



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ
Α.Π.Ε. ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΓΙΩΡΓΟΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΡΚΑΤΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Αθήνα , Σεπτέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ
Α.Π.Ε. ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΥ ΓΙΩΡΓΟΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΡΚΑΤΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .../.../.....

.....
Μαρκάτος Ν.

.....
Σαρίμβεης Χ.

.....
Κυρανούδης Χ.

Αθήνα , Σεπτέμβριος 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Μαρκάτο Νικόλαο για την αμέριστη υποστήριξή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τους Χημικούς Μηχανικούς Δρ. Αραμπατζή Γεώργιο, Περδικέα Νικόλαο και Μέγλερη Ευγενία χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη την εκπαιδευτική μου σταδιοδρομία.

Αναγνώστου Χ. Γεώργιος

Περίληψη

Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη διείσδυσης υβριδικών μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον κτιριακό τομέα και πιο συγκεκριμένα στον εμπορικό κτιριακό τομέα. Ειδικότερα μελετάται η περίπτωση υβριδικού συστήματος συμπαραγωγής φωτοβολταϊκών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος εκτίμησης των θερμικών ψυκτικών και ηλεκτρικών φορτίων του κτιρίου με βάση τα δομικά χαρακτηριστικά και το γεωγραφικό σημείο που βρίσκεται η εγκατάσταση. Η εκτίμηση πραγματοποιείται μέσω ενός υπολογιστικού κώδικα που αναπτύχθηκε στο Mathcad και συνεκτιμά την ανταλλαγή θερμότητας του κτιρίου με το εξωτερικό και με το εσωτερικό περιβάλλον.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η φωτοβολταϊκή τεχνολογία καθώς και η τρόποι ένταξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο ή κεκλιμένο επίπεδο μιας τοποθεσίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της συμπαραγωγής και τριπαραγωγής. Επίσης παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας, καθώς και η κατά περίπτωση χρήση των προς επιλογή συστημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού φορτίου για ένα υποθετικά υπό ανέγερση ξενοδοχείο στην περιοχή της Αθήνας. Επίσης, εκτιμώνται τα οικονομικά μεγέθη για τέσσερις περιπτώσεις κάλυψης του φορτίου. Οι τέσσερις αυτές περιπτώσεις είναι: α) Κάλυψη θερμικού φορτίου από κοινό λέβητα φυσικού αερίου, ψυκτικού φορτίου από κοινή κεντρική κλιματιστική μονάδα που λειτουργεί με ηλεκτρισμό και κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών από το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. β) Κάλυψη θερμικών φορτίων αποκλειστικά από μονάδα συμπαραγωγής και ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης, συμπληρωματική ηλεκτροδότηση από εθνικό δίκτυο. γ) Κάλυψη θερμικών φορτίων από κοινό λέβητα αερίου, ψυκτικών φορτίων από ηλεκτρική ψυκτική μονάδα και ηλεκτροδότηση από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ. δ) Κάλυψη θερμικών φορτίων από λέβητα συμπαραγωγής, ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης και ηλεκτροδότηση από την μονάδα συμπαραγωγής και από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των σεναρίων υποδεικνύουν ως οικονομικά συμφέρουσα λύση την (γ), χωρίς όμως να αποκλείονται οι περιπτώσεις (β) και (δ). Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως η συνεισφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος στην υβριδική περίπτωση (δ) μειώνει αισθητά τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Η περίπτωση (δ) είναι η ενεργειακά συμφέρουσα καθώς εκμεταλλεύεται την αποβαλλόμενη ενέργεια από την παραγωγή θερμότητας, οπότε θα ήταν καλό να μελετηθούν επιπλέον χρηματοδοτικά προγράμματα για αύξηση των επενδύσεων σε τέτοιου τύπου συστήματα, ώστε να καταστούν και οικονομικά πιο αποδοτικά.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εκτίμηση Ενεργειακών Αναγκών Κτιρίων	9
1.1	Μοντέλα υπολογισμού θερμικού φορτίου.....	10
1.1.1	Προβλεπτικό μοντέλο (Degree- day method).....	11
1.2	Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Κτιρίου	13
1.2.1	Θερμοκρασία ηλιακής ακτινοβολίας	14
1.2.2	Θερμικές απολαβές από ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό και παρουσία ανθρώπων.....	14
1.2.3	Μεταφορά θερμότητας από τοίχους και οροφή.....	15
1.2.4	Θερμικές απώλειες από το δάπεδο του ισογείου	16
1.2.5	Μεταφορά θερμότητας μέσω των παραθύρων	16
1.2.6	Θερμικές απώλειες λόγω αερισμού	18
1.3	Υπολογισμός αναγκών ζεστού νερού.....	19
1.4	Υπολογισμός ηλεκτρικών αναγκών	20
2	ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	22
2.1	Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	22
2.2	Μάζα αέρα - ακτινοβολία ενός ήλιου	23
2.3	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας	24
2.3.1	Υπολογισμοί ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας.....	24
2.3.2	Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία	27
2.4	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	29
2.4.1	Αρχές της φωτοβολταϊκής ενέργειας	29
2.4.2	Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων	33
2.4.3	Στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) (thin film).....	34
2.4.4	Υπόλοιπα στοιχεία τύπου thin film.....	35
2.4.5	Φωτοβολταϊκά συστήματα	37
2.4.6	Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων	41
2.5	ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ.....	43
2.5.1	Τρόποι ένταξης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κτίρια	43
3	Εισαγωγή στη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	50
3.1	Ιστορική εξέλιξη της συμπαραγωγής.....	51
3.2	Εφαρμογές	53
3.3	Συστήματα Συμπαραγωγής.....	54
3.3.1	Συστήματα «βάσης» και κορυφής»	54
3.3.2	Σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής	55
3.3.3	Συστήματα Αεριοστροβίλου.....	55
3.3.4	Συστήματα Ατμοστροβίλου.....	57
3.3.5	Παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης	61
3.3.6	Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου	62
3.3.7	Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά.....	63
3.3.8	Κυψέλες Καυσίμου	63
3.3.9	Μηχανές Stirling	65
3.4	Τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος.....	67
3.5	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε συστήματος.....	68
3.6	Μικροσυμπαραγωγή και Τριπαραγωγή	68
3.6.1	Τριπαραγωγή	69
3.6.2	Μικροσυμπαραγωγή	73
4	Εφαρμογή υβριδικού συστήματος ΑΠΕ σε ξενοδοχείο της Αθήνας	77
4.1	Εισαγωγή	77

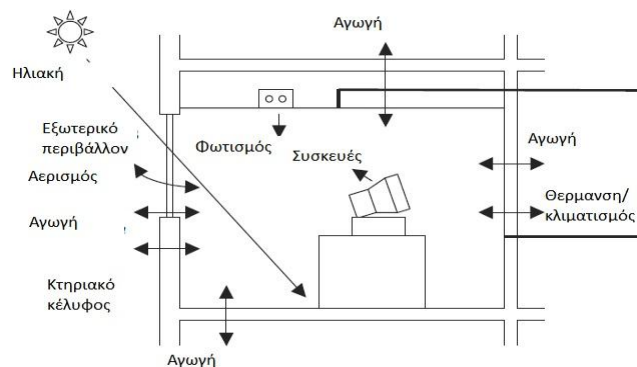
4.2	Εκτιμώμενα φορτία για το ξενοδοχείο	77
4.2.1	Αποτελέσματα εκτίμησης φορτίων	79
4.3	Περίπτωση βάρσης – ηλεκτροδότηση από εθνικό δίκτυο, ψύξη από κοινά κλιματιστικά, θέρμανση και ζεστό νερό από λέβητα φυσικού αερίου.....	81
4.4	Περίπτωση 2 – Κάλυψη θερμικών φορτίων αποκλειστικά από μονάδα συμπαραγωγής και ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης, συμπληρωματική ηλεκτροδότηση από εθνικό δίκτυο.....	82
4.4.1	Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης.....	83
4.4.2	Σκοπιμότητα χρήσης μονάδας συμπαραγωγής.....	84
4.4.3	Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης	84
4.4.4	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης	85
4.4.5	Συμπεράσματα	86
4.5	Περίπτωση 3 – Κάλυψη θερμικών φορτίων από κοινό λέβητα αερίου, ψυκτικών φορτίων από ηλεκτρική ψυκτική μονάδα και ηλεκτροδότηση από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ.....	87
4.5.1	Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης.....	88
4.5.2	Σκοπιμότητα χρήσης φωτοβολταϊκών πλαισίων	88
4.5.3	Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης	88
4.5.4	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης	89
4.5.5	Συμπεράσματα	90
4.6	Περίπτωση 4 – Κάλυψη θερμικών φορτίων λέβητα συμπαραγωγής, ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης και ηλεκτροδότηση από την μονάδα συμπαραγωγής και από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ.....	90
4.6.1	Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης.....	91
4.6.2	Σκοπιμότητα χρήσης μονάδας συμπαραγωγής και φωτοβολταϊκών	91
4.6.3	Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης	91
4.6.4	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης	92
4.6.5	Συμπεράσματα	93
4.7	Σύνοψη και συμπεράσματα	93
4.7.1	Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	95
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αλγόριθμος υπολογισμού ενεργειακών φορτίων.....	96
5	Βιβλιογραφία.....	104

1 Εκτίμηση Ενεργειακών Αναγκών Κτιρίων

Οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός κτιρίου χωρίζονται σε θερμικές, για θέρμανση του χώρου κυρίως το χειμώνα και για ζεστό νερό όλο το έτος, ψυκτικές για ψύξη τους καλοκαιρινούς κυρίως μήνες και ηλεκτρικές για όλη τη διάρκεια του έτους. Για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών αναγκών χρειάζεται να είναι γνωστές οι συσκευές που καταναλώνουν ενέργεια καθώς και η ισχύς τους, η μέση χρήση τους και ο συντελεστής φορτίου. Για το ζεστό νερό είναι αναγκαίο να είναι γνωστή η θερμοκρασία παροχής του από το δίκτυο ύδρευσης καθώς και η μέση ημερήσια κατανάλωση του, η οποία μπορεί να βρεθεί από πίνακες ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου.

Κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό ενός κτιρίου είναι σημαντικό να είναι γνωστή η θερμική συμπεριφορά του κατά τη διάρκεια του έτους ώστε να υπολογιστούν τα απαραίτητα ψυκτικά ή θερμικά φορτία που πρέπει να προσδοθούν, ώστε να παρέχει τη θερμική άνεση ανάλογα με τη λειτουργία που εξυπηρετεί (κατοικία, κτίριο γραφείων, νοσοκομείο, ξενοδοχείο, κλπ). Στο μεγαλύτερο μέρος του εικοστού αιώνα οι υπολογισμοί της θερμικής απόκρισης των κτιρίων έκαναν μία βολική αλλά αρκετά εσφαλμένη απλούστευση, ότι οι συνθήκες στα όρια του συστήματος είναι στατικές. Η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, το περιεχόμενο της υγρασίας, η ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα και η υγρασία αντιμετωπίζονταν ως σταθερές, ενώ το κτίριο υποτίθετο ότι είναι κενό.

Στο τελευταίο μέρος του εικοστού αιώνα, εισήχθη η επιρροή των κατοίκων και ένα ευρύτερο φάσμα εξωτερικών κλιματικών μεταβλητών, υπό την παραδοχή ομοιόμορφων κυκλικών εσωτερικών απολαβών θερμότητας και ηλιακής ακτινοβολίας που μεταδίδεται μέσω υαλοπινάκων και ενεργεί στις εσωτερικές επιφάνειες. Επιπλέον, άρχισε να θεωρείται ότι οι επιπτώσεις της θερμικής χωρητικότητας του κτιριακού κελύφους έχουν σημαντική επίδραση στην ανταλλαγή της ενέργειας κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων του κύκλου χρήσης και αναπτύχθηκαν απλές αναλυτικές μέθοδοι, ώστε να υπολογισθεί η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται μέσω των αδιαφανών στοιχείων σε οιονεί στατική κατάσταση. Ακόμη, πραγματοποιήθηκε μια πιο λεπτομερής επεξεργασία της γεωμετρίας της ηλιακής μεταφοράς θερμότητας μέσω υαλοπινάκων και συναφών συστημάτων σκίασης. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μία αναφορά στις τεχνικές εκτίμησης θερμικού και ψυκτικού φορτίου σε κτίρια και παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού τους. Στην εικόνα παρουσιάζονται συνοπτικά οι ροές ενέργειας σε ένα κτίριο.



Εικόνα 1-1 θερμικά φορτία κτιρίου

1.1 Μοντέλα υπολογισμού θερμικού φορτίου

Η επιστήμη της μαθηματικής μοντελοποίησης φυσικών συστημάτων περιλαμβάνει τον καθορισμό της τρίτης συνιστώσας του συστήματος όταν έχουν καθοριστεί οι δύο πρώτες. Υπάρχουν δύο γενικές και διακριτές προσεγγίσεις στην μοντελοποίηση και το ποια θα χρησιμοποιηθεί καθορίζεται από το σκοπό της διερεύνησης. Υπάρχουν δύο γενικά μοντέλα, αυτό της υποτιθέμενης μόνιμης κατάστασης και το δυναμικό το οποίο δεν απασχολεί την παρούσα εργασία.

Για την περίπτωση της υποτιθέμενης μόνιμης κατάστασης πραγματοποιούνται δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη είναι η κλασσική προσέγγιση (forward), κατά την οποία ο στόχος είναι η πρόβλεψη των μεταβλητών εξόδου ενός καθορισμένου μοντέλου με συγκεκριμένη δομή και γνωστές μεταβλητές όταν υπόκεινται σε κάποιες μεταβλητές εισόδου. Η προσέγγιση αυτή προϋποθέτει τη λεπτομερή γνώση των φυσικών φαινομένων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος και του μεγέθους των διαφόρων αλληλεπιδράσεων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι το σύστημα δεν χρειάζεται να έχει κατασκευασθεί πραγματικά για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του. Έτσι αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για προκαταρκτικό σχεδιασμό κατά τη φάση της ανάλυσης. Για κτιριακές εγκαταστάσεις αυτό σημαίνει πως ο ενεργειακός σχεδιασμός του κτιρίου (μέγεθος και λειτουργία συστημάτων θέρμανσης και ψύξης) μπορεί να πραγματοποιηθεί γνωρίζοντας τη φυσική δομή του κτιρίου, όπως για παράδειγμα γεωμετρία, δομικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν και διαστάσεις τους, γεωγραφική τοποθεσία, τύπος ηλεκτρικών συσκευών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά τη λειτουργία του κτιρίου και λοιπά.

Method	Data-Driven				Comments
	Forward	Empirical or Black-Box	Calibrated Simulation	Physical or Gray-Box	
<i>Steady-State Methods</i>					
Simple linear regression (Kissock et al. 1998; Ruch and Claridge 1991)	—	X	—	—	One dependent parameter, one independent parameter. May have slope and y-intercept.
Multiple linear regression (Dhar 1995; Dhar et al. 1998, 1999a, 1999b; Katipamula et al. 1998; Sonderegger 1998)	—	X	—	—	One dependent parameter, multiple independent parameters.
Modified degree-day method	X	—	—	—	Based on fixed reference temperature of 18.3°C.
Variable-base degree-day method, or 3-P change point models (Fels 1986; Reddy et al. 1997; Sonderegger 1998)	X	X	—	X	Variable base reference temperatures.
Change-point models: 4-P, 5-P (Fels 1986; Kissock et al. 1998)	—	X	—	X	Uses daily or monthly utility billing data and average period temperatures.
ASHRAE bin method and data-driven bin method (Thamilseran and Haberl 1995)	X	X	—	—	Hours in temperature bin times load for that bin.
ASHRAE TC 4.7 modified bin method (Knebel 1983)	X	—	—	—	Modified bin method with cooling load factors.
Multistep parameter identification (Reddy et al. 1999)	—	—	—	X	Uses daily data to determine overall heat loss and ventilation of large buildings.
<i>Dynamic Methods</i>					
Thermal network (Rabl 1988; Reddy 1989; Sonderegger 1977)	X	—	—	X	Uses equivalent thermal parameters (data-driven mode).
Response factors (Kusuda 1969; Mitalas 1968; Mitalas and Stephenson 1967; Stephenson and Mitalas 1967)	X	—	—	—	Tabulated or as used in simulation programs.
Fourier analysis (Shurcliff 1984; Subbarao 1988)	X	—	X	X	Frequency domain analysis convertible to time domain.
ARMA model (Rabl 1988; Reddy 1989; Subbarao 1986)	—	—	—	X	Autoregressive moving average (ARMA) model.
PSTAR (Subbarao 1988)	X	—	X	X	Combination of ARMA and Fourier series; includes loads in time domain.
Modal analysis (Bacot et al. 1984; Rabl 1988)	X	—	—	X	Building described by diagonalized differential equation using nodes.
Differential equation (Rabl 1988)	—	—	—	X	Analytical linear differential equation.
Computer simulation: DOE-2, BLAST, EnergyPlus (Crawley et al. 2001; Haberl and Bou-Saada 1998; Manke et al. 1996; Norford et al. 1994)	X	—	X	—	Hourly and subhourly simulation programs with system models.
Computer emulation (HVACSIM+, TRNSYS) (Clark 1985; Klein et al. 1994)	X	—	—	—	Subhourly simulation programs.
Artificial neural networks (Kreider and Haberl 1994; Kreider and Wang 1991)	—	X	—	—	Connectionist models.

Πίνακας 1-1 μοντέλα υπολογισμού

Η δεύτερη προσέγγιση (data driven) βασίζεται σε υπαρκτά δεδομένα. Σε αυτή την προσέγγιση οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου είναι γνωστές και μετρημένες, οπότε είναι απαραίτητο το σύστημα να έχει φυσική υπόσταση και κάποιο χρόνο λειτουργίας ώστε να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα. Ο στόχος είναι να καθοριστεί η μαθηματική περιγραφή του συστήματος για τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων. Η χρήση αυτού του μοντέλου επιτρέπει ακριβέστερη πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του κτιρίου σε σχέση με το προηγούμενο, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτικό σχεδιασμό. Ένα παράδειγμα κατά το οποίο μπορεί να γίνει χρήση αυτού του μοντέλου είναι μία εκ των υστέρων ενεργειακή επέμβαση σε ένα κτίριο, λαμβάνοντας δεδομένα από τις ενεργειακές καταναλώσεις της μέχρι τώρα χρήσης του. Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση μόνο του πρώτου μοντέλου και των διαφορετικών προσεγγίσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μεταβλητών εξόδου. Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό θερμικών αναγκών ενός κτιρίου.

