}$), της Τουρκίας ($8,4\text{GW}_{\text{th}}$), της Γερμανίας ($8,3\text{GW}_{\text{th}}$), της Ιαπωνίας ($4,0\text{GW}_{\text{th}}$) και της Ελλάδας ($2,9\text{GW}_{\text{th}}$). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην ΕΕ είναι περίπου $30,2\text{GW}_{\text{th}}$ ή $43,1 \cdot 10^6\text{m}^2$.

Στη Γερμανία είναι εγκατεστημένο το μεγαλύτερο ποσοστό των συλλεκτών (38%) της ευρωπαϊκής αγοράς, ενώ η Αυστρία, η Γαλλία, η Ελλάδα, η Ιταλία και η Ισπανία μαζί διαθέτουν το 39% [20]. Σε σχέση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών με κάλυμμα που βρίσκονται σε λειτουργία ανά κάτοικο, ο ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι $50,9\text{kW}_{\text{th}}/1,000$ κατοίκους. Η Κύπρος, όπου πάνω από το 90% των κατοικιών είναι εξοπλισμένα με ηλιακούς συλλέκτες, έχει τον υψηλότερο δείκτη στην Ευρώπη με $554,0\text{kW}_{\text{th}}/1,000$ κατοίκους και ακολουθεί η Αυστρία με $314,5\text{kW}_{\text{th}}/1,000$ κατοίκους και η Ελλάδα με $265,8\text{kW}_{\text{th}}/1,000$ κατοίκους. Η εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών σε νέα κτήρια είναι πλέον υποχρεωτική σε πολλές χώρες όπως η Ελλάδα, η Ισπανία, η Ιταλία, η Κύπρος, η Πορτογαλία κ.α. Η Κίνα κυριαρχεί στη διεθνή αγορά με 70% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, όπου και κατασκευάζεται το 77% των ηλιακών συλλεκτών νερού, ενώ το 12% κατασκευάζεται στην Ευρώπη [21].

Η χρήση ηλιακών συλλεκτών, ιδιαίτερα στα κτήρια κατοικιών, είναι πλέον μια πολύ διαδεδομένη εφαρμογή στην Ελλάδα με περισσότερα από $4,1 \cdot 10^6\text{m}^2$ ηλιακών συλλεκτών ή $2,9\text{GW}_{\text{th}}$ που ισοδυναμεί με εξοικονόμηση 474.159 τόνων ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ) και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά $1.502.161\text{kg CO}_2$ το χρόνο [5]. Το 2009, εγκαταστάθηκαν στην Ελλάδα περίπου 200.000m^2 συλλεκτών.

Συνήθως, για την κάλυψη του φορτίου ZNX επαρκεί ένα τετραγωνικό μέτρο ηλιακού συλλέκτη ανά άτομο. Σε μια κατοικία με τετραμελή οικογένεια, η επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών που τοποθετούνται είναι περίπου $3\div 4\text{m}^2$ με αντίστοιχη χωρητικότητα δεξαμενής αποθήκευσης περίπου $200\div 300\text{lt}$. Στο σχήμα 2.19α παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα παροχής ZNX, με δεξαμενή αποθήκευσης (θερμαντήρα) διπλής ενέργειας που τροφοδοτείται από σύστημα ηλιακών συλλεκτών και λέβητα πετρελαίου [22]. Το σύστημα ελέγχεται μέσω διαφορικού θερμοστάτη. Η κυκλοφορία του ζεστού νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες γίνεται μόνο όταν η θερμοκρασία του είναι 7°C υψηλότερη από τη θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης.

Στο σχήμα 2.19β παρουσιάζεται τυπικό διάγραμμα εγκατάστασης για θέρμανση χώρων με ηλιακούς συλλέκτες και λέβητα πετρελαίου [22]. Η ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ισχύς (kW) της δεξαμενής αποθήκευσης (θερμαντήρας) του Z.N.X. πρέπει να είναι ίση με τη θερμική ισχύ του λέβητα.



(β)

Σχήμα 2.19. Διάγραμμα (α) παροχής ζεστού νερού χρήσης και (β) θέρμανσης χώρων, με ηλιακούς συλλέκτες και λέβητα.

Ο συνδυασμός παθητικών, ενεργητικών και υβριδικών ηλιακών θερμικών συστημάτων, μπορεί να καλύψει σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές ανάγκες κτηρίων και ιδιαίτερα κατοικιών. Το **Ηλιακό Χωριό** στην Πεύκη Αττικής αποτελεί τη μεγαλύτερη αυτού του είδους εγκατάσταση στην Ελλάδα και από τις μεγαλύτερες σε όλο τον κόσμο. Το Ηλιακό Χωριό κατασκευάστηκε το 1988 με συνεργασία της Ελλάδος (τέως Υπ. Ανάπτυξης και του Οργανισμού Εργατικής Κατοικίας) με τη Γερμανία. Το συγκρότημα περιλαμβάνει 435 κατοικίες οι οποίες κατασκευάστηκαν με διάφορα παθητικά, ενεργητικά και υβριδικά συστήματα. Εγκαταστάθηκαν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών για την κάλυψη των αναγκών ΖΝΧ και θέρμανσης χώρων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένα δόροφο κτήριο (σχήμα 2.20), στην περιοχή ΣΤ' του Ηλιακού Χωριού, με 24 διαμερίσματα, το οποίο εξοπλίστηκε με ηλιακούς σωλήνες κενού και εποχιακή αποθήκευση θερμότητας (μεταλλική δεξαμενή 500m^3 , της οποίας τα $2/3$ είναι υπόγεια, θερμομονωμένη με 30cm ορυκτοβάμβακα. Το νερό της δεξαμενής θερμαίνεται στους 90°C το καλοκαίρι. Η θερμότητα αποδίδεται το χειμώνα στο δίκτυο θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης. Στις αρχές Μαρτίου, το νερό της δεξαμενής είναι $30\div 35^\circ\text{C}$ και χρησιμοποιείται μέχρι 30°C . Υπολογίζεται ότι συλλέγονται περίπου 130MWh ετησίως από τα 161m^2 συλλεκτών. Από αυτά, το 80% περίπου χρησιμοποιούνται από τη δεξαμενή αποθήκευσης (μέση ετήσια απόδοση δεξαμενής 71%). Το σύστημα αποδείχτηκε ιδιαίτερα αξιόπιστο και αποδοτικό.



Σχήμα 2.20. Συγκρότημα κατοικιών στο Ηλιακό Χωριό, με ηλιακούς συλλέκτες κενού και διεποχιακή αποθήκη θερμότητας.

Στην Ελλάδα, η πρώτη μεγάλη εφαρμογή εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης, πραγματοποιήθηκε το 1984 στο Αμερικανικό Κολέγιο Ελλάδος. Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε για να καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, δυο κτηρίων βιβλιοθήκης, συνολικής επιφάνειας 800m^2 και 300m^2 , αντίστοιχα, και για την παραγωγή ΖΝΧ για τα γυμναστήρια. Η εγκατάσταση έχει παροπλιστεί. Σε εμπορική λειτουργία βρίσκεται στη Βοιωτία, μια από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις ηλιακού κλιματισμού στον κόσμο, στη βιομηχανία καλλυντικών Σαράντης (σχήμα 2.21α). Ηλιακοί συλλέκτες συνολικής επιφάνειας 2700m^2 τροφοδοτούν δυο ψύκτες προσρόφησης (350kW ο κάθε ένας) με νερό θερμοκρασίας $70\div 75^\circ\text{C}$. Οι ψύκτες παράγουν νερό θερμοκρασίας $8\div 10^\circ\text{C}$ που καλύπτει τις ανάγκες των κλιματιζόμενων χώρων επιφάνειας 22000m^2 (130000m^3). Δυο λέβητες των 1200kW ο κάθε ένας καλύπτουν τις ανάγκες το βράδυ ή όταν έχει συννεφιά. Το χειμώνα οι ηλιακοί συλλέκτες κυκλοφορούν ζεστό νερό 55°C κατευθείαν στους θερμαινόμενους χώρους.



(α)



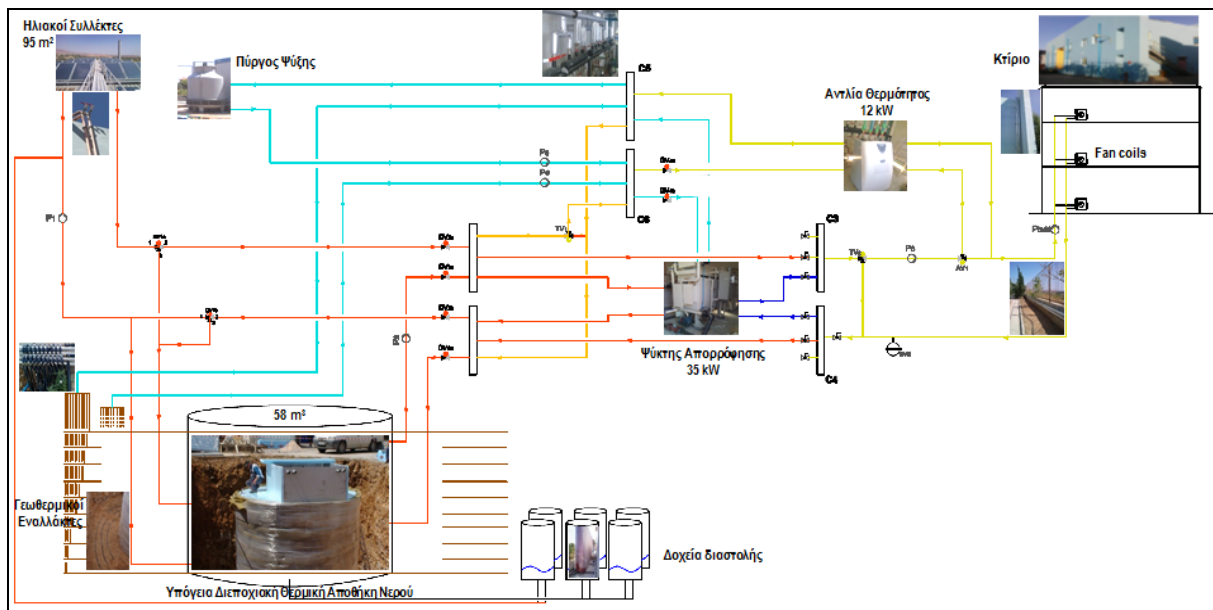
(β)

Σχήμα 2.21. Εφαρμογές ηλιακού κλιματισμού στην Ελλάδα. (α) Πεδίο επίπεδων ηλιακών συλλεκτών και δυο ηλιακοί ψύκτες (προσρόφησης) για τον κλιματισμό των αποθηκευτικών χώρων για τα προϊόντα της βιομηχανίας καλλυντικών Σαράντης. (β) Πεδίο ηλιακών συλλεκτών και ηλιακός ψύκτης (απορρόφησης) σε ξενοδοχείο στην Κρήτη.

Στην Κρήτη, σε ένα ξενοδοχείο 60 δωματίων (3000m^2) έχουν εγκατασταθεί επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες (500m^2) και ένας ψύκτης απορρόφησης (105kW) (σχήμα 2.21β). Το καλοκαίρι οι ηλιακοί συλλέκτες τροφοδοτούν τον ψύκτη με νερό θερμοκρασίας $75\text{-}80^\circ\text{C}$. Το ζεστό νερό από τους ηλιακούς συλλέκτες αποθηκεύεται σε επτά δεξαμενές νερού (συνολικού όγκου 1000lt). Ο ψύκτης λειτουργεί επτά ώρες κάθε ημέρα με μέσο COP περίπου 60%. Η εγκατάσταση διαθέτει έναν ηλεκτρικό ψύκτη συμπίεσης (170kW) που καλύπτει τα υπόλοιπα φορτία. Το σύστημα τροφοδοτεί τις μονάδες στοιχείων ανεμιστήρα (fan coils) στα δωμάτια του ξενοδοχείου και στους κοινόχρηστους χώρους. Ως εφεδρικό σύστημα χρησιμοποιείται ένας λέβητας προπανίου (290kW), ενώ ένας μικρότερος λέβητας προπανίου ($174,6\text{kW}$) χρησιμοποιείται για να καλύπτει τις ανάγκες ΖΝΧ, όταν δεν επαρκεί η εγκατάσταση των ηλιακών συλλεκτών.

Περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες και πιλοτικές εφαρμογές είναι απαραίτητες προκειμένου αφενός να επιλυθούν ορισμένα τεχνικά προβλήματα και αφετέρου να προωθηθούν στην αγορά και να μειωθεί το κόστος των εγκαταστάσεων ηλιακού κλιματισμού. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού και επιδεικτικού προγράμματος High-Combi (www.highcombi.eu) υλοποιήθηκαν και μελετήθηκαν 6 πιλοτικές εγκαταστάσεις σε κτήρια του τριτογενή τομέα, με διαφορετικούς συνδυασμούς τεχνολογιών ηλιακής θέρμανσης, ψύξης και αποθήκευσης, σε Αυστρία, Ισπανία, Ιταλία και Ελλάδα. Όλες οι εγκαταστάσεις επιτυγχάνουν υψηλό ποσοστό εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας και οικονομική απόδοση, καλύπτοντας σε ορισμένες περιπτώσεις 70% των φορτίων θέρμανσης χώρων, ΖΝΧ και ψύξης. Εξετάστηκαν διαφορετικές τεχνικές, επιμέρους συστήματα και συνδυασμοί τους (πχ νέοι τρόποι αποθήκευσης, εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας για ψύξη, συνδυασμένος έλεγχος θέρμανσης και ψύξης) και καταγράφηκαν τα αναλυτικά δεδομένα των συνθηκών λειτουργίας τους.

Στην Ελλάδα, η εγκατάσταση έγινε για να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης σε ένα κτήριο γραφείων (427m^2) στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Το σύστημα (σχήμα 2.22) περιλαμβάνει τους ηλιακούς συλλέκτες (95m^2), υπόγεια διεποχιακή θερμική αποθήκη νερού (ΥΔΑΝ, 58m^3), το θερμικό ψύκτη απορρόφησης (35kW), τις μονάδες απόρριψης θερμότητας (πύργο ψύξης και γεωθερμικούς εναλλάκτες θερμότητας γύρω από την υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης και μια αντλία θερμότητας (12kW) που χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή ενέργειας [23].



Σχήμα 2.22. Σχηματική διάταξη της εγκατάστασης ηλιακού συστήματος combi-plus σε κτήριο γραφείων του ΚΑΠΕ στο Κορωπί.

Κατά την ηλιακή ψύξη, η απορριπτόμενη θερμότητα από τη λειτουργία του ψύκτη απορρόφησης τροφοδοτείται μερικώς στους γεωθερμικούς εναλλάκτες θερμότητας που περιβάλλουν την ΥΔΑΝ. Αυτή η διαδικασία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους κοντά στη δεξαμενή, μειώνοντας έτσι τις θερμικές απώλειες. Κατά την ηλιακή θέρμανση, η ΥΔΑΝ μεταφέρει στο εσωτερικό του κτηρίου την ενέργεια που έχει αποθηκεύσει το καλοκαίρι, αποδεσμεύοντας τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την κάλυψη των φορτίων θέρμανσης. Η υποβοήθηση της θέρμανσης επιτυγχάνεται μέσω μίας καινοτόμου αντλίας θερμότητας, που τροφοδοτείται με ενέργεια από την ΥΔΑΝ, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Ανάλογα με το φορτίο του κτηρίου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της ΥΑΘ επιλέγεται η αντίστοιχη πηγή ή ο συνδυασμός πηγών θερμότητας. Οι πιθανοί συνδυασμοί είναι: ηλιακοί συλλέκτες, ΥΔΑΝ, ηλιακοί συλλέκτες & αντλία θερμότητας, ΥΔΑΝ & αντλία θερμότητας. Ανάλογα με το φορτίο του κτηρίου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της ΥΔΑΝ επιλέγεται η αντίστοιχη πηγή ή ο συνδυασμός πηγών θερμότητας: ηλιακοί συλλέκτες & ψύκτης απορρόφησης, ΥΔΑΝ & ψύκτης απορρόφησης, ηλιακοί συλλέκτες – ψύκτης απορρόφησης & αντλία θερμότητας, ΥΔΑΝ – ψύκτης απορρόφησης & αντλία θερμότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κ.Α. Μπαλαράς, Α.Α. Αργυρίου, Φ. Καραγιάννης, Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Εκδόσεις Σέλακα-4Μ Τεκδοτική, 479 σ., Αθήνα (2006).
2. J.M. Swift, T. Lawrence (Editors) (Editors). ASHRAE GreenGuide (3rd edition), The Design, Construction, and Operation of Sustainable Buildings, pp. 464. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (2010).
3. ΕΛΟΤ EN 15316-4-3 / 2003-03-05. Συστήματα θέρμανσης σε κτήρια - Μέθοδος υπολογισμού απαιτήσεων συστημάτων ενέργειας και επίδοση συστημάτων - Μέρος 4-3: Συστήματα παραγωγής θερμότητας, Θερμικά ηλιακά.
4. J.A. Duffie, W.A., Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes (2nd edition), John Wiley & Sons Inc, New York, (1991).

5. W. Weiss, F. Mauthner. Solar Heat Worldwide, Markets and Contributions to the Energy Supply 2009, pp. 58. Gleisdorf: AEE - Institute for Sustainable Technologies and International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, May (2011).
6. S.A. Klein, W.A. Beckman, J.A. Duffie. A Design Procedure for Solar Heating Systems, Solar Energy, Vol. 18, No 2, p. 113-127, (1976).
7. Ε. Βαζαΐος. Εφαρμογές της Ηλιακής Ενέργειας, Γ' έκδοση, Αθήνα, (1987).
8. J.A. Duffie, W.A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd edition, John Wiley & Sons Inc, New York, (1991).
9. C. Philibert. Barriers to technology diffusion: the case of solar thermal technologies, 29 p., Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development and Environment Directorate, International Energy Agency, (2006).
10. W. Weiss, G. Faninger. Austria – A solar thermal success story, Solar Update, Vol. 48, No 1, p. 6-7, (2008).
11. K. Ellehauge. Key Issues in Solar Thermal, Solar Combisystems. Solar Combisystems Final Report, 4.1030/C/00-002/2000, Altener program, European Commission, Brussels, (2003).
12. K. Ellehauge, A. Thür, D. Jähnig. Conditions and problems to be aware of when integrating solar combisystems in buildings. Solar Combisystems Final Report, 4.1030/C/00-002/2000, Altener program, European Commission, Brussels, (2003).
13. H.-M. Henning (editor), Solar Assisted Air-Conditioning in Buildings – A Handbook for Planners, Springer-Verlag, pp. 150, Vienna, (2004).
14. Κ.Α. Μπαλαράς, Σ. Κοντογιαννίδης. Ανασκόπηση Εγκαταστάσεων & Εφαρμογών Ηλιακού Κλιματισμού, 3^ο Εθνικό Συνέδριο RENES 2005, Αθήνα, 23-25 Φεβρουαρίου (2005).
15. C.A. Balaras, H-M. Henning, G. Grossman, E. Podesser, C.A. Infante Ferreira, Solar Cooling: An Overview of European Applications & Design Guidelines, ASHRAE J., Vol. 48, No 6, p. 14-22, (2006).
16. C.A. Balaras G. Grossman, H-M Henning, C.A.I. Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken. Solar Air Conditioning in Europe – An Overview, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, No 2, p. 299-314, (2007).
17. A. Thür. Solar Combisystem – European overview of installed systems 2001-2003. Solar Combisystems Final Report, 4.1030/C/00-002/2000, Altener Program, European Commission, Brussels, (2003).
18. T. Letz. Validation and background information the FSC procedure. Technical report of Subtask A, IEA-SHC Task 26, Solar Combisystems, pp. 23. Paris: International Energy Agency, (2002).
19. ESTIF. Solar Thermal Action Plan for Europe, pp. 26. Brussels: European Solar Thermal Industry Federation, (2007).
20. ESTIF. Solar Thermal Markets in Europe - Trends and Market Statistics 2009. European Solar Thermal Industry Federation, Brussels, June, (2010).
21. REN21. Renewables 2010 Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, September, (2010).
22. Γ. Μαλαχίας. Μελέτη Εγκατάστασης Ηλιακής Θέρμανσης Χώρων και Νερού Χρήσης, Τριώροφης Κατοικίας στην Εκάλη Αττικής, Αθήνα (2001).
23. Α. Αηδόνης, Δ. Χασάπης, Π. Τσεκούρας, Χ. Χατζηλάου, Ρ. Χριστοδουλάκη, Κ. Καρύτσας, Ε.Γ. Δασκαλάκη, Κ. Μπαλαράς, Κ. Αντωνόπουλος και Χ. Τζιβανίδης, Καινοτόμο σύστημα υψηλής ηλιακής κάλυψης για θέρμανση και ψύξη στην Αθήνα, 4^ο Εθνικό Συνέδριο RENES, “Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, προς ένα Φιλόδοξο και Αξιόπιστο Εθνικό Πρόγραμμα Δράσης”, Αθήνα, 10-12 Μαΐου (2010).

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, ΙΕΠΒΑ, Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας – www.energycon.org

Εφαρμογές Ηλιακού Κλιματισμού στην Ευρώπη - www.energycon.org/sace/sace.htm

Ένωση Βιομηχανιών Ηλιακής Ενέργειας - EBHE www.ebhe.gr

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας – www.cres.gr

Οδηγός Ηλιακού Κλιματισμού - www.cres.gr/kape/education/solar_cooling_brochure-SMALL.pdf

European Solar Thermal Industry ESTIF - www.estif.org

High Solar Fraction Heating and Cooling Systems HighCombi - www.highcombi.eu

International Solar Energy Society - www.ises.org

Task 26 – Solar combi systems - www.iea-shc.org/publications/task26/

Task 38 - Solar Air-Conditioning and Refrigeration - www.iea-shc.org/task38/

Task 40 - Towards Net Zero Energy Solar Buildings - www.iea-shc.org/task40/

Task 45 - Large Systems: Large Solar Heating/Cooling Systems, Seasonal Storage, Heat Pumps - www.iea-shc.org/task45/

Solar air-conditioning SOLAIR – www.solair-project.eu

Solar Combi+ - www.solarcombiplus.eu

Solar cooling technology across southern European islands SOLCO – www.solcoproject.net

Solar Keymark, The Quality Label for Solar Thermal Products - www.estif.org/solarkeymark

3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) είναι μια τεχνολογία που μετατρέπει μέρος της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας απευθείας σε ηλεκτρισμό. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε πρώτα στη διαστημική τεχνολογία κατά τη δεκαετία του '60 για παραγωγή ενέργειας στις διαστημικές εφαρμογές. Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιήθηκαν στην κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών σε διάφορες περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα σε απομονωμένες περιοχές ή σε περιοχές με μικρές ανάγκες ενέργειας (σχήμα 3.1). Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να λειτουργήσει με επιτυχία και σε εφαρμογές όπου απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3.1: Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η βασική πηγή ενέργειας που ενεργοποιεί τη φωτοβολταϊκή διαδικασία αποδίδοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια που κινούνται με εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες και έχουν διαφορετικό μήκος κύματος (συχνότητα). Η ενέργεια που έχει κάθε φωτόνιο είναι ίση με το γινόμενο της μάζας επί της ταχύτητάς του.

Το βασικό υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο. Όλα τα φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από 1,08eV εφόσον απορροφηθούν θα ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του υλικού του Φ/Β (ημιαγωγός). Συνεπώς, φαίνεται αρχικά ότι σχεδόν όλη η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας θα μπορούσε να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό. Δυστυχώς όμως, ένα φωτόνιο μπορεί να ενεργοποιήσει και να ελευθερώσει μόνο ένα ηλεκτρόνιο. Τα φωτόνια που έχουν περισσότερη ενέργεια από την ελάχιστη που απαιτείται για την ενεργοποίηση ενός ηλεκτρονίου, μετατρέπουν την υπολειπόμενη ενέργεια σε θερμότητα μέσα στο ίδιο το υλικό. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι οι φωτοβολταϊκές κυψέλες από πυρίτιο μπορούν να μετατρέψουν περίπου το 25% της ολικής απορροφούμενης ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Αυτό σύμφωνα με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες αποτελεί θεωρητικό όριο. Σε μερικές περιπτώσεις ίσως είναι οικονομικότερο να κατασκευάσουμε συστήματα που εκμεταλλεύονται και τη θερμική ενέργεια που συσσωρεύεται στο υλικό, για εφαρμογές όπου χρειάζεται ηλεκτρισμός και θερμότητα. Τέτοια συστήματα ονομάζονται φωτοβολταϊκά-θερμικά συστήματα.

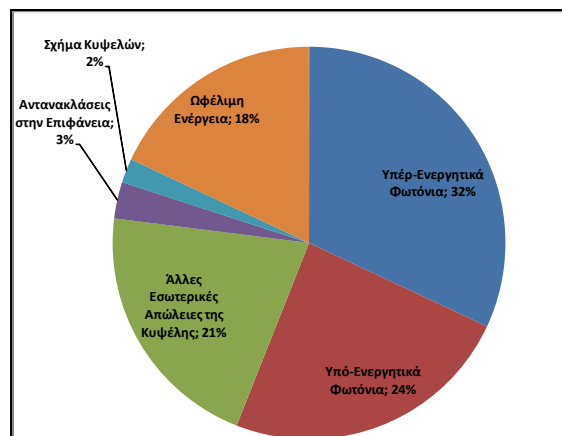
Η επιλογή του πυριτίου ως υλικό κατασκευής στα φωτοβολταϊκά προκαλεί ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας με συνέπεια ένα μέρος της να μην φτάνει ποτέ στο φωτοβολταϊκό καθώς αντανakλάται πάνω στην επιφάνεια του υλικού. Αυτή η απώλεια μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας αντανakλαστική επικάλυψη στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Επίσης, υπάρχουν εσωτερικές απώλειες ενέργειας που εξαρτώνται από την καθαρότητα του υλικού και την ποιότητα της κρυσταλλικής δομής του. Τέλος, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα η επιφάνεια που έχει διατεθεί για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν καλύπτεται πλήρως από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αν και αυτό το πρόβλημα περιορίζεται κατασκευάζοντας στοιχεία με εξαγωνικό ή παραλληλεπίπεδο σχήμα αντί για κυκλικό (όπως συνηθιζόταν παλαιότερα) κάποιο μέρος της επιφάνειας παραμένει αχρησιμοποίητο. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η κατανομή ενέργειας σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη.

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη, ένα άτομο πυριτίου (ημιαγωγός) απορροφά ένα φωτόνιο και η πρόσθετη ενέργεια που ενεργοποιεί ή διεγείρει ένα από τα

εξωτερικά ηλεκτρόνια το ελευθερώνει. Αυτό γίνεται καλύτερα όταν τα άτομα είναι παρατεταγμένα σε συγκεκριμένες σειρές ή θέσεις. Αυτή ονομάζεται κρυσταλλική κατάσταση. Σε οποιοδήποτε κρύσταλλο, τα άτομα ή τα μόρια είναι διατεταγμένα σε τέλειους γεωμετρικούς συνδυασμούς. Όταν ένα φωτόνιο χτυπήσει τον κρύσταλλο του πυριτίου, το διαπερνά μέχρις ότου απορροφηθεί από ένα άτομο. Αμέσως μετά, η ενέργεια του φωτονίου μεταφέρεται σε ένα από τα εξωτερικά ηλεκτρόνια, το οποίο ακολούθως ελευθερώνεται από το άτομο αφήνοντας ελεύθερη τη θέση του, ή όπως ονομάζεται, δημιουργώντας μια "οπή".

Όταν μια δέσμη φωτός πέφτει πάνω στον κρύσταλλο του πυριτίου, εκατομμύρια ηλεκτρονίων απελευθερώνονται κατά αυτό τον τρόπο, και δημιουργείται ένας αντίστοιχος αριθμός οπών που παραμένουν στην εξωτερική στοιβάδα. Ένα οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο μπορεί να γεμίσει τη θέση μιας τρύπας εκπέμποντας μια ελάχιστη ποσότητα θερμότητας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής.

Όταν σταματήσει η ακτινοβολία, όλα τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται ελεύθερα και εκτός θέσεως, επιστρέφουν αμέσως στις κενές θέσεις. Ο κρύσταλλος επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση, με αυξημένη τη θερμοκρασία του υλικού. Επειδή τα άτομα δεν αλλάζουν θέση, ο κρύσταλλος δεν αλλάζει μέγεθος, βάρος, σχήμα ή εμφάνιση.



Σχήμα 3.2: Απώλειες ηλιακής ενέργειας στο Φ/B φαινόμενο

3.2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάζεται με την τοποθέτηση ενός λεπτού στρώματος πυριτίου ενισχυμένου με φώσφορο, σε επαφή με ένα στρώμα από πυρίτιο ενισχυμένο με βόριο. Όταν προσπίπτει ακτινοβολία πάνω στο στοιχείο, τα φωτόνια απορροφούνται και ελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια. Πρόσθετα ηλεκτρόνια δημιουργούνται στο κομμάτι του πυριτίου-φωσφόρου, που ονομάζεται N-πυρίτιο γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο. Εάν συνδέσουμε με ένα σύρμα τα δυο στρώματα, τότε ηλεκτρόνια από το πάνω στρώμα θα φύγουν και θα κατευθυνθούν μέσα από το σύρμα στο κάτω στρώμα όπου και θα απορροφηθούν από το πυρίτιο-βόριο, που ονομάζεται P-πυρίτιο, μια και το φορτίο του είναι θετικό.

Κατά την κατασκευή του Φ/B στοιχείου, στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο στρωμάτων μερικά από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στο "N" στρώμα διαχέονται στη μικρή απόσταση μέχρι την απέναντι επιφάνεια του "P" στρώματος, καθώς προσελκύονται από τις οπές που υπάρχουν εκεί, τις οποίες θέλουν να γεμίσουν. Αυτό αφήνει τα άτομα του φωσφόρου στο "N" στρώμα χωρίς αρκετά ηλεκτρόνια για να ισορροπήσει τα θετικά φορτία στα μόριά του, ενώ αρκετά ηλεκτρόνια βρίσκονται στο "P" στρώμα γύρω από τα άτομα του βόριου. Δημιουργείται έτσι ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρικού φορτίου κατά μήκος της επαφής των δυο στρωμάτων.