1.1.1 Προβλεπτικό μοντέλο (Degree- day method)

Αν και οι διαδικασίες υπολογισμού των ενεργειακών απαιτήσεων διαφέρουν σημαντικά ως προς το βαθμό πολυπλοκότητάς τους, έχουν όλες τρία κοινά στοιχεία: τον υπολογισμό του φορτίου του χώρου, του δευτεροβάθμιου φορτίου εξοπλισμού και των πρωτογενών ενεργειακών αναγκών. Το δευτεροβάθμιο αφορά τον εξοπλισμό που κατανέμει θέρμανση, ψύξη ή και εξαερισμό για τον κλιματισμό του χώρου, ενώ το πρωτογενές αναφέρεται στον κεντρικό εξοπλισμό των εγκαταστάσεων που μετατρέπει καύσιμο ή ηλεκτρική ενέργεια σε θέρμανση ή ψύξη.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων είναι να προσδιοριστεί το φορτίο του χώρου, το οποίο είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από το χώρο ώστε να διατηρηθεί η απαραίτητη θερμική άνεση. Η πιο απλοϊκή περίπτωση είναι να θεωρήσουμε πως η ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της θερμικής άνεσης είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα. Στην πραγματικότητα λαμβάνονται υπόψη, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, και άλλοι παράγοντες όπως οι ηλιακές απολαβές, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας στο κέλυφος του κτιρίου, οι εσωτερικές απολαβές θερμότητας και οι επιπτώσεις του ανέμου στο κτίριο. Μολονότι ο υπολογισμός των ενεργειακών απαιτήσεων είναι παρόμοιος με αυτόν της διαστασιολόγησης ψυκτικού και θερμικού εξοπλισμού, διαφέρει στο γεγονός πως δεν χρησιμοποιούνται ακραίες τιμές θερμοκρασιών με βάση το χειρότερο σενάριο, αλλά μέσες τιμές για την περίοδο υπολογισμού.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, ένα από τα προβλεπτικά μοντέλα είναι ο υπολογισμός των βαθμοημερών θέρμανσης ή ψύξης, μέθοδος που προτιμάται σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Μία κρίσιμη παράμετρος αυτής της μεθόδου είναι η θερμοκρασία βάσης η οποία αναφέρεται στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος κάτω από την οποία χρειάζεται να προστεθεί θερμότητα στο χώρο για την εξασφάλιση θερμικής άνεσης το χειμώνα και πάνω από την οποία πρέπει να αφαιρεθεί θερμότητα για το καλοκαίρι. Εξαρτάται από την ανταλλαγή θερμότητας του κτιρίου με το περιβάλλον καθώς και με όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας εντός του κτιρίου (παρουσία ανθρώπων, χρήση ηλεκτρικών συσκευών). Για τον υπολογισμό της μελετάται για ποια θερμοκρασία η συνολική ανταλλαγή θερμότητας του κτιρίου με το περιβάλλον είναι ίση με μηδέν, κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο υπολογισμού.

Υπάρχουν πίνακες με τις τιμές των βαθμομερών για συγκεκριμένες θερμοκρασίες βάσης αλλά είναι προτιμότερο να υιοθετηθεί ένας αλγόριθμος υπολογισμού ανάλογα με τη θερμοκρασία βάσης του εξεταζόμενου συστήματος.

Για τον υπολογισμό των βαθμομερών γίνεται χρήση κλιματικών δεδομένων σε ετήσια ή σε μηνιαία βάση και προκύπτουν ανάλογα οι συνολικές ετήσιες βαθμομέρες ή μηνιαίες βαθμομέρες. Στον αλγόριθμο υπολογισμού (Παράρτημα Ι) που καταστρώθηκε για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες βαθμομέρες με βάση τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας αλλά και χρησιμοποιώντας μια τυπική μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας από πίνακες δεδομένων. Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των μηνιαίων βαθμομερών θέρμανσης στην περίπτωση που η εξωτερική θερμοκρασία είναι μικρότερη της θερμοκρασίας βάσης είναι:

$$HDD_b = N * s_d [Z_b * F(Z_b) + f(Z_b)]$$

όπου N είναι ο αριθμός των ημερών του μήνα και Z_b είναι η διαφορά μεταξύ της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας \bar{T} και της θερμοκρασίας βάσης T_b , κανονικοποιημένο με την τυπική απόκλιση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας s_d :

$$Z_b = \frac{T_b - \bar{T}}{s_d}$$

Η f είναι η κανονική (Gaussian) συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και η F είναι η κανονική συνάρτηση ισοδύναμης σωρευτικής πιθανότητας:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-Z^2}{2}\right)}$$

$$F(Z) = \sum_{-\infty}^Z f(z) dz$$

Στην περίπτωση που η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία βάσης οι βαθμομέρες είναι 0. Η εύρεση της θερμοκρασίας βάσης βρέθηκε με μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία εμφανίζεται στον αναλυτικό αλγόριθμο (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι), στην οποία λαμβάνονται υπόψη όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας που αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

Οι βαθμομέρες ψύξης όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία βάσης, υπολογίζονται από τον τύπο:

$$CDD_b = N * s_d [Z_b * F(Z_b) + f(Z_b)]$$

Αλλά τώρα το Z_b υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_b = \frac{\bar{T} - T_b}{s_d}$$

1.2 Μελέτη Θερμικής Συμπεριφοράς Κτιρίου

Κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό ενός κτιρίου πρέπει όπως αναφέρθηκε, εκτός από τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, να υπολογιστεί μέσα από μια αναλυτική διαδικασία η ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση του θερμικού ή ψυκτικού φορτίου που χρειάζεται να προσδοθεί στο χώρο. Οι κύριοι τρόποι ανταλλαγής θερμότητας είναι μέσω των τοιχωμάτων, μέσω των ανοιγμάτων (υαλοπίνακες και πόρτες), από την οροφή και το δάπεδο. Επίσης, τις ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη επηρεάζουν οι ηλεκτρικές συσκευές καθώς και η παρουσία των ανθρώπων που προσδίδουν θερμότητα στο χώρο. Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ανάγκη για αερισμό του χώρου.

Το μέγεθος του συστήματος θέρμανσης ή ψύξης για ένα κτίριο καθορίζεται από τις συνθήκες που πρέπει να επικρατούν στο εσωτερικό του και με βάση τις εξωτερικές συνθήκες. Το επιθυμητό εύρος των συνθηκών καθορίζεται από κάποια πρότυπα που εξασφαλίζουν τη θερμική άνεση των κατοίκων και παραμένει σχετικά σταθερό. Για παράδειγμα η προτεινόμενη τιμή για θέρμανση εσωτερικού χώρου είναι 22°C. Αντίθετα, οι συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον του κτιρίου μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με την ώρα, τον μήνα ακόμα και τον χρόνο. Ένα σύστημα κλιματισμού (θέρμανσης ή ψύξης) πρέπει να μπορεί να διατηρεί τις συνθήκες θερμικής άνεσης κάτω από κάποιες τιμές των εξωτερικών παραμέτρων.

Επικρατεί η αντίληψη πως κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος κλιματισμού πρέπει να επιλεγεί το μέγεθος που θα καλύπτει όλες τις ώρες την καθορισμένη τιμή των εσωτερικών συνθηκών ακόμη και κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες. Αλλά, η επιλογή μεγέθους με αυτό το κριτήριο των ακραίων συνθηκών δεν είναι πρακτική, καθώς θα καταλαμβάνει περισσότερο χώρο αλλά και θα έχει μεγαλύτερα λειτουργικά έξοδα. Οι περισσότεροι άνθρωποι δεν ενοχλούνται αν για ένα μικρό διάστημα οι συνθήκες δεν είναι οι ιδανικές, προφανώς χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, όταν οι εξωτερικές συνθήκες είναι ακραίες. Αυτό σημαίνει μικρότερο λειτουργικό αλλά και αρχικό κόστος για το σύστημα κλιματισμού. Όμως για να υπάρχει ένας μεθοδικός ακριβής τρόπος ώστε να γίνει σωστός σχεδιασμός χωρίς υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση μεγέθους πρέπει να είναι γνωστές οι κλιματικές συνθήκες που θα επικρατούν στο μέλλον. Κάτι τέτοιο είναι προφανώς αδύνατο, οπότε χρησιμοποιούνται τιμές παρελθόντων ετών μέσα από μέσες τιμές αρκετών χρόνων. Τέτοια δεδομένα μπορούν να βρεθούν από μετεωρολογικές υπηρεσίες αλλά και από την ASHRAE [2]. Για κοινά κτίρια το ιδανικό κόστος με ικανοποίηση των συνθηκών θερμικής άνεσης επιτυγχάνεται στην κάλυψή τους το 97,5 % του έτους. Αυτή η παραδοχή δεν ισχύει σε κτίρια που έχουν πιο απαιτητικές εσωτερικές συνθήκες όπως για παράδειγμα τα νοσοκομεία.

Συνήθως δεν συμπεριλαμβάνεται το εσωτερικό θερμικό φορτίο στον υπολογισμό του συστήματος θέρμανσης ενώ λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος ψύξης. Αυτό συμβαίνει για να διασφαλισθεί πως το σύστημα θα είναι δυνατόν να θερμάνει και χωρίς την παρουσία ανθρώπων και τη λειτουργία ηλεκτρικών συσκευών, οι οποίες υπό κανονικές συνθήκες θα προσέδιδαν θερμότητα στον εσωτερικό χώρο.

Ο άνεμος επηρεάζει την μεταφορά θερμότητας από και προς το κτίριο και η επιρροή του περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς μέσω της τιμής του συντέλεση συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα. Η μέση τιμή των σταθερών που χρησιμοποιούνται

για εκτίμηση των φορτίων είναι $h_0 = 29 \frac{W}{K \cdot m^2}$ για συναγωγή στον εξωτερικό χώρο και $h_i = 8.3 \frac{W}{K \cdot m^2}$ για τον εσωτερικό χώρο.

Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη θερμότητα που προσδίδεται στο κτίριο. Δεν επηρεάζει το μέγεθος του συστήματος θέρμανσης καθώς οι μέγιστες απαιτήσεις είναι συνήθως νωρίς το πρωί. Όμως επηρεάζει τις συνολικές ανάγκες θέρμανσης καθώς και το μέγεθος του συστήματος ψύξης του κτιρίου. Πριν πραγματοποιηθεί η ανάλυση των φαινομένων μεταφοράς θα γίνει μια αναφορά στα κλιματολογικά δεδομένα και σε παραδοχές που μπορούν να γίνουν με βάση την ηλιακή ακτινοβολία.

1.2.1 Θερμοκρασία ηλιακής ακτινοβολίας

Ο ήλιος είναι η κύρια πηγή θερμότητας της γης και χωρίς αυτόν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν θα ήταν πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του σύμπαντος ($-270^{\circ}C$). Η ηλιακή ενέργεια που αποθηκεύεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, το έδαφος και σε δομές όπως τα κτίρια απελευθερώνεται σταδιακά στη διάρκεια της νύχτας. Έτσι οι μεταβολές της εξωτερικής θερμοκρασίας εξαρτώνται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο κύριος λόγος ανάγκης συστημάτων ψύξης και για αυτό αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στο μέγιστο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, το οποίο απαιτείται συνήθως νωρίς το απόγευμα.

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας για τους υαλοπίνακες εκφράζεται σε όρους κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας (SHGF) και θα αναφερθεί αναλυτικά στην παράγραφο της επιρροής των υαλοπινάκων στη μεταφορά θερμότητας. Για τις αδιαφανείς επιφάνειες όπως οι τοίχοι και η οροφή, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται θεωρώντας την θερμοκρασία του περιβάλλοντος προσαυξημένη κατά ένα ποσό που ισούται με αυτήν την επίδραση. Αυτό γίνεται αντικαθιστώντας τη θερμοκρασία από τα κλιματολογικά δεδομένα (T_{air}), με την οποία υπολογίζεται η μεταφορά θερμότητας, από τη θερμοκρασία εκείνη που δίνει τον ίδιο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας (q_{solar}) και της συναγωγής με τον αέρα του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία αυτή ($T_{sol-air}$) υπολογίζεται μέσω του συντελεστή ηλιακής απορροφητικότητας των αδιαφανών επιφανειών (a_{wall}) και του συντελεστή που περιλαμβάνει το φαινόμενο της συναγωγής και ακτινοβολίας (h_0). Τυπικές τιμές των παραπάνω συντελεστών μπορούν να βρεθούν από την ASHRAE.

$$T_{sol-air} = T_{air} + \frac{q_{solar} * a_{wall}}{h_0}$$

1.2.2 Θερμικές απολαβές από ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό και παρουσία ανθρώπων

Η μετατροπή της χημικής ή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική εντός ενός κτιρίου αποτελεί τις εσωτερικές απολαβές θερμότητας ή το εσωτερικό φορτίο ενός κτιρίου. Οι πρωταρχικές πηγές του εσωτερικού φορτίου είναι οι άνθρωποι, οι ηλεκτρικές συσκευές και οι λαμπτήρες φωτισμού. Συνηθίζεται να αγνοείται το

εσωτερικό φορτίο στο σχεδιασμό του απαιτούμενου θερμικού φορτίου ώστε το σύστημα θέρμανσης να καλύπτει τις ανάγκες ακόμη και όταν αυτό δεν υφίσταται, αλλά υπολογίζεται πάντα στο σχεδιασμό του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου, αφού το εσωτερικό φορτίο αποτελεί σημαντικό μερίδιο των απαιτήσεων για ψύξη.

Το μέσο ποσό θερμότητας που προσδίδει ένας άνθρωπος στο χώρο εξαρτάται από το βαθμό δραστηριότητάς του και κυμαίνεται περίπου στα 100 W για ένα άτομο που αναπαύεται και πάνω από 500 W για ένα άτομο που αθλείται έντονα. Τυπικές τιμές μπορούν να βρεθούν σε πίνακες της ASHRAE. Κατά τον υπολογισμό των αναγκών θέρμανσης δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία ανθρώπων ενώ κατά τον υπολογισμό του ψυκτικού φορτίου εκτιμάται ότι το κτίριο έχει 100 % πληρότητα. Εν απουσία καλύτερων δεδομένων, ο αριθμός των ανθρώπων εντός του κτιρίου εκτιμάται στη βάση ενός ανθρώπου ανά 1 m² για αίθουσες συσκέψεων, 2.5 m² για σχολεία, 3-5 m² για καταστήματα και 10-15 m² για γραφεία.

Ο φωτισμός αποτελεί περίπου το 7% της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε κτίρια οικιών και 25% σε εμπορικά κτίρια. Έτσι, ο φωτισμός έχει σημαντικό αντίκτυπο στα ψυκτικά και θερμικά φορτία των κτιρίων. Το συνολικό ποσό θερμότητας που αποδίδει κάθε λαμπτήρας κυμαίνεται σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του, έτσι πρέπει να είναι γνωστός ο τύπος λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το εσωτερικό φορτίο που αποδίδεται λόγω του φωτισμού.

Οι πιο πολλές ηλεκτρικές συσκευές κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες, έτσι η θερμότητα που προσδίδεται στο χώρο από μια συσκευή σε σταθερή λειτουργία είναι η ενέργεια που καταναλώνεται από τον κινητήρα του. Η ισχύς που έχει μία συσκευή αντιπροσωπεύει την λειτουργία της στο μέγιστο φορτίο, αλλά συνήθως λειτουργούν σε μερικό φορτίο, πολλές φορές περίπου στο 30-40%, έτσι καταναλώνει και μεταφέρει λιγότερη ισχύ από τη μέγιστη. Αυτή η διαφορά χαρακτηρίζεται από το συντελεστή φορτίου με μέγιστη λειτουργία το 1.

Σε κλειστούς χώρους μεταφέρεται θερμότητα από όλες τις ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν και πρέπει να συνεκτιμώνται κατά την εκτίμηση του απαραίτητου ψυκτικού φορτίου. Όμως, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην εκτιμώμενη θερμότητα που μεταφέρεται από τις ηλεκτρικές συσκευές που οφείλονται στις διακυμάνσεις των συσκευών και των ωρών χρήσης. Όταν είναι γνωστές ακριβώς οι ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται, η παραγόμενη θερμότητα καθορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας δεδομένα που δίνονται από την ASHRAE. Η παρουσία θερμοστατών και τυπικών μεθόδων χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών οδηγούν πρακτικά σε χρήση χαμηλότερη από το πλήρες φορτίο, περίπου στο 50 %.

1.2.3 Μεταφορά θερμότητας από τοίχους και οροφή

Υπό σταθερές συνθήκες, το ποσό της μεταφοράς θερμότητας μέσω οποιουδήποτε στοιχείου ενός τοίχου ή οροφής του κτιρίου μπορεί να προσδιοριστεί από τον τύπο:

$$Q = U * A * (T_i - T_o)$$

Όπου T_i και T_o είναι η θερμοκρασία αέρα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου αντίστοιχα, A είναι η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας, U είναι ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, ενώ το $R = \frac{1}{U}$ είναι η ολική θερμική αντίσταση. Ο όρος $(T_i - T_o)$ μπορεί να αντικατασταθεί με τις μηνιαίες βαθμοημέρες θέρμανσης

ώστε να ληφθεί το ολικό ποσό μεταφοράς θερμότητας μέσω των τοίχων και της οροφής σε μηνιαία βάση.

Οι τοίχοι και οι οροφές των κτιρίων αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα υλικών και οι συνθήκες διαφέρουν σημαντικά από το ένα κτίριο στο άλλο. Έτσι, δεν είναι βολικό να υπάρχουν λίστες με τις τιμές του R για διαφορετικά είδη τοίχων και οροφών κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Αντί αυτού, η ολική θερμική αντίσταση υπολογίζεται από τις θερμικές αντιστάσεις του κάθε υλικού χρησιμοποιώντας το δίκτυο θερμικών αντιστάσεων. Η μονάδα θερμικής αντίστασης ενός στρώματος υλικού πάχους L και θερμικής αγωγιμότητας k υπολογίζεται από το $R = \frac{L}{k}$. Η θερμική αγωγιμότητα και οι άλλες ιδιότητες των κοινών υλικών που χρησιμοποιούνται σε κτίρια μπορούν να βρεθούν από την ASHRAE.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω των εκτεθειμένων επιφανειών ενός κτιρίου επηρεάζονται και από τα φαινόμενα ακτινοβολίας και συναγωγής και τους αντίστοιχους συντελεστές. Η επίδραση αυτών των φαινομένων στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια των τοίχων και οροφών εκφράζεται συνήθως με συνδυασμένους συντελεστές συναγωγής και ακτινοβολίας h_i και h_o για εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια αντίστοιχα. Τυπικές τιμές αυτών των συντελεστών μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία. Η αντίστοιχη θερμική αντίσταση που οφείλεται στα φαινόμενα της συναγωγής και της ακτινοβολίας εκφράζεται ως $R = \frac{1}{h_i}$ για τον εσωτερικό χώρο και $R = \frac{1}{h_o}$ για τον εξωτερικό.

1.2.4 Θερμικές απώλειες από το δάπεδο του ισογείου

Πολλά κτίρια κατοικιών και εμπορικά κτίρια δεν έχουν υπόγειο και το δάπεδο εφάπτεται απευθείας στο επίπεδο της γης ή ελαφρώς χαμηλότερα. Τέτοιου είδους κτίρια παρουσιάζουν απώλειες θερμότητας κυρίως μέσω της περιμέτρου της βάσης του κτιρίου προς τον εξωτερικό αέρα παρά προς το έδαφος. Έτσι, οι συνολικές απώλειες θερμότητας από ένα δάπεδο που εφάπτεται στην βάση του κτιρίου είναι ανάλογες προς την περίμετρο αυτού αντί της συνολικής επιφάνειας του δαπέδου και εκφράζεται ως:

$$Q_{\text{floor on grade}} = U_{\text{grade}} * p_{\text{floor}} * (T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}})$$

Όπου U_{grade} εκφράζει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας από το δάπεδο ανά μονάδα διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής θερμοκρασίας T_{indoor} και της εξωτερικής T_{outdoor} και ανά μονάδα μήκους της περιμέτρου p_{floor} του κτιρίου. Ο όρος $(T_{\text{indoor}} - T_{\text{outdoor}})$ μπορεί να αντικατασταθεί με τις μηνιαίες βαθμοήμερες θέρμανσης ώστε να ληφθεί το ολικό ποσό μεταφοράς θερμότητας μέσω του δαπέδου σε μηνιαία βάση. Η μεταφορά θερμότητας μέσω των δαπέδων συνήθως αγνοείται στην περίπτωση της εκτίμησης ψυκτικού φορτίου.

1.2.5 Μεταφορά θερμότητας μέσω των παραθύρων

Τα παράθυρα μπορεί να αποτελούνται από ένα ή από πολλαπλά στρώματα και προσφέρουν τη μικρότερη αντίσταση στη ροή θερμότητας. Σε μία τυπική οικία

περίπου το ένα τρίτο της συνολικής απώλειας θερμότητας το χειμώνα πραγματοποιείται μέσω των παραθύρων. Επιπρόσθετα, οι απολαβές ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων ευθύνονται για σημαντικό ποσό του ψυκτικού φορτίου το καλοκαίρι. Η καθαρή επιρροή ενός παραθύρου στη θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τον προσανατολισμό του και από τα ηλιακά και κλιματολογικά δεδομένα.

Παρά το γεγονός ότι τα παράθυρα είναι τόσο ανεπιθύμητα από ενεργειακής σκοπιάς, αποτελούν ένα βασικό κομμάτι οποιουδήποτε κτιρίου αφού βελτιώνουν την όψη του και επιτρέπουν στο φως του ήλιου και τη θερμότητά του να εισέλθουν εντός του κτιρίου. Επίσης επιτρέπουν στους κατοίκους να βλέπουν εκτός του κτιρίου χωρίς να χρειαστεί να βγουν από αυτό ενώ, αποτελούν και εξόδους ανάγκης σε χαμηλά κτίρια.

Σημαντικές παράμετροι για την επιλογή παραθύρων είναι η θερμική άνεση και η ενεργειακή διατήρηση. Ένα παράθυρο θα πρέπει να έχει μια καλή μετάδοση του φωτός ενώ πρέπει να παρέχει αποτελεσματική αντίσταση στη ροή θερμότητας. Οι απαιτήσεις στον φωτισμό ενός κτιρίου μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μέσω της μεγιστοποίησης της χρήσης του φωτός της ημέρας. Οι απώλειες θερμότητας το χειμώνα από τα παράθυρα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση αεροστεγών διπλών ή τριπλών παραθύρων, παράθυρα με επιλεκτικές επιστρώσεις μεμβρανών και να επιτρέπει την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατόν περισσότερο. Οι ηλιακές απολαβές, και ως εκ τούτου το φορτίο ψύξης το καλοκαίρι μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση αποτελεσματικών εσωτερικών ή εξωτερικών σκίαστρων στα παράθυρα.

Στην πραγματικότητα η ενεργειακή ανάλυση ενός παραθύρου γίνεται σε τρεις περιοχές, στο πλαίσιο του, στην άκρη του γυαλιού και στο κέντρο του γυαλιού. Το τελευταίο αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος ενός παραθύρου και για απλούστευση η παρούσα εργασία και ο αλγόριθμος που ακολουθεί περιορίζεται μόνο στην ανάλυση αυτού. Ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω των παραθύρων εκφράζεται με βάση τα παραπάνω ως:

$$Q_{window} = U_{window} \times A_{window} \times (T_{indoors} - T_{outdoors})$$

Όπου A_{window} η επιφάνεια του παραθύρου και U_{window} ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με βάση την παραπάνω σύμβαση. Ο όρος $(T_{indoors} - T_{outdoors})$ μπορεί να αντικατασταθεί με τις μηνιαίες βαθμοημέρες θέρμανσης, ώστε να ληφθεί το ολικό ποσό μεταφοράς θερμότητας μέσω των παραθύρων σε μηνιαία βάση. Θεωρώντας μονοδιάστατη μεταφορά θερμότητας μέσω ενός μονού παραθύρου πάχους d και θερμικής αγωγιμότητας k , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εκφράζεται ως:

$$U_{window} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_o}}$$

Η συνεισφορά του τζαμιού στην συνολική αντίσταση μεταφοράς θερμότητας που περιγράφεται παραπάνω είναι αρκετά μικρή και δεν αυξάνεται ιδιαίτερα απλά αυξάνοντας το πάχος του γυαλιού. Η λύση σε αυτό είναι η δημιουργία στρωμάτων γυαλιών με κενό ανάμεσά τους οπότε δημιουργούνται τα τζάμια δύο, τριών ή παραπάνω στρωμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μέσω των παραθύρων εκφράζεται ως:

$$U_{window} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^{layer} \frac{d}{k} + \sum_{i=1}^{layer-1} \frac{1}{h_{space}} + \frac{1}{h_o}}$$

Όπου *layer* είναι ο αριθμός των στρωμάτων γυαλιού στο τζάμι και h_{space} η σταθερά μεταφοράς θερμότητας στο κενό μεταξύ των στρωμάτων που αποτελεί χαρακτηριστικό του παραθύρου.

1.2.5.1 Θερμικές απολαβές μέσω παραθύρων

Όπως έχει αναλυθεί και σε προηγούμενη παράγραφο η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτιρίου. Στην περίπτωση των παραθύρων η επιρροή αυτή δεν υπολογίζεται με τη θερμοκρασία ηλιακής ακτινοβολίας, όπως γίνεται στις άλλες περιπτώσεις, αλλά μέσω του συντελεστή ηλιακών απολαβών (SHGC). Έτσι ο συνολικός ρυθμός μεταφοράς ηλιακών απολαβών εκφράζεται ως:

$$Q_{solar\ gain} = SHGC * A_{window} * q_{solar,incident}$$

Όπου $q_{solar,incident}$ εκφράζει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του παραθύρου και ο συντελεστής *SHGC* μπορεί να βρεθεί μέσω της ASHRAE, ανάλογα με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του παραθύρου.

1.2.6 Θερμικές απώλειες λόγω αερισμού

Το ποσοστό διείσδυσης του αέρα του κτιρίου μπορεί να προσδιοριστεί με απευθείας μετρήσεις από την έγχυση αερίου ιχνηθέτη σε ένα κτίριο και την παρατήρηση της μείωσης της συγκέντρωσής της με το χρόνο ή θέτοντας υπό πίεση το κτίριο στα 10 – 75 Pa με ένα μεγάλο ανεμιστήρα τοποθετημένο σε μια πόρτα ή ένα παράθυρο, και τη μέτρηση της ροής του αέρα που απαιτείται για να διατηρηθεί συγκεκριμένη εσωτερική-εξωτερική διαφορά πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή του αέρα για να διατηρήσει μια διαφορά πίεσης, τόσο περισσότερο το κτίριο μπορεί να έχει διαρροή αέρα. Εξαφθοριούχο θείο (SF₆) χρησιμοποιείται συνήθως ως αέριο ιχνηθέτης επειδή είναι αδρανές, μη τοξικό και είναι εύκολα ανιχνεύσιμο σε συγκεντρώσεις χαμηλές που φτάνουν το 1 μέρος ανά δισεκατομμύριο. Οι δοκιμές συμπίεσης είναι πιο εύκολο να διεξαχθούν και ως εκ τούτου προτιμώνται έναντι του ιχνηθέτη.

Παρά την ακρίβειά τους, οι άμεσες τεχνικές μέτρησης είναι άβολες, δαπανηρές και χρονοβόρες. Μια πρακτική εναλλακτική λύση είναι να προβλεφθεί η διείσδυση του αέρα βάσει των εκτεταμένων διαθέσιμων στοιχείων για τα υπάρχοντα κτίρια. Ένας τρόπος για να προβλέψουμε το ποσοστό διείσδυσης του αέρα είναι ο προσδιορισμός του είδους και μεγέθους όλων των ρωγμών σε όλες τις πιθανές θέσεις, καθώς και τη διαφορά πίεσης μεταξύ των ρωγμών σε συγκεκριμένες συνθήκες, και υπολογίζοντας τους ρυθμούς ροής του αέρα. Αυτό η μέθοδος είναι γνωστή ως “ρωγμή”.

Μια απλούστερη και πιο πρακτική προσέγγιση για την εκτίμηση για το πόσες φορές το σύνολο του αέρα σε ένα κτίριο, αντικαθίσταται από τον εξωτερικό αέρα ανά ώρα, είναι βάση εμπειριών με παρόμοια κτίρια υπό παρόμοιες συνθήκες. Αυτό ονομάζεται μέθοδος αλλαγής αέρα και το ποσοστό διείσδυσης στην περίπτωση αυτή εκφράζεται σε όρους των αλλαγών του αέρα ανά ώρα (ACH). Κυριολεκτικά η ποσότητα ACH αντιπροσωπεύει το ποσό εξωτερικού αέρα που εισδύει στο κτίριο εκφρασμένο σε όγκους του κτιρίου.

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του φρέσκου αέρα σε κτίρια κατοικιών πρέπει να υπάρχει ένα ελάχιστο 0.35 ACH. Συνήθως η εισροή αέρα σε κατοικίες κυμαίνεται πάνω από αυτήν την τιμή και δεν χρειάζεται η μηχανική παροχή αέρα. Η ανταλλαγή αέρα, ή η παροχή φρέσκου αέρα, έχει σημαντικό ρόλο στην υγεία, την ποιότητα του αέρα, τη θερμική άνεση, και την κατανάλωση ενέργειας. Η παροχή φρέσκου αέρα είναι ένα δίκκο μαχαίρι, μια πολύ μικρή δόση θα προκαλέσει προβλήματα υγείας και άνεσης, όπως το σύνδρομο των άρρωστων κτιρίων που εμφανίστηκαν σε πολύ καλά μονωμένα κτίρια, ενώ μεγάλη παροχή θα σπαταλούσε ενέργεια. Ως εκ τούτου, το ποσοστό της παροχής φρέσκου αέρα θα πρέπει να είναι αρκετό για τη διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα σε αποδεκτό επίπεδο. Το ποσοστό διείσδυσης των παλαιών κτιρίων είναι αρκετές φορές το απαιτούμενο ελάχιστο παροχής καθαρού αέρα, και έτσι υπάρχει μεγάλη σπατάλη ενέργειας που συνδέεται με αυτό. Η εισροή αέρα αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας ενός κτιρίου με δύο τρόπους. Πρώτον, ο εισερχόμενος εξωτερικός αέρα θα πρέπει να θερμαίνεται (ή να ψύχεται το καλοκαίρι) στην εσωτερική θερμοκρασία αέρα. Αυτό αντιπροσωπεύει θερμικό φορτίο αερισμού και εκφράζεται ως:

$$Q_{infiltration} = \rho_o * c_p * V_{building} * ACH * (T_i - T_o)$$

Όπου ρ_o είναι η πυκνότητα του εξωτερικού αέρα και c_p είναι η ειδική θερμότητα του αέρα. Ο όρος $(T_i - T_o)$ μπορεί να αντικατασταθεί με τις μηνιαίες βαθμομημέρες θέρμανσης ώστε να ληφθεί το ολικό ποσό απώλειας θερμότητας λόγω αερισμού σε μηνιαία βάση.

1.3 Υπολογισμός αναγκών ζεστού νερού

Η διαδικασία υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου για παραγωγή ζεστού νερού εξαρτάται από τον τύπο χρήσης, τύπο κτιρίου, τους κατοίκους, τα κλιματολογικά δεδομένα και το δίκτυο παροχής. Ο τρόπος υπολογισμού ακολουθεί την ίδια διαδικασία με την εκτίμηση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, όπου αρχικά υπολογίζονται οι βαθμομημέρες ζεστού νερού:

$$WDD = Days * (T_{base\ water} - T_{water})$$

Όπου Days οι ημέρες που αποτελούν τη βάση υπολογισμού (μηνιαία, ετήσια, κ.λ.π.), $T_{base\ water}$ η θερμοκρασία στην οποία είναι επιθυμητό να παρέχεται το ζεστό νερό, T_{water} η θερμοκρασία στην οποία παρέχεται το νερό του δικτύου την περίοδο της βάσης υπολογισμού. Κατόπιν, για να εκτιμηθεί το θερμικό φορτίο το οποίο πρέπει να προσδοθεί στο νερό του δικτύου για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Q_{water} = m_{dot} * dyn * rooms * 2 * \rho_{water} * c_{p\ water} * WDD$$

Όπου m_{dot} η απαιτούμενη παροχή ζεστού νερού ανά άτομο σύμφωνα με τον τύπο κτιρίου, dyn η δυναμικότητα του κτιρίου στην περίπτωση που πρόκειται για ξενοδοχείο, $rooms$ ο αριθμός των δωματίων στην περίπτωση ξενοδοχείου (υποτίθενται δωμάτια 2 ατόμων και χρησιμοποιείται ο εν λόγω πολλαπλασιαστής), ρ_{water} η πυκνότητα του νερού, $c_{p\ water}$ η ειδική θερμότητα του νερού. Η απαιτούμενη παροχή ζεστού νερού ανά άτομο μπορεί να βρεθεί από πίνακες στη βιβλιογραφία.

1.4 Υπολογισμός ηλεκτρικών αναγκών

Οι ηλεκτρικές ανάγκες των κτιρίων συνιστούν μεγάλο μέρος της ενέργειας που καταναλώνουν αυτά και, όπως αναφέρθηκε, επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό και τα υπόλοιπα φορτία του κτιρίου λόγω παραγωγής εσωτερικής θερμότητας στο κτίριο από τις ηλεκτρικές συσκευές και τα φωτιστικά. Όσον αφορά τις ηλεκτρικές συσκευές ο υπολογισμός της κατανάλωσης ανά περίοδο υπολογισμού εκτιμάται ως:

$$Q_{electric} = 0,5 * \left[\sum (P_{devroom} * Use_{devroom} * DC_{devroom} * dyn * rooms) + \sum (P_{devcom} * Use_{devcom} * DC_{devcom}) \right]$$

Όπου $P_{devroom}$ το διάνυσμα ισχύος των συσκευών που ανήκουν σε δωμάτια, $Use_{devroom}$ η χρήση των συσκευών των δωματίων στην περίοδο υπολογισμού, $DC_{devroom}$ το διάνυσμα συντελεστή φορτίου των ηλεκτρικών συσκευών των δωματίων και dyn η δυναμικότητα ανά περίοδο υπολογισμού. Στο δεύτερο μισό του παραπάνω τύπου υπολογίζεται η κατανάλωση από τις ηλεκτρικές συσκευές των κοινόχρηστων χώρων ενός κτιρίου, όπου P_{devcom} το διάνυσμα ισχύος αυτών των συσκευών, Use_{devcom} ο χρόνος χρήσης τους ανά περίοδο χρήσης και DC_{devcom} το ανάλογο διάνυσμα συντελεστή φορτίου.

Εκτός από τις ηλεκτρικές συσκευές, ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται και για τον φωτισμό. Ειδικά για αυτή την κατανάλωση μπορούν να ληφθούν μέτρα για την ελάττωση της. Χρήση φωτοκύτταρων στους κοινόχρηστους χώρους για μείωση του αχρείαστου φωτισμού, αντικατάσταση των κοινών λαμπτήρων με οικονομικούς, χρήση φυσικού φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην τελευταία περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών για φωτισμό υπολογίζεται ως:

$$Q_{lighting} = \sum (P_{lighting\ room} * Use_{lighting\ room} * dyn * rooms) + \sum (P_{lighting\ com} * Use_{lighting\ com})$$

Όπου $P_{lighting\ room}$ το διάνυσμα ισχύος των λαμπτήρων των δωματίων, $Use_{lighting\ room}$ οι ώρες χρήσης των λαμπτήρων των δωματίων, $P_{lighting\ com}$ το διάνυσμα ισχύος των λαμπτήρων των κοινόχρηστων χώρων, $Use_{lighting\ com}$ οι ώρες χρήσης των λαμπτήρων των κοινόχρηστων χώρων.

Οι συνολικές ηλεκτρικές ανάγκες υπολογίζονται ως άθροισμα των ανωτέρω:

$$Electricity = Q_{lighting} + Q_{electric}$$

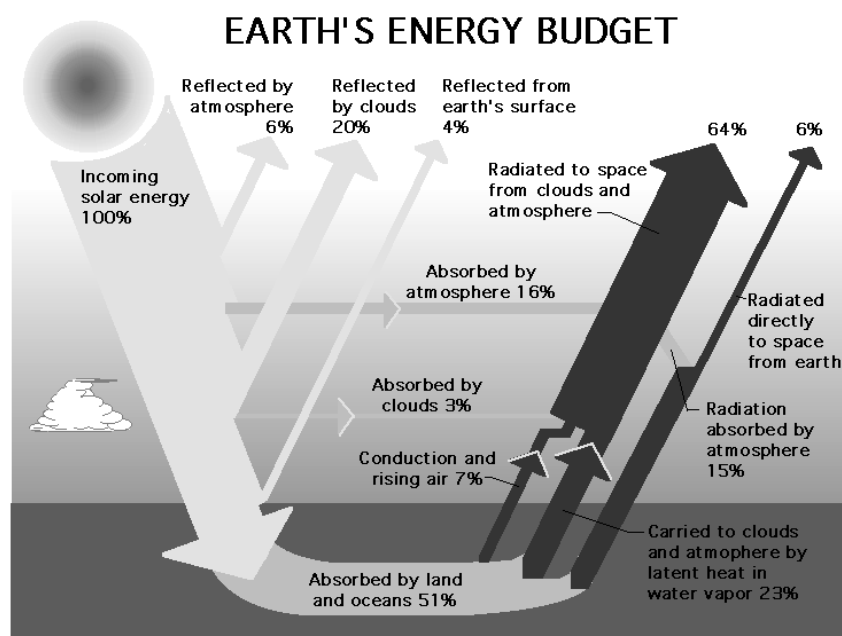
2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα (βιοκλιματικός σχεδιασμός), τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα (ηλιακοί θερμοσίφωνες), και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

2.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

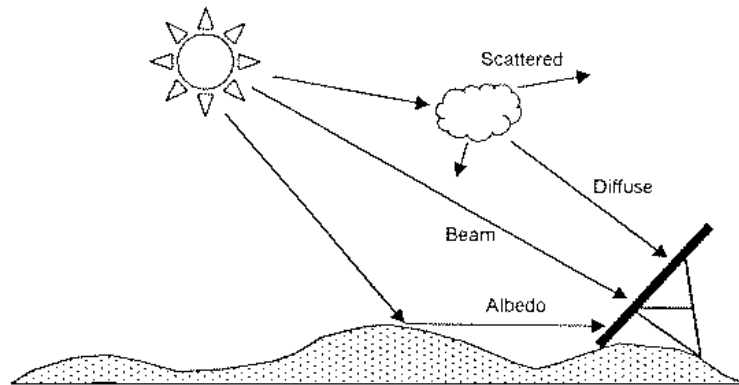
Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5.800 K. Η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά ($G_{SC} = 1376 \text{ W/m}^2$). Η ακτινοβολία που πέφτει σε ένα συλλέκτη πάνω από την ατμόσφαιρα της γης, αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από ακτινοβολία που ταξιδεύει σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο. Γενικότερα, η ολική ισχύς από μια πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αναιρείται λόγω της σκέδαση ή της απορρόφησης από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα και το υλικό που συνήθως αναφέρεται ως aerosols.



Εικόνα 2-1 Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας στη γη

Η ακτινοβολία, η οποία δεν ανακλάται ή διασκορπίζεται και προσεγγίζει την επιφάνεια της γης άμεσα σε ευθεία γραμμή από τον ηλιακό δίσκο, ονομάζεται άμεση ή ακτινική ακτινοβολία. Η διασκορπισμένη ακτινοβολία η οποία προσεγγίζει το έδαφος ονομάζεται διαχεόμενη ακτινοβολία. Κάποια από τις ακτινοβολίες αυτές ίσως προσεγγίσει ένα δέκτη μετά την ανάκλασή της στο έδαφος, οπότε και ονομάζεται ανακλώμενη ισχύς από το έδαφος. Η ολική ακτινοβολία η οποία αποτελείται από αυτά τα τρία στοιχεία ονομάζεται σφαιρική.