Αφού τα ηλεκτρόνια είναι φορτισμένα σωματίδια, είναι δύσκολο να περάσουν μέσα από τη ζώνη στατικού ηλεκτρικού φορτίου. Γι' αυτό το λόγο, η φορτισμένη περιοχή δρα ως συνοριακή περιοχή για το στοιχείο. Όταν κατασκευάζεται το στοιχείο, το σύνορο αυτό δημιουργείται αυτόματα. Υπάρχει καθ' όλη τη ζωή του στοιχείου και ποτέ δεν εξασθενίζει. Κανένα φωτοβολταϊκό δεν μπορεί να λειτουργήσει χωρίς αυτή τη ζώνη. Μόνο ηλεκτρόνια με υψηλά επίπεδα ενέργειας (υψηλές ταχύτητες) μπορούν να το

διαπεράσουν. Σαν αποτέλεσμα, το σύνορο αυτό λειτουργεί ως φίλτρο που αφήνει μόνο ηλεκτρόνια με υψηλές ενέργειες και σταματά ηλεκτρόνια με χαμηλά επίπεδα ενέργειας.

Η ποσότητα ρεύματος που παράγει ένα φωτοβολταϊκό είναι ανάλογη της ποσότητας ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο στοιχείο. Γι' αυτό το λόγο, το ρεύμα αυξάνεται με την επιφάνεια του στοιχείου καθώς και με την ένταση της ακτινοβολίας. Η τάση από την άλλη, εξαρτάται από το υλικό που χρησιμοποιείται. Όλα τα στοιχεία από πυρίτιο παράγουν περίπου 0.5Volt ανεξάρτητα από την επιφάνεια.

Τα φωτοβολταϊκά παρέχουν ένα μοναδικό τρόπο παραγωγής ενέργειας αφού δεν καταναλώνουν κανένα υλικό κατά τη διάρκεια παραγωγής του ρεύματος ούτε απελευθερώνουν κάποια ποσότητα υλικού. Γι' αυτό το λόγο, τα φωτοβολταϊκά μπορούν να είναι μονάδες τελείως απομονωμένες και ανεξάρτητες και θεωρητικά έχουν χρόνο ζωής όσο και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται. Το υλικό δεν αλλάζει σχήμα και τελικά η μόνη διαδικασία που συμβαίνει είναι ότι ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται κατευθείαν σε ηλεκτρική ενέργεια για εξωτερική χρήση.

Τα φωτοβολταϊκά πυριτίου διακρίνονται ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού τους. Προκειμένου να έχει το πυρίτιο ικανοποιητικές ιδιότητες για χρήση του σε Φ/Β εφαρμογές απαιτείται μεγάλη καθαρότητα. Από τις φάσεις καθαρισμού προκύπτει σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή το στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Εκτός από το φωτοβολταϊκό μονοκρυσταλλικού πυριτίου υπάρχουν και άλλες μορφές πυριτίου που είναι πιο φθηνές να παραχθούν από τους αντίστοιχους μεγάλου μεγέθους μονοκρυστάλλους. Η στερεοποίηση υπό κανονικές συνθήκες πυριτίου που έχει υποστεί τήξη, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσκοπικών κρυστάλλων. Εάν ο χρόνος στερεοποίησης είναι μεγάλος τότε οι κρύσταλλοι που δημιουργούνται θα είναι μεγαλύτεροι σε μέγεθος. Το τελικό προϊόν ονομάζεται πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, που είναι κοκοειδές στη μορφή του και το μέγεθος των κρυστάλλων εξαρτάται από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ψύχθηκε το πυρίτιο. Το προϊόν παράγεται σαν στερεό κομμάτι, ή σε σχήμα κορδέλας η οποία απάγεται από τη τηγμένη πρώτη ύλη, ή με βρασμό του πυριτίου και τη συγκέντρωση των ατμών πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια. Αυτοί οι μέθοδοι παραγωγής κοστίζουν λιγότερο από τη δημιουργία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα στοιχεία που δημιουργούνται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχουν μικρότερη απόδοση στη μετατροπή ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό. Παρατηρούνται επίσης μικρά ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα στα όρια των κρυστάλλων. Συνεπώς, όσο μεγαλύτεροι είναι οι κρύσταλλοι, τόσο λιγότερες οι συνοριακές τους επιφάνειες και το στοιχείο συμπεριφέρεται περισσότερο σαν να ήταν μονοκρυσταλλικό.

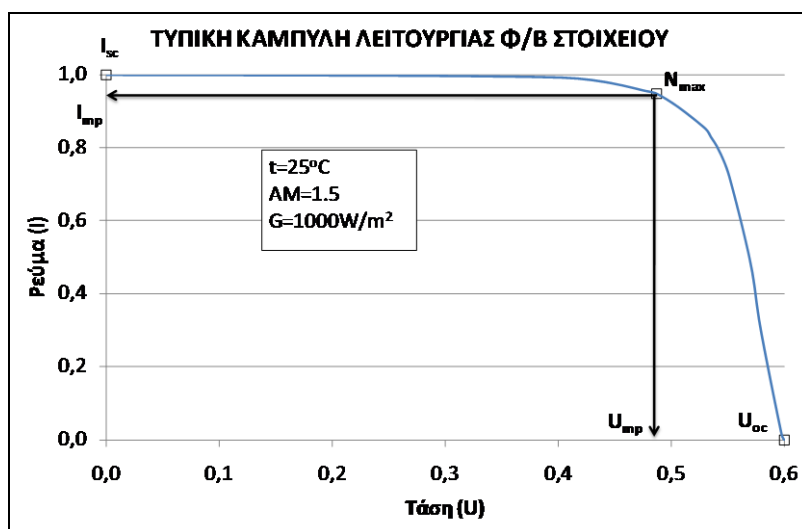
Στα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται επίσης το άμορφο πυρίτιο, το οποίο είναι καθαρό πυρίτιο που δεν έχει κρυσταλλική δομή. Τα άτομα του πυριτίου στο στερεό είναι τυχαία τοποθετημένα. Το γυαλί για παράδειγμα, είναι άμορφο όχι κρυσταλλικό υλικό. Πολύ λεπτά φιλμ από άμορφο πυρίτιο μπορούν να μετατρέπουν την ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Λόγω δε του ότι χρησιμοποιείται πολύ λίγο υλικό και αποφεύγεται η κρυσταλλοποίηση, τα στοιχεία από άμορφο πυρίτιο είναι πολύ φθηνά στην κατασκευή τους, οι αποδόσεις τους όμως είναι μικρές, $9\div 11\%$, σε σχέση με $16\div 18\%$ για τις μονοκρυσταλλικές κυψέλες. Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται αρκετά σε ιαπωνικά προϊόντα, τροφοδοτώντας μικροσυσκευές, π.χ. ρολόγια, υπολογιστές τσέπης και παιχνίδια που χρειάζονται πολύ μικρές ποσότητες ενέργειας. Οι ιαπωνικές εταιρείες είναι πρωτοπόροι στην παραγωγή άμορφου πυριτίου. Η μελλοντική αύξηση της απόδοσής τους και της σταθερότητάς τους μπορούν να κάνουν την κατασκευή τέτοιων στοιχείων συμφέρουσα και για μεγαλύτερες εφαρμογές.

Φωτοβολταϊκά μπορούν να κατασκευαστούν και από άλλα υλικά. Ο διαχωρισμός γίνεται βάσει των υλικών που χρησιμοποιούνται και του τύπου της ένωσης που έχουν. Υπάρχουν βασικά τέσσερις τρόποι για την ένωση των υλικών. Στην περίπτωση του πυριτίου, η ένωση είναι μια πολύ λεπτή περιοχή στα όρια των N και P υλικών. Το υλικό είναι βασικά πυρίτιο αλλά με διαφορετικούς εμπλουτισμούς. Στην περίπτωση αυτή η ζώνη επαφής ονομάζεται ομοεπαφή.

Τα Φ/Β στοιχεία όμως μπορούν να κατασκευαστούν από διαφορετικά υλικά. Ένας τύπος έχει ένα στρώμα από σουλφίδιο χαλκού που εναποτίθεται σε ένα στρώμα από σουλφίδιο καδμίου και η ένωση δημιουργείται στο σημείο επαφής των δυο υλικών. Όταν χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικά υλικά, η ζώνη επαφής ονομάζεται ετεροεπαφή. Μια ένωση μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ ενός ημιαγωγού και ενός μετάλλου και τότε ονομάζεται επαφή τύπου Schottky. Τέλος, στην περίπτωση που έχουμε ένα υλικό όπως οξείδιο τιτανίου μεταξύ μιας μεταλλικής επιφάνειας και ενός ημιαγωγού, η ένωση ονομάζεται MIS. Εάν η κατασκευή είναι ημιαγωγός-οξείδιο τιτανίου-ημιαγωγός τότε ονομάζεται SIS.

3.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Συνδέοντας το Φ/Β σε κύκλωμα που παρεμβάλλεται ωμική αντίσταση, παρατηρείται μεταβολή της τάσης "U" συναρτήσει της τιμής της αντίστασης από το μηδέν έως την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος " U_{oc} ", (σχήμα 3.3). Παράλληλα με την αύξηση της αντίστασης, η ένταση του ρεύματος παραμένει σταθερή μέχρι ενός χαρακτηριστικού σημείου, ενώ στη συνέχεια μειώνεται απότομα. Η καμπύλη (I-U) του σχήματος 3.3 αποτελεί τυπική χαρακτηριστική Φ/Β στοιχείων, και προκύπτει για σταθερή τιμή της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας "G" και της θερμοκρασίας του πλαισίου.



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστική καμπύλη Φ/Β

Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση διαφορετικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, έχουν καθοριστεί πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions, STC) κάτω από τις οποίες καταγράφεται η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών από όπου προκύπτει και η χαρακτηριστική (I-U). Οι πρότυπες συνθήκες ακολουθούν το πρότυπο IEC 60904/DIN EN 60904 σύμφωνα με το οποίο η κάθετη προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι ίση με $1000W/m^2$, η θερμοκρασία της Φ/Β επιφάνειας $25^{\circ}C$ ($\pm 2^{\circ}C$), και το φάσμα ακτινοβολίας του φωτός (σύμφωνα με τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας αναφοράς του IEC 60904-3) μάζας αέρα $AM=1,5$. Η μάζα αέρα ορίζεται ως ο λόγος του μήκους της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα προς το πάχος της ατμόσφαιρας, καθορίζοντας ουσιαστικά τη μείωση της έντασης ακτινοβολίας που προκαλείται από το μεγαλύτερο δρόμο (σε σχέση με την κατακόρυφη διαδρομή) που ακολουθούν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η καμπύλη λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου χαρακτηρίζεται από το σημείο μέγιστης ισχύος όπου το φωτοβολταϊκό λειτουργεί αποδίδοντας τη μέγιστη ισχύ (N_{max}), το σημείο ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) το οποίο είναι 5%-15% μεγαλύτερο από το ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{mp}) και το σημείο τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (U_{oc}) το οποίο είναι περίπου 0,5÷0,6V στα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου και 0,6÷0,9V στα άμορφου πυριτίου.

Χαρακτηριστικό μέγεθος το οποίο καθορίζει την ποιότητα του φωτοβολταϊκού είναι ο συντελεστής πλήρωσης (FF), ο οποίος ορίζεται από το λόγο της μέγιστης παραγόμενης ισχύος " N_{max} " προς τη μέγιστη θεωρητικά παραγόμενη ισχύ η οποία ορίζεται από το γινόμενο του ρεύματος βραχυκυκλώσεως " I_{sc} " επί την τάση ανοιχτοκυκλώσεως " U_{oc} ".

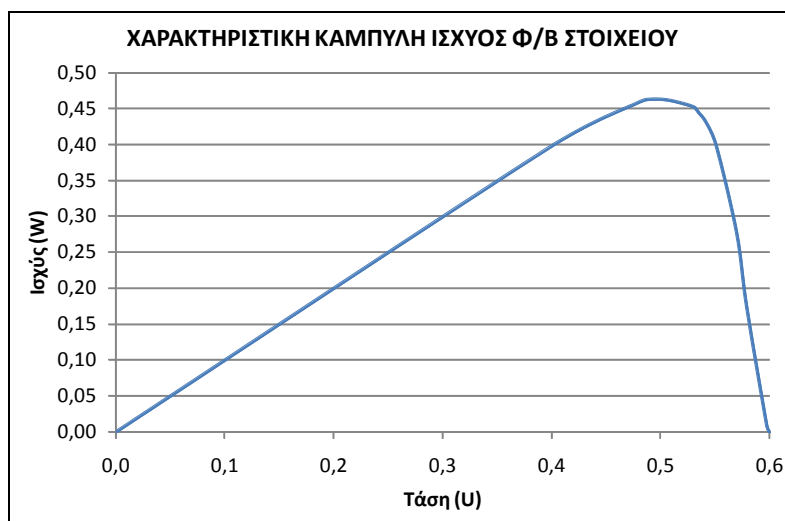
$$FF = \frac{N_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.1)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης των φωτοβολταϊκών κρυσταλλικού πυριτίου είναι περίπου 0.75÷0.85 και των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου 0,56÷0,61.

Η ισχύς " N ", που αποδίδει ένα Φ/Β στοιχείο, δίνεται από την εξίσωση:

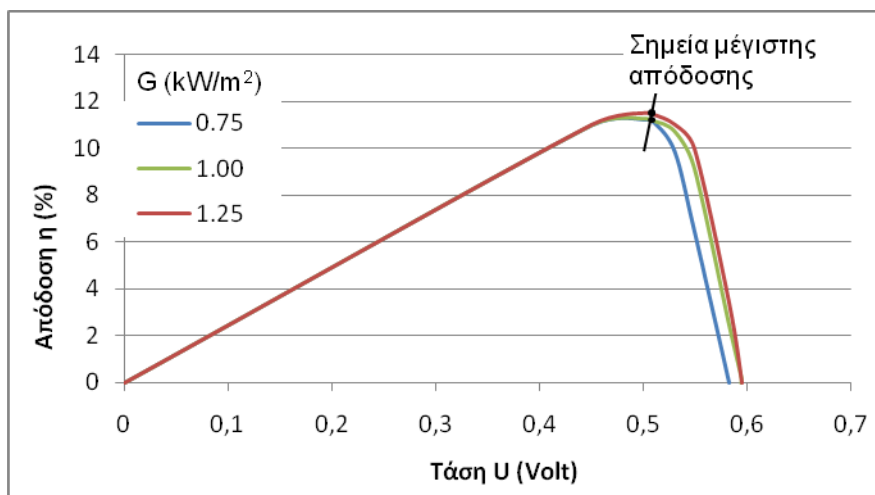
$$N = U \cdot I \quad (3.2)$$

Η διακύμανση της αποδιδόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την τάση " U ", παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4, για σταθερή ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας " G " και σταθερή θερμοκρασία πλαισίων.



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ισχύος Φ/Β

Όπως προκύπτει από το σχήμα 3.4, η μέγιστη ισχύς " N_{max} " αντιστοιχεί σε τιμή τάσης " U_{mp} ", ελαφρά μικρότερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος " U_{oc} ". Για ενδεικτικούς υπολογισμούς μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση $U_{mp} \approx 0,9 \cdot U_{oc}$. Για μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτείται η διερεύνηση του διαγράμματος (N-U), οπότε εντοπίζεται το σημείο της μέγιστης ισχύος του Φ/Β και καθορίζεται η ακριβής τιμή της τάσης " U_{mp} " και η αντίστοιχη ένταση " I_{mp} ".



Σχήμα 3.5: Βαθμός απόδοσης Φ/Β για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

Ο βαθμός απόδοσης " η " ενός Φ/Β πλαισίου (ή καλύτερα ο βαθμός αξιοποίησης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος " N " που παράγεται προς τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, η οποία καθορίζεται ως το γινόμενο της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας " G " επί το εμβαδόν " A " της επιφάνειας του Φ/Β. Συνεπώς ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την εξίσωση (3.3), ενώ στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης Φ/Β στοιχείου συναρτήσει της τάσης του για διάφορες τιμές έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

$$\eta = \frac{N}{G \cdot A} \quad (3.3)$$

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.5 η καμπύλη του βαθμού απόδοσης παραμένει σχεδόν σταθερή για διάφορες μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς η καμπύλη απόδοσης του Φ/Β δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ έχει παρόμοια μορφή με την καμπύλη ισχύος. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης εμφανίζεται στην ίδια περίπου τιμή τάσης λειτουργίας του Φ/Β, με μικρή μετατόπιση προς τα δεξιά και προς τα πάνω, όσο αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

3.4. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

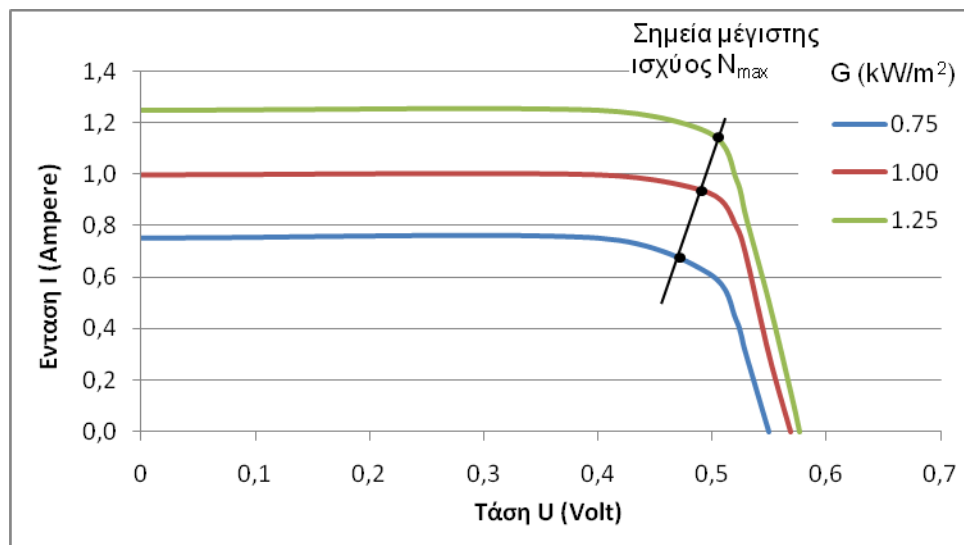
Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας καθορίζει την ωφέλιμη ισχύ που παράγει το Φ/Β στοιχείο. Δεδομένης της διαρκούς μεταβολής της θέσεως του ήλιου ως προς την επιφάνεια της γης, θα έπρεπε να μεταβάλλεται συνεχώς η κλίση του Φ/Β ώστε να επιτυγχάνεται κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων σ' αυτό. Λόγω των σοβαρών κατασκευαστικών δυσκολιών αλλά και των αντίστοιχων οικονομικών προβλημάτων που θα προκαλούσε μια τέτοια εφαρμογή στα κτήρια, προτιμάται συνήθως σταθερή κλίση τοποθέτησης των Φ/Β. Οι γωνίες κλίσης εξαρτώνται από την επιθυμητή χρήση και την εποχή του έτους. Κατά προσέγγιση η βέλτιστη κλίση του Φ/Β πλαισίου " β^* " είναι εκείνη η οποία επιτυγχάνει την κατά το δυνατό κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας για την υπό μελέτη χρονική περίοδο. Για τις περιοχές της χώρας μας, η προτεινόμενη κλίση των

πλαισίων είναι περίπου $55^{\circ}\pm 60^{\circ}$ για τη χειμερινή περίοδο. Αντίστοιχα, για την καλοκαιρινή περίοδο η προτεινόμενη κλίση των Φ/Β κυμαίνεται μεταξύ των 10° - 15° (πίνακας 3.1). Πιο συγκεκριμένα, εάν επιθυμούμε τη μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας επιλέγεται η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, δηλαδή " $\beta \approx \varphi - 15^{\circ}$ ", όπου " φ " το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Στην περίπτωση όμως αυτή, η παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι σαφώς μικρότερη αυτής του καλοκαιριού, επειδή τόσο η ένταση της διαθέσιμης ακτινοβολίας όσο και η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερες.

Πίνακας 3.1: Προτεινόμενη Βέλτιστη Κλίση Φ/Β Πλαισίων (πηγή Καλδέλλης Ι.Κ., Καβαδίας Κ.Α., 2001)

Μήνας	Γωνία Τοποθέτησης " β "	Μήνας	Γωνία Τοποθέτησης " β "
Ιανουάριος	$\varphi + 29^{\circ}$	Ιούλιος	$\varphi - 24^{\circ}$
Φεβρουάριος	$\varphi + 18^{\circ}$	Αύγουστος	$\varphi - 10^{\circ}$
Μάρτιος	$\varphi + 3^{\circ}$	Σεπτέμβριος	$\varphi - 2^{\circ}$
Απρίλιος	$\varphi - 10^{\circ}$	Οκτώβριος	$\varphi + 10^{\circ}$
Μάιος	$\varphi - 22^{\circ}$	Νοέμβριος	$\varphi + 23^{\circ}$
Ιούνιος	$\varphi - 25^{\circ}$	Δεκέμβριος	$\varphi + 30^{\circ}$

Αντίθετα εάν επιθυμούμε την ενεργειακή αυτονομία της εγκατάστασης, επιλέγεται γωνία κλίσης " $\beta \approx \varphi + 15^{\circ}$ ", η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απολαβής κατά το χειμώνα καθώς και μια σχεδόν σταθερή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

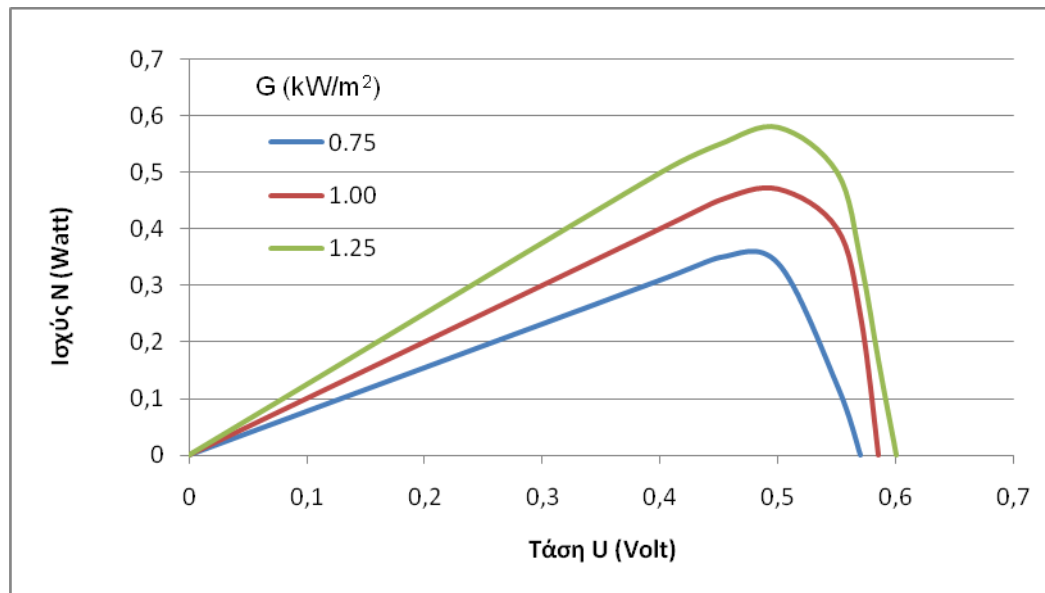


Σχήμα 3.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/Β, (I - U) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας

Πράγματι η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, επιδρά σημαντικά στην καμπύλη λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Δηλαδή, η αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως μετατοπίζοντας την καμπύλη (I - U) προς τα πάνω. Αντίστοιχα, η μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζει την καμπύλη λειτουργίας (I - U) προς τα κάτω (σχήμα 3.6). Αντίθετα, η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας δεν επηρεάζει σημαντικά την τάση ανοιχτοκυκλώσεως " U_{oc} " του Φ/Β.

Διερευνώντας τα δεδομένα του σχήματος 3.6 παρατηρείται ότι η καμπύλη που ενώνει τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη ισχύς του Φ/Β, είναι ευθεία γραμμή σχεδόν κάθετη στον άξονα της

"U", με ελαφρά κλίση προς τα δεξιά. Συνεπώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί το σημείο μέγιστης ισχύος εμφανίζεται πρακτικά για την ίδια τιμή τάσης "U", ανεξάρτητα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η πληροφορία αυτή επιβεβαιώνεται από τα στοιχεία του σχήματος 3.7, όπου παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες (N-U) για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα (N-U) Φ/Β για Διάφορες Τιμές Ηλιακής Ακτινοβολίας

Παράλληλα, αλλαγές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του έτους επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των Φ/Β στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως " U_{oc} " με αποτέλεσμα το κάθετο μέρος της καμπύλης (I-U) να μετακινείται προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η μείωση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της τάσης, (βλέπε σχήμα 3.8). Ο ρυθμός μείωσης της τάσης για Φ/Β στοιχεία πυριτίου με " $U_{oc}=0.6V$ " είναι περίπου $2mV/^{\circ}C$. Πιο συγκεκριμένα, η τάση " U_{θ} " του Φ/Β στοιχείου σε τυχαία θερμοκρασία πλαισίου " θ ", μπορεί να προσεγγισθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$U_{\theta} = U_{25} \cdot [1 - 0.002 \cdot (\theta - 25)] \quad (3.4)$$

Η παρατηρούμενη μείωση αντισταθμίζεται μερικώς από την αύξηση της έντασης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως " I_{sc} ", καθώς σύμφωνα με την εξίσωση (3.5) παρατηρείται μικρή αύξηση του ρεύματος εξόδου " I_{θ} " (σε mA), δηλαδή:

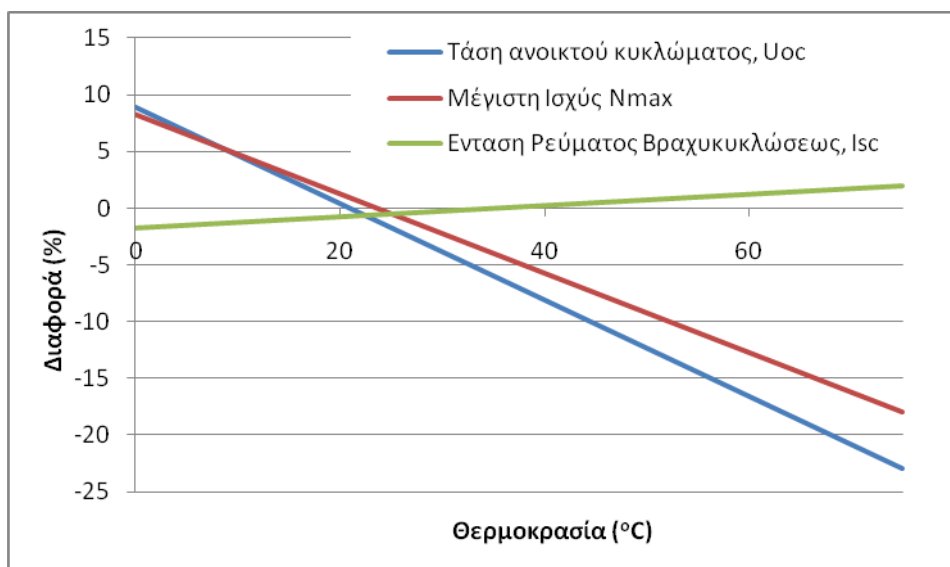
$$I_{\theta} = I_{25} \cdot [1 + 0.025 \cdot A \cdot (\theta - 25)] \quad (3.5)$$

όπου "A" εμβαδόν του φ/β στοιχείου σε cm^2 .

Η θερμοκρασία πλαισίου " θ " μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\theta = \theta_{\alpha} + k \cdot G \quad (3.6)$$

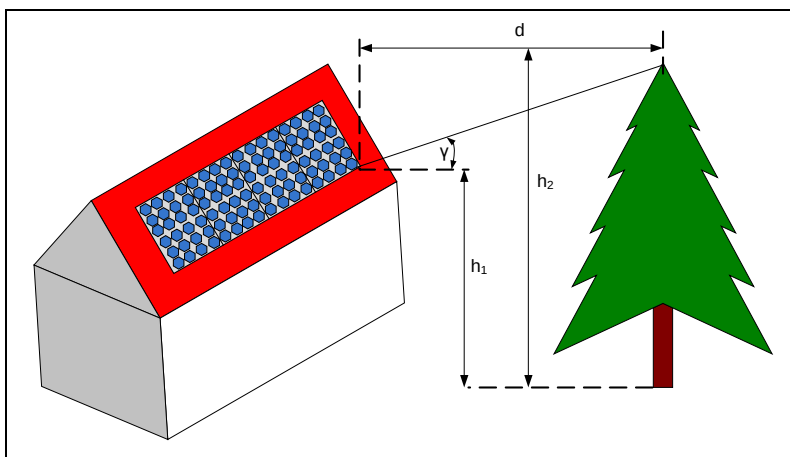
όπου " θ_a " η θερμοκρασία περιβάλλοντος, " G " η στιγμιαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και " k " θερμοκρασιακή σταθερά η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και μετάδοσης θερμότητας του Φ/Β πλαισίου και κυμαίνεται μεταξύ $0,02^\circ\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ και $0,04^\circ\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$.



Σχήμα 3.8: Επίδραση Θερμοκρασίας στη Συμπεριφορά ενός Φ/Β Στοιχείου

Τελικά η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου επηρεάζει αρνητικά την αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ " N_{max} " (σχήμα 3.8).

Τέλος, ο βέλτιστος προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων για τις κυριότερες χρήσεις, είναι ο νότιος-νοτιοδυτικός, ενώ είναι σημαντικό να αποφεύγεται η σκίαση της επιφάνειας των Φ/Β από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια (σχήμα 3.9).