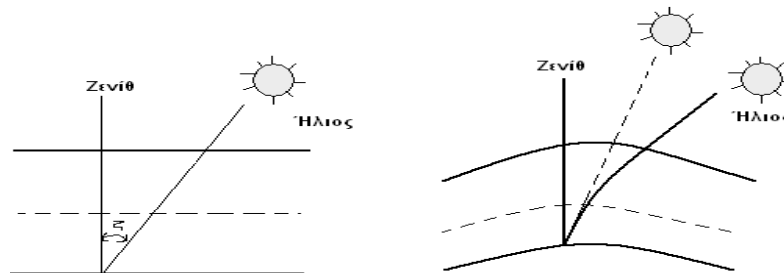


Εικόνα 2-2 Ανάλυση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη

Η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον πέρα από την όποια κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης.

2.2 Μάζα αέρα - ακτινοβολία ενός ήλιου

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μιας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1 (συντεταμημένο σε AM 1).



Εικόνα 2-3 Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου

Το εξωγήινο φάσμα δηλώνεται ως AM0, και είναι σημαντικό για δορυφορικές εφαρμογές των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων. Το AM1.5 είναι ένα τυπικό ηλιακό φάσμα πάνω στην επιφάνεια της γης σε μια καθαρή ημέρα, με ολική ένταση του 1 kW/m², η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων και συστημάτων.

Το μήκος της αέριας μάζας, αν αγνοηθεί η καμπυλότητα της γης, ισούται με το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας δια του συνημίτονου της ζενιθιακής γωνίας θ_z, δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία γη-ήλιος με την κατακόρυφο (ζενίθ) στο συγκεκριμένο σημείο. Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς (W/m ²)	Μέση ενέργεια των φωτονίων (eV)
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα	1350	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	750	1,21

Πίνακας 2-1 Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα

Μολονότι η ένταση μπορεί να φτάσει την τιμή του 1kW/m² (ακτινοβολία ενός ήλιου), η διαθέσιμη ένταση είναι συνήθως σημαντικά μικρότερη απ' αυτή της μέγιστης τιμής λόγω της περιστροφής της γης και των αντίξοων καιρικών συνθηκών. Η μέγιστη μέση ακτινοβολία σημειώνεται κοντά στο γεωγραφικό πλάτος των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω, ενώ είναι μικρότερη στις περιοχές του ισημερινού λόγω της κάλυψης του από σύννεφα. Σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι φυσικά ασθενέστερη λόγω της μικρής ηλιακής ανύψωσης.

2.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας

2.3.1 Υπολογισμοί ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά, για ένα συγκεκριμένο σημείο και υψόμετρο. Επίσης, επηρεάζονται

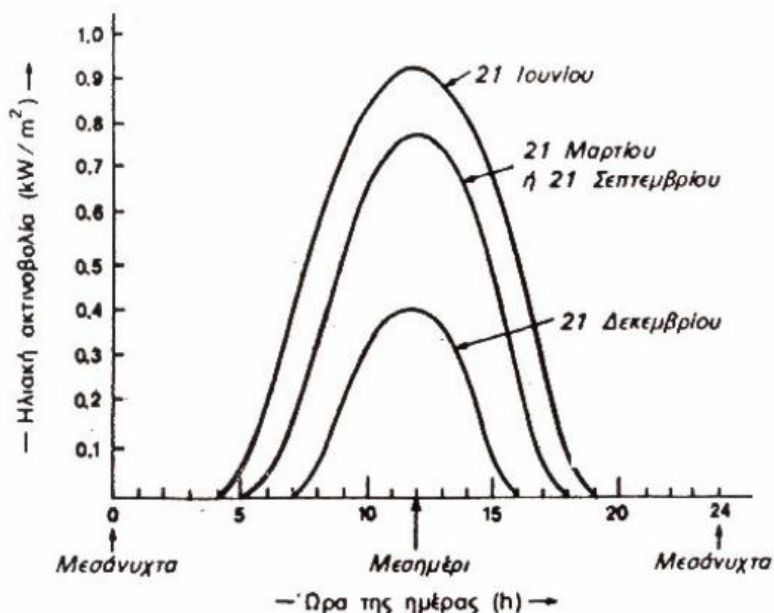
σε αξιόλογο βαθμό και από άλλους απρόβλεπτους παράγοντες όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου στο επίπεδο του ισημερινού.

$$\delta = 23.5 \sin \left[\frac{360(284 + n)}{365} \right]$$

όπου $n=1$ (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι ότι οι κυκλικές τροχιές του διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση για το βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνουν το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης ο αριθμός των ηλιοφεγγών ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.



Εικόνα 2-4 Χρονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας

Αν G_{0n} είναι η ένταση της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, που εκφράζει και την ακτινική ακτινοβολία, αφού εκτός της ατμόσφαιρας δεν υπάρχουν οι

υπόλοιπες συνιστώσες της ακτινοβολίας, σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου και G_{SC} η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{SC} \left(1 + 0.33 \cos \left(\frac{360}{365} n \right) \right)$$

όπου $n=1$ (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.
Ενώ στο οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας η ακτινοβολία εκφράζεται ως:

$$G_o = G_{on} \cdot \cos \theta_Z$$

Η γωνία θ_Z μεταξύ του ζενίθ και της ευθείας όρασης του ήλιου ονομάζεται γωνία ζενίθ ή ζενιθιακή γωνία, η δε συμπληρωματική της $\alpha=90^\circ - \theta_Z$, ονομάζεται ύψος του ήλιου. Το θ_Z υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \theta_Z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega$$

ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος της θέσης της εγκατάστασης,
 ω , η ωριαία γωνία του ήλιου σε ώρες:

$$\omega = 15(t_s - 12)$$

και t_s , ο ηλιακός χρόνος σε ώρες:

$$t_s = t_c + \left(\frac{L_{loc}}{15} \right) - T_c + E$$

t_c , ο τοπικός χρόνος σε ώρες

L_{loc} , το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή σε μοίρες

T_c , η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT σε ώρες(για την Ελλάδα +2hours)

E , μια εξίσωση χρόνου σε ώρες:

$$E = 3.82(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

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

$n=1$ (1^η Ιανουαρίου) έως 365 (31^η Δεκεμβρίου) ημέρα του έτους.

Η άλλη πολική συντεταγμένη για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου είναι η αζιμούθια γωνία γ , μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ήλιου στο επίπεδο του ορίζοντα και του νότου. Είναι $\gamma=0^\circ$ στο νότο, $\gamma=90^\circ$ στη δύση, $\gamma=-90^\circ$ στην ανατολή και $\gamma=180^\circ$ στο βορρά. Η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από τη γωνία β που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο,(ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), υπολογίζεται ως εξής:

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

Η ωριαία μέση ακτινοβολία που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας σε κάθε ώρα του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} G_{0h} \left[\cos \phi \cdot \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi}{180} (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \cdot \sin \phi \right]$$

ω_1 , η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας

ω_2 η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας

Η πρώτη τιμή που παίρνει η ω_1 είναι η $-\omega_s$, η ωριαία γωνία της ανατολής του ήλιου και η τελευταία τιμή της ω_2 είναι η $+\omega_s$, η ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου. Σημειώνεται ότι η ωριαία γωνία του ήλιου αυξάνεται από την ανατολή μέχρι τη δύση με ρυθμό 15°/h.

2.3.2 Η επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από τις μεταβολές που υφίσταται λόγω της κίνησης της γης περί τον ήλιο, και οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με βάση γεωμετρικές σχέσεις, υφίσταται έντονες διακυμάνσεις λόγω της παρεμβολής της ατμόσφαιρας. Οι μειώσεις αυτές μπορεί να διακρίνονται ανάλογα με το αν πρόκειται για αίθρια ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν υπάρχουν νέφη, ή μη αίθρια (νεφελώδη) ατμόσφαιρα, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει σαφής διάκριση. Οποσδήποτε όμως λόγω των σημαντικών επιπτώσεων της καθαρότητας της ατμόσφαιρας στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών γίνονται λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα στατιστικών μετρήσεων.

Έτσι από τις μετρήσεις της ηλιακής συνολικής ενέργειας I σε οριζόντιο επίπεδο στην τοποθεσία της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής καθαρότητας της ατμόσφαιρας από το πηλίκο:

$$K_T = \frac{I}{I_{oh}}$$

I , η μετρούμενη ολική ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

I_{oh} , η ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας στην ίδια θέση.

Ο K_T αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης και συχνά δίδεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή. Έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι μικρότερη ή ίση από ορισμένη τιμή εξαρτάται άμεσα από την τιμή του K_T . Είναι επίσης διαπιστωμένο, ότι όσο περισσότερο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

Η άμεση ή ακτινική ακτινοβολία I_b που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο είναι το υπόλοιπο μέρος της ολικής ακτινοβολίας:

$$I_b = I - I_d$$

I_b , η ακτινική ακτινοβολία

I_d , η διάχυτη ακτινοβολία

I , η ολική ακτινοβολία

Η συνολική ακτινοβολία I_T , που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_Z}$$

ατμοσφαιρική διαπερατότητα της ακτινικής ακτινοβολίας:

$$A_i = \frac{I_b}{I_{oh}}$$

φωτεινότητα του ορίζοντα:

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

Ο συντελεστής ανάκλασης ρ_g λαμβάνεται συνήθως ίσος με 0.2 αλλά υπάρχουν και πίνακες υπολογισμού ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Φρέσκο χιόνι	0.87
Ξηρή άμμος	0.18
Υγρή άμμος	0.09
Δάσος κωνοφόρων	0.05
Τσιμέντο νέο	0.33
Τσιμέντο παλιό	0.23

Πίνακας 2-2 ενδεικτικές τιμές συντελεστή ανάκλασης

Η εξάρτηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από το υψόμετρο της γης που δέχεται την ακτινοβολία δείχνει και την επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία. Έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι τα 900-1000 W/m², η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου 7 W/m² για κάθε 100m ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

Συνοψίζοντας οι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική ενέργεια που δέχεται μία επιφάνεια σε οριζόντιο επίπεδο είναι:

- Το ακριβές σημείο (γεωγραφικό πλάτος και μήκος, υψόμετρο)
- Η ώρα της ημέρας
- Οι κλιματικές συνθήκες(υγρασία, θερμοκρασία, ηλιοφάνεια)
- Η ατμοσφαιρική ρύπανση
- Η εποχή του χρόνου
- Η σκίαση του σημείου από παράπλευρες επιφάνειες

2.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.4.1 Αρχές της φωτοβολταϊκής ενέργειας

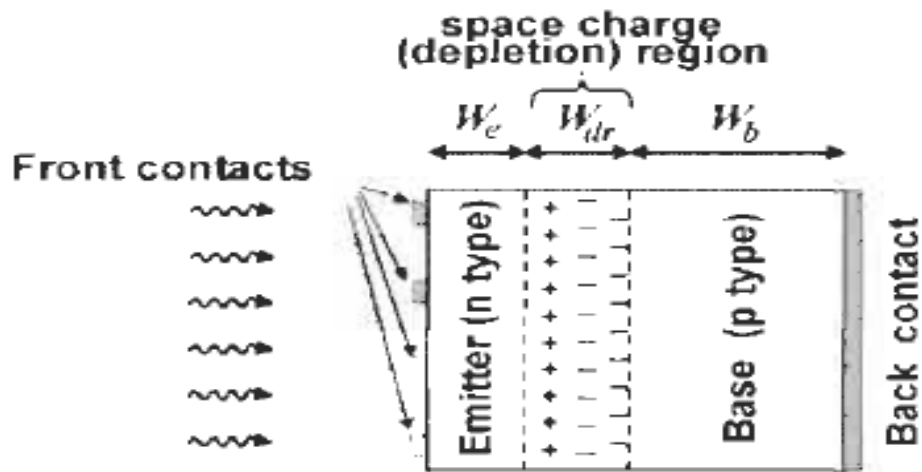
2.4.1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς και στους μονωτές. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, ή χημικές ενώσεις όπως το αρσενιούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο με τετραεδρική κρυσταλλική δομή.

Εντός των ημιαγωγών διακρίνεται η ζώνη σθένους, η ζώνη αγωγιμότητας και το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα σε αυτές τις ζώνες το οποίο εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να έχει η προσπίπτουσα ακτινοβολία ώστε να υπάρχει διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας επανασυνδέονται σε οπές στη ζώνη σθένους με ταυτόχρονη έκλυση ενέργειας.

Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη αποτελείται από συνδυασμό δυο λεπτών στρωμάτων από διαφορετικούς ημιαγωγούς, γνωστούς ως «p ημιαγωγός» και «n ημιαγωγός». Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού (p-n), έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η διαφορά αυτή ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αυτή η συνεχής κίνηση των φορέων αποτελεί ρεύμα με τη φορά του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου n προς τον ημιαγωγό τύπου p, το οποίο ονομάζεται φωτορεύμα.



Εικόνα 2-5 Ημιαγωγός τύπου p-n

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος αυτής ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σα διαφανές σώμα. Έτσι, διαπερνούν άθικτα το ημιαγωγό υλικό και απορροφούνται από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη, το οποίο και θερμαίνονται. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός μόνο όσα έχουν ενέργεια ίση με το ενεργειακό διάκενο συμβάλουν στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα υπόλοιπα συμβάλουν στη αύξηση της κινητικής ενέργειας στα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από τα δεσμοί και τελικά μετατρέπεται σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.4.1.2 Το ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ένα ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να παρασταθεί στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμά του από μία πηγή σταθερού ρεύματος συνδεδεμένης παράλληλα με μία ιδανική δίοδο. Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης περιγράφεται από την εξίσωση του Shockley:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{k_B \cdot T}} - 1 \right)$$

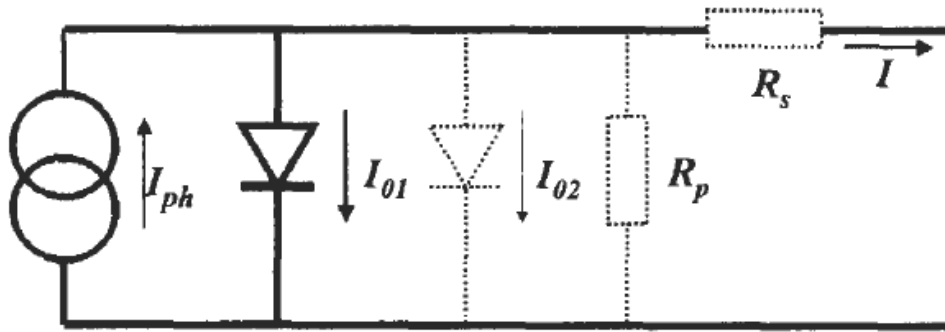
I_{ph} : το φωτορεύμα

I_0 : το ανάστροφο ρεύμα κόρου

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)

k_B : η σταθερά του Boltzman ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

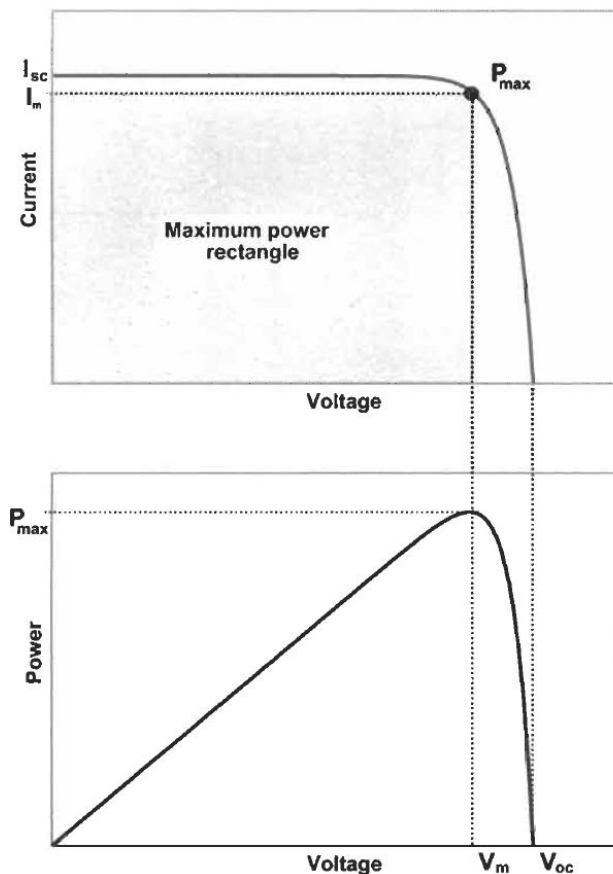
T : η απόλυτη θερμοκρασία το Φ/Β στοιχείου σε βαθμούς K



Εικόνα 2-6 Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου (συνεχής γραμμή). Τα μη ιδανικά στοιχεία δίνονται από τις διακεκομμένες γραμμές

Στην ιδανική περίπτωση το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) ισούται με το φωτορεύμα (I_{ph}) και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} είναι:

$$V_{oc} = \frac{k_B \cdot T}{q} \cdot \ln \left(I + \frac{I_{ph}}{I_o} \right)$$



Εικόνα 2-7 διάγραμμα I-V και P-V

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_{max} = V_m \cdot I_m$ προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτοκυκλωμένης τάσης ($I_{sc} \cdot V_{oc}$) ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

Για το ιδανικό στοιχείο ο λόγος πλήρωσης ορίζεται ως :

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad \text{όπου :} \quad v_{oc} = \frac{V_{oc}}{k_B \cdot T}$$

2.4.1.3 Το μη ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Για το ισοδύναμο κύκλωμα του μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται μία διάταξη η οποία αποτελείται από δύο διόδους, μία παράλληλη αντίσταση R_{sh} και μία αντίσταση σε σειρά R_s . Η αντίσταση R_h αφορά στη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Η αντίσταση R_s αφορά στην αντίσταση της επαφής κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από τη διόδο και το σύνολο των ωμικών αντιστάσεων των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής και των μεταλλικών κλάδων τους.

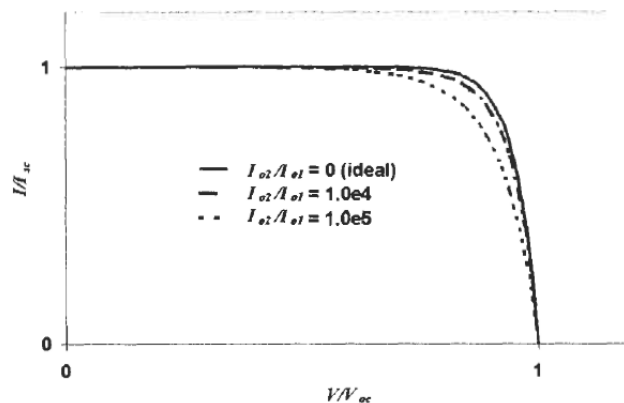
Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του μη ιδανικού στοιχείου περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{k_B \cdot T} \right)} - 1 \right] - \left[e^{\left(\frac{V+I \cdot R_s}{2 \cdot k_B \cdot T} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V+I \cdot R_s}{R_{ph}} \right)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης FF υπολογίζεται για το μη ιδανικό στοιχείο από τη σχέση :

$$FF = FF_0 (1 - r_s) \left[1 - \frac{(v_{oc} + 0.7) \cdot FF_0 (1 - r_s)}{v_{oc} \cdot r_p} \right]$$

όπου: $r_s = \frac{R_s \cdot I_{sc}}{V_{oc}}$ και $r_p = \frac{R_p \cdot I_{sc}}{V_{oc}}$



Εικόνα 2-8 χαρακτηριστική καμπύλη I-V μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

2.4.1.4 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος που αποδίδει το στοιχείο προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του και είναι καθοριστικός παράγοντας της ενεργειακής μετατροπής:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}}$$

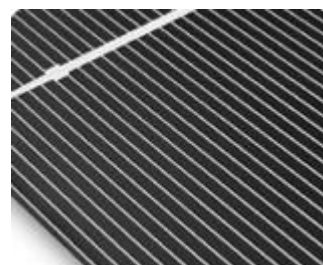
Η απόδοση εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού, την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του στοιχείου. Ως πρώτη αναφορά στα διαφορετικά υλικά, αξίζει να σημειωθεί πως από τους πιο κοινούς τύπους φωτοβολταϊκών το μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης παρουσιάζουν τα μονοκρυσταλλικά ακολούθως τα πολυκρυσταλλικά και τελευταία κατατάσσονται τα άμορφα (thin film).

2.4.2 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως υπάρχουν συγκεκριμένα χημικά στοιχεία ή ενώσεις που μπορούν να εκμεταλλευτούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το πιο διαδεδομένο, κυρίως λόγω αφθονίας του στη φύση και λεπτομερούς γνώσης των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων, είναι το πυρίτιο (Si) από το οποίο κατασκευάζονται τα μονοκρυσταλλικά (sc-Si) τα πολυκρυσταλλικά (mc-Si) και η ταινία πυριτίου (Ribbon-Si). Επίσης, από πυρίτιο κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) τα οποία ανήκουν στην κατηγορία λεπτών επιστρώσεων (thin film). Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα στοιχεία που κατασκευάζονται από χημικές ενώσεις όπως το Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe), ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS) και το Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs). Υπό ανάπτυξη βρίσκονται τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν νανοϋλικά ή οργανικά/πολυμερή στοιχεία, τα οποία δεν θα απασχολήσουν την παρούσα εργασία, καθώς δεν έχουν ακόμη εμπορική εφαρμογή.

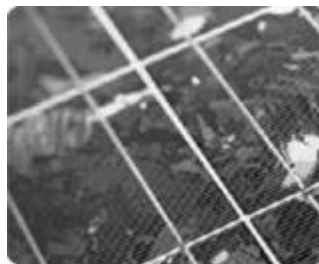
2.4.2.1 Στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 13 - 16% για το πλαίσιο (ένωση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων). Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Η εξάρτηση της απόδοσής τους σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι περίπου -0.5% ανά βαθμό Κελσίου σε σχέση με την πρότυπη μετρούμενη απόδοση (στους 25 βαθμούς Κελσίου) ενώ η τυπική επιφάνεια για ονομαστική ισχύ 1 kWp είναι περίπου 8 m².



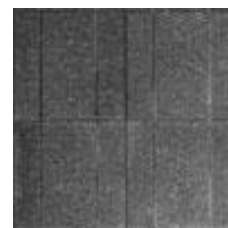
2.4.2.2 Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si)

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 11 έως και 14% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η εξάρτηση της απόδοσής τους σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι παραπλήσια των μονοκρυσταλλικών ενώ η τυπική επιφάνεια για ονομαστική ισχύ 1 kWp είναι περίπου 10m².



2.4.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%



2.4.3 Στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) (thin film)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο κρυσταλλικές μορφές πυριτίου. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 5 έως 7% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες μείωση της απόδοσης σε ποσοστό -0.25% ανά βαθμό κελσίου. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).


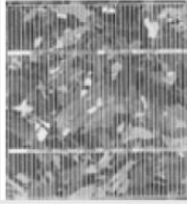




Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (περίπου 15-20 m² για 1 kWp). Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις και η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

2.4.4 Υπόλοιπα στοιχεία τύπου thin film

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που κατασκευάζονται από ενώσεις όπως CdTe, GaAs, CIGS έχουν παραπλήσιες ιδιότητες με το άμορφο πυρίτιο όσον αφορά τη θερμοκρασιακή τους ανοχή και εμφανίζουν καλύτερες αποδόσεις ενώ η απαιτούμενη επιφάνεια για 1 kWp είναι μικρότερη από αυτή που απαιτούν τα στοιχεία a-Si. Αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ενώ είναι αρκετά ελπιδοφόρα όσον αφορά την απόδοσή τους (θεωρητική απόδοση GaAs 25%), δεν εμφανίζουν μεγάλη διεύδυση στην αγορά λόγω έλλειψης πρώτων υλών, αφού μερικά από αυτά αποτελούν πολύ σπάνια στοιχεία στη φύση, ενώ κάποια από αυτά (As) είναι εξαιρετικά τοξικά οπότε και επικίνδυνα στη χρήση και την παραγωγή.

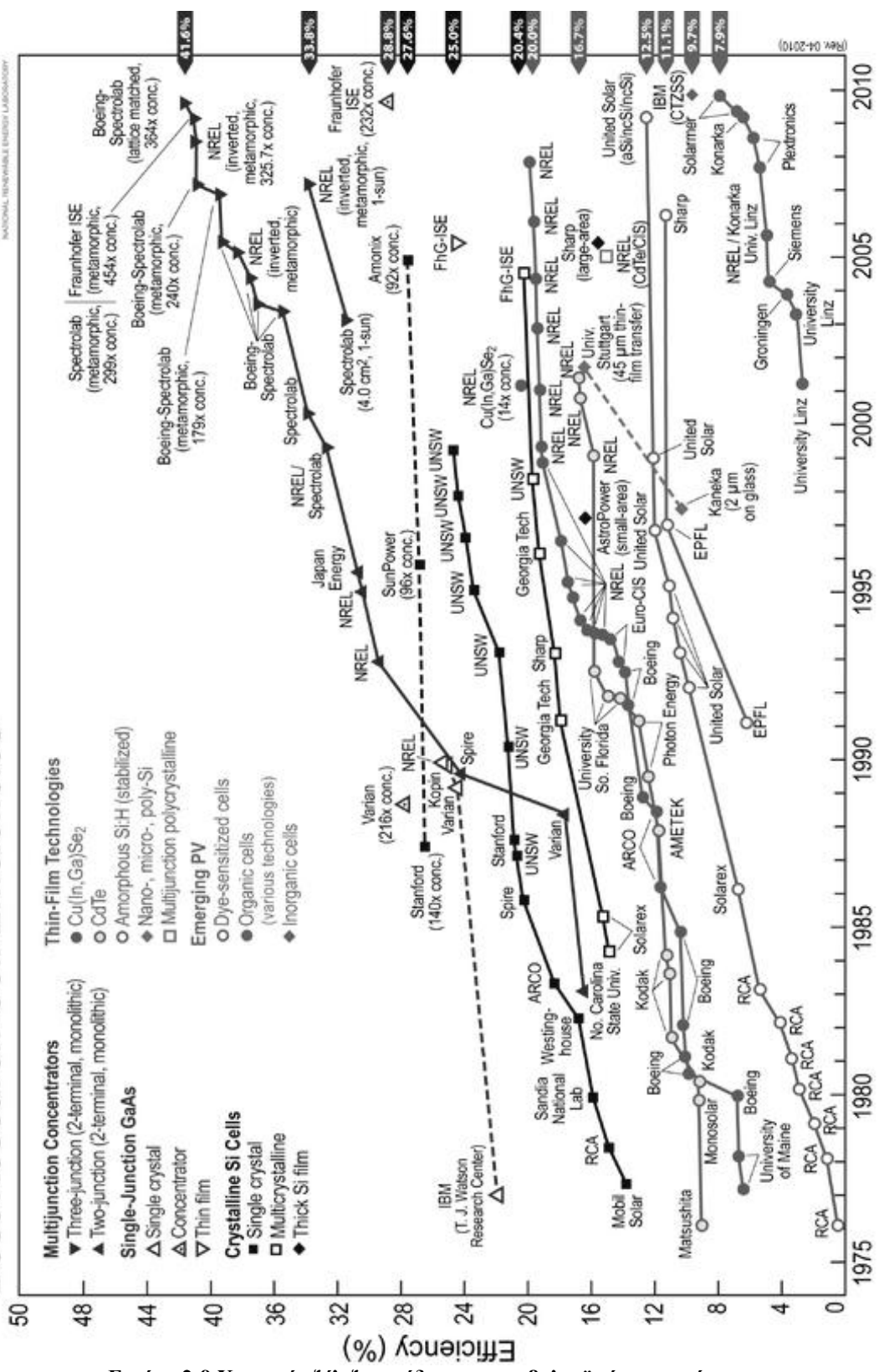


Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών				
ΤΥΠΟΣ	'Λεπτού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	'Υβριδικά'
Εμφάνιση				
Απόδοση	Άμορφα: 5-7% CIS: 7-10% CdTe: 8-9%	11-14%	13-16%	16-17%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10-20 m ²	8-10 m ²	7-8 m ²	6-7 m ²

Πίνακας 2-3 τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τη χρονολογική εξέλιξη των συντελεστών απόδοσης των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων:

Best Research-Cell Efficiencies

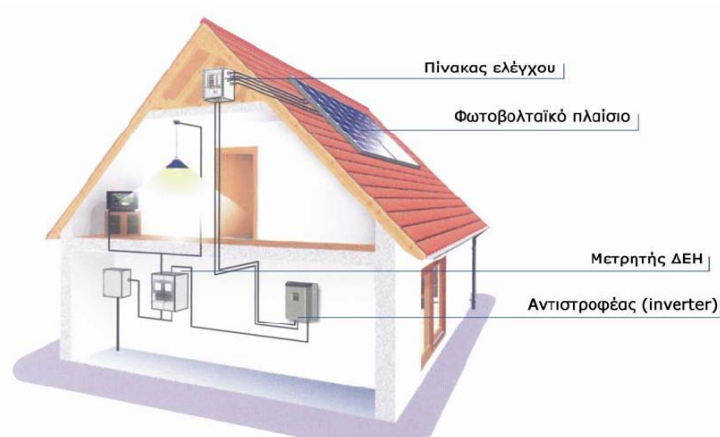
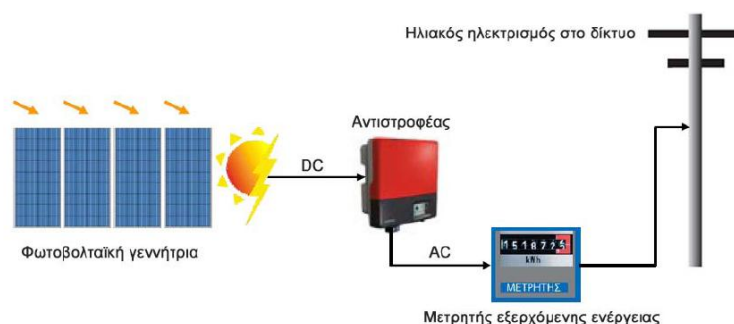


Εικόνα 2-9 Χρονική εξέλιξη απόδοσης φωτοβολταϊκών στοιχείων

2.4.5 Φωτοβολταϊκά συστήματα

2.4.5.1 Τεχνικές λεπτομέρειες

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δεν έχουν την απαραίτητη ισχύ για να καλύψουν ηλεκτρικές ανάγκες οπότε συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στη συνέχεια τα πλαίσια συνδέονται μεταξύ παράλληλα ή σε σειρά, ώστε να δημιουργηθεί ένα πάνελ. Ακολούθως τα πάνελ, που προμηθεύεται ο ενδιαφερόμενος συναρμολογημένα, συνδέονται επί τόπου ώστε να δημιουργηθεί μια συστοιχία επιθυμητής ισχύος και τάσης. Η συστοιχία συνδέεται με ένα inverter ώστε να μετατρέψει το ρεύμα στην επιθυμητή του μορφή προς κατανάλωση, διότι η συστοιχία έχει ως έξοδο συνεχές ρεύμα το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο επιθυμητής τάσης. Κατόπιν, το σύστημα συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο της διανομής ηλεκτρικού ρεύματος (αν πρόκειται για διασυνδεδεμένα συστήματα) ή με μια σειρά συσσωρευτών (αν πρόκειται για αυτόνομα συστήματα). Στην παρούσα εργασία δεν θα γίνει αναφορά στα αυτόνομα συστήματα, αν και διαφοροποιούνται σε λίγα συγκεκριμένα σημεία από τα διασυνδεδεμένα συστήματα και η γενική λειτουργία είναι κοινή.



Εικόνα 2-10 λειτουργία διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός από τις κατασκευαστικές απώλειες που εμφανίζουν σε σχέση με τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια, παρουσιάζουν απώλειες λόγω ωμικών αντιστάσεων στα καλώδια και τον μετατροπέα. Επίσης, παρουσιάζουν μία απώλεια απόδοσης με το χρόνο η οποία είναι συγκεκριμένη για κάθε πάνελ και

αναφέρεται από τον κατασκευαστή. Ακόμη εμφανίζεται απώλεια απόδοσης καθώς ανεβαίνει η θερμοκρασία, σε σχέση με την πρότυπη απόδοση του πάνελ (σε STC), η οποία όπως αναφέρθηκε είναι μικρότερη στα πάνελ που αποτελούνται από στοιχεία λεπτού υμενίου.

Ένας γενικός απλοποιημένος τύπος υπολογισμού της εξόδου του συλλέκτη είναι ο εξής:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \left(\frac{I_T}{I_S} \right)$$

P_{PV} η έξοδος του συλλέκτη σε kW

f_{PV} ο συντελεστής μείωσης της απόδοσης του συλλέκτη λόγω υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνειά του κλπ

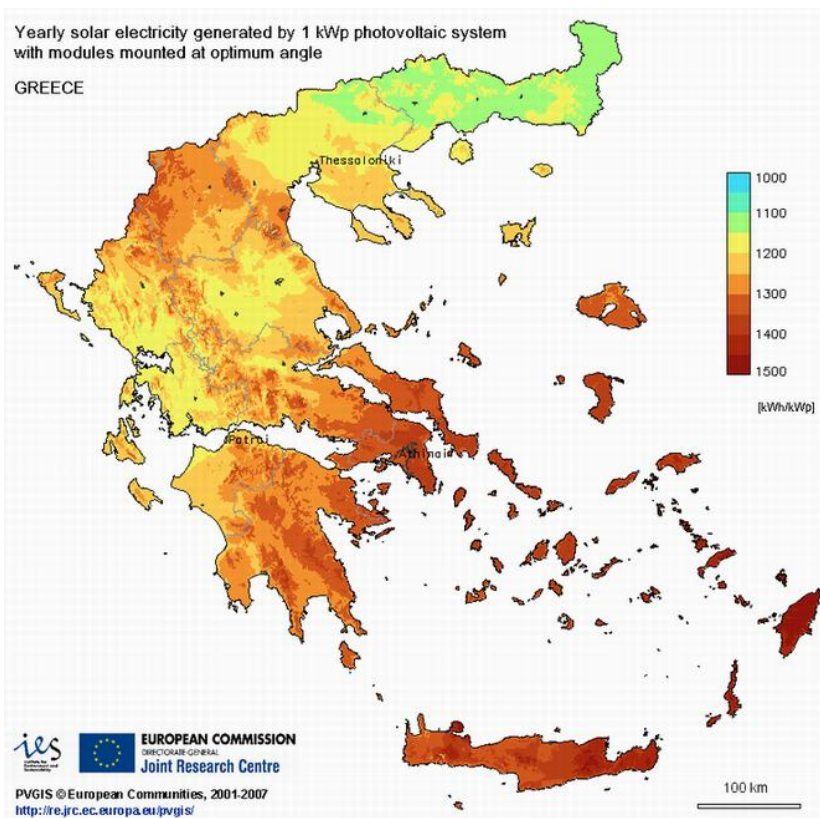
Y_{PV} η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη

I_T η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη

I_S η ακτινοβολία ενός ηλίου ίση με 1 kW/m^2

Η παραπάνω σχέση είναι αρκετά απλοϊκή και χρησιμοποιείται για εκτίμηση της τάξης μεγέθους της ισχύος ενώ στην πραγματικότητα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως οι ιδιότητες του υλικού, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται σε πιο περίπλοκη εξίσωση.

Ακόμη πιο απλοϊκή εκτίμηση της τάξης μεγέθους της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας μπορεί να γίνει γνωρίζοντας μόνο την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος κάνοντας χρήση ενός χάρτη ηλιακού δυναμικού.



Εικόνα 2-11 χάρτης ετήσιας αποδιδόμενης ηλεκτρικής σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ

Για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων υπάρχουν τρεις γενικοί τρόποι:

- Με στατικές βάσεις στήριξης όπου και επιλέγεται η βέλτιστη γωνία και προσανατολισμός (ενδέχεται να μπορούν να μεταβάλλεται η γωνία τους με χειροκίνητο τρόπο σε μία με τρεις προκαθορισμένες γωνίες)
- Με αυτόματο σύστημα παρακολούθησης ηλίου ενός άξονα. Με αυτόν τον τρόπο επιλέγεται ο προσανατολισμός και η συστοιχία έχει σύστημα ρύθμισης της βέλτιστης γωνίας αυτόματα.
- Με σύστημα παρακολούθησης δύο αξόνων. Η συστοιχία έχει ενσωματωμένο ένα εξελιγμένο σύστημα που επιλέγει τον βέλτιστο προσανατολισμό και γωνία σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Συνήθως επιλέγεται ο πρώτος τρόπος καθώς η παρακολούθηση του ηλίου με αυτοματοποιημένα συστήματα αυξάνει κατά πολύ το κόστος της εγκατάστασης. Υπάρχουν συγκεκριμένες εφαρμογές για συστήματα με αυτόματη ρύθμιση που δεν θα απασχολήσουν την παρούσα εργασία.

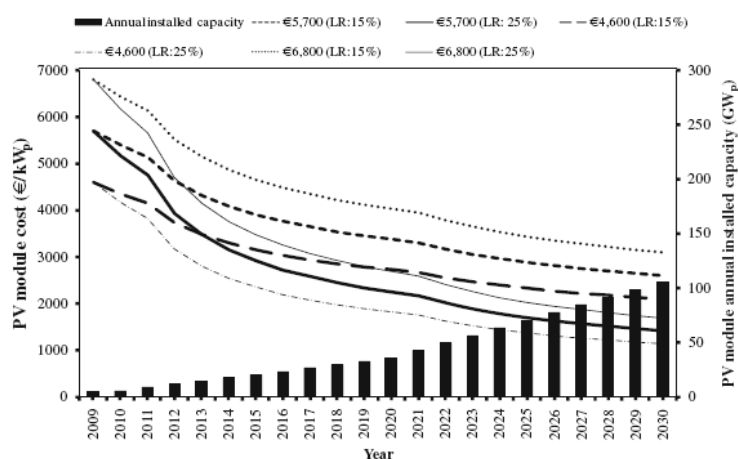
2.4.5.2 Οικονομικές λεπτομέρειες

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα που απαιτούν εσωτερικό φορτίο έχουν σαν αρχή λειτουργίας την απόδοση του πλεονάσματος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ και την αγορά από αυτή όταν υπάρχει έλλειμμα. Η εταιρία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος είναι υποχρεωμένη από το νόμο να αγοράζει όλο το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, σε σταθερή τιμή περίπου 0,44-0,55 €/kWh (ανάλογα που τοποθετείται) ενώ η τιμή πώλησης διαμορφώνεται περίπου στα 0,11 €/kWh.

Κατά τη διάρκεια επιλογής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, υπάρχουν τρία γενικά κριτήρια επιλογής:

- Με βάση τη διαθέσιμη επιφάνεια
- Με βάση τη διαθέσιμη ισχύ
- Με βάση το διαθέσιμο κεφάλαιο

Όσον αφορά τους μετατροπείς, επιλέγονται ώστε να καλύπτουν την ισχύ του συστήματος και έχουν αρκετά μεγάλες αποδόσεις (πάνω από 95%) και μικρή συνεισφορά στο τελικό κόστος της εγκατάστασης.