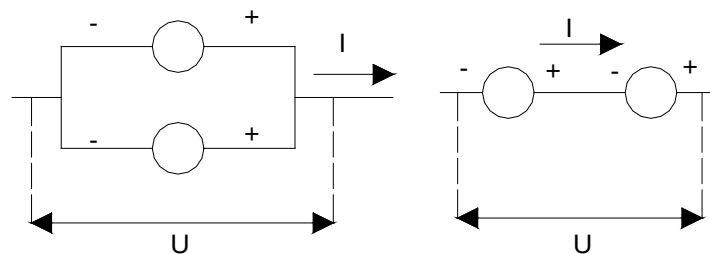
Σχήμα 3.9: Υπολογισμός γωνίας ύψους εμποδίου σκίασης των Φ/Β

Στην περίπτωση όπου υπάρχουν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια τα οποία σκιάζουν τα Φ/Β, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός της γωνίας ύψους " γ " του εμποδίου προκειμένου στη συνέχεια να υπολογιστεί η μείωση λόγω σκίασης της ηλιακής ενέργειας που δέχεται η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Ο υπολογισμός προκύπτει από τη διαφορά του ύψους τοποθέτησης των Φ/Β " h_1 " και του ύψους του αντικειμένου που προκαλεί τη σκίαση " h_2 " το οποίο βρίσκεται σε απόσταση " d ":

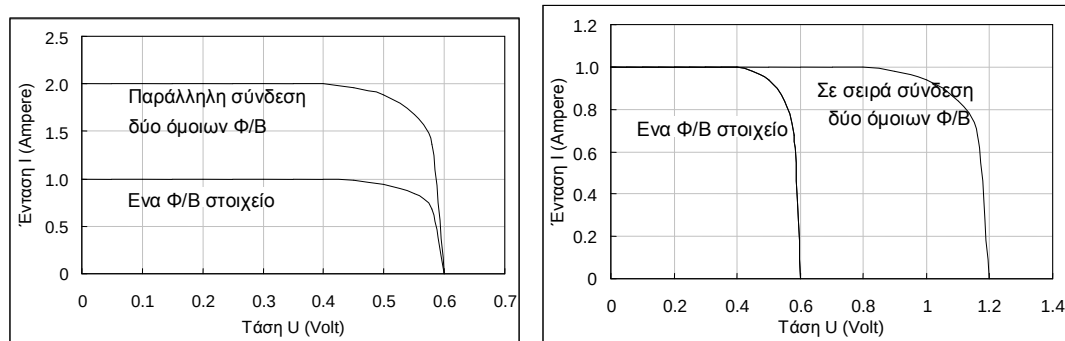
$$\gamma = \tau \phi \exp\left(\frac{h_2 - h_1}{d}\right) \quad (3.7)$$

3.5. ΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Επειδή το κάθε Φ/Β στοιχείο αποδίδει ισχύ μερικών μόνο Watt, τα οποία δεν είναι αρκετά για τις περισσότερες εφαρμογές, δημιουργούνται κατάλληλοι συνδυασμοί Φ/Β στοιχείων ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις του φορτίου όσον αφορά την απαιτούμενη τάση, ισχύ ή ένταση ρεύματος. Με κατάλληλη συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων τοποθετημένα σε πλαίσιο δημιουργούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο είναι και το τελικό προϊόν που διατίθεται προς εγκατάσταση. Για την επίτευξη της τάσης και της απαιτούμενης ισχύος μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, τα πλαίσια συνδέονται σε συνδεσμολογίες εν σειρά και εν παραλλήλω. Στο σχήμα 3.10, δίνονται οι βασικές συνδεσμολογίες Φ/Β στοιχείων.



Σχήμα 3.10: Σύνδεση εν παραλλήλω και εν σειρά Φ/Β στοιχείων



Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας (I-U) για εν παραλλήλω και για εν σειρά σύνδεση όμοιων Φ/Β στοιχείων

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες (I-U) που αντιστοιχούν στις δύο βασικές διατάξεις σύνδεσης όμοιων Φ/Β στοιχείων δίνονται στο σχήμα 3.11. Για την εν παραλλήλω σύνδεση Φ/Β στοιχείων, η τάση "U" της ισοδύναμης συνδεσμολογίας προκύπτει ως η μέση τιμή των τάσεων των "n" επιμέρους στοιχείων, ενώ η ένταση του ρεύματος "I" ως το άθροισμα των αντίστοιχων ρευμάτων, δηλαδή:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \quad (3.8)$$

και

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (3.9)$$

Αντίθετα, στη σύνδεση εν σειρά δύο όμοιων Φ/Β, η ένταση παραμένει σταθερή και ίση με την ελάχιστη της επιτρεπόμενης έντασης που διαρρέει κάθε στοιχείο της συνδεσμολογίας, ενώ η τάση των Φ/Β προστίθεται, οπότε:

$$I = \min_{i=1}^n \{I_i\} \quad (3.10)$$

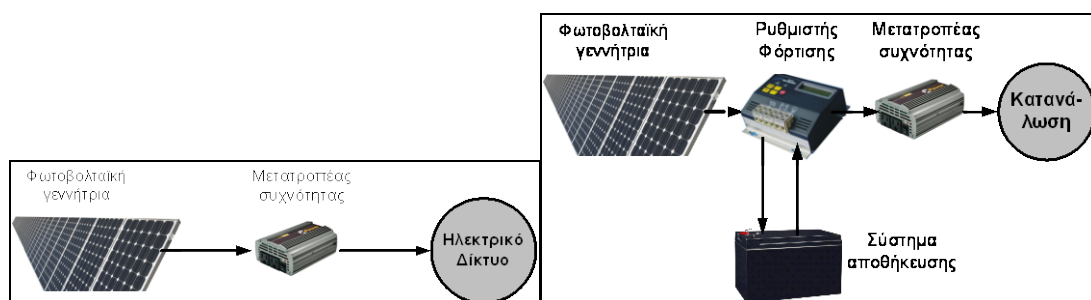
και

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (3.11)$$

Η ισχύς "N", που παράγεται από τη σύνδεση των Φ/Β στοιχείων, είτε εν παραλλήλω είτε εν σειρά, προκύπτει από το γινόμενο της ισοδύναμης έντασης επί την αντίστοιχη τάση της συνδεσμολογίας, (εξίσωση (3.2)).

3.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι επιμέρους συνιστώσες μιας Φ/Β μονάδας εξαρτώνται από το σκοπό που εξυπηρετεί η εγκατάσταση (σχήμα 3.12). Όταν ο σκοπός είναι η παραγωγή και διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (διασυνδεδεμένο σύστημα) τότε απαιτείται μόνο η χρήση ενός ή περισσοτέρων μετατροπέων συχνότητας προκειμένου η παραγόμενη ενέργεια της Φ/Β γεννήτριας να ικανοποιεί τις προϋποθέσεις διασύνδεσης. Στην περίπτωση όπου το ζητούμενο για την εγκατάσταση είναι η κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών αυτόνομου καταναλωτή η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, το ρυθμιστή φόρτισης, το σύστημα αποθήκευσης (μπαταρίες) και το μετατροπέα συχνότητας.



Σχήμα 3.12: Σχηματική παράσταση διασυνδεδεμένης στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (αριστερά) και αυτόνομης (δεξιά) Φ/Β εγκατάστασης

Για τον αναλυτικό προσδιορισμό των διαστάσεων μιας Φ/Β γεννήτριας, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη γνωστών ενεργειακών απαιτήσεων "E_ο" αυτόνομου καταναλωτή υπό δεδομένη τάση λειτουργίας "U_ο", απαιτείται η γνώση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. "H_T"), καθώς και της μεταβολής της θερμοκρασίας στην περιοχή εγκατάστασης, κατά τη διάρκεια όλων των ωρών/ημερών του έτους. Ακολουθώντας, με βάση τις καμπύλες απόδοσης των Φ/Β πλαισίων και τις συγκεκριμένες

γωνίες τοποθέτησής τους (ανά εποχή του έτους), εκτιμάται το εμβαδόν των συλλεκτικών επιφανειών για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μήνα (ή ημέρα) του έτους υπολογίζεται το πεδίο μεταβολής του αριθμού των απαιτούμενων Φ/Β πλαισίων "z", ως:

$$Z_{\min} \leq Z \leq Z_{\max} \quad (3.12)$$

με:

$$Z_{\min} = \frac{E_o / (\eta_{CC} \cdot \eta_{INV} \cdot \eta_{KAL})}{(H_T \cdot \eta_{PV}) \cdot S_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}} \cdot \eta_{\Theta EPM} \cdot \eta_{KA\Theta AP} \cdot \eta_{ΓHP}} \quad (3.13)$$

και

$$Z_{\max} = Z_{\min} / \eta^* \quad (3.14)$$

όπου:

H_T : η μηνιαία ηλιακή ενέργεια (kWh/mo/m^2) στην περιοχή εγκατάστασης και σε γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων "β"

η_{CC} : η μέση μηνιαία απόδοση του ρυθμιστή φόρτισης (87%÷93%)

η_{INV} : η μέση μηνιαία απόδοση του μετατροπέα συχνότητας (inverter) (90%÷96%)

η_{KAL} : λαμβάνει υπόψη τις απώλειες των καλωδιώσεων μεταφοράς (96%÷99%)

η_{PV} : η αναμενόμενη μέση μηνιαία ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων (8%÷17%)

$\eta_{\Theta EPM}$: λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της απόδοσης των Φ/Β στοιχείων λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας των από τους 20°C, θερμοκρασία στην οποία οι κατασκευαστές παραθέτουν την καμπύλη απόδοσης των Φ/Β πλαισίων τους (85%÷95%).

$\eta_{KA\Theta AP}$: λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων λόγω επικαθήσεων σκόνης κ.λπ. (96%÷99%)

$\eta_{ΓHP}$: λαμβάνει υπόψη τη γήρανση των Φ/Β η οποία εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό γήρανσης ανά έτος (90%÷95%)

$S_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}$: το εμβαδόν του τυπικού Φ/Β πλαισίου που συγκροτεί τη γεννήτρια

η^* : η συνολική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης και απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας στο μετατροπέα συχνότητας

Για την πλήρη αυτονομία της εγκατάστασης επιλέγεται το πλήθος των πλαισίων "z", το οποίο ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες όλων των μηνών του έτους. Ακολουθώντας το συνολικό πλήθος των πλαισίων αναλύεται σε γινόμενο " $z_1 \times z_2$ " εν παραλλήλω και εν σειρά συνδεδεμένων, καθώς:

$$Z = Z_1 \cdot Z_2 \quad (3.15)$$

και

$$Z_2 = U_o / U_d \quad (3.16)$$

όπου " U_d " η τάση λειτουργίας του κάθε Φ/Β πλαισίου.

Για την επιλογή των χαρακτηριστικών μεγεθών της συστοιχίας των συσσωρευτών, η χωρητικότητά τους εκτιμάται συναρτήσει της απαιτούμενης ενεργειακής αυτονομίας (π.χ. " d_o " τυπικών ημερών), της τάσης λειτουργίας " $U_{\Sigma Y \Sigma}$ " και του μέγιστου επιτρεπόμενου βαθμού εκφόρτισης (DOD_L) των συσσωρευτών, οπότε:

$$Q_{\max} = \frac{d_o \cdot (E_{\text{ETHΣΙΑ}} / 8760)}{\eta_{\text{db}} \cdot \text{DOD}_L \cdot U_{\Sigma\text{ΥΣ}}} \quad (3.17)$$

όπου " η_{db} " ο βαθμός απόδοσης του κλάδου εκφόρτισης των συσσωρευτών, συμπεριλαμβανομένου του μετατροπέα συχνότητας και των αντίστοιχων καλωδιώσεων. Η τάση λειτουργίας των συσσωρευτών από την εμπειρία λαμβάνει τιμές ίσες με 12V ή 24V ή 48V.

Για την επιλογή του ρυθμιστή φόρτισης, η ονομαστική του ισχύς καθορίζεται μεγαλύτερη ή ίση με αυτή της Φ/Β γεννήτριας, ενώ οι τιμές τάσεως εισόδου και εξόδου αντιστοιχούν στην τιμή της τάσεως της Φ/Β γεννήτριας και της συστοιχίας των συσσωρευτών. Σε περιπτώσεις απαίτησης μεγάλης έντασης ηλεκτρικού ρεύματος επιλέγεται η λύση περισσότερων μονάδων συνδεδεμένων εν παραλλήλω.

Τέλος, η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα συχνότητας καθορίζεται από τη μέγιστη ζήτηση φορτίου της κατανάλωσης προσαυξημένη κατά ένα ποσοστό, ώστε να συνυπολογίζεται και η πιθανή αύξηση της ζήτησης στο επόμενο χρονικό διάστημα. Η απαιτούμενη τάση λειτουργίας των φορτίων της κατανάλωσης προσδιορίζει και την τάση εξόδου του μετατροπέα συχνότητας της εγκατάστασης.

Στην περίπτωση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος, δεν απαιτείται σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας καθώς το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγείται στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω του μετατροπέα συχνότητας. Ως εκ τούτου, στην παραπάνω διαδικασία υπολογισμού δε λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμιστής φόρτισης και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Η εκτίμηση της ετήσιας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας Φ/Β εγκατάστασης υπολογίζεται ως:

$$E_y = N_o \cdot CF \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

όπου " N_o " η ονομαστική ισχύς της Φ/Β εγκατάστασης, " CF " ο συντελεστής φορτίου (Capacity Factor) της εγκατάστασης και " Δt " οι ώρες του έτους (8760 ή 8784 για δίσεκτο έτος).

Ο συντελεστής φορτίου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης εξαρτάται από το ηλιακό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης καθώς επίσης και από τον τύπο των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται. Για την περιοχή της Ελλάδας ο μέσος ετήσιος συντελεστής φορτίου των Φ/Β εγκαταστάσεων κυμαίνεται μεταξύ 15÷20%. Αντίστοιχα η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ ισχύος φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα κυμαίνεται περίπου από 1300÷1800kWh ετησίως.

Η απαιτούμενη Φ/Β επιφάνεια για τη δημιουργία μιας Φ/Β εγκατάστασης εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύ " N_o " (σε kW) και το μέγιστο βαθμό απόδοσης " η " των πλαισίων που τη συγκροτούν, και υπολογίζεται (σε m^2) για ένταση ακτινοβολίας 1kW και θερμοκρασία πλαισίου 25°C, ως:

$$A = \frac{N_o}{\eta} \quad (3.19)$$

Ζητείται για παράδειγμα η απαιτούμενη επιφάνεια για τη δημιουργία μιας φωτοβολταϊκής μονάδας 2kW. Στην εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθούν πολυκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια που σύμφωνα με τον κατασκευαστή έχουν μέγιστο βαθμό απόδοσης 14%. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.19) η απαιτούμενη επιφάνεια είναι τουλάχιστον 14,3 m^2 χωρίς βέβαια να ληφθούν υπόψη οι συνολικές διαστάσεις των πλαισίων (εκτός της φωτοβολταϊκής επιφάνειας) καθώς επίσης και τυχόν άλλοι περιορισμοί της εγκατάστασης. Στο παραπάνω παράδειγμα η χρήση μονοκρυσταλλικών Φ/Β πλαισίων με βαθμό απόδοσης 16% θα απαιτούσε τουλάχιστον 12,5 m^2 ενώ η χρήση Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου με βαθμό απόδοσης 10% τουλάχιστον 20 m^2 .

Τέλος, έστω ότι ζητείται η εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής μιας φωτοβολταϊκής μονάδας 10kW η οποία πρόκειται να εγκατασταθεί στην περιοχή της Αθήνας. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.18) και λαμβάνοντας υπόψη μέσο ετήσιο συντελεστή φορτίου 18% με πιθανότητα σφάλματος $\pm 3\%$, η μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι:

$$E_y = 10\text{kW} \cdot 0.18 \cdot 8760\text{h} = 15768\text{kWh} \quad (3.20)$$

ενώ αντίστοιχα η ελάχιστη εκτιμώμενη ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι:

$$E_y = 10\text{kW} \cdot 0.15 \cdot 8760\text{h} = 13140\text{kWh} \quad (3.21)$$

και η αντίστοιχη μέγιστη:

$$E_y = 10\text{kW} \cdot 0.21 \cdot 8760\text{h} = 18396\text{kWh} \quad (3.22)$$

3.7. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να εγκατασταθούν είτε στο έδαφος είτε πάνω στο κτήριο, ανάλογα με το σχεδιασμό του κτηρίου, το είδος της οροφής και τη διαθέσιμη επιφάνεια παραπλεύρως του κτηρίου. Ο σημαντικότερος παράγοντας για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών στο έδαφος είναι ο προσανατολισμός και η κλίση. Η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή της εγκατάστασης επιτυγχάνεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα (γωνία πρόσπτωσης ίση με μηδέν) στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Καθώς όμως η γωνία πρόσπτωσης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και κατά τη διάρκεια του έτους, μόνο με την εγκατάσταση ηλιακών ιχνηλατών (solar trackers) μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού. Κατά την επιλογή των πλαισίων στήριξης των φωτοβολταϊκών θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι γεωγραφικές και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες της περιοχής όπως ριπές ανέμου, πλημμύρες καθώς επίσης και διάβρωση του εδάφους.

Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στην οροφή των κτηρίων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε βάσεις με κλίση ή σε επίπεδες βάσεις ή ακόμη και συνδυασμός των δύο (σχήμα 3.13). Η μέθοδος και ο τρόπος εγκατάστασης εξαρτάται από το αν το κτήριο είναι υπάρχον ή υπό κατασκευή, καθώς επίσης και από το είδος της οροφής (σκυρόδεμα, ξύλινη σκεπή, κεραμοσκεπή κ.λπ.).



Η εγκατάσταση Φ/Β στις επιφάνειες των κτηρίων περιορίζει τον απαιτούμενο χώρο εγκατάστασης των Φ/Β και συμβάλλει στην κάλυψη της ενεργειακής τους κατανάλωσης συμβάλλοντας στη δημιουργία κτηρίων μηδενικής (zero energy buildings) ή σχεδόν μηδενικής (near zero energy buildings) ενεργειακής κατανάλωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ζαφειράκης Δ., Καββαδίας Κ.Α., Καλδέλλης Ι.Κ., 2007, "Η Αποθήκευση Ενέργειας στην Ηλεκτροπαραγωγή", Περιοδικό Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Τεύχος 401, σελ. 28-34.

2. Καββαδίας Κ.Α., Νίνου Ι., Ζαφειράκης Δ.Π., Καλδέλλης Ι.Κ., 2010, "Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος Φωτοβολταϊκής Βάσης για Αυτόνομους Τηλεπικοινωνιακούς Σταθμούς", 4ο Εθνικό Συνέδριο για την Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Μονάδα Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων ΕΜΠ (RENES), Αθήνα.
3. Καλδέλλης Ι., Καλαμπάλικης Αθ., Καπετανάας Π., 1998, "Σχεδιασμός - Μελέτη Λειτουργίας Αυτόνομης Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης για Απομονωμένο Καταναλωτή", Εθνικό Συνέδριο για την Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΕΜΠ-RENES, pp.315-322, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα.
4. Καλδέλλης Ι., Σωτηράκη Κ., 1999, "Σχεδιασμός-Μελέτη Λειτουργίας Αυτόνομου Νησιωτικού Φωτοβολταϊκού Σταθμού", 6ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ-Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Διεργασιών, Τόμος Α', pp.301-308, Βόλος.
5. Καλδέλλης Ι.Κ., Σπυρόπουλος Γ.Χ., Καββαδίας Κ.Α., 2007, "Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας: Ηλιακή Ακτινοβολία - Ηλιακά Θερμικά Συστήματα - Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις", 1η έκδοση, Αθ. Σταμούλης, Αθήνα.
6. Καλδέλλης Ι.Κ., Ιωαννίδης Θ., Καββαδίας Κ., Βλάχου Δ., 2002, "Ανάλυση Ανταγωνισμού στη Διεθνή Φωτοβολταϊκή Αγορά Ισχύουσα Κατάσταση-Δυνατότητες Εφαρμογής στον Ελλαδικό Χώρο", 7ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Τόμος Α', σελ.151-158, Πάτρα.
7. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ., 2001, "Επίδραση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης στην Ενεργειακή Συμπεριφορά Πειραματικού Φωτοβολταϊκού Σταθμού", 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Περιβάλλοντος, Ένωση Ελλήνων Φυσικών, "Εξελίξεις και Προοπτικές στα Περιβαλλοντικά Ζητήματα", Καλαμπάκα.
8. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., 2001, "Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας", 1η έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
9. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., Βλάχος Γ., 2002, "Ολοκληρωμένη Μελέτη Κόστους Ηλεκτροπαραγωγής στο Αιγαίο εν Όψει της "Απελευθέρωσης" της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας", 2ο Συνέδριο Τεχνολογίες Αρχιπελάγους, Απρίλιος 2002, Πειραιάς.
10. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., Κονδύλη Αιμ., 2008, "Μέθοδος Άριστης Διαστασιολόγησης Ενεργειακών Συστημάτων Ήπιων Μορφών Ενέργειας για Απομονωμένους Καταναλωτές", 20ο Εθνικό Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρίας Επιχειρησιακών Ερευνών, Σπέντες.
11. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., Μαγουλάς Χρ., 2005, "Χρήση Φωτοβολταϊκών Γεννητριών σε Τηλεπικοινωνιακούς Σταθμούς για Εξοικονόμηση Υγρών Καυσίμων", 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων, Αθήνα.
12. Καλδέλλης Ι.Κ., Φλούμης Ν., Βλάχου Δ., Καββαδίας Κ., Κων/νίδης Π., 2002, "Μια Ολοκληρωμένη Αναπτυξιακή Πρόταση για τα Νησιά του Αιγαίου", 2ο Συνέδριο Τεχνολογίες Αρχιπελάγους, Πειραιάς.
13. Κουφομιχάλης Χρ., Μπαργωτάκης Χρ., Καλδέλλης Ι., Τσούτσος Θ., 2002, "Παραδείγματα Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών στις Τηλεπικοινωνίες", 7ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Τόμος Α', σελ.89-96, Πάτρα.
14. Μπαλαράς Κ.Α., Αργυρίου Α.Α., Καραγιάννης Φ., 2006, "Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας", Εκδόσεις Σέλκα-4Μ Τεκδοτική, Αθήνα.
15. Νεοκλέους Α., Κωνσταντινίδης Σ., 1999, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδ. ΙΩΝ, Αθήνα.
16. Σπυρόπουλος Γ.Χ., Πονηρός Ν.Π., Καββαδίας Κ.Α., Καλδέλλης Ι.Κ., 2007, "Ανάλυση Λειτουργίας Πειραματικής Υβριδικής Φωτοβολταϊκής-Αντλητικής Εγκατάστασης", 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων, Αθήνα.
17. Φραγκιαδάκης Ι.Ε., 2009, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", 3η έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

18. Bayod-Rújula A.A., Ortego-Bielsa A., Martínez-Gracia A., 2011, "Photovoltaics on Flat Roofs: Energy Considerations", *Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 1996-2010.
19. Haas R., 2002, "Building PV Markets: Customers and Prices", *Renewable Energy World Jr.*, Vol.5/3, pp.98-111.
20. Hartmann N., Glueck C., Schmidt F.P., 2011, "Solar Cooling for Small Office Buildings: Comparison of Solar Thermal and Photovoltaic Options for Two Different European Climates", *Renewable Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 1329-1338.
21. Kaldellis J., Spyropoulos G., Kavadias K., Koronaki I., 2009, "Experimental Validation of Autonomous PV-Based Water Pumping System Optimum Sizing", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1106-1113.
22. Kaldellis J.K., 2002, "Minimum Stand-Alone Wind Power System Cost Solution for Typical Aegean Sea Islands", *Wind Engineering Journal*, Vol.26/4, pp.241-255.
23. Kaldellis J.K., 2003, "Optimum Techno-Economic Energy-Autonomous Photovoltaic Solution for Remote Consumers Throughout Greece", *Journal of Energy Conversion and Management*, vol.45/17, pp.2745-2760.
24. Kaldellis J.K., Fragos P., Kapsali M., 2011, "Systematic Experimental Study of the Pollution Deposition Impact on the Energy Yield of Photovoltaic Installations", *Renewable Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2717-2724.
25. Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Neonakis J.K., 2002, "A Probabilistic Computational Method for the Economic Evaluation of Soft Energy Applications in Course of Time", 4th GRACM Congress on Computational Mechanics, Paper 2002_60, Patras, Greece.
26. Kaldellis J.K., Koronakis P., Kavadias K., 2003, "Energy Balance Analysis of A Stand-Alone Photovoltaic System, Including Variable System Reliability Impact", *Renewable Energy Journal*, Vol.29/7, pp.1161-1180.
27. Kaldellis J.K., Ninou I., Zafirakis D., 2011, "Minimum Long-Term Cost Solution for Remote Telecommunication Stations on the Basis of Photovoltaic-Based Hybrid Power Systems", *Energy Policy*, vol. 39, no. 5, pp. 2512-2527.
28. Kaldellis J.K., Vlachos G. Th., Kavadias K.A., 2002, "Optimum Sizing Basic Principles of a Combined Photovoltaic-Wind-Diesel Hybrid System for Isolated Consumers", *Proceedings of EuroSun 2002 International Conference*, Paper W141, Bologna, Italy.
29. Liu Z., Bao Y., 2011, "Design Issues and Contribution to Building Energy of Photovoltaic Roof", vol. 250-253.
30. Sidrach-de-Cardona M., Mora Lopez Li., 1998, "A Simple Model for Sizing Stand Alone Photovoltaic Systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells Jr.*, Vol.55/3, pp.119-214.
31. Sonnenenergie D.G., 2008, "Planning and Installing Photovoltaic Systems: a Guide for Installers, Architects and Engineers", Earthscan.
32. Wang D., Guan X., Zhang S., 2011, "Experimental Study on PV Solar Wall", vol. 250-253.
33. Williams N.J., Van Dyk E.E., Vorster F.J., 2011, "Monitoring Solar Home Systems with Pulse Width Modulation Charge Control", *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 133, no. 2.
34. Zogou O., Stapountzis H., 2011, "Energy Analysis of an Improved Concept of Integrated PV Panels in an Office Building in Central Greece", *Applied Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 853-866.

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η βιομάζα αποτελεί μία βασική πηγή ενέργειας και προέρχεται από την εκμετάλλευση (αξιοποίηση) φυτικών, ζωικών και δασικών προϊόντων και υπολειμμάτων, αστικών λυμάτων και απορριμμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Συγκεκριμένα η βιομάζα προέρχεται από :

- προϊόντα, υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής
- υποπροϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία των υλικών αυτών
- αστικά λύματα και απορρίμματα (υγρά και στερεά οργανικά απόβλητα)
- φυσικές ύλες που προέρχονται από φυσικά ή τεχνητά οικοσυστήματα (δάση, φυτά)

Η βιομάζα αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας καθώς καλύπτει περίπου το 14% των παγκόσμιων ενεργειακών απαιτήσεων και είναι η σημαντικότερη πηγή ενέργειας για τις αναπτυσσόμενες χώρες, με ποσοστό συμμετοχής 35% στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Αποτελεί μια ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, η οποία είναι δυνατό να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή επάρκεια, αντικαθιστώντας τα συνεχώς εξαντλούμενα αποθέματα ορυκτών καυσίμων. Η χρήση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας δεν είναι νέα, σ' αυτή συγκαταλέγονται τα καυσόξυλα και οι ξυλάνθρακες, τα οποία μέχρι το τέλος του περασμένου αιώνα κάλυπταν το 97% των ενεργειακών αναγκών της χώρας.

Στην Ευρώπη η χρήση της βιομάζας για παραγωγή ενέργειας είναι αρκετά διαδεδομένη. Στη χώρα μας η συμμετοχή της βιομάζας στο ενεργειακό ισοζύγιο για το 2010 εκτιμάται περίπου στο 4,5%, σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του υπουργείου περιβάλλοντος για το ενεργειακό ισοζύγιο. Ιδιαίτερα για τον οικιακό τομέα, η κατανάλωση βιομάζας συμμετέχει με ποσοστό 12,5%, ενώ στο τριτογενή τομέα με ποσοστό περίπου 8% (περίπου το 7,7% καταναλώνεται από τον αγροτικό τομέα). Το ποσοστό αυτό στον οικιακό τομέα αφορά κυρίως στην καύση καυσόξυλων σε ανοιχτές εστίες καύσης, τζάκια και σόμπες.

Βασική πηγή ενέργειας από την οποία προέρχεται η βιομάζα αποτελεί η ηλιακή ενέργεια. Η βιομάζα παράγεται από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, με βασικές πρώτες ύλες το νερό και τον άνθρακα. Από την επεξεργασία της βιομάζας παράγονται στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα, καθώς και λιπάσματα, τροφές και βιομηχανικά υλικά.

Η βιομάζα είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών, χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Τα φυτά μετασχηματίζουν την ενέργεια του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας με μια σειρά σύνθετων διεργασιών. Οι βασικές πρώτες ύλες του εν λόγω μετασχηματισμού είναι το νερό και το CO₂, που αφθονούν στη φύση. Από τη στιγμή που η βιομάζα έχει σχηματιστεί με τη διεργασία που προαναφέρθηκε, αποτελεί μια αξιοποιήσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι της ενεργειακής μετατροπής της βιομάζας, διακρίνονται σε θερμοχημικές (ξηρές) ή σε βιοχημικές (υγρές). Η επιλογή της μεθόδου μετατροπής προσδιορίζεται κατά κανόνα από την αναλογία άνθρακα και αζώτου στη διαθέσιμη πρώτη ύλη και από την περιεχόμενη υγρασία την ώρα της συλλογής.

Οι βιοχημικές διεργασίες, που ονομάζονται έτσι επειδή είναι αποτέλεσμα μικροβιακής δράσης, χρησιμοποιούνται για προϊόντα και υπολείμματα, όπως λαχανικά, κοπριά κ.λπ., με αναλογία άνθρακα και αζώτου μικρότερη από 30 και υγρασία μεγαλύτερη από 50%. Οι βιοχημικές διεργασίες διακρίνονται στις:

- α) Αερόβια Ζύμωση (παρουσία οξυγόνου),
- β) Αναερόβια Ζύμωση (απουσία εξωτερικού οξυγόνου),
- γ) Αλκοολική Ζύμωση.