Εικόνα 2-12 εκτίμηση εξέλιξης κόστους φωτοβολταϊκών πλαισίων

Προφανώς το κόστος όλων των υλικών είναι ανάλογο της ποιότητάς τους και κάθε εταιρεία προσφέρει τα πάνελ σε διαφορετική τιμή ανά watt, ενώ το ίδιο ισχύει και στους μετατροπείς με μικρότερες όμως διαφοροποιήσεις. Μία μέση τιμή για τα πάνελ είναι περίπου 2.5 €/watt, ενώ για τους inverter 0,5 €/watt και αυτές διαφοροποιούνται ανάλογα με την τεχνολογία. Προφανώς ισχύει η οικονομία κλίμακας, οπότε όσο ανεβαίνει η εγκατεστημένη ισχύς, μειώνεται το κόστος ανά watt για τα υλικά. Κατά την κοστολόγηση του συστήματος δεν πρέπει να παραλείπονται η καλωδίωση και το ηλεκτρολογικό υλικό (ρυθμιστές, κλπ) καθώς και οι βάσεις στήριξης από τους υπολογισμούς. Επίσης είναι σημαντικό να επιλέγονται προσεκτικά τα χαρακτηριστικά αυτών για αποφυγή απωλειών και υπερθερμάνσεων του συστήματος (διαστάσεις καλωδίων, εφικτός αερισμός των βάσεων στήριξης) .

2.4.5.3 Βέλτιστη λειτουργία Φ/Β συστημάτων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στην ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένο και οριζόντιο επίπεδο και αναφέρθηκε ένας τρόπος υπολογισμού της γωνίας (β) του συλλέκτη για μεγιστοποίηση της ολικής ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει. Επίσης έγινε αναφορά στον προσανατολισμό των συλλεκτών και την αζιμούθια γωνία (γ). Αυτά τα μεγέθη βελτιστοποιούνται για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Για το βόρειο ημισφαίριο υπάρχουν κάποιοι γενικοί κανόνες που επιτρέπουν τους αρχικούς υπολογισμούς για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Έτσι, αν το γεωγραφικό πλάτος του εξεταζόμενου σημείου είναι φ τότε η γωνία β παίρνει τις ακόλουθες τιμές ανάλογα με την απαιτούμενη παραγωγή:

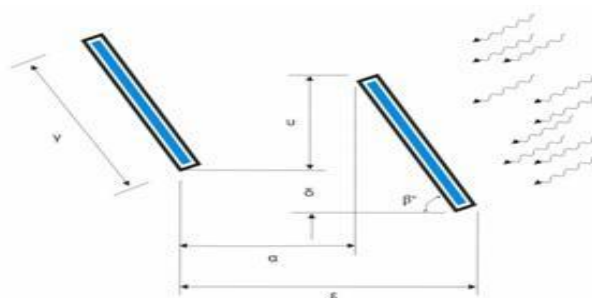
- $\beta \approx \varphi$ για όλη τη διάρκεια του χρόνου
- $\beta \approx \varphi + 15^\circ$ για καλύτερη απόδοση το χειμώνα
- $\beta \approx \varphi - 15^\circ$ για καλύτερη απόδοση το καλοκαίρι

Όσον αφορά την αζιμούθια γωνία ο βέλτιστος προσανατολισμός είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο με $\gamma = 0^\circ$

Επιπλέον πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς δεν πρέπει η μία σειρά πλαισίων να σκιάζει αισθητά την επόμενη. Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης ε μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών γίνεται ως εξής:

Υπολογίζεται η επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης:

$$u = \gamma \cdot \sin\beta - \delta$$



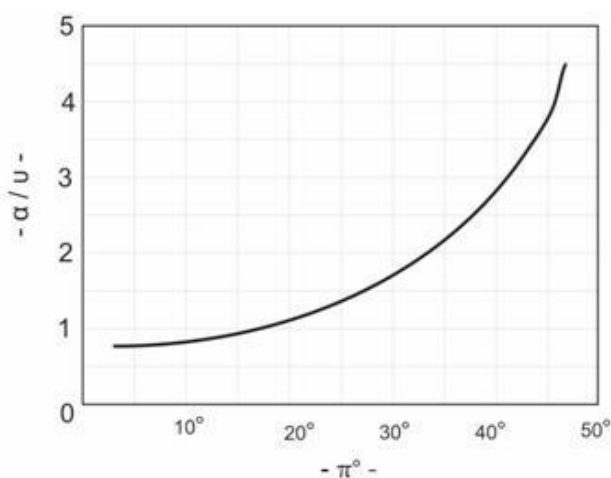
Εικόνα 2-13

γ , το μήκος των Φ/Β πλαισίων σε μέτρα
 β , η γωνία κλίσης των πλαισίων
 δ , η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δύο σειρών πλαισίων σε μέτρα (μηδέν αν είναι στο ίδιο επίπεδο)

Ο τελικός υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης για αποφυγή σκίασης μεταξύ των πλαισίων γίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = \alpha + \gamma \cdot \cos \beta$$

Όπου, από το διάγραμμα της εικόνας 3-10 προκύπτει η ελεύθερη απόσταση α από το λόγο α/u (όπου π° το γεωγραφικό πλάτος).



Εικόνα 2-14 υπολογισμός ελεύθερης απόστασης

Ένας γενικός πρακτικός κανόνας για να αποφεύγεται (όπου είναι δυνατόν) η σκίαση από εμπόδια είναι η εξασφάλιση της ελάχιστης απόστασης από το εμπόδιο να είναι διπλάσια από το ύψος του εμποδίου. Γενικά μια καλά σχεδιασμένη περιοχή εγκατάστασης εξασφαλίζει την ύπαρξη μηδενικής σκίασης κατά το ηλιακό παράθυρο (9:00 π.μ – 3:00 μ.μ).

2.4.6 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται 20-30 χρόνια λειτουργίας

- Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου,
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Αυτό το δεδομένο επιβάλλει την ανάγκη να επιδοτούνται οι επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά είτε άμεσα είτε έμμεσα (μέσω αυξημένης τιμής αγοράς της παραγόμενης ενέργειας σε διασυνδεδεμένα συστήματα). Επιπλέον, η παραγωγή και η ζήτηση είναι ετεροχρονισμένες οπότε δημιουργείται η ανάγκη αποθήκευσης σε αυτόνομα συστήματα. Τέλος, ο μικρός βαθμός απόδοσης επιβάλλει τη χρήση μεγάλων εκτάσεων για παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας.

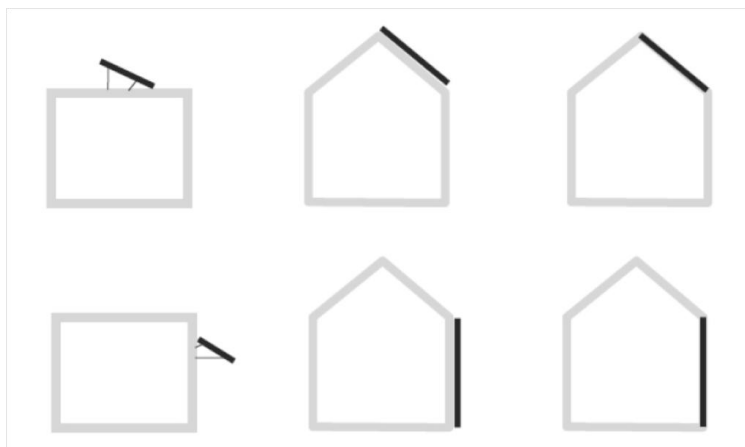
2.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Υπάρχουν δύο γενικοί τρόποι εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια, είτε ως πρόσθετα στοιχεία με ελεύθερες μεταλλικές βάσεις είτε ενσωματωμένα στη δομή του κτιρίου. Η δεύτερη περίπτωση στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία συναντάται ως BIPV (Building integrated photovoltaic systems) και αφορά στην ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε υπάρχουσες ή νέες κτηριακές εγκαταστάσεις. Η εγκατάσταση σε κτίρια αποτελεί μια ειδική μέθοδο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων η οποία έχει κάποια επιπρόσθετα οφέλη αλλά και εμπόδια, σε σχέση με την εγκατάσταση σε ανοικτά πεδία. Αυτά είναι:

- Αποφυγή κόστους αγοράς, περίφραξης και εγκατάστασης συστημάτων ασφαλείας οικοπέδου.
- Αποφυγή ενδεχόμενου κόστους πρόσθετου εξοπλισμού μεταφοράς ενέργειας στο κεντρικό δίκτυο(εκμετάλλευση του ήδη υπάρχοντος δικτύου ηλεκτροδότησης του κτιρίου).
- Παραγωγή ηλεκτρισμού στο σημείο της κατανάλωσης και αποφυγή απωλειών από μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό ισχύει ειδικά σε κτήρια γραφείων όπου το προφίλ της παραγωγής ταιριάζει με το προφίλ ζήτησης φορτίου.
- Είναι δυνατή η αντικατάσταση συμβατικών οικοδομικών υλικών με επιπρόσθετη συνολική μείωση κόστους της κατασκευής (BIPV).
- Σε συνδυασμό με σωστό βιοκλιματικό σχεδιασμό του κτιρίου μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της απαιτούμενης ενέργειας λειτουργίας του κτιρίου (σκίαση ταράτσας και λοιπών χώρων με παράλληλη μείωση απαίτησης ψύξης το καλοκαίρι).

Ένα από τα μειονεκτήματα της εγκατάστασης σε κτίρια είναι η περίπτωση των σκιάσεων των επιφανειών των πλαισίων, κάτι που πρέπει να εξεταστεί στο λεπτομερή σχεδιασμό του συστήματος.

2.5.1 Τρόποι ένταξης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κτίρια



Εικόνα 2-15

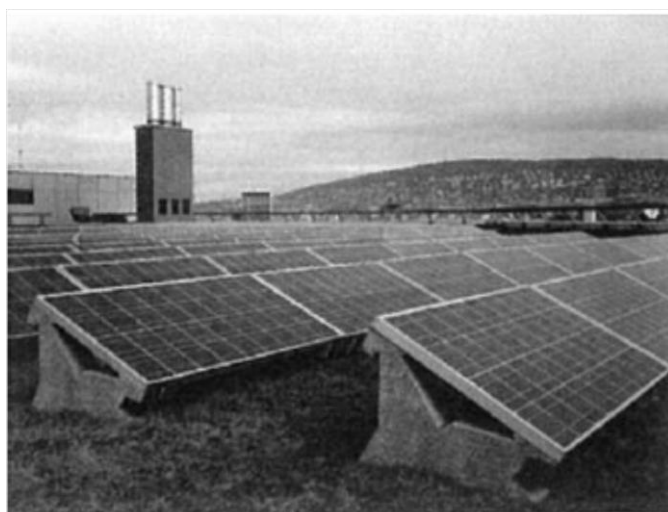
2.5.1.1 Σε επίπεδες ταράτσες

Επίπεδες ταράτσες εννοούνται όσες έχουν κλίση μέχρι 5° . Αποτελούν τον πιο διαδεδομένο τρόπο ένταξης Φ/Β σε κτίρια καθώς δεν εισάγονται πολλά προβλήματα σκίασης. Επιπλέον, γίνεται επιλογή του προσανατολισμού και της κλίσης συνήθως στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

Υπάρχουν τρεις τρόποι εγκατάστασης:

- Σε στηρίγματα που τοποθετούνται ελεύθερα (χωρίς διάνοιξη οπών) πάνω στην επιφάνεια της ταράτσας με πρόβλεψη ώστε να μην μετακινούνται από τον αέρα.
- Με βάσεις που βιδώνονται πάνω στην επιφάνεια της ταράτσας
- Ενσωματωμένα στην επιφάνεια της ταράτσας (BIPV)

Στη δεύτερη εφαρμογή πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην καταστραφεί η μόνωση της ταράτσας. Συνηθίζεται να επιλέγονται βάσεις στήριξης που να απαιτούν πολύ λίγες διανοίξεις οπών στην επιφάνεια της. Επιπλέον, πρέπει να υπάρξει πρόβλεψη για σωστό αερισμό στο πίσω μέρος των πλαισίων, ώστε να αποφευχθεί υπερθέρμανση τους αλλά και της ταράτσας του κτιρίου. Αν ο σχεδιασμός του αερισμού γίνει με προσοχή μπορεί το σύστημα να συνεισφέρει στην ολοκληρωμένη βιοκλιματική λειτουργία του κτιρίου με μείωση των απαιτήσεων για ψύξη (ειδικά στους τελευταίους ορόφους).

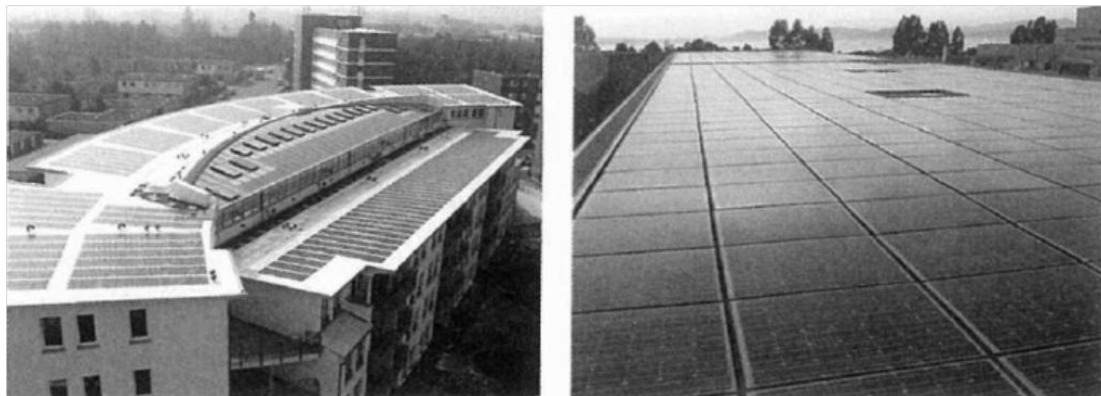


Εικόνα 2-16

Για την ασφάλεια της εγκατάστασης καλό είναι να υπάρχει κενό περίπου ενός μέτρου από την περιφέρεια της ταράτσας ώστε να μπορεί ο αέρας να ρέει ελεύθερα και να μειωθεί το αεροδυναμικό φορτίο που εφαρμόζεται στην εμπρός επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Κατά το σχεδιασμό πρέπει να εξετάζεται αν η επιφάνεια που θα τοποθετηθούν οι βάσεις και τα πλαίσια μπορούν να αντέξουν το βάρος τους αλλά και το πρόσθετο βάρος που δημιουργούν τα φορτία από τον αέρα.

Οι συνήθεις τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων που χρησιμοποιούνται για εφαρμογή υπό κλίση στις ταράτσες κτιρίων αποτελούνται από μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά στοιχεία, λόγω της μικρής επιφάνειας που διατίθεται. Αυτό συμβαίνει διότι (όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο) τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου απαιτούν τη μισή περίπου επιφάνεια σε σχέση με αυτή των thin film για κάθε εγκατεστημένο watt ισχύος.

Στην περίπτωση ενσωμάτωσης στην επιφάνεια της ταράτσας η κλίση προφανώς δεν είναι στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας (για την Ελλάδα περίπου 30°) αλλά ταυτίζεται με την κλίση της ταράτσας και τα φωτοβολταϊκά δεν θα παράγουν τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ενέργεια. Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που υπάρχουν πολύ ισχυρά ρεύματα αέρα που θα δημιουργούσαν πρόβλημα στατικότητας στην υπό κλίση εγκατάσταση των πλαισίων.



Εικόνα 2-17

Σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί συνήθως να εξασφαλιστεί ο κατάλληλος αερισμός και τα πλαίσια λειτουργούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες, οπότε είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται στοιχεία thin film τα οποία έχουν μεγαλύτερη ανοχή στη θερμοκρασία. Προφανώς στην περίπτωση της ενσωμάτωσης στην ταράτσα δεν υπάρχει ανάγκη, από την άποψη αεροδυναμικών φορτίων, να υπάρχει κενό μεταξύ των πλαισίων και της περιφέρειας της ταράτσας οπότε γίνεται εκμετάλλευση μεγαλύτερης επιφάνειας.

2.5.1.2 Σε σκεπές με κλίση

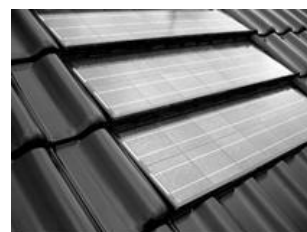
Αυτή η περίπτωση εμφανίζει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και εξετάζεται κατά περίπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι η κατασκευή των επικλινών στεγών εμφανίζει διάφορες παραλλαγές οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν την τοποθέτηση και λειτουργία του συστήματος, λόγω σκιάσεων και προσανατολισμού.

Είναι προφανές από την ανάλυση που έγινε παραπάνω ότι σκεπές με βόρειο προσανατολισμό δεν προτείνονται για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς θα λειτουργούν κάτω από πολύ μειωμένη απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας.

Σε σκεπές με κλίση υπάρχουν δύο τρόποι εγκατάστασης:

- Τα πλαίσια να βιδωθούν στην υπάρχουσα κατασκευή της σκεπής (είτε απευθείας είτε με μεταλλικούς διαδρόμους)
- Τα πλαίσια να ενσωματωθούν στη σκεπή υποκαθιστώντας τα οικοδομικά της υλικά (κεραμίδια).

Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να εξεταστεί η κλίση και ο προσανατολισμός της σκεπής. Αυτά τα δεδομένα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος καθώς αποτελούν την υποχρεωτική κλίση και προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού συστήματος με επιπτώσεις στην απόδοσή του. Όπως και στην



εγκατάσταση στην ταράτσα, η περίπτωση της ενσωμάτωσης (BIPV) στο σκελετό του κτιρίου δημιουργεί προβλήματα αερισμού των πλαισίων αλλά, εδώ πρέπει να υπάρξει μελέτη και για την μόνωση του κτίσματος από την βροχή, καθώς τα κεραμικά πλακίδια που θα υποκατασταθούν από τα Φ/Β πλαίσια επιτελούν αυτόν το σκοπό. Για εγκατάσταση σε κεραμοσκεπές και υποκατάσταση κεραμικών πλακιδίων έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τρόποι εγκατάστασης που προσομοιάζουν την δομή των κεραμιδιών ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνση του νερού της βροχής από τη στέγη.



Εικόνα 2-18

2.5.1.3 Σε προσόψεις κτιρίων



Εικόνα 2-19

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν είτε να εγκατασταθούν ως πρόσθετα στοιχεία στις πλαϊνές επιφάνειες των κτιρίων, είτε να ενσωματωθούν στο κτίριο (BIPV) υποκαθιστώντας οικοδομικά υλικά (μονώσεις κλπ). Σε αυτές τις εφαρμογές η ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι μικρότερη από την βέλτιστη. Αυτό συμβαίνει διότι ο προσανατολισμός καθορίζεται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας του κτιρίου και δεν ταυτίζεται πάντα με το νότο στον οποίο επιτυγχάνονται οι βέλτιστες τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, η κλίση των πλαισίων επιβάλλεται συνήθως στις 90° κάτι που μειώνει επιπρόσθετα την απόδοσή τους. Αυτή η κλίση επιβάλλεται από τις κάθετες πλαϊνές επιφάνειες των κτιρίων πλην εξαιρέσεων όπου υιοθετούνται πιο περίπλοκες κατασκευές κτιρίων οι οποίες

ενδέχεται να προσεγγίζουν πιο αποδοτικές κλίσεις (πιο κοντά στις 30°). Ακόμη, εμφανίζονται πολύ έντονα φαινόμενα σκίασης από το ίδιο το κτίριο αλλά και από παρακείμενους όγκους και πρέπει να γίνει λεπτομερής μελέτη για την τελική συμμετοχή της σκίασης στις απώλειες.