Οι θερμοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν οξειδωτικές αντιδράσεις, που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, για διαφορετικές συνθήκες οξείδωσης. Οι διεργασίες αυτές χρησιμοποιούνται για τα είδη της βιομάζας με αναλογία άνθρακα και αζώτου μεγαλύτερη από 30 και υγρασία μικρότερη από 50%. Στις διεργασίες αυτές περιλαμβάνονται:

- α) Η Πυρόλυση (θέρμανση απουσία αέρα)
- β) Η Απευθείας Καύση
- γ) Η Αεριοποίηση
- δ) Η Υδρογονοδιάσπαση

4.1. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η άμεση καύση είναι ο πιο συνήθης τρόπος παραγωγής θερμικής (ή και ηλεκτρικής) ενέργειας, κατά την οποία χρησιμοποιούνται καυσόξυλα και γεωργικά υποπροϊόντα (άχυρο, καλάμια, κότσαλα, κλαδοδέματα και υπολείμματα ξύλου) με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό (>15%). Η θερμαντική αξία των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων επηρεάζεται από τον τρόπο καύσης τους.

Η θερμική απόδοση κατά την καύση σε βιομηχανικού τύπου κλιβάνους φτάνει το 40%, ενώ η απόδοση των σύγχρονων μονάδων λεβήτων καύσης τυποποιημένης βιομάζας ανέρχεται πάνω από 85%. Η αντίστοιχη θερμική απόδοση στα παραδοσιακά τζάκια κατοικιών κυμαίνεται περίπου στο 10÷25%, ενώ στα ενεργειακά τζάκια η θερμική απόδοση ανέρχεται πάνω από 50%.

Η καύση ξύλου αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που παράγεται στον κόσμο από βιομάζα. Στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, οι αποδόσεις της διαδικασίας καύσης πλησιάζουν το 30% σε μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας θερμοηλεκτρικά εργοστάσια. Παράλληλα έχουν μειωθεί σημαντικά και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μέσω της σύγχρονης αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Ήδη αναπτύσσεται τεχνολογία σε μικρές μονάδες και σε μεγάλα εργοστάσια καύσης, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για συστήματα θέρμανσης από ξύλο, υπολείμματα ξύλου, άχυρα και πρώτες ύλες με περιεκτικότητα σε υγρασία μέχρι 60%.

Πίνακας 4.1.: Θερμαντική αξία βιομάζας.

Χαρακτηριστικά	Θερμαντική αξία (MJ/kg)
Αγριαγκινάρα	14,5
Ευκάλυπτος	19,0
Καλάμι	18,6
Κλαδοδέματα ελιάς	22,0
Μίσχανθος	17,3
Σόγια	21,0
Υπολείμματα αμυγδαλιάς	18,9
Υπολείμματα βελανιδιάς	19,8
Υπολείμματα καπνού	15,3
Υπολείμματα μηλιάς	26,3

Από την φυτική βιομάζα που αναπτύσσεται στην Ελλάδα, η αγριαγκινάρα (σχήμα 4.1.) θεωρείται το πιο ενεργειακό φυτό, καθώς είναι πολυετές (άνω των 7 ετών) και με μεγάλη απόδοση παραγωγή βιομάζας από 1200 έως 3000 kg/στρέμμα, ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας, ποτιστική ή μη. Επίσης η καλλιέργεια αγριαγκινάρας έχει ελάχιστες απαιτήσεις σε λίπασμα και καθόλου ζιζανιοκτόνα, διότι το ίδιο το φυτό είναι ισχυρό ζιζάνιο (εισβολέας).



Σχήμα 4.1: Καλλιέργεια αγριαγκινάρας

Τα σκουπίδια επίσης είναι μια σημαντική πηγή βιομάζας, με την καύση των οποίων μπορεί να παραχθεί ατμός και ηλεκτρισμός. Τα σκουπίδια και άλλου είδους απόβλητα χρησιμοποιούνται σήμερα σε αρκετά εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής όπως ακριβώς και ο άνθρακας (διαδικασία καύσης). Η θερμογόνος δύναμη των σκουπιδιών προσεγγίζει περίπου το 24% το άνθρακα, δηλαδή περίπου 4 kg σκουπιδιών παράγουν την ίδια ενέργεια με 1 kg άνθρακα.

Η ενεργειακή μετατροπή της βιομάζας με την πυρόλυση γίνεται θερμαίνοντας τη φυτική ύλη η οποία αποσυντίθεται και παράγει λόγω απουσίας του αέρα (οξυγόνου) βιοάνθρακα, βιοέλαιο και βιοαέριο. Η πυρόλυση γίνεται σε κλειστά δοχεία, σε θερμοκρασία 500÷600°C η οποία επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση μέρους της βιομάζας. Για τη χρήση βιομάζας στη διαδικασία πυρόλυσης η περιεκτικότητα της βιομάζας σε νερό πρέπει να είναι μικρότερη από 40%. Η αντίδραση είναι εσωθερμική και δεν χρειάζεται παρά μόνο μικρά ποσά εξωτερικής ενέργειας. Ένας τόνος ξηρού ξύλου με πυρόλυση αποδίδει 300kg ξυλάνθρακα, 140m³ βιοαέριο, 14lt μεθυλική αλκοόλη, 53lt οξικό οξύ, 8lt εστέρες, 3lt ακετόνη, 76lt ξύλου, 12lt λάδι και 30kg πίσσα. Η ενεργειακή απόδοση της βιομάζας φτάνει το 90%, ενώ για τις ενεργειακές ανάγκες της μεθόδου καταναλώνεται το 10% του παραγόμενου αερίου.

Ο βιοάνθρακας που παράγεται έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα (83%) και οξυγόνο (11%) ενώ περιέχει σε μικρότερες ποσότητες υδρογόνο, τέφρα και άζωτο. Η θερμογόνος δύναμή του είναι 22÷33MJ/kg. Τα χαρακτηριστικά του βιοάνθρακα που παράγεται με την πυρόλυση εξαρτώνται από την προέλευση της βιομάζας που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα ο βιοάνθρακας που προέρχεται από τα υπολείμματα βελανιδιάς έχει θερμογόνος δύναμη 33MJ/kg ενώ από κλαδοδέματα ελιάς 28MJ/kg.

Η ενεργειακά συμπυκνωμένη βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον οικιακό τομέα για τη θέρμανση χώρων και παραγωγή ζεστού νερού, στον αγροτικό τομέα για τη θέρμανση θερμοκηπίων και την ξήρανση γεωργικών προϊόντων, σε βιομηχανικές εφαρμογές για την παραγωγή αερίων και υγρών καυσίμων.

Το βιοέλαιο το οποίο παράγεται κατά την πυρόλυση έχει περιεκτικότητα σε άνθρακα 51% και σε οξυγόνο 40%, ενώ περιέχει και μικρές ποσότητες θείου. Η θερμογόνος δύναμη του βιοελαίου είναι 20÷30 MJ/kg. Στον πίνακα 4.2. παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του βιοελαίου για τρεις διαφορετικούς τύπους βιομάζας.

Πίνακας 4.2.: Χαρακτηριστικά βιοελαίου από διαφορετικούς τύπους βιομάζας.

Χαρακτηριστικά	Θερμαντική αξία (MJ/kg)	Σημείο ανάφλεξης (°C)
Υπολείμματα αμυγδαλιάς	5,7	133
Στέμφυλα	5,4	137
Κλαδοδέματα	8,2	98

Τα αέρια που παράγονται κατά την πυρόλυση και που δεν συμπυκνώνονται αποτελούν το βιοαέριο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, για τη λειτουργία της μονάδας, ή να χρησιμοποιηθούν για διεργασίες ξήρανσης και θέρμανσης. Η θερμογόνος δύναμη του βιοαερίου που παράγεται κυμαίνεται από $7\div 10\text{MJ/kg}$.

Η αεριοποίηση, αφορά στη μετατροπή της βιομάζας σε αέριο, αφού έχει προηγηθεί η πυρόλυση. Όταν χρησιμοποιείται αέρας, το μίγμα των παραγομένων αερίων περιέχει μεγάλες ποσότητες αζώτου με θερμογόνος δύναμη 4MJ/m^3 . Όταν χρησιμοποιείται οξυγόνο για την αεριοποίηση, τότε το παραγόμενο μίγμα δεν περιέχει άζωτο και έχει θερμογόνος δύναμη 7MJ/m^3 . Η αεριοποίηση με την παρουσία ατμού σε θερμοκρασία 1000°C αυξάνει σημαντικά το ποσοστό υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα στο μίγμα των αερίων και τη θερμαντική τους ισχύ. Για τη σύνθεση της αλκοόλης πρέπει να χρησιμοποιηθεί αεριοποίηση με οξυγόνο. Η απόδοση της μεθόδου αυτής κυμαίνεται μεταξύ $60\div 70\%$.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναερόβια τεχνική. Η αναερόβια μετατροπή της κυτταρίνης γίνεται με μείγμα καλλιεργειών και μικροοργανισμών και το τελικό προϊόν της διαδικασίας είναι το μεθάνιο. Η παραγωγή αερίου για κάθε τόνο πρώτης ύλης που επεξεργάζεται με αναερόβια ζύμωση είναι 385m^3 το οποίο αποτελείται από $270\text{ m}^3\text{ CH}_4$ και $115\text{ m}^3\text{ CO}_2$. Το μεθάνιο μαζί με το διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον επίσης, παρουσιάζει και η αναερόβια επεξεργασία αστικών λυμάτων.

Τέλος, η αλκοολική ζύμωση είναι από τις παλαιότερες βιοχημικές μεθόδους μετατροπής της βιομάζας. Η αιθανόλη μπορεί να παραχθεί από τα αγροτικά και δασικά προϊόντα και υποπροϊόντα που μένουν ανεκμετάλλευτα. Τα υπολείμματα των σιτηρών και του αραβόσιτου που μένουν στους αγρούς μετά την συγκομιδή, είναι μια φτηνή πρώτη ύλη για την παραγωγή αιθανόλης. Η πρώτη ύλη αρχικά υδρολύεται με τη χρήση θεϊκού οξέος ή ενζύμων για την παραγωγή μείγματος γλυκόζης και ξυλόζης. Τα σάκχαρα ζυμώνονται για την παραγωγή αιθανόλης. Η λιγνίνη που μένει ως υπόλειμμα $20\div 30\%$ της ολικής μάζας της υδρόλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας με άμεση καύση ή πυρόλυση.

4.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Η βιομάζα στο κτηριακό τομέα στην Ελλάδα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή θερμικής ενέργειας. Ο πιο παραδοσιακός τρόπος παραγωγή θερμικής ενέργειας στα κτήρια από βιομάζα, είναι οι ανοικτού τύπου εστίες καύσης (τζάκια, σόμπες, κ.ά.), καθώς επίσης και τα ενεργειακά τζάκια που παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή απόδοση ($>50\%$) και είναι η τεχνολογία που κυρίως εφαρμόζεται στα νέα κτήρια. Τα ενεργειακά τζάκια μπορούν να τροφοδοτήσουν με θερμό νερό και μια κεντρική εγκατάσταση θέρμανσης με δίκτυο διανομής και τερματικές μονάδες απόδοσης θερμότητας όπως τα κλασικά σώματα ακτινοβολίας (άβακες-radiators), η οποία μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις θέρμανσης μια μέση κατοικίας. Στην περίπτωση αυτή η εστία καύση (τζάκι) διαθέτει ενσωματωμένο εναλλάκτη νερού, ο οποίος τοποθετείται μετά τον χώρο καύσης και πριν τον καπναγωγό της εστίας, μέσω του οποίου κυκλοφορεί το θερμό νερό που τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής της κεντρικής εγκατάστασης θέρμανσης. Τα ενεργειακά τζάκια μπορούν να καταναλώνουν κάθε τύπο στερεάς βιομάζας, τυποποιημένης ή μη.



Σχήμα 4.2: Ενεργειακά τζάκια

Πέραν των εστιών καύσης, σε περιορισμένη κλίμακα και κυρίως σε αγροτικές περιοχές εφαρμόζεται η καύση βιομάζας με λέβητες στερεών βιοκαυσίμων. Οι λέβητες αυτοί καταναλώνουν κυρίως τυποποιημένη βιομάζα, δηλαδή επεξεργασμένα υποπροϊόντα ξύλου ή βιοκαυσίμων όπως είναι τα συσσωματώματα ξύλου (wood pellets) και τα θρύμματα ξύλου (wood chips) (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Θρύμματα (αριστερά) και συσσωματώματα (κέντρο και δεξιά) ξύλου

Τα συσσωματώματα ξύλου είναι τυποποιημένο κυλινδρικό βιολογικό καύσιμο που παρασκευάζεται με τη συμπίεση ξηρών πριονιδιών, ή/και σκόνη ξύλου, ή/και μικρών τεμαχιδίων, τα οποία προέρχονται από καθαρά υπολείμματα ξύλου (π.χ. βιομηχανιών επεξεργασίας ξύλου). Για την παραγωγική διαδικασία των συσσωματωμάτων δεν χρησιμοποιούνται κόλλες ή άλλα χημικά πρόσθετα, παρά μόνο υψηλή συμπίεση και ατμός. Σε ορισμένες διαδικασίες παραγωγής, χρησιμοποιούνται βιολογικά πρόσθετα σε μικρή περιεκτικότητα. Τα επιπλέον πρόσθετα και οι προσμίξεις στην παραγωγή συσσωματωμάτων, δημιουργούν λειτουργικά προβλήματα στο λέβητα λόγω αύξησης της εναπομένουσας στάχτης κατά την καύση. Σημαντικό είναι τα συσσωματώματα να έχουν τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες ώστε να μη διαλύονται κατά την καύση, αφού η σκόνη τους παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες.

Τα θρύμματα ξύλου είναι μικρά τεμάχια ξύλου μήκους 5÷50mm. Η ποιότητα των θρυμμάτων εξαρτάται από την πρώτη ύλη και τη διαδικασία παραγωγής. Οι βασικοί τύποι θρυμμάτων είναι, τα θρύμματα από δασικά υπολείμματα (κλαδιά, κορυφές και κορμοί δένδρων) κατάλληλα για μεγάλους λέβητες κυρίως τηλεθέρμανσης, τα θρύμματα από βιομάζα που παράγονται σε πριονιστήρια τα οποία έχουν καλύτερες ιδιότητες καύσης αλλά είναι πολύ υγρά και δεν ενδείκνυται για μικρούς λέβητες και τα θρύμματα βιομάζας από αραίωμα χωρίς κλαδιά και φύλλα που περνάνε από διαδικασία ξήρανσης πριν το θρυμματίσμα. Η υγρασία των τελευταίων είναι περίπου 30% και το μέγεθός τους ποικίλει ανάλογα με τη διαδικασία θρυμματίσματος, ενώ είναι κατάλληλα για όλους τους λέβητες.

Τα συσσωματώματα ξύλου έχουν θερμογόνο δύναμη 17MJ/kg και υγρασία 8% ενώ τα θρύμματα ξύλων έχουν θερμογόνο δύναμη 13MJ/kg και υγρασία 30%. Τα συσσωματώματα ξύλων επιφέρουν

μικρά οφέλη στις τοπικές κοινωνίες καθώς είναι προϊόν βιομηχανίας ενώ παράλληλα έχουν αυξημένο κόστος. Απαιτούν όμως μικρότερο χώρο αποθήκευσης σε σχέση με τα θρύμματα (περίπου το 1/3), έχουν καλύτερη ποιότητα καύσης λόγω της ομοιομορφίας που παρουσιάζουν και λιγότερες απαιτήσεις κατά τη λειτουργία και συντήρηση του λέβητα. Τα θρύμματα ξηρής βιομάζας από την άλλη ενισχύουν την τοπική αγορά, είναι φθηνότερα από τα συσσωματώματα, έχουν όμως μεγάλες απαιτήσεις χώρου αποθήκευσης. Λόγω της έλλειψης ομοιομορφίας των θρυμάτων ξύλου, η ποιότητα της καύσης είναι μειωμένη και για τη λειτουργία και συντήρηση του λέβητα απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό.

Οι λέβητες καύσης στερεάς βιομάζας που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά είναι υψηλής τεχνολογίας και μπορούν να καλύψουν τόσο το φορτίο αιχμής όσο και τα μερικά φορτία. Παρόλα αυτά είναι προτιμότερο κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος θέρμανσης σε κτηριακές εγκαταστάσεις, να προτιμάται η εγκατάσταση δύο έναντι ενός λέβητα σε περίπτωση που υπάρχει έντονη διακύμανση φορτίου. Η διακύμανση του φορτίου εξαρτάται από το προφίλ λειτουργίας του κτηρίου, την κλιματική ζώνη και το ωράριο λειτουργίας. Οι σύγχρονοι λέβητες στερεάς βιομάζας ισχύος από 50÷500kW (40000÷500000kcal/h), παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Απόδοση καύσης μεγαλύτερη από 85%
- Χαμηλές εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και τέφρας σε πλήρες φορτίο.
- Δυνατότητα διακύμανσης της αποδιδόμενης ισχύος ανάλογα με το απαιτούμενο φορτίο.
- Δυνατότητα ελέγχου της καύσης μέσω τηλεχειρισμού.
- Αυτοματοποιημένη λειτουργία για ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων συντήρησης.
- Κατάλληλοι για λειτουργία και σε κτήρια κατοικιών.

Στο σχήμα 4.4 φαίνεται μια διάταξη λέβητα στερεού καυσίμου, ο οποίος τροφοδοτείται με αυτόματο κοχλία συστροφής από παράπλευρο χώρο αποθήκευσης καυσίμου. Η μεταφορά του καυσίμου μπορεί να γίνει επίσης μέσω κεκλιμένων διαδρόμων μεταφοράς. Για λόγους ασφαλείας ο χώρος αποθήκευσης πρέπει να διαχωρίζεται σαφώς από το χώρο του λεβητοστασίου.



Σχήμα 4.4: Διάταξη λέβητα στερεού καυσίμου

Η μεταφορά καυσίμου στους χώρους κατανάλωσης γίνεται με τη χρήση φορτηγών, τα οποία θα πρέπει να έχουν πρόσβαση στο σημείο τροφοδοσίας του χώρου αποθήκευσης. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται διατάξεις αποθήκευσης καυσίμου σε παρόμοιες εγκαταστάσεις.



Σχήμα 4.5: Παραδείγματα αποθήκευσης καυσίμου

Το κόστος των μονάδων λεβήτων με στερεά βιομάζα είναι δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τους συμβατικούς λέβητες πετρελαίου και φυσικού αερίου και κυμαίνεται περίπου στα 120 έως 200 200€/kW, ανάλογα την θερμική ισχύ. Ταυτόχρονα απαιτείται η διαμόρφωση χώρου αποθήκευσης της βιομάζας, κατασκευή η οποία αυξάνει σημαντικά τα αρχικό κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Όσον αφορά στην περιβαλλοντική επιβάρυνση της χρήσης βιομάζας σε συστήματα κεντρικής θέρμανσης, στον πίνακα 4.3. δίνονται συγκριτικά οι εκπομπές ρύπων από καμινάδες λεβήτων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το πετρέλαιο, φυσικό αέριο και θρύμματα ξύλου. Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές για λέβητες ισχύος 500÷600 kW.

Πίνακας 4.3. Έκλυση ρύπων ανά είδος καυσίμου από καύση σε λέβητες (Πηγή: SEI 2003)

Εκπομπές (mg/m ³ καυσαερίων)	SO ₂	NO _x	Τέφρα	CO	NM VOC
Λέβητας πετρελαίου	130	78.2	0	2.3	<3
Λέβητας αερίου	0	44.5	0	14.8	0
Λέβητας συμπύκνωσης αερίου	0	12.2	0	7.4	0
Λέβητας θρυμμάτων ξύλου	27	81	24	6	<1

Το εργαστήριο γεωργίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας φιλοδοξεί να είναι ο πρώτος δημόσιος χώρος της Ελλάδας που θερμαίνεται με στερεά βιομάζα. Όπως είναι γνωστό παρήγαγε, μεταποίησε σε βιομηχανική βάση και σήμερα εφαρμόζει για την θέρμανση του το πρώτο ελληνικό στερεό καύσιμο σε μορφή συσσωματωμάτων (pellets) με πρώτη ύλη την αγριαγκινάρα.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα στα κτήρια, χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) με τυπική τεχνολογία ατμοστροβίλων. Όμως, οι μικρού μεγέθους ατμοστρόβιλοι (<25MW) είναι συνήθως ακριβοί και με μικρές αποδόσεις. Πολύ μεγάλες μονάδες μπορεί να έχουν 30÷40% ηλεκτρική απόδοση. Σήμερα αναπτύσσονται συνεχώς νέας τεχνολογίας συστήματα προκειμένου να αυξηθεί η απόδοσή τους. Στον πίνακα 4.4. δίνονται ενδεικτικές τιμές για διάφορα συστήματα ΣΗΘ με βιομάζα για οικιακή χρήση.

Πίνακας 4.4. Κόστος οικιακών συστημάτων ΣΗΘ με χρήση βιομάζας

Περιγραφή	Κόστος	Παρατηρήσεις
Βιομάζα ΣΗΘ	3500 €/kWe	Η τιμή αφορά συστήματα αεριοποίησης και παροχής βιαερίου σε συμβατικούς κινητήρες.
Βιομάζα ΣΗΘ σε σύνδεση με δίκτυο	2500 €/kWe	Περιλαμβάνεται η δεξαμενή αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας. Για κάθε 1kWh ηλεκτρικής ενέργειας, παράγονται 2kWh θερμικής ενέργειας.
Βιομάζα ΣΗΘ αυτόνομα	5000 €/kWe	Το κόστος διπλασιάζεται λόγω των συσσωρευτών, για αυτονομία περίπου 6 ώρες σε πλήρη ηλεκτρική ισχύ.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με κινητήρες εσωτερικής καύσεως, παρουσιάζουν αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης. Η θερμική ενέργεια ανακτάται από το νερό του κυκλώματος ψύξης της μηχανής, αλλά και από τα καυσαέρια της μηχανής. Ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται, καθορίζεται και η θερμοκρασία μείωσης των καυσαερίων στη έξοδο της μηχανής και κατά συνέπεια η θερμότητα που αξιοποιείται. Οι μονάδες αυτές λειτουργούν με φυσικό αέριο, diesel, προπάνιο, ή βιοαέριο. Υπάρχουν επίσης τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ξηρή βιομάζα με επικρατέστερο καύσιμο το πυρηνόξυλο λόγω της υψηλής του θερμογόνου δύναμης. Στον πίνακα 4.5 δίνονται συγκριτικά στοιχεία για τη θερμογόνο δύναμη των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ΣΗΘ αλλά και ενδεικτικά κόστη αγοράς για το 2011.

Πίνακας 4.5. Χαρακτηριστικά και κόστος αγοράς καυσίμων ΣΗΘ (τιμές για έτος 2011)

Είδος καυσίμου	Θερμογόνος δύναμη	Κόστος	Ενδεικτικό κόστος (€/kWh)
Πετρέλαιο κίνησης	8700kcal/lt	1,52€/lt	0,150
Πετρέλαιο θέρμανσης	8400kcal/lt	0,92€/lt	0,091
Φυσικό αέριο	8900kcal/m ³	0,72€/m ³	0,073
Προπάνιο	10300kcal/kg	0,65€/kg	0,085
Πυρηνόξυλο	3700kcal/kg	0,045€/kg	0,010
Βιαέριο	2500÷5500kcal/m ³	Ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής	
Βιομάζα	3000÷4000kcal/kg	0,09€/kg	0,021
Τυποποιημένη Βιομάζα	3500÷5000kcal/kg	0,30€/kg	0,070

Τα συστήματα ΣΗΘ έχουν ισχύ από μερικά kW έως 2MW και για το λόγο αυτό θεωρούνται κατάλληλα για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε κατοικίες, επιχειρήσεις, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εργοστάσια κ.λπ.. Τα συστήματα ΣΗΘ εσωτερικής καύσεως μπορούν να λειτουργούν συνεχώς χωρίς μεγάλο θόρυβο, δεν παρουσιάζουν προβλήματα κατά τις μεταβολές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό και φτάνει περίπου στα 500€/kW_e (εκτός στερεάς βιομάζας), έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης, μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 60000h) και μπορούν να εγκατασταθούν και να τεθούν σε λειτουργία σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα εξαρτάται από τον τύπο της μονάδας, τη δυναμικότητα, το βαθμό απόδοσης, το κόστος της βιομάζας, τη λειτουργία και τη διάρκεια ζωής της μονάδας.

Για τη χρήση συστημάτων βιομάζας σε κτήρια, επισημαίνεται ότι υπάρχει η υπουργική απόφαση 103/1993/Β-369 που αφορά τις σταθερές εστίες καύσης για θέρμανση κτηρίων και ζεστού νερού χρήσης. Στο άρθρο 2, (παράγραφος 1) της απόφασης αυτής προβλέπεται ότι: «Στην περιοχή του ηπειρωτικού τμήματος του νομού Αττικής, στη Σαλαμίνα και στο νομό Θεσσαλονίκης εκτός της περιοχής δυτικά του Γαλλικού ποταμού, για τις εγκαταστάσεις θέρμανσης κτιρίων, βιομηχανικών και βιοτεχνικών χώρων, τα μόνα επιτρεπόμενα καύσιμα είναι το ντίζελ θέρμανσης, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά προδιαγραφές, και αέρια καύσιμα». Η απόφαση αυτή αποκλείει τα κεντρικά συστήματα θέρμανσης με βιομάζα στις δύο μεγάλες αστικές περιοχές, όπου κατοικεί ο μισός πληθυσμός της χώρας. Η απόφαση αυτή ελήφθη το 1993 λόγω της «ανάγκης μείωσης των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων και λήψης των αναγκών για το σκοπό αυτό προληπτικών μέτρων». Ο αποκλεισμός των εφαρμογών βιομάζας έγινε για περιβαλλοντικούς λόγους, αφού την εποχή εκείνη, τα διαθέσιμα συστήματα βιομάζας χαρακτηρίζονταν από σχετικά υψηλές εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Σήμερα τα τεχνολογικά δεδομένα έχουν αλλάξει δραστικά και πλέον υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης της βιομάζας με αισθητά μικρότερες εκπομπές, επιβάλλοντας παράλληλα και μια αναθεώρηση του παλαιότερου καθεστώτος που διέπει τις σταθερές εστίες καύσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αποστολάκης, Μ., Κυρίσης, Σ. και Σούτερ Χ., (1987). Το Ενεργειακό Δυναμικό της Βιομάζας Γεωργικών και Δασικών Υποπροϊόντων, Ινστιτούτο Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΕΛΚΕΠΑ, Αθήνα.
2. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α. (2001). Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα.
3. ΚΑΠΕ 2003. Οδηγός Επενδυτών "Θέρμανση κτηρίων και Κατοικιών με Εφαρμογές Βιομάζας". Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Ευρωπαϊκό πρόγραμμα "Promoting Biomass Heating in Large Buildings and Blocks - BIOHEAT".
4. Κούκιος Μ., "Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας - Βιομάζα". Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ. Αθήνα 2004.<http://www.bioheat.info/>
5. Πανταζής Γεώργιος Δρ. Μηχανολόγος "Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού – Θέρμανσης [ΣΗΘ] ". Τεχνικό Περιοδικό – Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων Μηχανικών. Τεύχος 139, Νοέμβριος 2003.
6. Σούτερ Χ., (1995). Η Βιομάζα και η ενεργειακή της αξιοποίηση. Παραγωγή-δυναμικό. Μηνιαία Τεχνική Επιθεώρηση, Νο 41, Ιούνιος.
7. ΥΠΕΚΑ 2011. Ενεργειακό ισοζύγιο για την Ελλάδα 2008. www.ypeka.gr
8. Υπουργείο Βιομηχανίας Ενέργειας & Τεχνολογίας, ΥΒΕΤ (1989). Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα, Αθήνα.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

9. Borjesson, P.I., Johansson, T.B., (1994). Bioenergy-European Status and Prospects, Proc. Eureka Technology Conferences "Energy for the Future", Lillehammer, Norway, 14-16 June.
10. EVA 2003. Final report of European project: "Promoting Biomass Heating in Large Buildings and Blocks - BIOHEAT". Project 4.1030/Z/00-163/200, in the frame of Altener programme. Vienna 2003. www.bioheat.info
11. European Biomass Industry Association EUBIA - www.eubia.org
12. Gosse G., (1993). The state of biomass energy in the year 2000, European Directory of Renewable Energy Suppliers & Services, Bruce Cross (editor), James & James Science.
13. Hall, D.O., (1993). "Biomass Energy" in Renewable Energy: Prospects for Implementation, T. Jackson (editor). Stockholm Environmental Institut, Energy Policy, Stockholm.
14. Pelkmans, L (1997). "Biodiesel as an alternative motor fuel", CADDET Newsletter, No 3, September.
15. SEI 2003. Brochure for "Wood Fuels for Residential Buildings". Sustainable Energy Ireland, Renewable Energy Information Office. www.bioheat.info

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας – www.cres.gr

European Pellet Centre www.pelletcentre.info

Green Energy – Ecologic Heating System: www.acp-bioenergy.gr/frontend/articles.php?cid=123

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Ενεργειακά φυτά – οδηγό καλλιέργειών: www.scribd.com/doc/16713591

www.biofuels.gr/biomass_burn_1.html

5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ.

Ο γεωθερμικός κλιματισμός (θέρμανση και ψύξη) χώρων με χρήση της θερμότητας της γης άρχισε να αναπτύσσεται σημαντικά τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας την εμφάνιση και την ευρεία διάδοση των αντλιών θερμότητας (heat pumps) [1]. Οι πολλοί διαθέσιμοι τύποι αντλιών θερμότητας επιτρέπουν την εκμετάλλευση με οικονομικό τρόπο του θερμικού περιεχομένου υλικών χαμηλής θερμοκρασίας, όπως είναι το έδαφος ή οι ρηχοί υδροφόροι ορίζοντες και οι τεχνητές ή φυσικές συγκεντρώσεις νερού (θάλασσα, λίμνες, δεξαμενές νερού κλπ). Η αρχή λειτουργίας των γεωθερμικών συστημάτων θέρμανσης & ψύξης κτηρίων, βασίζεται στην εκμετάλλευση της θερμότητας της γης.

Στο υπέδαφος κάθε τόπου η θερμοκρασία παραμένει σχεδόν σταθερή όλο το έτος, χωρίς έντονες διακυμάνσεις. Η θερμοχωρητικότητα των υλικών του υπεδάφους είναι ιδιαίτερα υψηλή και συγκρινόμενη με την θερμοχωρητικότητα του αέρα, που αποτελεί την κύρια πηγή θερμότητας για τις αντλίες θερμότητας που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις κλιματισμού, θεωρείται ότι τείνει στο άπειρο. Αυτό σημαίνει πως δημιουργείται η δυνατότητα άντλησης ή απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας στο υπέδαφος, χωρίς να μεταβάλλονται οι θερμοκρασιακές του συνθήκες.

Οι γεωθερμικές εφαρμογές (κανονικής γεωθερμίας) για θέρμανση/ψύξη κτηρίων αποτελούνται από τρία κύρια μέρη:

- Την αντλία θερμότητας (ΑΘ)
- Τη σύνδεση με τη γη (διατάξεις με εναλλάκτες θερμότητας)
- Το σύστημα διανομής κλιματισμού (θέρμανσης/ψύξης και ζεστού νερού χρήσης) στο εσωτερικό του κτηρίου.

5.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Η αρχή λειτουργίας των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας είναι η αυτή με των εγκαταστάσεων κλιματισμού με πηγή τον αέρα ή με ενδιάμεσο μέσο το νερό με την ιδιαιτερότητα ότι στην περίπτωση της γης το σύστημα κλιματισμού υπόκειται σε ειδικούς περιορισμούς.

Στην Ελλάδα, η μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας του υπεδάφους, σε βάθος $>2\text{m}$, είναι της τάξης των $16\pm 20^{\circ}\text{C}$. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος το θέρος μπορεί να φτάσει και τους $40\pm 42^{\circ}\text{C}$, ενώ το χειμώνα τους $0\pm 2^{\circ}\text{C}$ [2]. Γενικός κανόνας για τον επιτυχή σχεδιασμό των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας, είναι ότι το υπέδαφος ενός τόπου διατηρεί θερμοκρασία ίση με τη μέση τιμή της θερμοκρασίας αέρα σε όλο το έτος, εκτός των περιπτώσεων όπου υφίστανται γεωθερμικές εκτροπές, όπως σε περιοχές γεωθερμικών πεδίων. Στην Ελλάδα οι περιοχές γεωθερμικών πεδίων (εκτροπών) είναι αρκετές και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποχρέωση ειδικών ελέγχων για τον προσδιορισμό των συνθηκών σε κάθε περιοχή.

Η αξία των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας ορίζεται ακριβώς από το γεγονός ότι η σταθερότητα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στο υπέδαφος και η διατήρησή της στη μέση ετήσια τιμή της θερμοκρασίας του αέρα περιβάλλοντος συντελεί στη λειτουργία των αντλιών θερμότητας σε υψηλούς βαθμούς απόδοσης [3-8]. Η λειτουργία των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας και ο βαθμός απόδοσης αυτών εξαρτάται κυρίως από το σχεδιασμό τους και από τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζονται με τις καταναλώσεις των κτηρίων.

Συνεπώς, ο ακριβής και προσεκτικός υπολογισμός των εγκαταστάσεων κεντρικού κλιματισμού και θερμάνσεων, καθώς και η μεθοδολογία αντιμετώπισης των φορτίων θερινού και χειμερινού κλιματισμού ορίζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος, το βαθμό απόδοσης και το ποσοστό κάλυψης των αναγκών κλιματισμού.

5.1.1. Κατανομή θερμοκρασίας στο υπέδαφος.

Η κατανομή της θερμοκρασίας στο υπέδαφος, παίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές κανονικής γεωθερμίας [9]. Η γνώση του τρόπου που κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο υπέδαφος, για οποιοδήποτε τύπο εδάφους, είναι απαραίτητη για τη σωστή και οικονομική-τεχνική εκμετάλλευσης της γεωθερμικής ενέργειας.

Σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να είναι γνωστά για το σχεδιασμό των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας αποτελούν τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά. Τα κυριότερα από αυτά είναι η πυκνότητα των υλικών του υπεδάφους, η ειδική θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα. Αυτά επίσης εξαρτώνται από πολλές άλλες παραμέτρους όπως, το πορώδες, την ύπαρξη νερού, τις αναπτυσσόμενες πιέσεις και την ομοιογένεια των υλικών.

5.1.1.1. Γεωλογικοί παράμετροι που επιδρούν στα θερμικά χαρακτηριστικά εδαφών και πετρωμάτων

Για την εγκατάσταση συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης χώρων μέσω της κανονικής γεωθερμίας, που δε χαρακτηρίζεται ως γεωθερμικό δυναμικό, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των τιμών θερμικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων και των εδαφών και πετρωμάτων [1]. Οι γεωλογικοί παράμετροι και οι θερμικές ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό των θερμικών χαρακτηριστικών εδαφών και πετρωμάτων είναι:

1. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών.
2. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων.
3. Η πραγματική πυκνότητα ή ειδικό βάρος (particle or true density).
4. Η φαινόμενη πυκνότητα ή το βάρος ανά μονάδα όγκου (bulk density).
5. Το πορώδες του εδάφους (porosity).
6. Η υγρασία του εδάφους (soil moisture content).
7. Η ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό (volumetric water content).
8. Η ειδική θερμότητα (specific heat capacity).
9. Η ειδική θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity).
10. Η ειδική θερμική διαχυτότητα (thermal diffusivity).

5.1.1.2. Σχέσεις που συνδέουν τις φυσικές και θερμικές ιδιότητες των εδαφών

Η μέση ειδική θερμοχωρητικότητα των εδαφών (mean specific heat capacity "C" (J/m³/K)) μπορεί να αποδοθεί ως το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων των συστατικών από τα οποία αποτελείται το έδαφος. Αν "m_s", "m_w", "m_a", και "m_o" είναι οι μάζες (kg) των στερεών συστατικών του εδάφους, του εδαφικού νερού, του αέρα που περιέχεται στο έδαφος και της οργανικής ύλης αντίστοιχα, τότε ισχύει [16]:

$$C = m_s \times c_s + m_w \times c_w + m_a \times c_a + m_o \times c_o \quad (5.1)$$

όπου:

- "c_s" είναι η ειδική θερμότητα (J/kg/K) του ξηρού εδάφους
- "c_w" είναι η ειδική θερμότητα (J/kg/K) του νερού που περιέχεται στους πόρους του εδάφους,
- "c_a" η ειδική θερμότητα (J/kg/K) αέρα που υπάρχει στους πόρους,
- "c_o" είναι η ειδική θερμότητα (J/kg/K) της οργανικής ύλης του εδάφους.

Η ειδική θερμότητα " c_s " των ξηρών εδαφών σύμφωνα με την ASHRAE [6,14], μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για τις περισσότερες κατηγορίες εδαφών, στην τιμή των $0,73\text{kJ/kg/K}$. Η παραδοχή αυτή επιτρέπει να ληφθούν στους υπολογισμούς ως κύριοι παράγοντες επηρεασμού, η υγρασία και η φαινόμενη πυκνότητα των εδαφών, οι τιμές των οποίων μεταβάλλονται ανάλογα με τον τύπο εδάφους, σύμφωνα με την κλασσική ταξινόμηση εδαφών (αμμώδες, πηλοαμμώδες, αμμοπηλώδες, πηλώδες, ιλυοπηλώδες, ιλυώδες, ιλυοαργιλοπηλώδες, αργιλοπηλώδες, αμμοαργιλοπηλώδες, αμμοαργιλώδες, ιλυοαργιλώδες, αργιλώδες). Στον πίνακα 5.1 δίνονται ενδεικτικές τιμές της ειδικής θερμότητας c (J/kg/K) διαφόρων υλικών τα οποία αποτελείται το έδαφος.

Πίνακας 5.1: Ενδεικτικές τιμές των θερμικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών

Υλικό	Φαινόμενη πυκνότητα ($\cdot 10^3 \text{kg/m}^3$)	Ειδική θερμότητα (J/kg/K)	Θερμοχωρητικότητα ($\cdot 10^3 \text{J/m}^3/\text{K}$)	Θερμική αγωγιμότητα (W/m/K)
Χαλαζίας	2,65	733	1942	8,4
Εδάφη	2,65	733	1942	2,9
Εδάφη με οργανική ύλη	1,30	1926	2503	0,25
Νερό	1,00	4186	4186	0,6
Πάγος	0,900	2093	1883	2,5
Αέρας	0,0012	1005	1,20	0,026

Για τον υπολογισμό του δυνητικού θερμικού δυναμικού σε κάθε περιοχή γίνεται χρήση γεωλογικών χαρτών. Σκοπός είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα εγκατάστασης ανοικτού ή κλειστού συστήματος ψύξης – θέρμανσης, μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας επιφανειακών, υπόγειων νερών και γεωλογικών σχηματισμών, που δεν χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό.

Από το σύνολο των πετρωμάτων που συγκροτούν την πετρολογία, επιλέγονται αυτά που έχουν την μεγαλύτερη εξάπλωση και αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής του έργου. Για τη δημιουργία υπολογιστικής βάσης με συγκρίσιμα αποτελέσματα, θεωρείται ότι κάθε πέτρωμα ή ενότητα πετρωμάτων είναι ισότροπο ως προς τη θερμική αγωγιμότητα και θερμική χωρητικότητα σε όλο τον όγκο του. Σε περιπτώσεις που η επιλογή του κυρίαρχου πετρολογικού τύπου για τον υπολογισμό δεν είναι δυνατή, πρέπει να διατηρηθούν οι ενότητες των γεωλογικών χαρτών (π.χ. ηφαιστειακά πετρώματα). Η εκάστοτε πετρολογική ενότητα θεωρείται ότι έχει ενιαία τιμή θερμική αγωγιμότητα και θερμική χωρητικότητα με ισότροπο χαρακτήρα.

Στον πίνακα 5.2 δίνονται ενδεικτικές τιμές για την ειδική αγωγιμότητα k (W/m/K) και ειδική θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου διαφόρων εδαφικών υλικών ($\text{MJ/m}^3/\text{K}$). Ο υπολογισμός όγκου για κάθε πέτρωμα ή ενότητα πετρωμάτων γίνεται μέχρι το βάθος των 100m με εμβαδόν την επιφανειακή τους εμφάνιση. Η επιφανειακή αποτύπωση των πετρωμάτων γίνεται μετά από επιτόπια έρευνα. Οι αναφορές στην υδροφορία πρέπει να βασίζονται σε στοιχεία πεδίου.

Πίνακας 5.2 Θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητα εδαφικών υλικών

α/α	Τύπος πετρώματος	Ειδική θερμική Αγωγιμότητα k (W/m/K)			Ειδική θερμοχωρη- τικότητα C (MJ/m ³ /K)
		ελάχιστη	τυπική	μέγιστη	
	Μαγματικά πετρώματα				
1	Βασάλτης- ηφαιστειακό	1,3	1,7	2,3	2,3÷2,8
2	Διορήτης- ηφαιστειακό	2,0	2,6	2,9	2,9
3	Γάββρος – ηφαιστειακό	1,7	1,9	2,5	2,6
4	Γρανίτης - πλουτωνικό	2,1	3,4	4,1	2,1÷3,0
5	Περιδοτίτης - πλουτωνικό	3,8	4,0	5,3	2,7
6	Ριόλιθος - ηφαιστειακό	3,1	3,3	3,4	2,1
	Μεταμορφωμένα πετρώματα				
1	Γνεύσιος – πρόκειται για μεταμορφωμένο γρανίτη	1,9	2,9	4,0	1,8÷2,4
2	Μάρμαρο	1,3	2,1	3,1	2,0
3	Μεταχαλαζίτες – πρόκειται για μεταμορφωμένα πετρώματα με μεταμόρφωση σε μεγάλες θερμοκρασίες		≈5,8		2,1
4	Μαρμαρυγιακός σχιστόλιθος	1,5	2,0	3,1	2,2
5	Αργιλικός σχιστόλιθος	1,5	2,1	2,1	2,2÷2,5
	Ιζηματώδη πετρώματα				
1	Ασβεστόλιθος	2,5	2,8	4,0	2,1÷2,4
2	Μάργες	1,5	2,1	3,5	2,2÷2,3
3	Χαλαζίτες	3,6	8,0	6,8	2,1÷2,2
4	Ορυκτό αλάτι	5,3	5,4	6,4	1,2
5	Ψαμμίτης	1,3	2,3	5,1	1,6÷2,8
6	Σχιστόλιθοι και ιλυόλιθοι	1,1	2,2	3,5	2,1÷2,4
	Μη σταθεροποιημένα πετρώματα				
1	Χαλίκια σε ξηρή κατάσταση	0,4	0,4	0,5	1,4÷1,6
2	Χαλίκια σε κορεσμό νερού		≈1,8		≈2,4
3	Μορραίνες αφορά χαλίκια σε παγετώδεις αποθέσεις	1,0	2,0	2,5	1 5÷2,5
4	Ξηρή άμμος	0,3	0,4	0,8	1,3÷1,6
5	Υγρή άμμος	1,7	2,4	5,0	2,2÷2,9
6	Άργιλος/ ιλύς	0,4	0,5	1,0	1,5÷1,6
7	Άργιλος / ιλύς σε υγρή κατάσταση	0,9	1,7	2,3	1, 6÷3,4
8	Τύρφη – αφορά ηφαιστειακές αποθέσεις	0,2	0,4	0,7	0,5÷3,8
	Άλλα πετρώματα & υλικά				
1	Μπεντονίτης – ορυκτό αργίλου με δυνατότητα προσρόφησης νερού και διόγκωσης μορίου	0,5	0,6	0,8	≈3,9
2	Τσιμέντο	0,9	1,6	2,0	≈1,8
3	Πάγος (-10°C)		2,32		1,87
4	Πλαστικό (pe)		0,39		-
5	Αέρας (0-20° C), Ξηρός		0,02		0,0012
6	Χάλυβας		60		3,12
7	Νερό (+10°C)		0,58		4,19

5.1.2. Κωδικοποίηση των γήινων υπεδάφικών υλικών για θερμική αξιοποίηση

Για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους γεωθερμικού εναλλάκτη πρέπει να ληφθούν υπόψη ο τύπος εδάφους (τύπος εδάφους, τύπος πετρώματος, υδραυλικές συνθήκες κ.λπ.) και οι ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου (πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3 Αναμενόμενες αποδόσεις κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών σε εδάφη και πετρώματα για θέρμανση και ψύξη (γερμανικοί κανονισμοί DIN)

Υλικά Τυποποιημένες τιμές	Ειδική θερμική απόδοση	
	Για 1800h λειτουργίας εποχιακά (W/m)	Για 2400h λειτουργίας εποχιακά (W/m)
Φτωχό υπέδαφος (ξηρό ίζημα) ($k < 1,5 \text{ W/mK}$)	25	20
Κανονικό στρώμα βράχου (διαποτισμένο ίζημα, $k = 1,5 \sim 3,0 \text{ W/mK}$)	60	50
Στρώμα βράχου με υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($k > 3,0 \text{ W/mK}$)	84	70
Τύποι πετρών/πετρωμάτων:		
Αμμοχάλικο, άμμος, ξηρό	<25	<20
Αμμοχάλικο, άμμος, υγρό	65÷80	55÷65
Αμμοχάλικο και άμμος με το ισχυρό ρεύμα υπόγειου νερού, για τα ενιαία συστήματα	80÷100	80÷100
Άργιλος, loam, υγρασία	35÷50	30÷40
Ασβεστόλιθος (στερεός)	55÷70	45÷60
Ψαμμίτης	65÷80	55÷65
Όξινο βράχος (π.χ. γρανίτης)	65÷85	55÷70
Όξινο βράχος (π.χ. Βασάλτης)	40÷65	35÷55
Gneiss	70÷85	60÷70

Χαρακτηριστικές συγκεκριμένες ικανότητες αφαίρεσης για τους εναλλάκτες θερμότητας γεωτρήσεων (διπλού U σωλήνες) VDI 4640 part 2

Στον πίνακα 5.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές των γερμανικών κανονισμών DIN για τον απαιτούμενο αριθμό και το μήκος γεωθερμικών εναλλακτών ανάλογα τη θερμική αγωγιμότητας (W/m/K) του εδάφους. Το ενεργό μήκος είναι το μήκος ανά σωλήνα U.

Πίνακας 5.4 Επίδραση της θερμικής αγωγής του υπεδάφους στον αριθμό και το μήκος των γεωθερμικών εναλλακτών (γερμανικοί κανονισμοί DIN)

Θερμική Αγωγιμότητα W/m/K	Αριθμός U-tube	Ενεργό Μήκος U-tube (m)	Συνολικό Μήκος (m)
0,952	16	60,67	970
1,211	15	57,32	860
1,471	14	57,01	798
1,730	12	61,59	739
2,076	12	57,32	688
2,336	12	54,88	659
2,595	10	64,63	646

5.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Για την εκμετάλλευση του εδάφους ως πηγή θερμότητας (ή απόρριψη θερμότητας) χρησιμοποιούνται οι παρακάτω διατάξεις:

- Κλειστά Συστήματα. Είναι οι γεωθερμικοί εναλλάκτες κλειστού κυκλώματος που σκοπό έχουν την συναλλαγή θερμότητας με το έδαφος. Είναι κατασκευασμένοι από δίκτυα σωληνώσεων εντός του εδάφους όπου κυκλοφορεί διάλυμα νερού - γλυκόλης.
- Ανοιχτά συστήματα. Βασίζονται στην άντληση των υπεδαφικών ή επιφανειακών υδάτων και εκμετάλλευση της περιεχόμενης σε αυτά θερμικής ενέργειας.

5.2.1. Κλειστά συστήματα

5.2.1.1. Οριζόντιοι Γεωθερμικοί Εναλλάκτες θερμότητας

Στην εγκατάσταση αυτή δημιουργείται συναλλαγή θερμότητας με το έδαφος τοποθετώντας σωλήνες κατάλληλης διαμέτρου σε οριζόντια διάταξη. Ο τρόπος τοποθέτησης μπορεί να είναι είτε σε ενιαία οριζόντια εκσκαφή είτε σε τάφρους. Η τοποθέτηση γίνεται σε βάθος από 1.0÷5,0m με πυκνότητα 0,5÷1m ή σε σπείρες. Η επίδραση μεταξύ δυο παραλλήλων σωληνώσεων εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών του εδάφους. Στην περίπτωση του οριζόντιου εναλλάκτη σημαντική αξία έχει και ο όγκος του αποθηκευμένου νερού, εντός του εναλλάκτη.

Ο οριζόντιος εναλλάκτης συνιστάται σε κατασκευές με επάρκεια περιβάλλοντα χώρου και για μη βραχώδη εδάφη. Πλεονέκτημα αποτελεί η ευκολία κατασκευής και το χαμηλό κόστος. Η αναμενόμενη απόδοση του οριζοντίου εναλλάκτη για απόσταση μεταξύ δυο οριζοντίων σωλήνων ίση με 1m και βάθος 1m δεν μπορεί να είναι μικρότερη των 15W/m μήκους ή αντίστοιχα ανά τμ επιφανείας. Στις εικόνες του σχήματος 5.1 παρουσιάζονται δυο εν δυνάμει τρόποι τοποθέτησης των οριζοντίων γεωεναλλακτών. Η περίπτωση β, χρησιμοποιείται και ως δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας εντός του εδάφους.



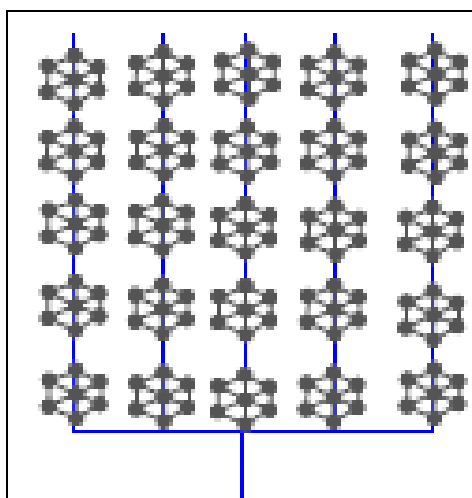
Σχήμα 5.1 Διάταξη τοποθέτησης οριζοντίων γεωθερμικών εναλλακτών, σε παράλληλα κυκλώματα (α) και σε κυκλικές τοποθετήσεις (β), [88].

5.2.1.2. Κατακόρυφοι Γεωθερμικοί Εναλλάκτες θερμότητας

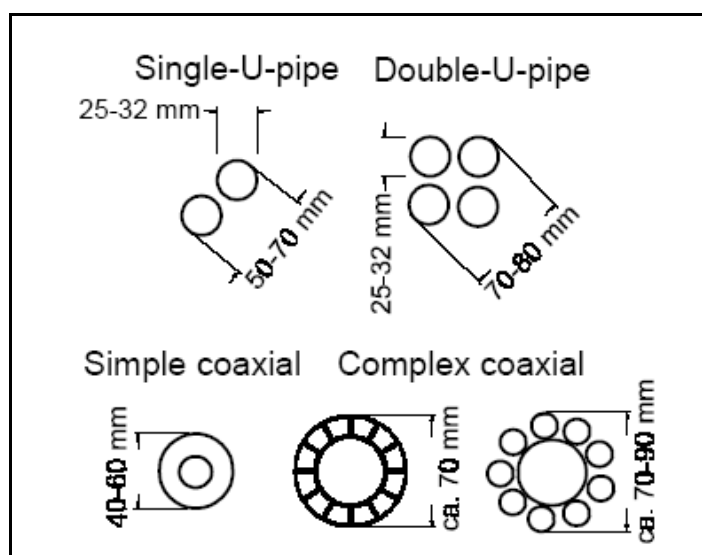
Για την συναλλαγή θερμότητας με το υπέδαφος όταν οι συνθήκες δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση οριζόντιου συστήματος, χρησιμοποιείται ο κατακόρυφος εναλλάκτης. Η ανάπτυξη του Για τη συναλλαγή θερμότητας με το υπέδαφος όταν οι συνθήκες δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση οριζόντιου συστήματος, χρησιμοποιείται ο κατακόρυφος εναλλάκτης. Η ανάπτυξη του γεωθερμικού εναλλάκτη γίνεται με σωλήνες κατακόρυφα εντός γεωτρήσεων διαμέτρου 6”÷8” και βάθους μέχρι

120m. Το πλήθος των γεωτρήσεων είναι συνάρτηση της ισχύος της εγκατάστασης. Οι κατακόρυφοι γεωεναλλάκτες εφαρμόζονται σε εγκαταστάσεις με περιορισμένο περιβάλλοντα χώρο ανεξαρτήτως σύστασης υπεδάφους.

Η απόσταση μεταξύ των γεωεναλλακτών εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και τον καταμερισμό των φορτίων. Περιοχές με ομοιόμορφα φορτία, π.χ. μόνο θέρμανση ή μόνο θερινό κλιματισμό κατά τη μεγαλύτερη περίοδο του έτους, δημιουργούν προϋποθέσεις με δυσμενή επίδραση και μεγιστοποίηση της απόστασης των κατακόρυφων εναλλακτών. Το κυριότερο εκ των θερμικών χαρακτηριστικών αυτών είναι η θερμική διαχυτότητα. Γενικά, απόσταση μεγαλύτερη των 7m αποτελεί απόσταση ασφάλειας για περιοχές με ισοδύναμη ετήσια μεταβολή του φορτίου. Η ελάχιστη απόδοση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 30W/m βάθους. Στα σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζεται ο τρόπος τοποθέτησης των κατακόρυφων γεωεναλλακτών και ο τρόπος τοποθέτησης των σωληνώσεων εντός αυτών.



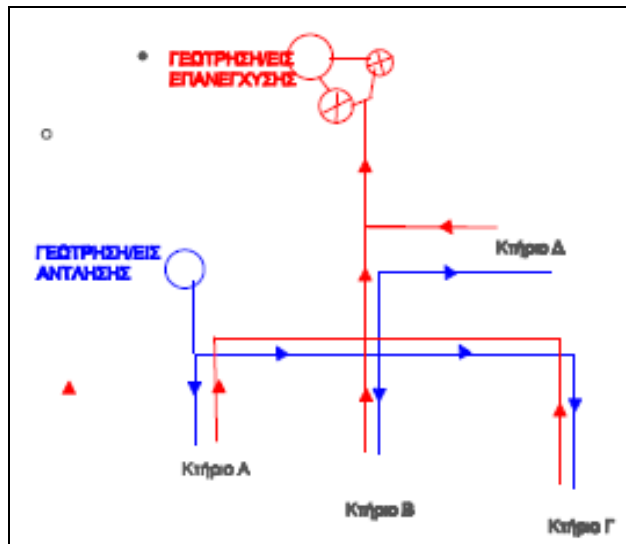
Σχήμα 5.2 Διάταξη συστοιχίας κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών [8β].



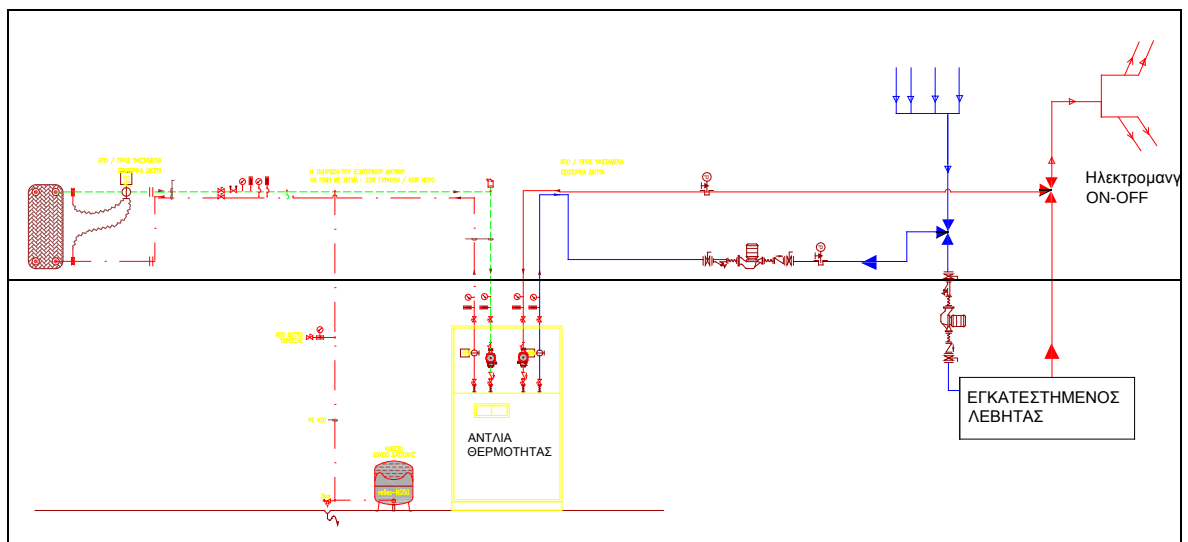
Σχήμα 5.3 Τύποι κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών με βάση τη διάταξη των αγωγών [24, 8β]

5.2.2. Δίκτυα Ανοικτού Κυκλώματος

Χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η άντληση υπογείων υδάτων και η θερμική εκμετάλλευσή τους με την απόρριψη ή απορρόφηση θερμότητας. Το νερό αντλείται από τον υδροφόρο ορίζοντα του υπεδάφους, μπορεί όμως να είναι και θαλασσινό νερό ή νερό παρακείμενης λίμνης ή ποταμού. Μετά τη χρήση του το νερό επιστρέφει πίσω στην πηγή. Η χρήση της μεθόδου αυτής προτείνεται για περιοχές με πλούσια υδροφορία και όταν η κατώτερη στάθμη άντλησης από γεώτρηση δεν υπερβαίνει τα 50m. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται διάταξη ανοικτού κυκλώματος με γεωτρήσεις άντλησης και επανέγχυσης.



Σχήμα 5.4 Διάταξη γεωθερμικού συστήματος ανοικτού κυκλώματος [8β]..



Σχήμα 5.5. Σύνδεση γεωθερμικού ανοικτού συστήματος σε υφιστάμενη διάταξη λεβητοστασίου με διατήρηση της πρότερης κατάστασης[8β].

5.2.3. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί και ο ρόλος τους στη λειτουργία της υπεδαφικής θερμικής αποθήκης

Το υπέδαφος συνίσταται από εδαφικούς σχηματισμούς (τα πρώτα μέτρα κοντά στην επιφάνεια) και από πετρώματα.

Εδαφικοί σχηματισμοί

Το έδαφος αποτελείται από στερεά, υγρά και αέρια συστατικά. Τα στερεά συστατικά δεν καλύπτουν όλο τον όγκο του εδαφικού σχηματισμού, αλλά μέρος αυτού. Το υπόλοιπο αποτελείται από πόρους, δηλαδή από ενδιάμεσους χώρους διαφορετικών διαστάσεων οι οποίοι καταλαμβάνονται από τα υγρά και αέρια συστατικά.

Σε μια δοκιμή θερμικής απόκρισης, ορισμένο θερμικό φορτίο εφαρμόζεται στον κάθετο εναλλάκτη θερμότητας και μετράται η θερμοκρασία που εισέρχεται και η θερμοκρασία που εξέρχεται σε χρονικό διάστημα τουλάχιστον 50 ωρών.

Ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας βασίζεται στη θεωρία της γραμμικής πηγής [Ingersoll and Plass, 1948]. Μια πιθανή προσέγγιση είναι η εξίσωση που ανέπτυξαν οι Eklof and Gehlin (1996):

$$k_{\text{eff}} = \frac{q}{4\pi \times H \times K} \quad (5.2)$$

όπου: q είναι η ποσότητα θερμότητας που απορροφάται ή απορρίπτεται (W), k_{eff} είναι η μέση θερμική αγωγιμότητα του υπεδαφικού σχηματισμού (W/mK), K η κλίση της λογαριθμικής καμπύλης της θερμοκρασίας με το χρόνο και H το μήκος του κάθετου γεωθερμικού εναλλάκτη (m).

Το θεωρητικό υπόβαθρο για τις δοκιμές θερμικής απόκρισης υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες, ωστόσο, οι πρώτες εφαρμογές έγιναν το 1995 στο πανεπιστήμιο της Lulea στη Σουηδία και το 1996 στο πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι υπολογίζει επιτυχώς τη θερμική αγωγιμότητα του εδάφους. Παρουσιάζει όμως τα εξής προβλήματα:

1. Η παρουσία ροής υπεδαφικού νερού έχει μεγάλη επίδραση στην ακρίβεια των μετρήσεων
2. Δεν υπολογίζει ξεχωριστά τη θερμική αγωγιμότητα του κάθε τύπου εδάφους ή πετρώματος που συνθέτουν το υπέδαφος.