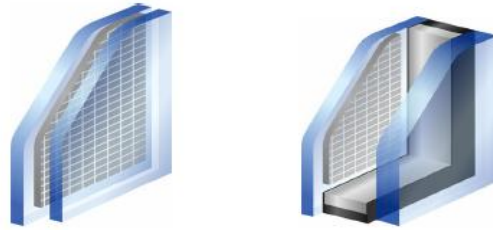
Αν και οι αποδόσεις αυτών των εγκαταστάσεων είναι μειωμένες σε σχέση με την τοποθέτηση σε ταράτσα ή ακόμη και σε επικλινή σκεπή, έχουν οφέλη ως προς το βιοκλιματικό σχεδιασμό του κτιρίου αλλά και την αισθητική του. Έχουν αρχίσει να υιοθετούνται τα τελευταία χρόνια κυρίως λόγω βελτίωσης της τεχνολογίας και δημιουργίας μη ανακλαστικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία δημιουργούσαν αρκετά έντονα αισθητικά αλλά και πρακτικά προβλήματα. Είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται στοιχεία thin film τα οποία ανταποκρίνονται καλύτερα στον μειωμένο αερισμό που παρατηρείται σε αυτού του τύπου τις εγκαταστάσεις. Πάντως, είναι προτιμότερο να εγκαθίστανται κατά την αρχική κατασκευή του κτιρίου ώστε να ταιριάζει με τη συνολική του αρχιτεκτονική.



Εικόνα 2-20

2.5.1.4 Σε υαλοπίνακες (παράθυρα, γυάλινες οροφές)

Αποτελεί μία ειδική εφαρμογή των εγκαταστάσεων σε πλαϊνές επιφάνειες κτιρίων (παράθυρα) ή σε στέγη (γυάλινες οροφές) και διαφοροποιείται σε σχέση με τα παραπάνω από το γεγονός ότι μειώνεται κατά πολύ ο βαθμός κάλυψης από φωτοβολταϊκά στοιχεία σε κάθε πλαίσιο, καθώς είναι επιθυμητό να υπάρχει μεγαλύτερη διέλευση φωτός. Επιπλέον διαφοροποιείται από το γεγονός της ύπαρξης διαπερατής από το φως επιφάνειας τόσο στην εμπρός όσο και στην πίσω επιφάνεια των πλαισίων ώστε να είναι δυνατόν να εισέλθει το ηλιακό φως στο κτίριο.



Εικόνα 2-21

Η κατασκευή τους συνίσταται συνήθως από δύο γυάλινες επιφάνειες ανάμεσα από τις οποίες τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε συγκεκριμένη διάταξη για την επίτευξη της επιθυμητής διαφάνειας. Ανάλογα με το βαθμό της διαφάνειας που επιθυμείται, αυξάνεται προφανώς και η απαραίτητη επιφάνεια για κάθε kW εγκατεστημένης ισχύος.

ΕΙΚΟΝΑ			
ΤΥΠΟΣ Si	Άμορφο	Άμορφο	Πολυκρυσταλλικό
ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ	1%	10%	13%
ΙΣΧΥΣ (STC)	53 W/m ²	42 W/m ²	125 W/m ²
ΕΙΚΟΝΑ			
ΤΥΠΟΣ Si	Μονοκρυσταλλικό	Μονοκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό
ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ	22%	36%	43%
ΙΣΧΥΣ (STC)	122 W/m ²	134 W/m ²	84 W/m ²

Εικόνα 2-22

2.5.1.5 Σε σκίαστρα του κτιρίου

Σε αυτή την εφαρμογή εμφανίζεται, όπως και στις προσόψεις κτιρίων, το πρόβλημα του προσανατολισμού προς το νότο και της σκίασης από το ίδιο το κτίριο, καθώς τα σκίαστρα φωτοβολταϊκών κατευθύνονται σύμφωνα με την κατεύθυνση της παράπλευρης επιφάνειας του κτιρίου. Εδώ όμως υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης ως ένα βαθμό της κλίσης του φωτοβολταϊκού σκίαστρου ώστε να επιτελεί το διπλό του ρόλο στο καλύτερο σημείο. Τα σκίαστρα ενδέχεται να απαιτούν ένα βαθμό διαφάνειας οπότε εντάσσονται και στην κατηγορία των υαλοπινάκων.



Εικόνα 2-23 σκίαστρα φωτοβολταϊκών με εμφανή προβλήματα από παρακείμενη σκίαση

2.5.1.6 Σε σκίαστρα εκτός του κτιρίου

Μία ειδική κατηγορία σκιάστρων, η οποία αν και δεν αποτελεί μέρος του κτιρίου θεωρείται ότι εξυπηρετεί λειτουργικές του ανάγκες, είναι τα σκίαστρα παρακείμενων οριζόντιων χώρων (υπαίθριοι χώροι στάθμευσης, κλπ). Στην περίπτωση των ξενοδοχειακών μονάδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για σκίαση χώρων όπως υπαίθρια εστιατόρια, καφετέριες και λοιποί βοηθητικοί χώροι. Ο προσανατολισμός και η κλίση αυτών των εγκαταστάσεων μπορούν να επιλέγονται κοντά στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας ενώ είναι δυνατόν να επιλέγονται πλαίσια με διαφάνεια οπότε και αυξάνεται ο απαιτούμενος χώρος για κάθε εγκατεστημένο watt ισχύος.



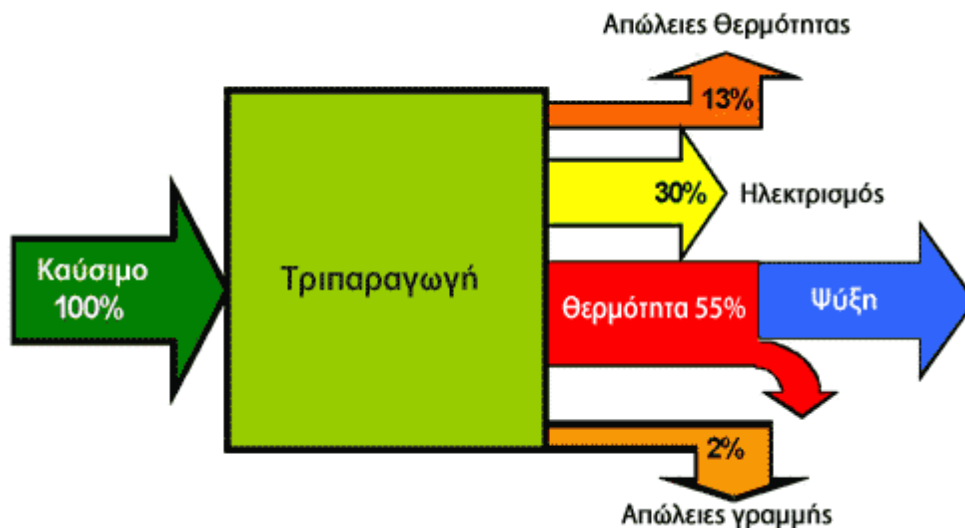
Εικόνα 2-24

3 Εισαγωγή στη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπαραγωγή (CHP ή ΣΗΘ). *Συμπαραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.*

Η συμπαραγωγή δεν αποτελεί μια συγκεκριμένη τεχνολογία αλλά περισσότερο μια εφαρμογή τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης, καθώς και μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας των τελικών καταναλωτών. Λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων, έχουν αναπτυχθεί νέες διατάξεις των συστημάτων συμπαραγωγής που τα καθιστούν οικονομικά συμφέροντα σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Τα προηγμένα υλικά και οι τεχνικές σχεδίασης μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν αυξήσει σημαντικά την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του εξοπλισμού, μειώνοντας ταυτόχρονα τις δαπάνες και τις εκπομπές ρύπων.

Διευκρινίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Όταν υπάρχει σημαντική ανάγκη για ψύξη (κλιματισμό) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η θερμότητα σε μια εγκατάσταση συμπαραγωγής, στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψύξης μέσω κύκλων απορρόφησης. Αυτή η «διευρυμένη» διαδικασία συμπαραγωγής είναι γνωστή ως Τριπαραγωγή ή συνδυασμένη παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας, Θερμότητας και Ψύξης (ΣΗΘΨ).



Εικόνα 3-1 Βασική αρχή της τριπαραγωγής

Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης

30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπαραγωγής φθάνει το 80-85%. Με την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας, η απόδοση μιας εγκατάστασης συμπαραγωγής μπορεί να φθάσει ή και να ξεπεράσει το 90%. Ως εκ τούτου η συμπαραγωγή προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας που κυμαίνεται μεταξύ 15 έως 40%, σε σύγκριση με τους συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς και λέβητες, αντίστοιχα.

Αποτέλεσμα του αυξημένου βαθμού απόδοσης είναι και η εξοικονόμηση καυσίμου που επιτυγχάνεται. Ένα σύστημα συμπαραγωγής ατμοστροβίλου μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 15 % περίπου (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με μονάδα ατμοστροβίλου και θερμότητας με λέβητα), ενώ ένα σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel τη μειώνει κατά 25 % (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με ντιζελοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια και θερμότητας με λέβητα). Μια πρόσθετη βελτίωση του βαθμού εκμετάλλευσης των καυσίμων έγκειται στο ότι τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που είναι της τάξεως του 8 - 10 %.

Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, που επιτυγχάνεται με τη συμπαραγωγή, συντελεί, εν γένει, σε μείωση και των εκπεμπόμενων ρύπων. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, είναι ενδεχόμενη η αύξηση των ρύπων σε τοπική κλίμακα, γεγονός το οποίο επιβάλλει ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του είδους της μονάδας και του πρόσθετου εξοπλισμού της.

Ως πηγή ενέργειας σε μονάδες συμπαραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο (ορυκτό ή βιομάζα). Το καύσιμο όμως που κυριαρχεί σήμερα, για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους είναι το φυσικό αέριο. Τα πλεονεκτήματα χρήσης του φυσικού αερίου ως καύσιμο είναι τα εξής:

- ανταγωνιστικά τιμολόγια ως προς άλλα καύσιμα,
- καθαρή καύση με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται η ζωή του κινητήρα,
- μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα μεταξύ προγραμματισμένων συντηρήσεων,
- χαμηλότεροι ρύποι σε σχέση με άλλα καύσιμα,
- λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με άλλα καύσιμα και
- καθόλου θείο, άρα δεν προκαλεί όξινη βροχή.

Τέλος τα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να εγκατασταθούν σε ενεργοβόρες βιομηχανίες, στον τριτογενή τομέα (νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ), ή να καλύψουν τις θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες μιας αστικής περιοχής, μέσω συστημάτων τηλεθέρμανσης.

3.1 Ιστορική εξέλιξη της συμπαραγωγής

Η συμπαραγωγή πρωτοεμφανίστηκε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. γύρω στο 1890. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ατμολέβητα – στροβίλο, που λειτουργούσαν με άνθρακα. Πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν μονάδες συμπαραγωγής. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι περίπου το 58% της ηλεκτρικής ενέργειας, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του αιώνα, προέρχονταν από μονάδες συμπαραγωγής.

Κατόπιν ακολούθησε κάμψη κυρίως για δύο λόγους:

- ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής, που πρόσφεραν σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια και
- διαθεσιμότητα υγρών καυσίμων και φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές που έκανε τη λειτουργία των λεβήτων οικονομικά συμφέρουσα.

Συνεχίζοντας με το παράδειγμα των Η.Π.Α., η βιομηχανική συμπαραγωγή μειώθηκε στο 15% του συνολικού δυναμικού συμπαραγωγής μέχρι το 1950 και έπεσε στο 5% έως το 1974. Η πορεία αυτή έχει πλέον αντιστραφεί όχι μόνον στις Η.Π.Α. αλλά και σε χώρες της Ευρώπης και στην Ιαπωνία, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στην απότομη αύξηση τιμών των καυσίμων, από το 1973 και μετά.

Η ανοδική πορεία στη διάδοση της συμπαραγωγής συνοδεύτηκε και από αξιοσημείωτη πρόοδο της σχετικής τεχνολογίας. Οι βελτιώσεις και εξελίξεις συνεχίζονται και νέες τεχνικές αναπτύσσονται και δοκιμάζονται, αλλά ήδη η συμπαραγωγή έχει φθάσει σε επίπεδο ωριμότητας με αποδεδειγμένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων, από πλευράς είδους, μεγέθους και λειτουργικών χαρακτηριστικών, είναι διαθέσιμη.

Στις 4 Ιουνίου 1993, υπουργοί από τις 23 χώρες - μέλη της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) στο Παρίσι, προσπαθώντας να δημιουργήσουν τις συνθήκες εκείνες στις οποίες ο τομέας ενέργειας θα μπορέσει να έχει μέγιστη δυνατή συμβολή σε μια βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη και ευημερία των λαών, με ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος, έθεσαν τους ακόλουθους κοινούς στόχους:

- ποικιλότητα, αποδοτικότητα και ευελιξία στον ενεργειακό τομέα ως βασικές συνθήκες μακροπρόθεσμης ενεργειακής ασφάλειας,
- ικανότητα έγκαιρης και ευέλικτης ανταπόκρισης σε περιπτώσεις εκτάκτων ενεργειακών αναγκών,
- περιβαλλοντικά αποδεκτή (βιώσιμη) διάθεση και χρήση της ενέργειας,
- ενθάρρυνση και ανάπτυξη ενεργειακών πηγών περιβαλλοντικά πιο αποδεκτών,
- βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης, η οποία να συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και στην ενεργειακή ασφάλεια με τρόπο οικονομικά αποδοτικό,
- συνεχής έρευνα, ανάπτυξη και εμπορική προώθηση νέων και βελτιωμένων ενεργειακών τεχνολογιών,
- τιμές ενέργειας οι οποίες επιτρέπουν στην αγορά να ενεργεί αποδοτικά
- ελεύθερο και ανοιχτό εμπόριο και ένα ασφαλές πλαίσιο για επενδύσεις που συμβάλλουν στην ενεργειακή απόδοση και ασφάλεια και
- συνεργασία μεταξύ όλων των μελών ενεργειακής αγοράς με σκοπό τη βελτίωση της πληροφόρησης και κατανόησης και την ενθάρρυνση της ανάπτυξης αποδοτικών, περιβαλλοντικών αποδεκτών και ευέλικτων ενεργειακών συστημάτων και αγορών.

Η διάδοση της συμπαραγωγής στις χώρες της ΟΟΣΑ όχι μόνο είναι συμβατή αλλά και συμβάλλει στην επίτευξη όλων αυτών των στόχων. Για το λόγο αυτόν, οι περισσότερες χώρες έχουν θεσπίσει μέτρα που ενθαρρύνουν τη συμπαραγωγή, έστω

και αν τα μέτρα αυτά διαφέρουν σημαντικά από χώρα σε χώρα ως προς την αποτελεσματικότητα. Σημαντική είναι η διάδοση της συμπαραγωγής και σε χώρες εκτός ΟΟΣΑ, ιδιαίτερα στην Κεντρική και Ανατολική Ευρώπη, αλλά οι προϋποθέσεις ενεργειακής και οικονομικής αποδοτικότητας δεν έχουν πάντοτε εξασφαλισθεί.

Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας, που προήλθε από συστήματα συμπαραγωγής στις 12 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 1985, ήταν 8,13% με τάσεις για μικρή αύξηση κατά τα τελευταία έτη. Το ποσοστό ήταν σχετικά χαμηλό και αφήνει σημαντικά περιθώρια για ανάπτυξη.

Η συμπαραγωγή θεωρείται πλέον μία από τις σημαντικότερες τεχνικές για αποδοτική εκμετάλλευση των καυσίμων, εξοικονόμηση φυσικών και οικονομικών πόρων και προστασία του περιβάλλοντος. Από το 1990 μέχρι σήμερα σε πολλές χώρες καταβάλλονται προσπάθειες να υπερπηδηθούν τα εμπόδια και να διευκολυνθεί η διάδοση της. Μεταξύ των κινήτρων, που χρησιμοποιήθηκαν, είναι η σχετικά υψηλή τιμή αγοράς περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρίες ηλεκτρισμού και η επιχορήγηση επενδύσεων. Άλλα μέτρα περιλάμβαναν πληροφόρηση, ενεργειακές καταγραφές και αναλύσεις, υποστήριξη της έρευνας και ανάπτυξης, κ.λπ.

3.2 Εφαρμογές

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Μεγάλες μονάδες συνδεδεμένες στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της χώρας.
- Μικρές αυτόνομες μονάδες (βιομηχανικός, εμπορικός – κτιριακός και αγροτικός τομέας).

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να αντικατασταθούν από συμπαραγωγικούς σταθμούς και να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες πόλεων ή οικισμών, βιομηχανιών, μονάδων αφαλάτωσης, θερμοκηπίων, ιχθυοκαλλιεργειών κλπ, που βρίσκονται στην περιοχή τους. Η απόσταση των καταναλωτών θερμότητας από το σταθμό και η διασπορά τους είναι κρίσιμης σημασίας για τη σκοπιμότητα της όλης εγκατάστασης. Ειδικότερα για τη θέρμανση πόλεων ή οικισμών, γνωστή με τον όρο τηλεθέρμανση, επιπλέον της απόστασης και διασποράς, έχουν σημασία ο ετήσιος αριθμός βαθμομερών και η απαιτούμενη θερμική ισχύς.

Σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής παρουσιάζουν οι ακόλουθοι βιομηχανικοί κλάδοι:

- βιομηχανίες τροφίμων και ποτών,
- κλωστοϋφαντουργίες,
- βιομηχανίες χαρτιού,
- χημικές βιομηχανίες,
- διυλιστήρια ακάθαρτου πετρελαίου,
- εργοστάσια τσιμέντου και
- βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες (χαλυβουργία, εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου, κλπ).

Στις βιομηχανίες αυτές, πολλές διεργασίες παράλληλα απαιτούν θερμότητα με τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια και κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών (μικρότερων των 100°C), π.χ. ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση ή ψύξη χώρων, θερμό νερό χρήσης.
- Διεργασίες μέτριων θερμοκρασιών (100 - 300°C) π.χ. διεργασίες στη χαρτοποιία, στην κλωστοϋφαντουργία, στα εργοστάσια ζάχαρης, σε μερικές χημικές βιομηχανίες, κ.λπ. Συνεπώς οι διεργασίες αυτές απαιτούν θερμότητα με μορφή ατμού.
- Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών (300 - 700°C), π.χ. σε μερικές χημικές βιομηχανίες.
- Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (πάνω από 700°C), π.χ. σε εργοστάσια τσιμέντου, μεταλλουργικές βιομηχανίες, υαλουργία κ.λπ.

Στον εμπορικό - κτιριακό τομέα ανήκουν τα ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, σχολεία, κτίρια γραφείων, κατοικίες, κλπ. Η συμπαραγωγή καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα των κτιρίων καθώς και τις ανάγκες σε ψύξη.

3.3 Συστήματα Συμπαραγωγής

Ένα σύστημα συμπαραγωγής αποτελείται κυρίως από τέσσερα στοιχεία:

(α) Τον κινητήρα

Μπορεί να είναι αμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, συνδυασμένου κύκλου, κυψέλες καυσίμου, μηχανή Stirling Ο κινητήρας κινεί τη γεννήτρια.

(β) Τη γεννήτρια

Μπορεί να είναι σύγχρονη, ασύγχρονη ή αυτοδιεγειρόμενη ασύγχρονη και παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

(γ) Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας

Ανακτά την απορριπτόμενη θερμότητα από τα ρευστά που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής (με εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας) και από τα καυσαέρια (με λέβητα ανάκτησης θερμότητας που αποκαλείται και λέβητας καυσαερίων).

(δ) Το σύστημα ελέγχου

Διασφαλίζει την ασφαλή και ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος συμπαραγωγής.