Αν το έδαφος θεωρηθεί ως ομογενές μέσο με σταθερές ιδιότητες, τότε το θερμικό φορτίο (E_0) που περιέχεται σε μια έκταση A (m^2), και για βάθος z (m), είναι:

$$E_0 = C \times \Delta T \quad (5.3)$$

όπου: C είναι η θερμοχωρητικότητα ($\text{J/m}^3\text{K}$) του μέσου και ΔT η μέση διαφορά θερμοκρασίας (K) της επιφάνειας (T_{surf}) και της θερμοκρασίας (K) σε βάθος z (T_z).

Θερμότητα προσδίδεται στο έδαφος, λόγω της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και των βαθύτερων στρωμάτων.

$$T = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} * e^{-\text{Depth} * \sqrt{\frac{\pi}{365} * \frac{1}{a}}} * \cos\left\{\frac{2\pi}{365} * \left[t_{\text{now}} - t_{\text{shift}} - \frac{\text{Depth}}{2} * \sqrt{\frac{\pi}{365} * \frac{1}{a}}\right]\right\} \quad (5.4)$$

όπου: T είναι η θερμοκρασία του υπεδάφους (K), T_{mean} η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια (K), T_{amp} η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους (K), $Depth$ το βάθος κάτω από την επιφάνεια (m), t_{now} είναι η τρέχουσα χρονική στιγμή (ημέρα) κατά την οποία εφαρμόζεται η σχέση, t_{shift} είναι η ημέρα με την ελάχιστη θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους, α η θερμική διαχυτότητα του εδάφους (m^2/s).

Η γνώση των φυσικών και θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους, σε συνδυασμό με την κατανόηση των μηχανισμών μετάδοσης της θερμικής ενέργειας είναι απαραίτητες για την πιο αποδοτική αξιοποίηση της θερμότητας του υπεδάφους.

5.2.4. Μέθοδος προσδιορισμού της αποδοτικότητας του υπεδάφους

Επειδή κατά την ανάλυση των θερμικών ιδιοτήτων των υπεδάφικών υλικών δεν είναι δυνατή η πλήρης και στο συγκεκριμένο σημείο με ακρίβεια εκτίμηση των μεγεθών, σε εγκαταστάσεις μεγάλου εύρους, ή και σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος κρίνεται χρήσιμη η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου θερμικής απόκρισης (Thermal Response Test).

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο σε μερικούς από τους κατακόρυφους γεωθερμικούς εναλλάκτες, αλλά και σε μερικά από τα εν δυνάμει χρησιμοποιούμενα οριζόντια δίκτυα εναλλακτών προηγούνται μετρήσεις θερμικής απόκρισης. Συνδέεται το δίκτυο με συσκευή παραγωγής κλιματισμένου νερού και εισάγεται στον εναλλάκτη θερμότητας με συνεχή μέτρηση της θερμοκρασίας εξόδου και της θερμικής ροής. Μετά το πέρας των μετρήσεων οι οποίες διαρκούν από 24 έως 48 ώρες

Από τις μετρήσεις που εκτελούνται δίνεται η δυνατότητα να μετρηθούν και προβλεφθούν θερμικές συμπεριφορές του υπεδάφους περίξ του γεωθερμικού εναλλάκτη σε βάθος χρόνου. Προσδιορίζονται δηλαδή η μέση ειδική θερμότητα, η μέση ειδική θερμική αγωγιμότητα και η μέση θερμική διάχυση των υλικών.

5.3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

Οι αντλίες θερμότητας είναι συσκευές που λειτουργούν όπως τα κοινά ψυγεία. Κάθε ψυκτική συσκευή αντλεί θερμότητα από ένα χώρο που πρέπει να παραμείνει σε χαμηλή θερμοκρασία και την απελευθερώνει σε χώρο με υψηλότερη θερμοκρασία. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στην αντιστρέψιμη λειτουργία των αντλιών θερμότητας, δηλαδή στην ικανότητά τους να παρέχουν τόσο ψύξη όσο και θέρμανση.

Με τις αντλίες θερμότητας της γης, αξιοποιείται η καλούμενη περιβαλλοντική θερμική ενέργεια, αυτή δηλαδή που περιέχεται στις μάζες του άμεσου περιβάλλοντος του κτηρίου, δηλαδή στις αέριες, στις υδάτινες και στις εδαφικές-υπεδαφικές (λιθογραφικές).

Επειδή, ο συντελεστής απόδοσης της Α.Θ. εξαρτάται κατά σημαντικό ποσοστό από τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, δηλαδή του περιβάλλοντα αέρα ή της διαθέσιμης λιθογραφικής μάζας, η τιμή του COP δεν είναι σταθερή.

Επίσης, επισημαίνεται, ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της πηγής θερμότητας στο διάστημα $0^{\circ}\div 30^{\circ}\text{C}$ και όσο περισσότερο αυτή πλησιάζει τη θερμοκρασία χρήσης, τόσο υψηλότερος είναι και ο συντελεστής COP (EER) [1]. Συνεπώς σε μια αντλία θερμότητας διακρίνονται:

- Ο συντελεστής COP, που εκφράζει την απόδοση της αντλίας θερμότητας με καθορισμένες θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος και λειτουργίας. Είναι η θεωρητική τιμή του COP, που δίνεται από τον κατασκευαστή της αντλίας θερμότητας.

- Ο ετήσιος ή εποχιακός συντελεστής SCOP (SEER), που δίνεται από το λόγο της θερμικής ενέργειας, που παράγαγε η αντλία θερμότητας, προς την ενέργεια που κατανάλωσε μέσα σε ένα έτος ή σε μια εποχή λειτουργίας θέρμανσης ή και ψύξης. Όταν διατίθενται μετρήσεις ορισμένων ετών λειτουργίας, προσδιορίζεται ο μέσος ετήσιος συντελεστής συμπεριφοράς SCOP (COP_m) της αντλίας θερμότητας. Επίσης ο μέσος εποχικός συντελεστής συμπεριφοράς (Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER), όταν διατίθενται μετρήσεις ορισμένων μηνών λειτουργίας⁽¹⁾.

Δεύτερος παράγοντας οικονομικής απόδοσης της αντλίας θερμότητας είναι η συνολική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παράγει στη διάρκεια ενός έτους. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από το ενεργειακό δυναμικό της πηγής, δηλ. της διατιθέμενης αέρας, υδάτινης ή λιθογραφικής μάζας και το ύψος και το είδος των θερμικών αναγκών του κτηρίου.

Και οι δυο αυτοί παράγοντες είναι, σε σχέση με τις χώρες της δυτικής και βόρειας Ευρώπης, ευνοϊκότεροι στην Ελλάδα. Συνεπώς, τα κίνητρα για να αναπτυχθεί η χρήση αντλιών θερμότητας είναι ισχυρότερα, όπως θα αναπτυχθεί και παρακάτω. Οι υπεδαφικές θερμοκρασίες του ελληνικού χώρου μπορούν να γίνουν γνωστές τόσο από τις μέσες ετήσιες θερμοκρασίες του αέρα, όσο και από άμεσες μετρήσεις, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί σε υπόγεια νερά.

Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας φιλική προς το περιβάλλον. Η αξιοποίηση της κανονικής γεωθερμικής ενέργειας αποτελεί μεταξύ άλλων αποδοτική εφαρμογή σε συστήματα κλιματισμού κτηρίων (θέρμανση-δροσισμός), παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, σε εφαρμογές στη γεωργία, στην ιχθυοκαλλιέργεια και σε οικονομικά ελκυστικά συστήματα αφαλάτωσης νερού.

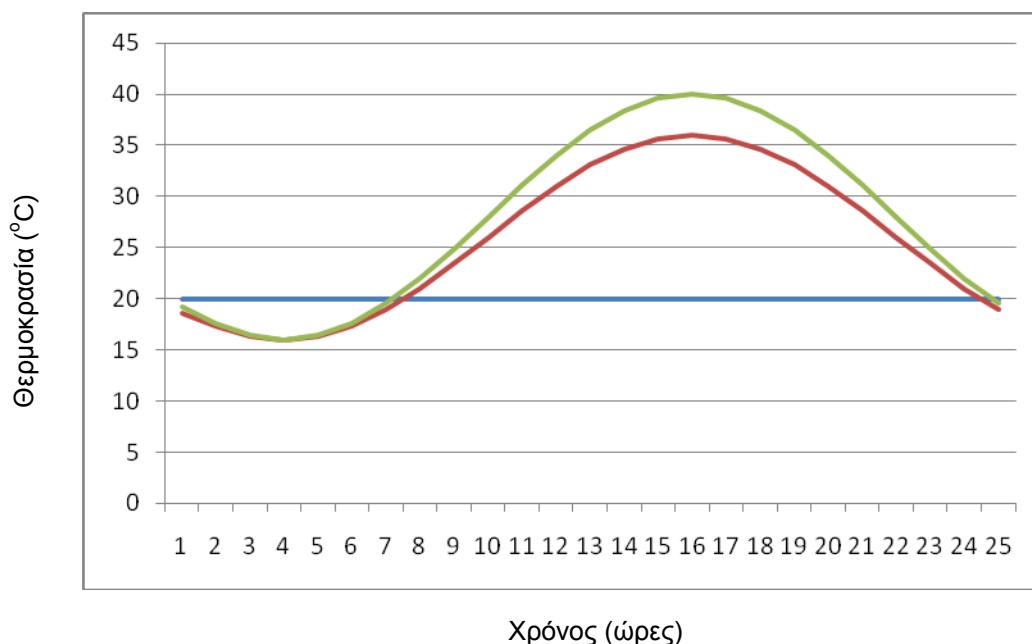
Η εφαρμογή συστημάτων θέρμανσης - ψύξης χώρων με χρήση της θερμότητας των πετρωμάτων και του υπόγειου νερού, παρουσιάζει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, τα οποία είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα.

Ένα γεωθερμικό σύστημα αξιοποιεί την εντός του εδάφους υπάρχουσα σταθερή θερμοκρασία. Έτσι το χειμώνα, το ρευστό που κυκλοφορεί στο γεωθερμικού εναλλάκτη απορροφά τη θερμότητα του εδάφους και την αποδίδει στο κτήριο. Το δε θέρος, λειτουργώντας αντίστροφα απάγει τη θερμότητα από το κτήριο και μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη την αποδίδει στο δροσερότερο έδαφος. Με δεδομένο το σταθερό ενεργειακό δυναμικό που παρουσιάζεται, τόσο στα πετρώματα μικρού βάθους, όσο και τα νερά του υδροφόρου ορίζοντα, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση τέτοιων συστημάτων εξασφαλίζει οικονομικότερη λειτουργία έως και 60%, ανάλογα με το αν πρόκειται για θέρμανση ή ψύξη αντίστοιχα.

⁽¹⁾ Ο COP (συντελεστής απόδοσης θερμότητας), EER (παράγοντας απόδοσης ψύξης), και ο SEER (αναλογία ενεργειακής αποδοτικότητας εποχική- περιόδου) περιγράφουν την αποδοτικότητα θέρμανσης και ψύξης των κλιματιστικών μηχανημάτων. Δείχνουν την αναλογία της θέρμανσης ή της ψύξης που παρέχεται από μια μονάδα σχετικά με το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για να την παραγάγει. Κατά συνέπεια, εάν ένα κλιματιστικό μηχάνημα παράγει 5kW της θερμότητας από 1kW ηλεκτρική εισαγωγή, ο COP είναι 5. Ομοίως, εάν ένα κλιματιστικό μηχάνημα παράγει 5kW της ψύξης από μια 1kW ηλεκτρική εισαγωγή EER είναι 5. Όσο υψηλότερος είναι ο COP και το EER, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερος είναι ο εξοπλισμός.

5.4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ

Για τον υπολογισμό των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα βασικά χαρακτηριστικά των συνθηκών λειτουργίας. Μια εγκατάσταση κανονικής γεωθερμίας είναι από τη φύση της εγκατάσταση με μεγάλο αρχικό κόστος κατασκευής και συνεπώς πρέπει να αξιοποιείται τα μέγιστα από τους χρήστες και με τη βέλτιστη απόδοση. Η βέλτιστη απόδοση των συστημάτων χρήσης των αντλιών θερμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των "δοχείων" άντλησης και απόρριψης της θερμικής ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις γεωθερμίας, κατά την περίοδο λειτουργίας των εγκαταστάσεων κλιματισμού εξασφαλίζουν σε ότι αφορά το εξωτερικό περιβάλλον, την για αρκετό χρονικό διάστημα ικανή συνθήκη, συγκρινόμενες με άλλου τύπου διατάξεις. Η συνθήκη αυτή επιβεβαιώνεται σε διατάξεις συνεχούς λειτουργίας, 24ωρης, και σε διατάξεις θερινής λειτουργίας.

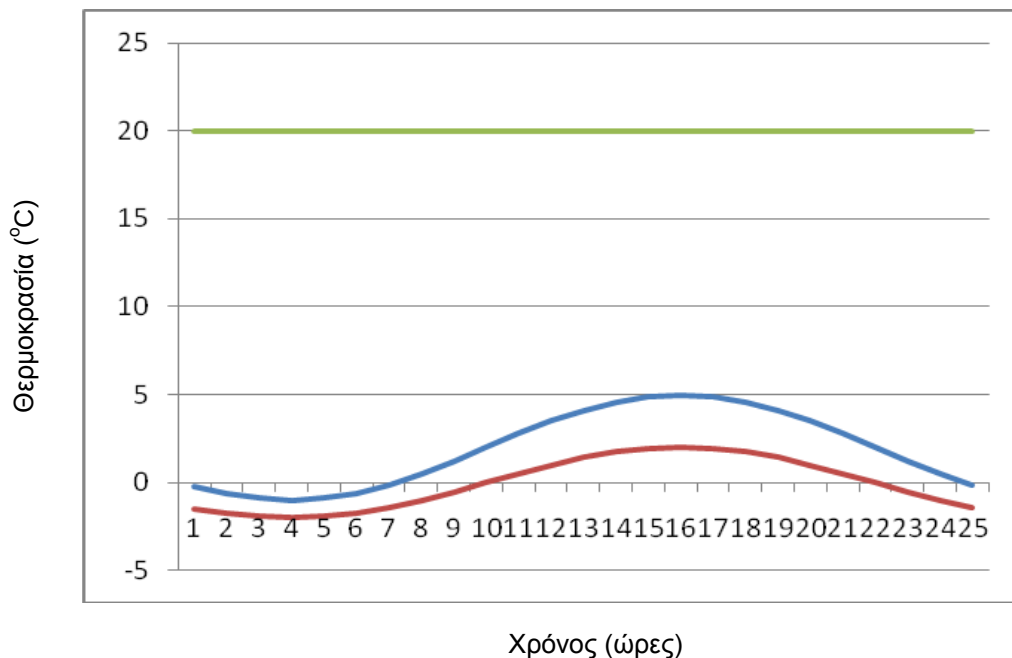


Σχήμα 5.6. Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και μη διαταραγμένου πεδίου κανονικής γεωθερμίας για την περιοχή των Αθηνών για ακραίες τιμές περιβάλλοντος ($T_{env,max}=36^{\circ}\text{C}$ & 40°C). Περίοδος θέρους.

Στο σχήμα 5.6, παρουσιάζεται η εν δυνάμει ανάπτυξη των θερμοκρασιών απόρριψης της κτηριακής θερμότητας μια θερινή ημέρα στην περιοχή των Αθηνών. Η περιοχή που υπερβαίνει τη θερμοκρασία των 20°C είναι η περιοχή στην οποία τα γεωθερμικά συστήματα κλιματισμού παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο των συστημάτων αέρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά τόσο μεγαλύτερη και η διαφορά στην απόδοση. Μεγαλύτερη θερμοκρασία απόρριψης δημιουργεί μείωση του παράγοντα EER. Θεωρητικά στην περίπτωση της θερμοκρασίας απόρριψης ίσης με 47°C η τιμή του EER είναι ίση με 2. Στην περίπτωση κανονικής γεωθερμίας στις συνθήκες αυτές του περιβάλλοντος για μη διαταραγμένο πεδίο η τιμή του EER_g φθάνει στην τιμή του 10 και για διαταραγμένο πεδίο, με απόκλιση περί τους 5°C , στην τιμή του 8. Λόγω της διακύμανσης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος πέραν από την ακραία τιμή της θερμοκρασίας, πολλές ώρες από αυτές της λειτουργίας της διάταξης η συσκευή αντιμετωπίζει μέση θερμοκρασία μικρότερη της ακραίας. Η μέση αυτή θερμοκρασία εξαρτάται από το χρόνο πραγματικής λειτουργίας της διάταξης για την κάλυψη των φορτίων κλιματισμού. Για παράδειγμα, αντί της ακραίας τιμής των 40°C η πραγματική

μέση τιμή λειτουργίας είναι αυτή των 32°C. Για τη τιμή αυτή η απόδοση των συσκευών αέρα, ανέρχεται στην τιμή του 2,8 ενώ για διαταραγμένο πεδίο στην κανονική γεωθερμία η τιμή ανέρχεται σε 5,5.

Για την περίπτωση του χειμώνα, η λειτουργία των εγκαταστάσεων παρουσιάζει λίγο διαφορετικές συνθήκες. Η καμπύλη των θερμοκρασιών παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7. Ημερήσια διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος και μη διαταραγμένου πεδίου κανονικής γεωθερμίας για την περιοχή των Αθηνών για ακραίες τιμές περιβάλλοντος ($T_{env,max} = -1^{\circ}\text{C}$ & -2°C). Περίοδος χειμώνα.

Η απόδοση των συστημάτων χειμερινού κλιματισμού με αέρα και με κανονική γεωθερμία, ανέρχεται σε ακραίες τιμές σε 2,3 και για τη γεωθερμία αντίστοιχα σε 14 για την περίπτωση των μέσων τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, που είναι σε επίπεδο περιβάλλοντος η τιμή των 3°C και για την περίπτωση της κανονικής γεωθερμίας αυτή των 16°C. Οι αντίστοιχες τιμές COP ανέρχονται σε 3,2 ενώ της κανονικής γεωθερμίας σε 10.

Για την περίπτωση της τροφοδότησης εσωτερικών δικτύων με μέσο το νερό τότε οι τιμές αυτές μειώνονται σημαντικά με ποσοστό περί το 10% ανά 5°C. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση της απόδοσης των εγκαταστάσεων όταν οι εσωτερικές εγκαταστάσεις για τη θέρμανση απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες μέσου.

Σε ετήσια βάση, ή καλύτερα σε μέση περιοδική βάση, οι εγκαταστάσεις κλιματισμού με απόκριση στον αέρα παρουσιάζουν σε εγκαταστάσεις 24ωρης απαίτησης, για τη περίοδο του θέρους, τιμή SEER ίση με 3,3 ενώ για την κανονική γεωθερμία 5,3. Για την περίοδο του χειμώνα η μέση τιμή στις εγκαταστάσεις αέρα είναι ίση με SCOP 3,1 ενώ των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας 5,8.

Η απόδοση των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας, ειδικά κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου αλλά και στις μέσες τιμές της χειμερινής περιόδου μπορεί να παρουσιάσει απόδοση μικρότερη από αυτήν των εγκαταστάσεων αέρα. Παράλληλα, τα λάθη στο σχεδιασμό των εγκαταστάσεων κανονικής γεωθερμίας, ειδικά στην περίπτωση των κατακόρυφων γεωεναλλακτών σε περίπτωση αστοχίας προς τον υποβιβασμό της ενεργειακής δυνατότητας του συστήματος, δημιουργεί τον κίνδυνο υπερθέρμανσης ή υπόψυξης (το χειμώνα) του "πεδίου" και μειωμένης απόδοσης. Η υπερδιαστασιολόγηση του γεωεναλλάκτη οδηγεί σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και μερική

εκμετάλλευση των δυνατοτήτων με αποτέλεσμα την επιμήκυνση του χρόνου απόσβεσης του αρχικού κόστους.

Για την περίπτωση των μικρού μεγέθους συστημάτων, η γνώση των γεωλογικών στοιχείων της περιοχής ίσως να είναι αρκετή για το σχεδιασμό και την κατασκευή της εγκατάστασης. Στην περίπτωση εκτεταμένων εγκαταστάσεων, ειδικά κατακόρυφων γεωτρήσεων, κρίνεται απαραίτητη η δοκιμή απόδοσης των εναλλακτών, γνωστή ως "thermal response test". Για δίκτυα μεγάλου εύρους η δοκιμή αυτή μπορεί να επαναληφθεί σε χαρακτηριστικές θέσεις του "πεδίου".

5.4.1. Υπολογιστικό Παράδειγμα

Περίπτωση σχεδιασμού γεωθερμικού συστήματος, κατακόρυφων γεωεναλλακτών με σκοπό την κάλυψη των αναγκών κτηρίου στο οποίο η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς είναι 10kW_{th} .

Για το σχεδιασμό του συστήματος, πέραν της τιμής μέγιστης θερμικής ισχύος της εγκατάστασης (σύμβολο " t_h ") είναι χρήσιμος και ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος. Από την ετήσια κατανομή των αναγκών θέρμανσης είναι γνωστή η χρονική διάρκεια της χρήσης της εγκατάστασης η οποία μπορεί πλέον να ορισθεί συγκεκριμένα, π.χ. εφόσον ο χρόνος χρήσης είναι 1500h (ώρες ανά έτος) και το υλικό του υπεδάφους κανονικό στρώμα βράχου (διαποτισμένο ίζημα, $k=1,5\div 3,0\text{W/m/K}$) η εν δυνάμει θερμική απόδοση του κατακόρυφου γεωεναλλάκτη ανέρχεται σε 60W/md (ανά μέτρο βάθους, πίνακας 5.3).

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για 100% κάλυψη των αναγκών με κατακόρυφο γεωεναλλάκτη απαιτείται μήκος (βάθος) 167m.

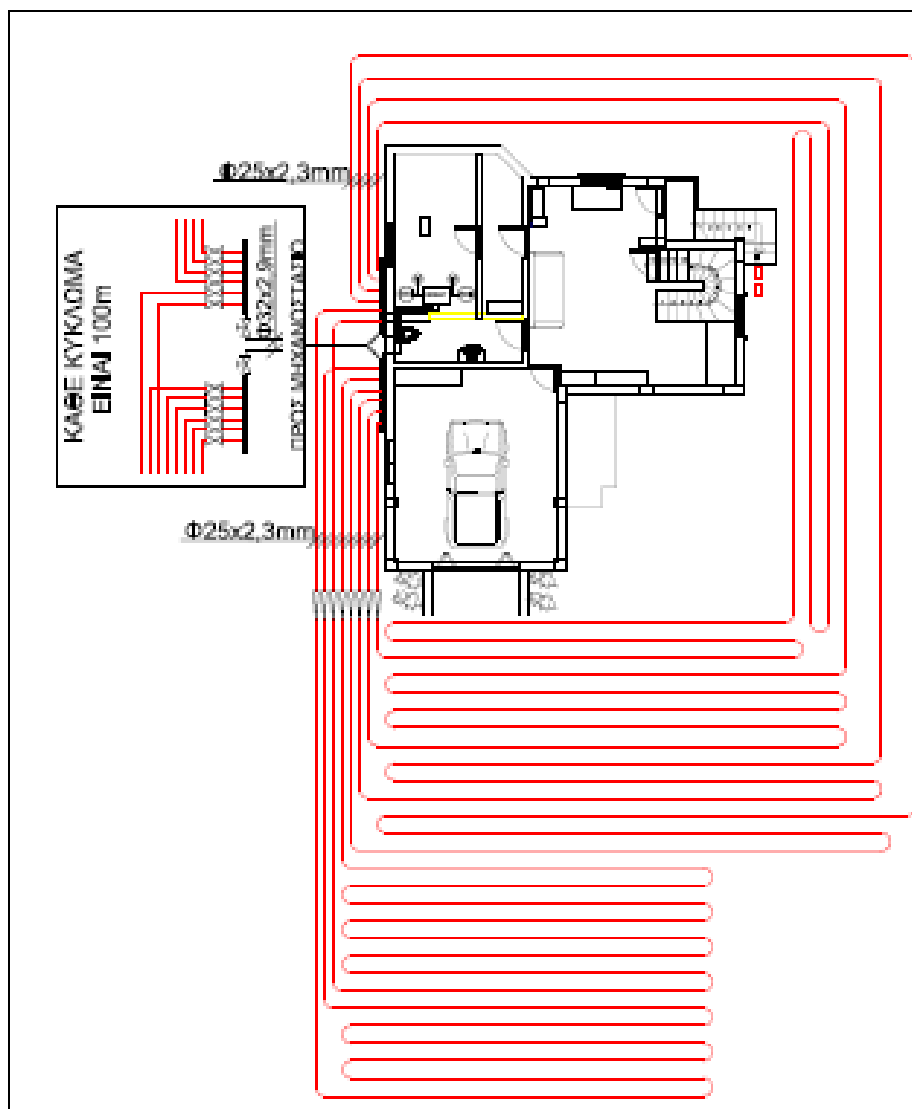
Λόγω της έλλειψης σωληνώσεων που να αντέχουν σε τέτοια βάθη, πλην των χαλκοσωλήνων, όπου η στατική πίεση ανέρχεται σε 16,2bar περίπου, προτείνεται η διάσπαση της κατακόρυφης γεώτρησης σε δύο ή τρία μέρη ($2\times 83,5\text{m}$ ή πίεση 8,08bar ή εναλλακτικά $3\times 55,7\text{m}$ ή πίεση 5,39bar). Στην περίπτωση των δυο κατακόρυφων γεωεναλλακτών, το υλικό του εναλλάκτη πρέπει να είναι ανθεκτικό υπό όλες τις συνθήκες λειτουργίας σε πίεση περίπου κατά $10\div 15\%$ μεγαλύτερη της στατικής, εφόσον δεν υπάρχει εκτεταμένο οριζόντιο δίκτυο, συνεπώς 9,35bar. Η επιλογή των σωληνώσεων πρέπει να είναι της τάξης του PEXa, δηλαδή σωλήνας αντοχής σε υψηλή σχετικά πίεση παράλληλα με υψηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση των τριών γεωτρήσεων η πίεση ασφαλείας ανέρχεται σε 6,2bar, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σωλήνας HDPE, δηλαδή σωλήνας με μικρότερη αντοχή σε σχέση πίεσης και θερμοκρασίας. Αναλόγως της ποιότητας των σωληνώσεων και της αντοχής τους σε πίεση συσχετιζόμενη με την θερμοκρασία.

Στην περίπτωση εκτεταμένου δικτύου, με ισχύ $\lambda\chi$ για μέγιστο φορτίο 100kW_{th} το δίκτυο απαιτεί μήκος 1490m με απόδοση ανά μέτρο βάθους 65W, η τιμή αυτή προκύπτει από μετρήσεις στο συγκεκριμένο υπέδαφος για χρόνο λειτουργίας 1500ώρες ετησίως. Η αύξηση της απόδοσης σε σχέση με τις τιμές του πίνακα 5.3 στον οποίο καταγράφονται οι τιμές για 1800 και 2400 ώρες ετήσιας λειτουργίας.

Στην περίπτωση μικτών φορτίων, δηλαδή ετήσια περίοδο με θερμικά και ψυκτικά φορτία (π.χ. 10kW_{th} και 8kW_c) η απόδοση του συστήματος βελτιώνεται κατά $10\div 15\%$, αναλόγως των υλικών του υπεδάφους. Έτσι για το ίδιο υπέδαφος σε ετήσια βάση και για 1500 ώρες περίοδο θέρμανσης και 800 ώρες περίοδο θερινού κλιματισμού, η απόδοση του γεωεναλλάκτη βελτιώνεται σε 68W/m βάθους και μειώνεται το συνολικά απαιτούμενο μήκος γεωεναλλάκτη.

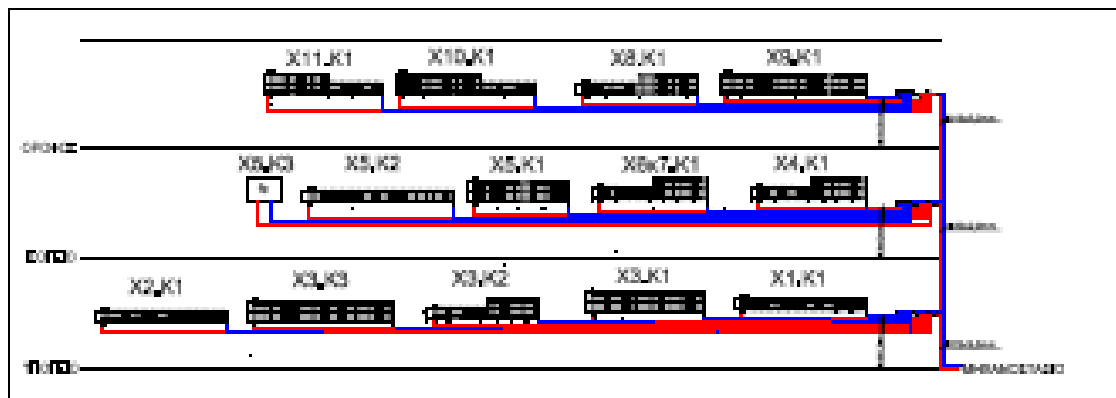
Στην περίπτωση μικτής χρήσης είναι άξιο προσοχής το αναμενόμενο ή τυχαίο ύψος θερμοκρασίας λειτουργίας του γεωεναλλάκτη, το οποίο μπορεί να πλησιάσει ή να υπερβεί στιγμιαία την τιμή των 50 ή 60°C . Η αντοχή των σωληνώσεων σε πίεση εξαρτάται άμεσα από το επίπεδο της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα η επιλογή τους να εξαρτάται σημαντικά από τα επίπεδα της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση σχεδιασμού με οριζόντιο γεωεναλλάκτη, απαιτείται μήκος εναλλάκτη περί τα 480m (κατ' ελάχιστο) ή αντίστοιχα επιφάνεια 480m^2 . Η έκταση αυτή κατανέμεται σε 6 κυκλώματα των 80m (βλέπε σχήμα 5.8). Η μέση απόδοση του συστήματος ανέρχεται σε 20W/m ή m^2 . Σε περίπτωση περιοχής με μικτές ανάγκες (περίοδο ψύξης και θέρμανσης), αρκούν 5 κυκλώματα και έκταση 400μ, εφόσον η απόδοση ανέρχεται σε 25W/m .



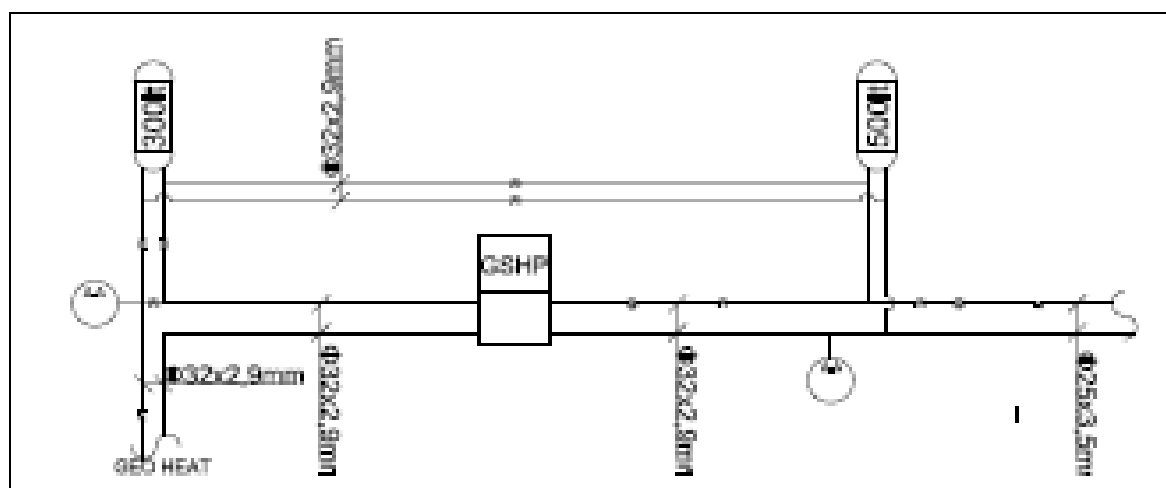
Σχήμα 5.8. Μηχανοστάσιο και δίκτυα γεω- εναλλάκτη οριζοντίου συστήματος κατοικίας

Οι διαστάσεις των διανομέων και σωληνώσεων του δικτύου συλλογής του κυκλώματος κανονικής γεωθερμίας υπολογίζεται όπως ακριβώς και τα δίκτυα διανομής κλιματισμού με νερό ή άλλο μέσο και ακολουθούν τους κανόνες ορθού σχεδιασμού και λειτουργίας των εγκαταστάσεων, όπου δηλαδή όλες οι συσκευές και οι διατάξεις λειτουργούν στο κανονικό σημείο λειτουργίας. Δηλαδή οι αντλίες κυκλοφορίας, κυκλοφορητές, εναλλάκτες κ.λπ. σχεδιάζονται στο σημείο ονομαστικής λειτουργίας (μέγιστου βαθμού απόδοσης). Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται το κατακόρυφο διάγραμμα εντοιχισμένου δικτύου διανομής κλιματισμού. Αυτή η μορφή των δικτύων χαμηλής θερμοκρασιακής διαφοράς, παρουσιάζει σημαντική αύξηση του βαθμού απόδοσης των συστημάτων κανονικής γεωθερμίας ανυψώνοντας το βαθμό απόδοσης COP σε τιμές κοντά στο 8 και τις τιμές SCOP σε επίπεδο $5,0\div 5,5$.



Σχήμα 5.9. Δίκτυο διανομής κλιματισμού με εντοιχισμένο σύστημα σε κατοικία

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα μηχανοστασίου για κατοικία με πρόβλεψη δοχείου αποθήκευσης θερμού νερού χρήσης.



Σχήμα 5.10. Μηχανοστάσιο σύνδεσης κανονικής γεωθερμίας και δικτύου διανομής κλιματισμού σε κατοικία. Με δοχείο Θ.Ν.Χ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Επιστημονικές εργασίες:

1. "Εκμεταλλεύσιμη Ηλιογενής και Γηγενής Θερμότητα στο Αβαθές Υπέδαφος της Αττικής ", Μ.Γρ. Βραχόπουλος, Ι. Παπαγεωργάκης, Τεχνικά χρονικά ΤΕΕ, τεύχος 1, (1998), pp. 1-18.
2. "Modeling the earth temperature using multiyear measurements", Mihalakakou, G., Santamouris, M. and Asimakopoulos, D. (1992) Energy and Buildings, 19 (1-9). Elsevier Sequoia.
3. "Untiefe geothermische Energieressourcen: Theorie und praktische Anwendungen", Kapp, Chr. (1994) Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, 87. Band.
4. Παπαγεωργάκης, Ι. (1992): "Θέρμανση - ψύξη κτηρίων με αβαθή γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα". Ανακοίνωση στο 4ο Συνέδριο του Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνολογίας για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Ξάνθη.
5. M. Gr. Vrachopoulos, Kravvaritis Kl., Savvanis Pan., Stylianou St., Kotsiovelos G, Kravvaritis El. and Adamidis Ad. "Geothermal energy applications in agriculture", Geaia 2004, 1-2 March 2004, Athens, Greece.
6. M.Gr. Vrachopoulos, Kyritsis K.H., Filios A.E. and Tzivanidis C.N. "Modeling and Control System for a Vertical Earth Heat Exchanger", University of Twente ECOS 2000, p.p.1003-1012.
7. Abu-Hamdeh N. H., "Measurement of the Thermal Conductivity of Sandy Loam and Clay Loam Soils using Single and Dual Probes", J. Agric. Engng Res. 80, 2, 209 - 216, 2001
8. M.Gr.Vrachopoulos, Filios A.E., Margaritis D. & Stylianou S.K., "Heat Pump Performance Modeling", Patras University, 1st National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering, p.159. 2002 Patras.
9. M.Gr.Vrachopoulos, G.K.Peroglou and V.N. Goudoula. «Exploitation of Solar and Indigenous Heat Flow of the Shallow Substratum of Attiki», release in EMES (Engineering of Modern Energy Systems) at May 30 – June 1, 1997, Oradea Romania
10. M.Gr.Vrachopoulos, A.S.Bifsas, S.K.Stilianou, and V.N.Goudoula. «The Optimum Exploitation of the Indigenous "Heat" of the Geological Substratum in Sousaki, Korinthos», release in EMES (Engineering of Modern Energy Systems) at May 30 – June 1, 1997, Oradea Romania
11. Vrachopoulos M. Gr., Adamidis Ad., Kravvaritis El., Kotsiovelos G, Kravvaritis Kl., Stylianou St., and Savvanis Pan. "Temperature Field Prediction around a Vertical Earth Heat Exchanger for Heating and Cooling Loads of Agro-tourist Buildings", International Conference Geothermal Energy Applications in Agriculture, 3 - 4 May 2004, Athens, Greece
12. M. Gr. Vrachopoulos, Adamidis Ad., Kravvaritis El., Kotsiovelos G, Kravvaritis Kl., Stylianou St., and Savvanis Pan. "Exploitation of Low Enthalpy Geothermal potential of Ierapetra Artificial Lake", International Conference Geothermal Energy Applications in Agriculture, 3 - 4 May 2004, Athens, Greece
13. Bristow K. L.; White R. D., Kluitenberg G. J., "Comparison of single and dual-probes for measuring soil thermal properties with transient heating", Australian Journal of Soil Research, 32, 447-464, 1994
14. Kelvin W. T., "The reduction of observations of underground temperature", Trans. R. Soc. Edinburgh, 22, 405, 1861
15. Reece C. F., "Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential", Soil Science Society of America Journal, 60, 1022 - 1028, 1996
16. Campbell G. S.; Callissendorff C.; Williams J. H. "Probe for measuring soil specific heat using a heat pulse method", Soil Science Society of America Journal, 55, 291 - 293, 1991
17. Μ. Γρ. Βραχοπουλος, Φυτρολάκης Ν. Κυρούσης Ι. & Κραβαρίτης Ε.Δ., "Εξοικονόμηση Ενέργειας με Εκμετάλλευση Ομαλής Γεωθερμίας στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου", 5ο Συν. RENES, Φεβρουάριος 2005, Αθήνα.
18. Σιμιτόπουλος Χρ. & Βραχοπουλος Μ. Γρ., "Υπολογισμός κατακόρυφων γεωθερμικών εναλλακτών", 5ο Συν. RENES, Φεβρουάριος 2005, Αθήνα.

Βιβλία:

1. Μ. Γρ. Βραχοπουλος, "Γεωθερμία", Σημειώσεις για το διατμηματικό πρόγραμμα Παραγωγή και διαχείριση ενέργειας, Ηλεκτρολόγων κ.λπ. ΕΜΠ, Φεβρουάριος 2002, Αθήνα.
2. Μ. Φυτίκας, Ν. Ανδρίτσος, Γεωθερμία, 2005 Θεσσαλονίκη, εκδ Τζιόλα.
3. Δεκαβάλλα Μ., "Παραμετρική Ανάλυση Γεωθερμικού Συστήματος Αντλιών Θερμότητας με Κάθετους Γεωναλλάκτες" Διπλωματική Εργασία Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Μεταλλευτικής, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Ε.Μ.Π.
4. Καρυδάκης Γ.Ι., Γεωθερμική Ενέργεια, "Αθλητής", Αθήνα, 2005
5. Μενδρινός Δ., Κ.Α.Π.Ε., 2006
6. Παπαμίχος Ν.Θ., "Δασικά εδάφη: Σχηματισμός – Ιδιότητες – Συμπεριφορά", Θεσσαλονίκη, 1996
7. Pewe, T. (1969): "The Periglacial Environment; Past and Present". Mc Gill-Queens University Press.

ΠΡΟΤΥΠΑ - ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

1. EN 15450; however, due to the large climatic and geological differences, this standard can hardly give more than a general minimum framework for design and installation, with many items to be filled in regionally.
2. EN 791 has been adopted meanwhile in all EU member states. Further standards can be found nationally e.g. in Germany and Poland, as table 2 shows
3. ISO 13256, Water-source heat pumps - Testing and rating for performance nationalized e.g. in DK, NL heat pumps in general, testing and rating 2001
4. VDI 2067 Blatt 6, Economy calculation of heat consuming installations; heat pumps heat pumps, economic calculations 1989-09, (DE)
5. VDI 4650, Blatt 1, Calculation of heat pumps - Short-cut method for the calculation of the annual effort figure of heat pumps - Electric heat pumps for room heating heat pumps, efficiency calculations 2003-01, (DE)
6. DIN 8901, Refrigerating systems and heat pumps - Protection of soil, ground and surface water heat pumps, protection of groundwater and soil against pollution, 2002-12, (DE)
7. VDI 4640, Blatt 1-4 Thermal use of the underground - part 1-4 design and installation of geothermal heat pump systems, 2000-2004, (DE)
8. VDI 4640 Richtlinien, part 1 & 2, 2000
9. ÖNORM M 7753, Heat pumps with electrically driven compressors for direct expansion, ground coupled - Testing and indication of the producer geothermal, testing and rating 1995-10, (AT)
10. ÖNORM M 7755-2+3 Electrically driven heat pumps design and installation of groundsource heat pump systems
11. (groundwater, rock, soil) 2000-09, (AT)
12. ÖWAV RB 207 Systems for the exploitation of geothermal heat geothermal, avoiding risks to underground and groundwater 1993, (AT)
13. Normbrunn- 97 Energy well standard (Energibrunnsnorm) correct installation of geothermal system 1997, (SE)
14. SVEPstandard Installation standard for ground heat collectors (Tillverkningsnorm för Bergvärmekollektorer) correct installation of geothermal system 2005-11, (SE)
15. SIA D 0179, Energie aus dem Untergrund - Erdreichspeicher für moderne Gebäudetechnik Shallow geothermal energy 2003, (CH)
16. SIA D 190, Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührenden Betonbauteilen - Leitfaden
17. zu Planung, Bau und Betrieb Energy piles 2005, (CH)
18. AWP T1-5 Technische Merkblätter Heat pump heating systems with borehole heat exchangers, ground collectors, groundwater, etc. 2007, (CH)
19. EN 791 Drill rigs. Safety work safety 1996-01

20. DVGW W 110, Investigations in bore holes and wells sunk to tap ground water; compilation of methods investigations for geological reconnaissance inside a borehole 2005-06
21. DVGW W 115 Boreholes for exploration, capture and observation of groundwater well drilling 2001-03
22. DVGW W 116 Use of mud additives in drilling fluids for drilling in groundwater selection of drilling fluids in order to protect the groundwater 1998-04
23. PN-G-01201 Drilling - Terminology drilling terminology 1992-12
24. PN-G-01215 Drilling engineering - Designation of drilling tools drilling tools 1998-01
25. PN-G-02305 Structure and water well drillings - Drilling rigs - Requirements drilling rigs 1994-11
26. PN-G-08611 Drilling - Drilling machinery - Requirements of safety and ergonomics work safety 1999-07

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Andersland O.B., Anderson D.M., "Geotechnical engineering for cold regions", McGraw-Hill, New York, 1978
2. ASHRAE Application Handbook (SI), 1999
3. Abramowitz M.; Stegun I., "Handbook of mathematical functions", Dover Publications Inc., New York, 1972
4. Binayak P., Mohanty US, Salinity Laboratory, 1999
5. Bose, J.E., "Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems", International Ground-Source Heat Pump Association, Stillwater, 1988
6. Campbell G.S., "Soil Physics with BASIC. Transport Models for Soil-Plant Systems", (Developments in Soil Science, 14), Elsevier, Amsterdam, 1985
7. Kasuda T., Archenbach P.R., "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States", ASHRAE Transactions, 71, 1, 1965
8. Kavanaugh S.P., Deerman J.D., "Simulation of vertical U tube ground coupled heat pump systems", ASHRAE Transactions, 97, 287-295, 1991
9. Lund J.W., Freeston D.H., "World-Wide Direct Uses Of Geothermal Energy", Proceedings World Geothermal Congress, Tohoku, Japan, 2000
10. Pahud D., "Geothermal energy and heat storage", 2002
11. Paksoy , Halime Ö., "Underground Thermal Energy Storage - A Choice For Sustainable Future", World Energy Council publications, <http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications>, 2005
12. Sanner B., "A different Approach to Shallow Geothermal Energy – Underground Thermal Energy Storage (UTES)", 2000
13. U.S. Geothermal Energy Association, 2007

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Χαλκίδας: www.teihal.gr

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας- TEE: www.tee.gr

Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής ΥΠΕΚΑ: www.ypeka.gr

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης ΕΛΟΤ: www.elot.gr

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας – ΚΑΠΕ: www.cres.gr

Geothermal Energy Association: www.geo-energy.org

6. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αιολικές μηχανές αποτελούν ανθρώπινες επινοήσεις που έχουν ως σκοπό την αποτελεσματική αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Οι αιολικές μηχανές ή ανεμόμυλοι όπως ονομάζονταν στο παρελθόν, ήταν γνωστοί από τα πρώιμα ιστορικά χρόνια, καθώς Κινέζοι, Πέρσες, Ασσύριοι, αλλά και αρχαίοι Έλληνες φέρονται να χρησιμοποιούν αντίστοιχες συσκευές ήδη από τη 2η π.Χ. χιλιετία.

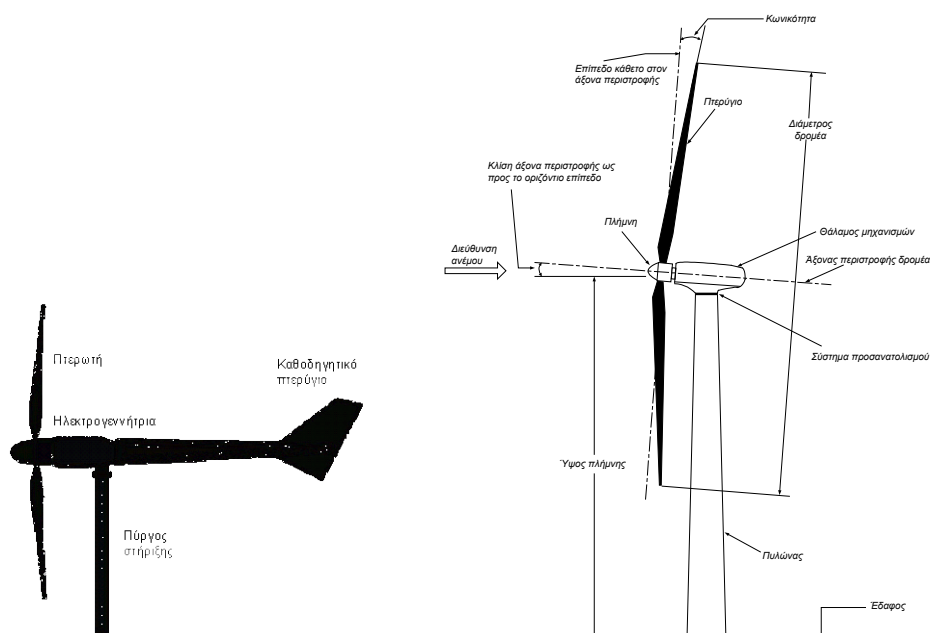
Οι ανεμοκινητήρες ή ανεμογεννήτριες (Α/Γ) όπως αποκαλούνται σήμερα, επανήλθαν στο προσκήνιο της ενεργειακής τεχνολογίας στα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα, κυρίως σαν συνέπεια των διαδοχικών ενεργειακών κρίσεων αλλά και της επιδεινούμενης περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Πριν από τη ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη που παρουσίασε ο τομέας της αιολικής ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες, οι Α/Γ χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μικρών απομονωμένων καταναλωτών χωρίς δυνατότητα σύνδεσης σε τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα.

Σήμερα οι Α/Γ έχουν γνωρίσει σημαντική εξέλιξη σχετικά με το μέγεθός τους και η πλειοψηφία των αιολικών εγκαταστάσεων παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτρικά δίκτυα (διασυνδεδεμένες εγκαταστάσεις). Παράλληλα, σημαντική παραμένει η συνεισφορά των Α/Γ στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων καταναλωτών όπως εξοχικές κατοικίες, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί, αγροκτήματα, φάρoi κ.λπ.

Κάθε χρόνο στον πλανήτη προστίθενται ολοένα και περισσότερες εγκαταστάσεις Α/Γ φτάνοντας το 2010 την εγκατάσταση νέων αιολικών πάρκων ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 25000MW (2 φορές περίπου την εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ της χώρας μας) ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα τελευταία χρόνια το μεγαλύτερο ποσοστό των νέων εγκαταστάσεων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αφορούσε σε μονάδες αξιοποίησης αιολικής ενέργειας.

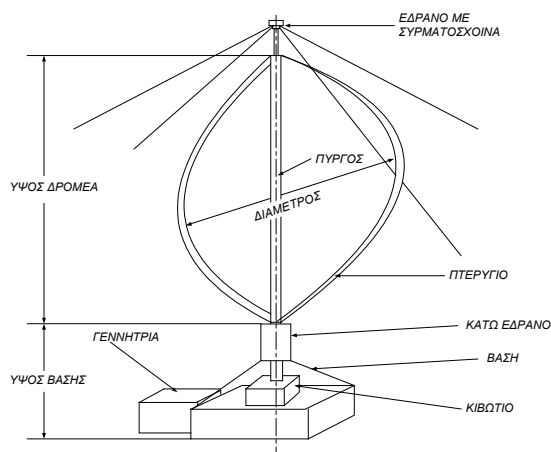
Οι Α/Γ ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ και κατά συνέπεια το μέγεθός τους διακρίνονται σε μικρο (micro) όπου περιλαμβάνονται Α/Γ έως 1kW, σε μικρές Α/Γ με μέγεθος από 1÷10kW, μικρές/μεσαίες Α/Γ 10÷100kW, μεσαίες Α/Γ 100÷500kW και μεγάλες Α/Γ με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 500kW. Οι Α/Γ έως και 10kW είναι κατάλληλες για την κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών στον κτηριακό τομέα καθώς μπορούν υπό προϋποθέσεις να εγκατασταθούν εντός του αστικού περιβάλλοντος.

Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι Α/Γ είναι οι Α/Γ "οριζοντίου" και οι Α/Γ "κατακορύφου" άξονα. Οι Α/Γ οριζοντίου άξονα (σχήμα 6.1), έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλο με τη διεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, μπορούν να έχουν ένα, δύο, τρία ή και περισσότερα πτερύγια, ενώ η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη, δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη, δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Οι μηχανές αυτές παρουσιάζουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Ο προσανατολισμός του δρομέα προς τη διεύθυνση του ανέμου, επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση καθοδηγητικού πτερυγίου (σε μικρές Α/Γ), είτε με κατάλληλα αισθητήρια που καταγράφουν τη στιγμιαία διεύθυνση του ανέμου και στρέφουν (προσανεμίζουν) την πτερωτή στη διεύθυνση του ανέμου ηλεκτρονικά με τη χρήση σερβομηχανισμού.



Σχήμα 6.1: Βασικά τμήματα μικρής και μεγάλης Α/Γ οριζοντίου άξονα.

Για τον έλεγχο ισχύος της μηχανής είναι απαραίτητη είτε η ρύθμιση του βήματός της, είτε ο κατάλληλος αεροδυναμικός σχεδιασμός και η αξιοποίηση του φαινομένου "απώλειας στήριξης". Πιο συγκεκριμένα, με τη διαδικασία ρύθμισης βήματος (pitch control) επιχειρείται η περιστροφή του πτερυγίου γύρω από το διαμήκη άξονά του, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής γωνίας προσβολής κατά το μήκος του πτερυγίου ώστε να υλοποιούνται οι απαιτήσεις ισχύος της μηχανής. Αντίστοιχα, ο μηχανισμός απώλειας στήριξης (stall control) βασίζεται στο αεροδυναμικό φαινόμενο της αποκόλλησης του οριακού στρώματος από τμήμα ή το σύνολο του πτερυγίου, εφόσον η γωνία προσβολής του πτερυγίου ξεπεράσει ορισμένα αεροδυναμικά όρια. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε απότομη μείωση της ισχύος της μηχανής.



Σχήμα 6.2: Βασικά τμήματα Α/Γ κατακόρυφου άξονα.

Οι μηχανές κατακόρυφου άξονα (σχήμα 6.2), εμφανίζουν το σημαντικό πλεονέκτημα αυτόματης προσαρμογής στη διεύθυνση του ανέμου και ως εκ τούτου αποτελούν πιο απλές κατασκευές. Οι εν λόγω Α/Γ περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω κατακόρυφου άξονα απ' ευθείας στο έδαφος, όπου βρίσκεται τοποθετημένη και η ηλεκτρική γεννήτρια. Ο συντελεστής ισχύος των μηχανών

κατακορύφου άξονα είναι εν γένει μικρότερος από αυτόν των μηχανών οριζοντίου άξονα. Επίσης οι μεγάλες μηχανές κατακορύφου άξονα παρουσιάζουν σημαντικό πρόβλημα κατά την εκκίνηση, όπου απαιτείται εξωτερική βοήθεια, μειονέκτημα που δεν εμφανίζεται στις μηχανές οριζοντίου άξονα. Η επιλογή μικρών Α/Γ κατακορύφου άξονα μειώνει τις διαστάσεις της πτερωτής και θεωρείται ότι ενσωματώνεται καλύτερα στο αστικό περιβάλλον.

6.2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα πτερύγια του δρομέα μιας Α/Γ δεσμεύουν ένα ποσοστό της ανά μονάδα χρόνου κινητικής ενέργειας του ανέμου και το μετατρέπουν σε μηχανικό έργο (στρεπτική ροπή) στον άξονα της πτερωτής. Το μηχανικό έργο μετασχηματίζεται κατά κανόνα μέσω της ηλεκτρικής γεννήτριας σε ηλεκτρική ισχύ. Η τελική ισχύς εξόδου της Α/Γ ισούται με:

$$N_{ex} = C_p \cdot \eta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \right) \quad (6.1)$$

όπου:

"C_p" είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης της πτερωτής. Η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης για μικρές Α/Γ κυμαίνεται από 10÷35%. Από το σχεδιασμό της πτερωτής των υφιστάμενων Α/Γ είναι γνωστό ότι το "C_p" εκφράζεται συναρτήσει της παραμέτρου περιστροφής "λ" της πτερωτής, όπου:

$$\lambda = \frac{\pi D n_r}{60 V} \quad (6.2)$$

όπου με "n_r" συμβολίζεται ο αριθμός στροφών του άξονα της πτερωτής, και συνεπώς:

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (6.3)$$

Οι τιμές του αεροδυναμικού βαθμού απόδοσης μεταβάλλονται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, ενώ η μέγιστη τιμή του επιτυγχάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεταξύ 10÷15m/s.

"η" είναι ο ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ. Στις μικρές Α/Γ ο ηλεκτρομηχανολογικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται μεταξύ 80÷95% ενώ για μακροχρόνιους υπολογισμούς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επίδραση της γήρανσης της μηχανής. Οι σύγχρονες μεγάλες Α/Γ εμφανίζουν ηλεκτρομηχανολογικό βαθμό απόδοσης που φτάνει το 95%.

"ρ" είναι η πυκνότητα του αέρα σε kg/m³. Οι καμπύλες λειτουργίας των Α/Γ που δίνουν οι κατασκευαστές αναφέρονται σε πυκνότητα αέρα 1,225kg/m³. Η πυκνότητα του αέρα παρουσιάζει μικρές μεταβολές ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν (ατμοσφαιρική πίεση, σχετική υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος). Επίσης, μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο τοποθέτησης της Α/Γ.

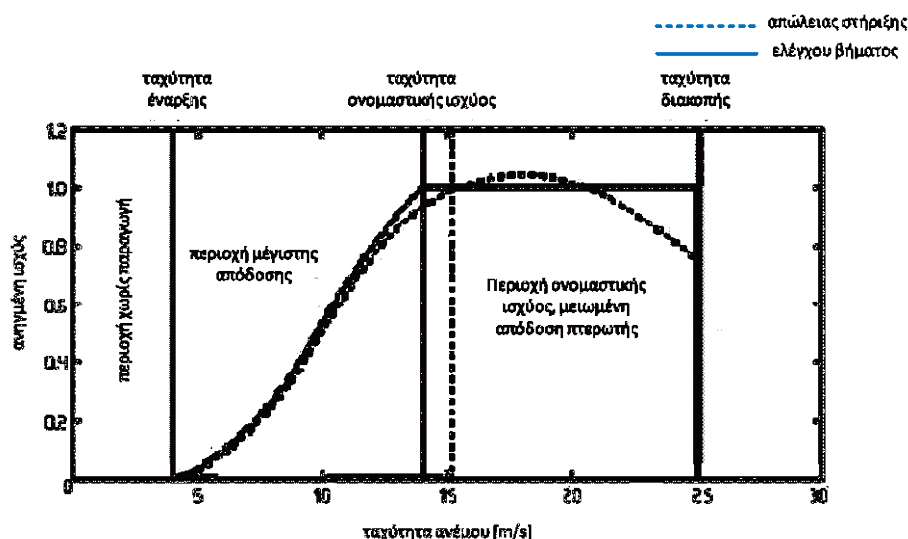
"Α" είναι η επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής η οποία υπολογίζεται ως:

$$A = \pi \cdot D^2 / 4 \quad (6.4)$$

όπου με "D" συμβολίζεται η διάμετρος της πτερωτής. Η επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ καθώς η ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ αυξάνει με το τετράγωνο της διαμέτρου της.

"V" είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πτερωτής και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ. Η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από το ύψος τοποθέτησης της Α/Γ και φυσικά από την ποιότητα του αιολικού δυναμικού της περιοχής εγκατάστασης.

Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας Α/Γ περιγράφει τη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου που προσβάλλει την πτερωτή. Ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου ισχύος που χρησιμοποιεί η Α/Γ αλλάζει και η μορφή της καμπύλης λειτουργίας της. Οι Α/Γ ελέγχου βήματος παρουσιάζουν σταθερή απόδοση ισχύος για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής, ενώ στις Α/Γ απώλειας στήριξης η αποδιδόμενη ισχύς μετά από την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας δεν είναι απολύτως σταθερή (σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3: Καμπύλες λειτουργίας Α/Γ ελέγχου βήματος και απώλειας στήριξης.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας Α/Γ ξεκινάει από ταχύτητες ανέμου " $V_c=2\div5\text{m/s}$ " (ταχύτητα έναρξης λειτουργίας), που αντιστοιχούν σε ένταση ανέμων $2\div3$ Beaufort, και για λόγους ασφαλείας διακόπτεται η λειτουργία της όταν η ταχύτητα ανέμου ξεπεράσει τα " $V_f=20\div25\text{m/s}$ " (ταχύτητα διακοπής λειτουργίας) ή αντίστοιχα $9\div10$ Beaufort. Η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ επιτυγχάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεταξύ " $V_R=10\div15\text{m/s}$ " (ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας) δηλαδή σε ανέμους με ένταση $6\div7$ Beaufort.

Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ για χρονικό διάστημα " Δt ", υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης, το οποίο συνήθως περιγράφεται από την καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας " $f(V)$ " (στο υπό μελέτη χρονικό διάστημα) και την καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή. Παράλληλα, απαιτείται η εκτίμηση μιας ρεαλιστικής πρόβλεψης του μέσου συντελεστή τεχνικής διαθεσιμότητας της εγκατάστασης " Δ " στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή θα ισχύει:

$$E(\Delta t) = N_0 \cdot \omega \cdot \Delta \cdot \Delta t \quad (6.5)$$

όπου ο μέσος συντελεστής ισχύος " ω " της εγκατάστασης δίνεται ως:

$$\omega = \int_{V_c}^{V_F} \frac{N(V)}{N_0} f(V) dV \quad (6.6)$$

και παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ του 0,2 και του 0,6, χωρίς να αποκλείονται θεωρητικά αριθμητικά μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Φυσικά στις αστικές περιοχές, λόγω της μέτριας ποιότητας του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, οι τιμές του " ω " υπολείπονται σημαντικά των παραπάνω ενδεικτικών τιμών.

Η τεχνική διαθεσιμότητα " Δ " μιας εγκατάστασης εκφράζει την ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας της εγκατάστασης από τεχνικής σκοπιάς και δε συνδέεται άμεσα με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής. Φυσικά η εμφάνιση ισχυρής έντασης ανέμων αυξάνει την πιθανότητα βλάβης των εγκαταστάσεων και κυρίως εμποδίζει τη γρήγορη και αποτελεσματική αποκατάσταση πιθανών βλαβών. Επιπλέον, σε νησιωτικές (απομονωμένες) περιοχές, η επιδείνωση των καιρικών συνθηκών μπορεί να καθυστερήσει τη μετάβαση των εξειδικευμένων συνεργείων συντήρησης. Να σημειωθεί ότι μια αιολική εγκατάσταση δεν είναι τεχνικά διαθέσιμη, ακόμα και αν φυσούν άνεμοι ικανής έντασης, σε περιπτώσεις τυχαίων βλαβών, προγραμματισμένης συντήρησης, λειτουργίας μηχανισμών αυτοπροστασίας αλλά και αδυναμίας του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου να απορροφήσει την αποδιδόμενη ενέργεια, όταν η Α/Γ είναι διασυνδεδεμένη. Στις μικρές εγκαταστάσεις Α/Γ η τεχνική διαθεσιμότητα κυμαίνεται μεταξύ 0,7÷0,9.

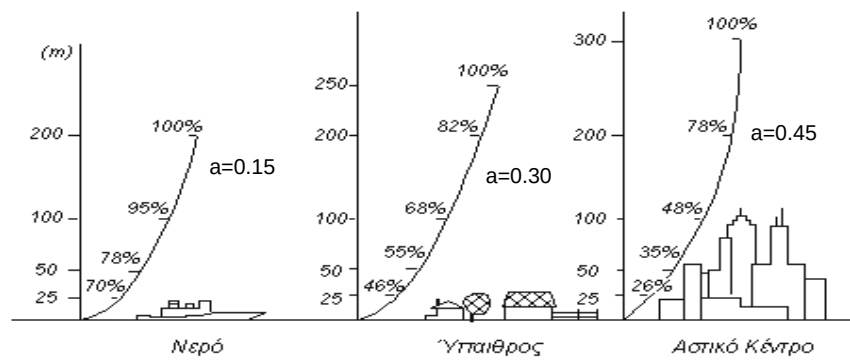
Συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία το γινόμενο " $\omega \cdot \Delta$ " αποδίδεται με τον όρο "capacity factor", δηλαδή συντελεστής φορτίου (ισχύος) της εγκατάστασης:

$$CF = \Delta \cdot \omega \quad (6.7)$$

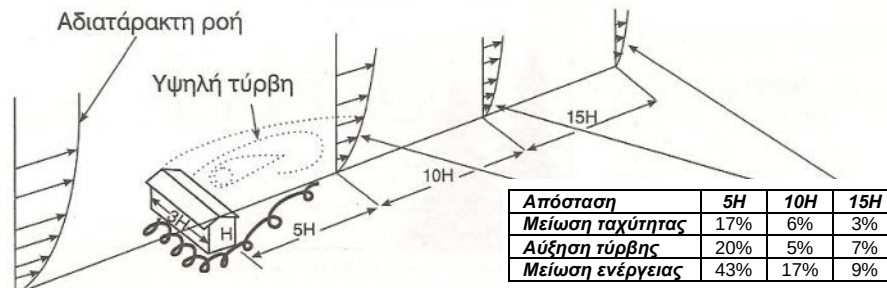
Με τη βοήθεια του μέσου συντελεστή ισχύος, η τυχαία Α/Γ ονομαστικής ισχύος " N_0 " μπορεί να εξομοιωθεί με μηχανή συνεχούς ισχύος ($\omega \cdot N_0$) για την περίπτωση μέσων ενεργειακών υπολογισμών. Βασική επιδίωξη στον τομέα των αιολικών εφαρμογών είναι η επιλογή εκείνης της εμπορικής μηχανής, η οποία με δεδομένο το διαθέσιμο τοπικό αιολικό δυναμικό μεγιστοποιεί την ετήσια παραγωγή ενέργειας.

6.3. ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει μια κατακόρυφη διανομή μέσα στο στρώμα της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, παρουσιάζει εκθετική αύξηση με την αύξηση του ύψους η οποία συνήθως είναι αξιοσημείωτη για τα πρώτα 100m από το έδαφος, συνήθως εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας με την αύξηση του ύψους εξαρτάται κυρίως από το ανάγλυφο της περιοχής (σχήμα 6.4). Στις αστικές περιοχές η παρουσία των κτηρίων διαταράσσει σημαντικά το πεδίο ροής του ανέμου. Σύμφωνα με έρευνες σχετικά με τη ροή γύρω από κτήρια, η ζώνη επιρροής των κτηρίων περιλαμβάνει δύο φορές το ύψος του κτηρίου ανάντη, δέκα φορές το ύψος του κτηρίου κατάντη και ύψος τουλάχιστον διπλάσιο του κτηρίου. Είναι ενδεικτικό ότι σε απόσταση διπλάσια του ύψους του κτηρίου έχουμε κατά 5% αύξηση του επιπέδου της τύρβης και κατά 6% μείωση της ταχύτητας του ανέμου, η οποία και οδηγεί σε μείωση κατά 17% της διαθέσιμης ενέργειας του αδιατάρακτου ρεύματος ανάντη του κτηρίου (σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.4: Μεταβολή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.



Σχήμα 6.5: Επίδραση κτηρίου στη ροή της ταχύτητας του ανέμου.

Για την περιγραφή της κατακόρυφης διανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία των οριακών στρωμάτων εκ των οποίων η πιο διαδεδομένη είναι η εκθετική διανομή (power law):

$$\frac{V(h)}{V(h_0)} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^a \quad (6.8)$$

Η εξίσωση (6.8) δίνει την ταχύτητα του ανέμου " $V(h)$ " σε ύψος " h " από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου " a " όταν είναι γνωστή η ταχύτητα " $V(h_0)$ " στο ύψος αναφοράς " h_0 ". Η ακριβής τιμή της παραμέτρου " a " εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και από τη διεύθυνση του ανέμου.

Για τις ανάγκες υπολογισμού του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής δεν επαρκεί η γνώση της μέσης ταχύτητας του ανέμου της περιοχής, αλλά απαιτούνται αναλυτικές πληροφορίες και για την κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών ταχύτητας του ανέμου μέσα στο χρόνο, ενώ παράλληλα απαιτείται η γνώση των διαστημάτων νηνεμίας καθώς και των ριπών του ανέμου στην περιοχή. Μια παραστατική εικόνα της συχνότητας εμφάνισης των ταχυτήτων του ανέμου σε μια περιοχή αποτελεί το ιστόγραμμα, το οποίο απεικονίζει την πυκνότητα συχνότητας " f " εμφάνισης ταχυτήτων του ανέμου σε συγκεκριμένα διαστήματα ταχυτήτων (σχήμα 6.6).



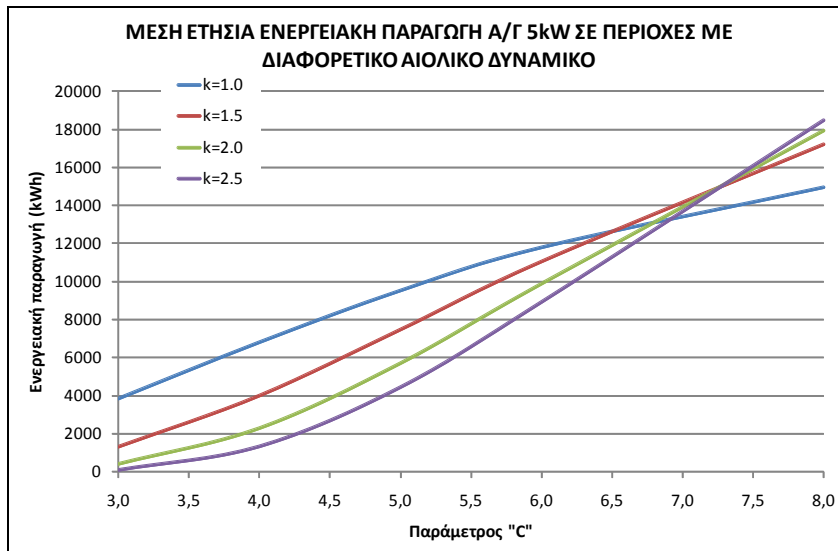
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας ανέμου.

Για να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε ασφαλή αποτελέσματα απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις με σημαντικό κόστος αλλά και χρονική καθυστέρηση που συνοδεύει τις εκτεταμένες μετρήσεις. Ως εκ τούτου, καταφεύγουμε σε αναλυτικές κατανομές, που περιγράφουν με σχετική ακρίβεια το τοπικό αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη αναλυτική διανομή πυκνότητας πιθανότητας είναι η κατανομή "Weibull". Η κατανομή "Weibull" αποτελεί μια ειδική περίπτωση της γενικευμένης κατανομής που προτάθηκε από τον Weibull και περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100 μέτρα από το έδαφος. Η κατανομή "Weibull" προσδιορίζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας "V" ($V-dV/2$, $V+dV/2$) βάσει δύο μόνο παραμέτρων. Η αναλυτική έκφραση της κατανομής "Weibull" δίνεται ως:

$$f_w(V) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{C} \right)^k \right] \quad (6.8)$$

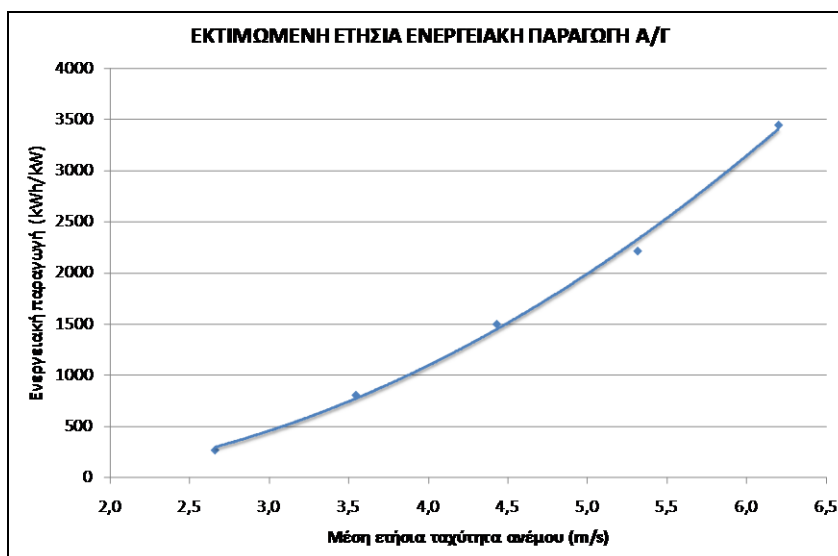
όπου η παράμετρος "C" συνδέεται με τη μέση ταχύτητα του ανέμου ($C \approx 1.1 \bar{V}$) και η παράμετρος "k" είναι αντιστρόφως ανάλογη της διασποράς του μέτρου των ταχυτήτων του ανέμου ως προς τη μέση ταχύτητα ($k=1.5 \div 2.0$).

Οι κατασκευαστές Α/Γ, προκειμένου να διευκολύνουν τους αγοραστές όσον αφορά στην εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής των Α/Γ ανάλογα με το αιολικό δυναμικό της περιοχής και του ύψους τοποθέτησης, παρέχουν καμπύλες ενεργειακής παραγωγής σε σχέση με τις παραμέτρους "k" και "C" (σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.7: Αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή παραγωγή Α/Γ 5kW εγκατεστημένη σε περιοχές με διαφορετικό αιολικό δυναμικό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και θεωρώντας μια απλοποιημένη μορφή καμπύλης λειτουργίας μια Α/Γ, στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται προσεγγιστικά η μέση ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή μιας Α/Γ ανά kW ονομαστικής ισχύος σε περιοχές με διαφορετικές μέσες ετήσιες ταχύτητες του ανέμου.



Σχήμα 6.8: Ενεργειακή παραγωγή Α/Γ για διάφορες τιμές μέσης ταχύτητας του ανέμου ($k=1.5$).

6.4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Για την τεchnοοικονομική ανάλυση εγκατάστασης και λειτουργίας μιας αιολικής μηχανής απαιτείται η γνώση του κόστους αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού καθώς επίσης το αναμενόμενο κόστος συντήρησης και τυχόν αντικαταστάσεις μέρους του εξοπλισμού με χρόνο ζωής μικρότερο από το χρόνο ζωής της Α/Γ.

Το ανηγμένο κόστος αγοράς " P_r " Α/Γ έως 100kW, μπορεί να υπολογιστεί με αρκετά καλή προσέγγιση από την ημιεμπειρική εξίσωση:

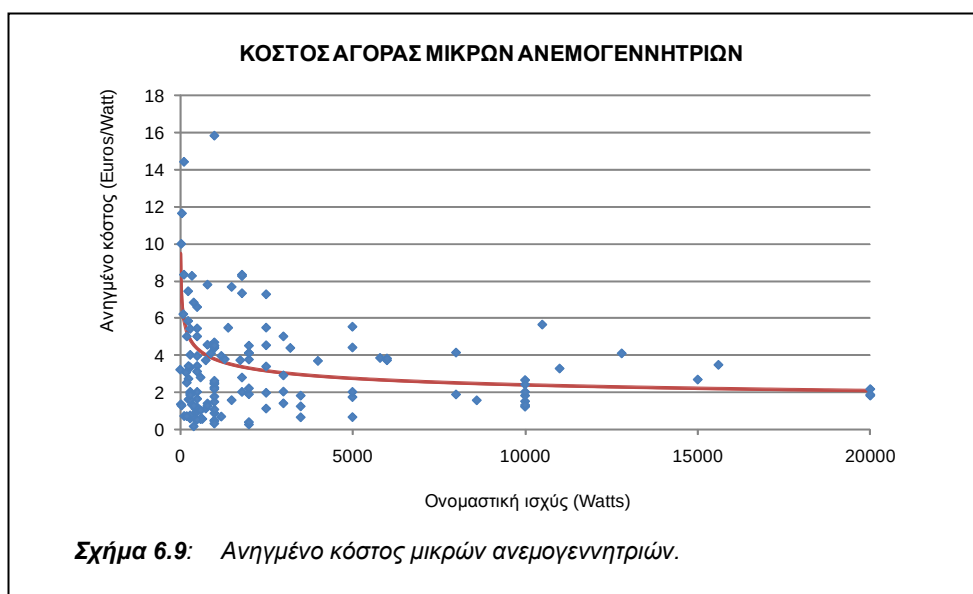
$$P_r = \frac{a}{b + N_o^x} + c(t) \quad (6.9)$$

όπου " $a=8.7 \cdot 10^5$ ", " $b=621$ ", " $x=2.05$ " και " $c(t)$ " η χρονική συνάρτηση που περιγράφει τη διαχρονική μεταβολή της ασυμπτωτικής τιμής ενός αιολικού kW. Πιο συγκεκριμένα:

$$c(t) = 700 \cdot (1 + 0.7 \cdot e^{-0.125 \cdot t}) \quad (6.10)$$

όπου " t " ο αριθμός των ετών μετά το 1990.

Αντίστοιχα, στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η καμπύλη ανηγμένου κόστους μικρών Α/Γ όπως αυτή έχει προκύψει από καταγεγραμμένες τιμές εμπορικών μοντέλων διαφόρων μεγεθών. Σύμφωνα με το σχήμα 6.9, οι πολύ μικρές Α/Γ παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις κόστους φθάνοντας έως και τα 16€ ανά Watt ονομαστικής ισχύος της Α/Γ ενώ το κόστος τείνει ασυμπτωτικά με την αύξηση του μεγέθους των Α/Γ στα 2€/W.



Παράλληλα, το κόστος εγκατάστασης μιας Α/Γ εξαρτάται από τον τρόπο στήριξης της Α/Γ αλλά και τις δυσκολίες πρόσβασης στο χώρο εγκατάστασης. Το κόστος εγκατάστασης μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό " f " του κόστους αγοράς της Α/Γ με τιμές που κυμαίνονται για μικρές μηχανές μεταξύ 40÷75%. Συνοψίζοντας, το συνολικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης μιας Α/Γ ονομαστικής ισχύος " N_o " προκύπτει ως:

$$IC_o = P_r \cdot N_o \cdot (1 + f) \quad (6.11)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκφράζεται ως ποσοστό " m " του κόστους εγκατάστασης και κυμαίνεται μεταξύ 2÷4%. Ως εκ τούτου, το εκτιμώμενο ετήσιο κόστος συντήρησης μιας Α/Γ μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$FC_o = m \cdot IC_o \quad (6.12)$$

Η αντικατάσταση τμημάτων του εξοπλισμού που απαρτίζουν την εγκατάσταση είναι στην πλειοψηφία των εγκαταστάσεων επιτακτική προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία της Α/Γ σε επιθυμητά επίπεδα απόδοσης. Στα τμήματα αυτά μπορεί να περιλαμβάνονται τα πτερύγια, το κιβώτιο μετάδοσης (εφόσον υπάρχει) ή η ηλεκτρογεννήτρια. Ο υπολογισμός του κόστους αντικατάστασης του εξοπλισμού "VC_o" είναι αρκετά σύνθετος καθώς αφορά σε κόστος το οποίο επιβαρύνει τον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ανάλογα με το χρόνο ζωής κάθε εξαρτήματος.

Τέλος, τα έσοδα της εγκατάστασης αφορούν είτε στην πώληση της παραγόμενης ενέργειας είτε στο κόστος της ενέργειας που υποκαθιστά η χρήση της Α/Γ. Ειδικότερα, τα εκτιμώμενα ετήσια έσοδα της εγκατάστασης υπολογίζονται ως:

$$R_o = E \cdot c_o \quad (6.13)$$

όπου "E" η ετήσια παραγόμενη ενέργεια της Α/Γ και "c_o" η τιμή πώλησης ή αγοράς (σε περίπτωση αντικατάστασης από την παραγωγή της Α/Γ) της ηλεκτρικής ενέργειας.

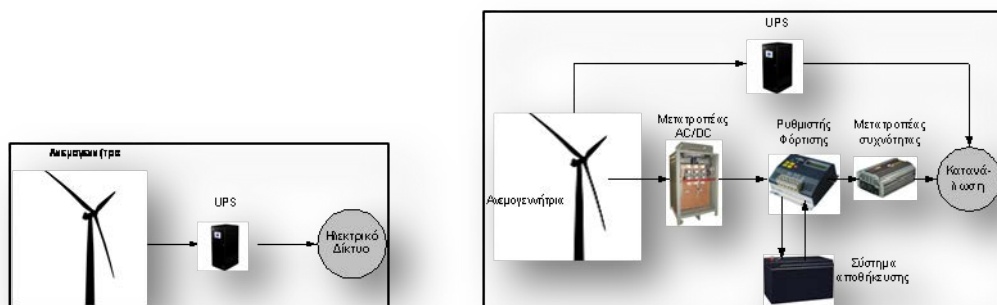
Ο χρόνος απόσβεσης της εγκατάστασης αποτελεί τον πιο κοινό δείκτη αξιολόγησης μιας επένδυσης. Μια απλοποιημένη προσέγγιση στην εκτίμηση του χρόνου απόσβεσης "n*" αποτελεί ο υπολογισμός του χρόνου όπου τα συνολικά ετήσια έσοδα γίνονται ίσα ή ξεπερνούν τα έξοδα συντήρησης προστιθέμενα στο κόστος αγοράς και εγκατάστασης έως τη συγκεκριμένη χρονιά, δηλ.:

$$\sum_{n=1}^{n=n^*} R_o - \left(IC_o + \sum_{n=1}^{n=n^*} FC_o + VC_o \right) \geq 0 \quad (6.14)$$

Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι ο παραπάνω υπολογισμός δε λαμβάνει υπόψη τη χρονική μεταβολή των οικονομικών μεγεθών και ως εκ τούτου δεν μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Η τεχνικοοικονομική αξιολόγηση μιας αιολικής εγκατάστασης απαιτεί γνώσεις οικονομικών και ξεφεύγουν από το σκοπό της περιληπτικής παρουσίασης των εφαρμογών των Α/Γ στα κτήρια. Για το λόγο αυτό, για περεταίρω στοιχεία οικονομικοτεχνικής αξιολόγησης οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να απευθυνθούν στη βιβλιογραφία Καλδέλλης 2005 και Καλδέλλης, Καββαδίας 2005.

6.5. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΤΑ ΚΤΗΡΙΑ

Οι πρώτες χρήσεις των Α/Γ σε κτηριακές εφαρμογές αφορούσαν κυρίως την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών καταναλωτών οι οποίοι δεν είχαν την επιλογή διασύνδεσης με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στη συνέχεια σήμερα ολοένα και αυξάνονται οι εφαρμογές των μικρών Α/Γ σε κτήρια προκειμένου να καλύψουν μέρος των ηλεκτρικών αναγκών των καταναλωτών ακόμη και με διασύνδεση σε ηλεκτρικό δίκτυο, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτηρίου αλλά και τη μείωση των περιβαλλοντικών και χρηματοοικονομικών επιπτώσεων που επιφέρει η χρήση των συμβατικών καυσίμων. Διακρίνονται οι περιπτώσεις χρήσης των Α/Γ, ως αυτόνομα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής και ως συστήματα διασυνδεδεμένα στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αντισταθμίζει μέρος της απορροφούμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, επιστρέφοντας σε αυτό τις ποσότητες που δεν μπορεί να απορροφήσει τοπικά ο καταναλωτής λόγω μειωμένης ζήτησης.



Σχήμα 6.9: Σχηματική παράσταση διασυνδεδεμένης στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (αριστερά) και αυτόνομης (δεξιά) αιολικής εγκατάστασης.

Ως εκ τούτου, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή της Α/Γ σε διασυνδεδεμένο σύστημα μειώνεται κατά τις απώλειες του σταθεροποιητή τάσης (UPS) του οποίου ο μέσος ετήσιος βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 95÷98%, ενώ στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Η μέση ετήσια απόδοση του μετατροπέα AC/DC (converter) (90%÷96%)
- η μέση ετήσια απόδοση του ρυθμιστή φόρτισης (87%÷93%)
- η μέση ετήσια απόδοση του μετατροπέα συχνότητας (inverter) (90%÷96%)
- οι απώλειες των καλωδιώσεων μεταφοράς (1%÷4%)
- η συνολική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης και απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας στο μετατροπέα συχνότητας (80%÷90%).

Οι Α/Γ που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών των κτηρίων τοποθετούνται είτε στον περιβάλλοντα χώρο του κτηρίου (σχήμα 6.10), είτε στην οροφή του κτηρίου (σχήμα 6.11), είτε ενσωματώνονται στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κτηρίου (σχήμα 6.12). Κατά την επιλογή της θέσης τοποθέτησης μιας Α/Γ, εκτός από τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής της θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία της Α/Γ, η στάθμη θορύβου και οι χωροταξικοί/πολεοδομικοί περιορισμοί.



Σχήμα 6.10: Τοποθέτηση Α/Γ στον περιβάλλοντα χώρο κτηρίου.



Σχήμα 6.11: Τοποθέτηση Α/Γ επάνω σε κτήρια.



Σχήμα 6.12: Ενσωμάτωση Α/Γ σε κτήρια.

Οι Α/Γ μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων των κτηρίων είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με άλλα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά. Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκής γεννήτριας και Α/Γ έχει αποδειχθεί για τη χώρα μας ως ο ιδανικός συνδυασμός για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κτηρίων καθώς οι πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται (αιολικό δυναμικό και ηλιακή ακτινοβολία) είναι συμπληρωματικές κατά τη διάρκεια του έτους. Λόγω των αυξημένων απαιτήσεων χώρου για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, η δημιουργία κτηρίων μηδενικής (zero energy buildings) ή σχεδόν μηδενικής (near zero energy buildings) ενεργειακής κατανάλωσης μπορεί να επιτευχθεί σε πολλές περιπτώσεις μόνο με την ταυτόχρονη εκμετάλλευση του ηλιακού και του αιολικού δυναμικού της περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Καββαδίας Κ.Α., Καλαφάτης Ελ., Ζαφειράκης Δ.Π., Καλδέλλης Ι.Κ., 2010, "Ανάλυση Τεχνικής Αξιοπιστίας εν Λειτουργία Ανεμογεννητριών στην Ελλάδα", 4^ο Εθνικό Συνέδριο για την Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Μονάδα Ανανεώσιμων Ενεργειακών Πόρων ΕΜΠ (RENES), Μάιος 2010, Αθήνα.

2. Καλδέλλης Ι.Κ., 2005, "Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας", 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα.
3. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., 2001, "Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας", Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα.
4. Καλδέλλης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., 2005, "Υπολογιστικές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας (Αιολική Ενέργεια – Μικρά Υδροηλεκτρικά)", Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα.
5. Καλδέλλης Ι.Κ., Φλούμης Ν., Βλάχου Δ., Καββαδίας Κ., Κων/νίδης Π., 2002, "Μια Ολοκληρωμένη Αναπτυξιακή Πρόταση για τα Νησιά του Αιγαίου", 2^ο Συνέδριο Τεχνολογίες Αρχιπελάγους, Απρίλιος 2002, Πειραιάς.
6. Μπαλαράς Κ.Α., Αργυρίου Α.Α., Καραγιάννης Φ., 2006, "Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας", Εκδόσεις Σέλκα-4Μ Τεκδοτική, Αθήνα.
7. Μπεργελές Γ., 1994, "Ανεμοκινητήρες", Εκδ. Συμεών, Αθήνα.
8. Νεονάκης Ι.Κ., Καββαδίας Κ.Α., Καλδέλλης Ι.Κ., 2002, "Ολοκληρωμένο Υπολογιστικό Πλαίσιο Οικονομικής Βιωσιμότητας Αιολικών Επενδύσεων με Χρήση Πιθανοτήτων", 7^ο Εθνικό Συνέδριο ΙΗΤ, Τόμος Β', σελ.41-48, Νοέμβριος 2002, Πάτρα.

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

9. Hau E., 2010, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", 2nd ed. Springer.
10. Kaldellis J., 2002, "An Integrated Time-Depending Feasibility Analysis Model of Wind Energy Applications in Greece", Energy Policy, vol. 30/4, pp. 267-280.
11. Kaldellis J., 2002, "Optimum Autonomous Wind–Power System Sizing for Remote Consumers, Using Long-Term Wind Speed Data", Applied Energy, vol. 71/3, pp. 215-233.
12. Kaldellis J., 2004, "Investigation of Greek Wind Energy Market Time-Evolution", Energy Policy, vol. 32/7, pp. 865-879.
13. Kaldellis J., 2007, "An Integrated Model for Performance Simulation of Hybrid Wind–Diesel Systems", Renewable Energy, vol. 32/9, pp. 1544-1564.
14. Kaldellis J., 2008, "The Wind Potential Impact on the Maximum Wind Energy Penetration in Autonomous Electrical Grids", Renewable Energy, vol. 33/7, pp. 1665-1677.
15. Kaldellis J., Gavras T.J., 2000, "The Economic Viability of Commercial Wind Plants in Greece a Complete Sensitivity Analysis", Energy policy, vol. 28/8, pp. 509-517.
16. Kaldellis J., Kavadias K., 2007, "Cost-Benefit Analysis of Remote Hybrid Wind-Diesel Power Stations: Case Study Aegean Sea Islands", Energy Policy, vol. 35/3, pp. 1525-1538.
17. Kaldellis J., Kavadias K., Koronakis P., 2007, "Comparing Wind and Photovoltaic Stand-Alone Power Systems Used for the Electrification of Remote Consumers", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11/ 1, pp. 57-77.
18. Kaldellis J., Vlachos G., 2006, "Optimum Sizing of an Autonomous Wind–Diesel Hybrid System for Various Representative Wind-Potential Cases", Applied Energy, vol. 83/2, pp. 113-132.
19. Kaldellis J.K., 2003, "An Integrated Feasibility Analysis of a Stand-Alone Wind Power System, Including No-Energy Fulfillment Cost", Wind Energy, vol. 6/4, pp. 355-364.
20. Kaldellis J.K., 2010, "Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems: Technology, Energy Storage and Applications", Woodhead Publishing Limited.
21. Kaldellis J.K., 2011, "Critical Evaluation of Financial Supporting Schemes for Wind-Based Projects: Case Study Greece" Energy Policy, vol. 39/5, pp. 2490-2500.

22. Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Kondili E., 2006, "Energy and Clean Water Coproduction in Remote Islands to Face the Intermittent Character of Wind Energy", *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 25/3, pp. 298-312.
23. Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Zafirakis D., 2009, "Integrated Electrification Solution for Remote Islands Based on Wind-PV Hybrid System", in *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Marseille, France.
24. Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Filios A.E., 2009, "A New Computational Algorithm for the Calculation of Maximum Wind Energy Penetration in Autonomous Electrical Generation Systems", *Applied Energy*, vol. 86/7-8, pp. 1011-1023.
25. Kaldellis J.K., Kostas P., Filios A., 2006, "Requirements of a Stand-Alone Wind Power Installation by Means of Photovoltaic Panels" *Energy*, pp. 383-397.
26. Kaldellis J.K., Tsesmelis M., 2002, "Integrated Energy Balance Analysis of a Stand-Alone Wind Power System for Various Typical Aegean Sea Regions", *Wind Energy*, vol. 5/1, pp. 1-17.
27. Kaldellis J.K., Zafirakis D., 2011, "The Wind Energy (R)Evolution: A Short Review of a Long History" *Renewable Energy*, vol. 36/7, pp. 1887-1901.
28. Kapsali M., Kaldellis J.K., 2010, "Combining Hydro and Variable Wind Power Generation by Means of Pumped-Storage under Economically Viable Terms", *Applied Energy*, vol. 87/11, pp. 3475-3485.
29. Notton G., Muselli M., Poggi P., Louche A., 2001, "Decentralized Wind Energy Systems Providing Small Electrical Loads in Remote Areas", *International Journal of Energy Research*, vol. 25, pp. 141-164.
30. Wood D.H., 2001, "An Improved Determination of the Optimum Tower Height for Small Wind Turbine", *Wind Engineering*, vol. 25, pp. 191-196.