3.3.1 Συστήματα «βάσης» και κορυφής»

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν είτε ως συστήματα «κορυφής» (*topping systems*) είτε ως συστήματα «βάσης» (*bottoming system*).

Στα συστήματα κορυφής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η αποβαλλόμενη θερμότητα, χαμηλής

θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται σε θερμικές διεργασίες, θέρμανση χώρων ή ακόμη και για παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα συστήματα βάσης, παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας και κατόπιν τα θερμά αέρια διοχετεύονται συνήθως σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί την αμοστροβιλογεννήτρια. Είναι επίσης δυνατό τα θερμά αέρια να διοχετευθούν σε αεριοστρόβιλο, που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια χωρίς την παρεμβολή λέβητα.

3.3.2 Σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για συστήματα ΣΗΘ είναι αυτές των αεριοστρόβιλων, αμοστροβιλων (συνδυασμένου κύκλου, συμπύκνωσης και ανάκτησης θερμότητας), μηχανών εσωτερικής καύσης, κινητήρων Stirling, ατμομηχανών και οργανικού κύκλου Rankine.

3.3.3 Συστήματα Αεριοστρόβιλου

Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούν τα θερμά αέρια που παράγονται άμεσα από την καύση ορυκτών καυσίμων.



Εικόνα 3-2 Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο χρησιμοποιούνται όπου υπάρχουν μεγάλες ανάγκες ατμού. Τα παραγόμενα καυσαέρια από τους αεριοστρόβιλους οδηγούνται σε λέβητες ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ατμού. Τα καυσαέρια μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν απευθείας για ξήρανση ή να οδηγηθούν σε ψύκτη απορρόφησης για παραγωγή ψύξης.

Οι αεριοστρόβιλοι αερίου χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά σε συστήματα συμπαραγωγής μέσης ή υψηλής τάσης. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει γρήγορη εκκίνηση και άμεση απόκριση στις αλλαγές φορτίων.

Έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε εφαρμογές συμπαραγωγής με κύρια πλεονεκτήματα το χαμηλό κόστος ανά εγκατεστημένο kW σε συστήματα πάνω από 1,5 MW, υψηλή διαθεσιμότητα, χαμηλού κόστους συντήρηση, δυνατότητα αλλαγής καυσίμου, υψηλής ποιότητας θερμότητα που μπορεί εύκολα να ανακτηθεί και υψηλή απόδοση σε μεγαλύτερα μεγέθη.

Χωρίζονται σε δύο βασικές διατάξεις:

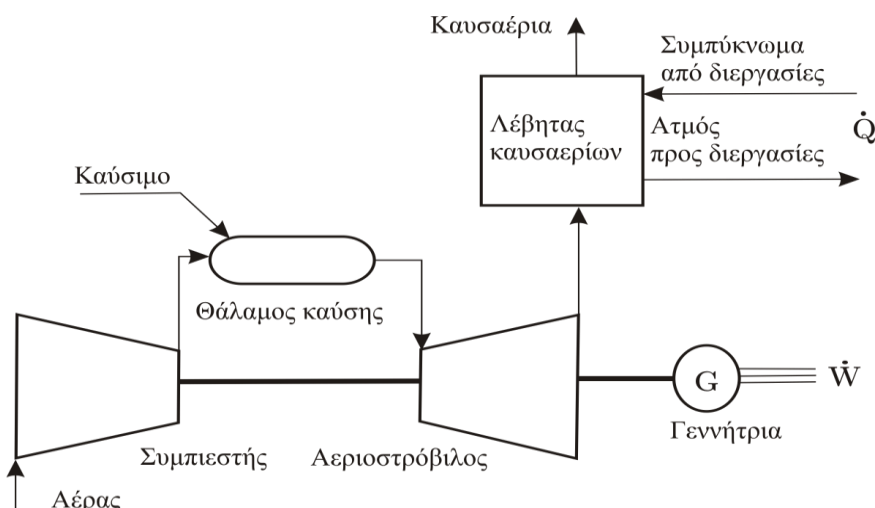
- ανοιχτού κύκλου και
- κλειστού κύκλου

3.3.3.1 Αεριοστρόβιλος ανοιχτού κύκλου

Οι περισσότερες μονάδες αεριοστρόβιλου είναι ανοιχτού κύκλου. Αέρας αναρροφάται από την ατμόσφαιρα, συμπιέζεται και οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Τα καυσαέρια εκτονώνονται στον αεριοστρόβιλο (που κινεί τη γεννήτρια) και εξέρχονται σε θερμοκρασία 300 - 600 °C. Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης (ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης) ενός τέτοιου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής (25 - 35% και σε σύγχρονες προηγμένες μονάδες 40%).

Η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων κάνει τις μονάδες αυτές ιδανικές για συμπαραγωγή (Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.), εγόνος που αυξάνει τον ολικό βαθμό απόδοσης σε 60 - 80%. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων:

- άμεση χρήση σε θερμικές διεργασίες (θέρμανση, ξήρανση),
- διοχέτευση των καυσαερίων σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας (λέγεται και λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός που είναι κατάλληλος όχι μόνο για θερμικές διεργασίες αλλά και για την κίνηση ατμοστρόβιλου (συνδεδεμένου με γεννήτρια ή άλλο μηχάνημα).



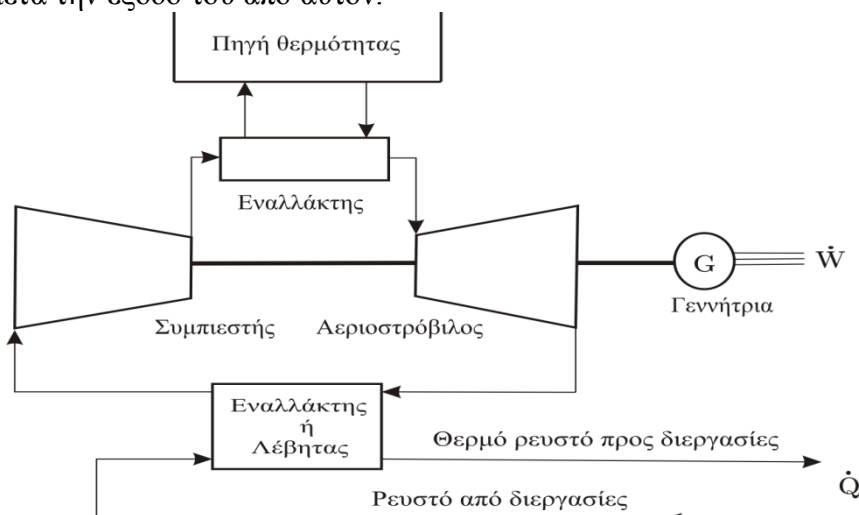
Εικόνα 3-3 συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο ανοιχτού κύκλου έχουν ισχύ 100kW - 100MW. Λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο ή ελαφριά αποστάγματα πετρελαίου (καύσιμο Diesel), αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και αέρια καύσιμα που παράγονται π.χ. κατά την καταλυτική σχάση υδρογονανθράκων σε διυλιστήρια πετρελαίου.

Ο χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής αεριοστρόβιλων είναι 9 - 14 μήνες για ισχύ μέχρι 7MW και φθάνει τα 2 έτη για μεγαλύτερες μονάδες. Η αξιοπιστία και η μέση ετήσια διαθεσιμότητα τέτοιων συστημάτων που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο είναι συγκρίσιμες με εκείνες των συστημάτων ατμοστρόβιλου. Οι μονάδες που λειτουργούν με υγρό καύσιμο απαιτούν πιο συχνή συντήρηση με συνέπεια τη χαμηλότερη διαθεσιμότητα. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής είναι 15 - 20 έτη και μπορεί να μειωθεί σημαντικά εξαιτίας καύσιμου κακής ποιότητας ή ανεπαρκούς συντήρησης.

3.3.3.2 Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου

Στα συστήματα κλειστού κύκλου, το εργαζόμενο ρευστό (συνήθως ήλιο ή αέρας) κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα. Θερμαίνεται μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία σε εναλλάκτη θερμότητας πριν την είσοδο στον αεριοστρόβιλο και ψύχεται μετά την έξοδο του από αυτόν.



Εικόνα 3-4. Σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο κλειστού κύκλου.

Καθώς το ρευστό δεν συμμετέχει στην καύση διατηρείται καθαρό και έτσι αποφεύγεται η μηχανική και χημική διάβρωση του αεριοστρόβιλου από τα προϊόντα καύσης. Η εξωτερική καύση επιτρέπει τη χρήση οποιουδήποτε καυσίμου στα συστήματα αυτά. Στην Ευρώπη και την Ιαπωνία λειτουργούν συστήματα τέτοιου τύπου με ισχύ 2 - 50 MW, ο αριθμός τους όμως είναι περιορισμένος. Η αξιοπιστία των συστημάτων κλειστού κύκλου είναι τουλάχιστον ίση με εκείνη των συστημάτων ανοιχτού κύκλου, ενώ η διαθεσιμότητα είναι υψηλότερη χάρη στις μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης που οφείλεται στην καθαρότητα του εργαζόμενου ρευστού.

3.3.4 Συστήματα Ατμοστροβίλου

Οι ατμοστροβίλοι δεν μετατρέπουν άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Απαιτούν μία πηγή ατμού υψηλής πίεσης που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας. Στα καύσιμα των λεβήτων συμπεριλαμβάνονται ορυκτά καύσιμα, όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ή ανανεώσιμα καύσιμα, όπως το ξύλο και τα αστικά απορρίμματα.

Ο ατμοστροβίλος μπορεί να αποτελείται από πολλές βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να οριστεί με την ανάλυση της εκτόνωσης του ατμού από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη πίεση.

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα συμπαραγωγής, κατάλληλα για ισχύς 500 kW - 100 MW ή και μεγαλύτερης. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε καύσιμο. Ακόμη και στερεά απόβλητα καίγονται σε ειδικούς λέβητες εφοδιασμένους με συστήματα κατακράτησης ή και εξουδετέρωσης ρύπων και τοξικών ουσιών, που δημιουργούνται κατά την καύση. Ο βαθμός απόδοσης φθάνει το 60 - 85%. Για

σύγκριση, υπενθυμίζεται ότι ο βαθμός απόδοσης ενός συμβατικού ατμοηλεκτρικού σταθμού βρίσκεται στην περιοχή του 35%.



Εικόνα 3-5 Σύστημα ατμοστρόβιλου

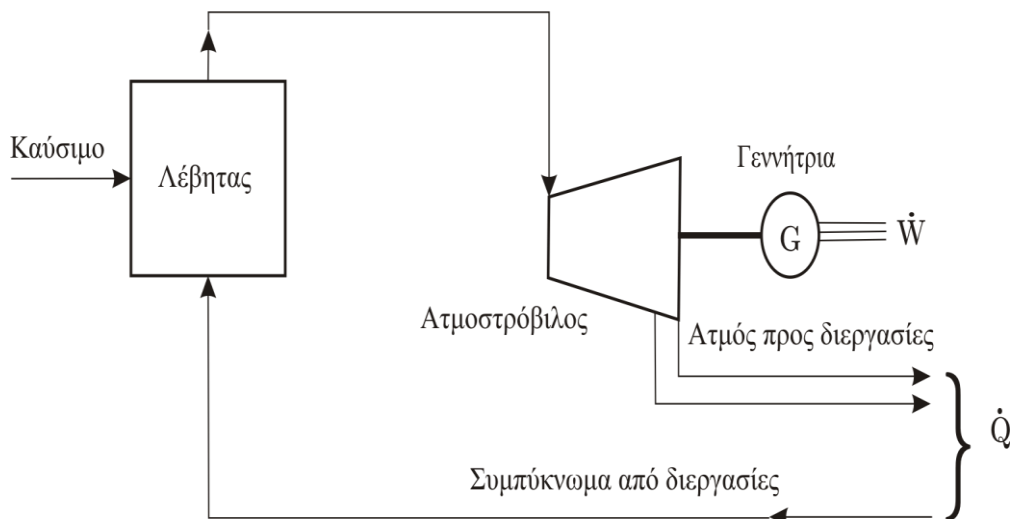
Τα συστήματα ατμοστρόβιλου έχουν υψηλή αξιοπιστία, υψηλή διαθεσιμότητα (90 - 95%) και μεγάλη διάρκεια ζωής (25 - 35 έτη). Όμως, ο χρόνος εγκατάστασης είναι σχετικά μεγάλος, 12 - 18 μήνες για μικρές μονάδες και μέχρι τρία έτη για μεγαλύτερα συστήματα.

Οι τρεις βασικές διατάξεις συστημάτων της κατηγορίας αυτής περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

3.3.4.1 Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης

Ατμός υψηλής πίεσης (20 - 100bar) και θερμοκρασίας (480 - 540°C) παράγεται σε λέβητα με κατανάλωση καυσίμου και χρησιμοποιείται για την κίνηση ατμοστρόβιλου, στον άξονα του οποίου είναι συνδεδεμένη ηλεκτρογεννήτρια (Εικόνα 3-6). Ο ατμός βγαίνει από το στρόβιλο σε πίεση και θερμοκρασία κατάλληλη για τις διεργασίες. Ο όρος «αντίθλιψη» οφείλεται στο ότι η πίεση αυτή είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (3 - 20 bar)

Απομάστευση (δηλαδή εξαγωγή) μέρους του ατμού από ενδιάμεσες βαθμίδες του στρόβιλου στις επιθυμητές πιέσεις είναι επίσης δυνατή.



Εικόνα 3-6. Σύστημα ΣΗΘ με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.

Σε σύγκριση με το σύστημα απομάστευσης, το σύστημα αντίθλιψης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

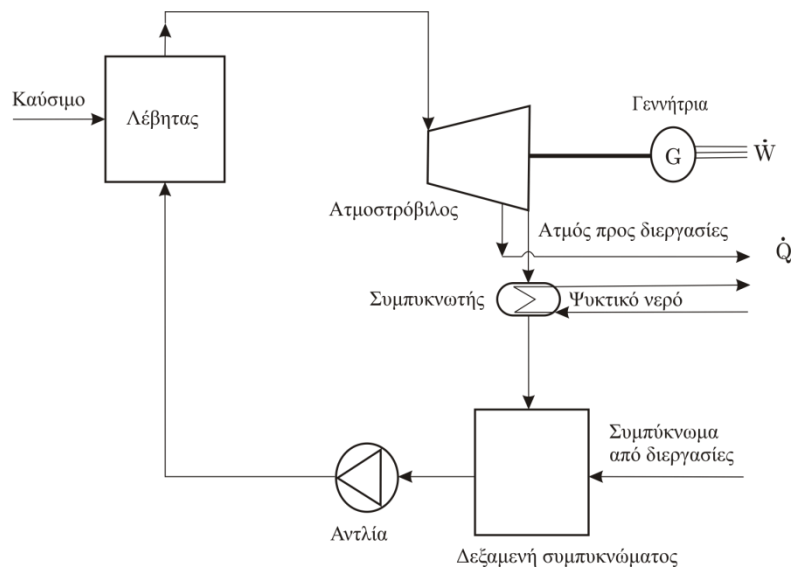
- απλή μορφή,
- μικρότερο κόστος,
- μειωμένη ή καθόλου ανάγκη ψυκτικού νερού και
- υψηλότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 85%), κυρίως διότι δεν αποβάλλεται θερμότητα στο περιβάλλον μέσω συμπυκνωτή.

Σημαντικό μειονέκτημα του, είναι ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένη με την απαιτούμενη θερμότητα. Έτσι:

- είναι αδύνατη η ανεξάρτητη λειτουργία του ατμοηλεκτρικού σταθμού από το δίκτυο θέρμανσης και
- είναι αναγκαία η αμφίδρομη σύνδεση με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού για την κάλυψη πρόσθετων αναγκών ή για τη διοχέτευση της πιθανής περίσσειας ηλεκτρικής ενεργείας

3.3.4.2 Ατμοστρόβιλος απομάστευσης

Μέρος του ατμού εξάγεται από μία ή περισσότερες ενδιάμεσες βαθμίδες του στρόβιλου στις επιθυμητές πιέσεις, ενώ ο υπόλοιπος εκτονώνεται μέχρι την πίεση του συμπυκνωτή (λέγεται και ψυγείο του ατμού) που είναι 0,05 - 0,10 bar .

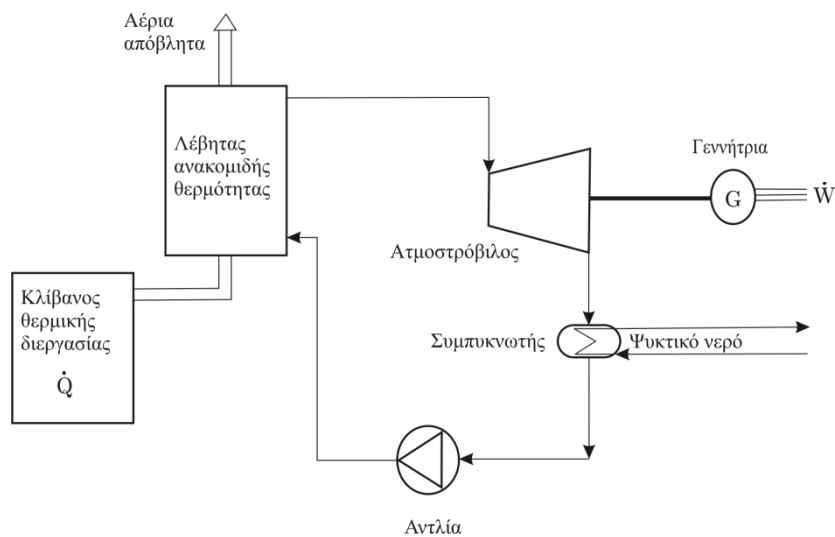


Εικόνα 3-7. Σύστημα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης.

Τα συστήματα απομάστευσης είναι ακριβότερα και έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 80%) από τα συστήματα αντίθλιψης. Όμως έχουν την δυνατότητα ανεξάρτητης (μέσα σε ορισμένα όρια) ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με ρύθμιση της ολικής παροχής ατμού και επομένως της παροχής ατμού προς τον συμπυκνωτή.

3.3.4.3 Ατμοστρόβιλος σε κύκλο βάσης

Αρκετές βιομηχανίες (π.χ. χαλυβουργεία, υαλουργία, κεραμουργεία, εργοστάσια τιμέντου, εργοστάσια αλουμινίου, διυλιστήρια πετρελαίου κ.λπ.) έχουν αέρια απόβλητα υψηλής θερμοκρασίας. Μετά τη θερμική διεργασία, τα αέρια αυτά μπορούν να περάσουν μέσα από λέβητα ανακομιδής θερμότητας, όπου παράγεται ατμός που κινεί μία ατμοστροβιλογεννήτρια. Έτσι η μονάδα παραγωγής θερμότητας μετατρέπεται σε σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού.



Εικόνα 3-8. Σύστημα συμπαραγωγής με κύκλο βάσης ατμού.

Τυπική περιοχή τιμών του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης είναι 5 - 15 %. Ο βαθμός απόδοσης είναι χαμηλός, αλλά η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από θερμότητα που διαφορετικά θα χανόταν χωρίς πρόσθετη κατανάλωση καυσίμου.

3.3.5 Παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης



Εικόνα 3-9. Παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης.

Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- μονάδες μικρής κλίμακας με αεριομηχανή (15- 1000kW) ή κινητήρα Diesel (75 - 1000 kW),
- συστήματα μέσης ισχύος (1000 - 6000 kW) με αεριομηχανή ή κινητήρα Diesel,
- συστήματα μεγάλης ισχύος (άνω των 6000 kW) με κινητήρα Diesel

Αεριομηχανές (*gas engine*) ονομάζονται οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με αέριο καύσιμο, (π.χ. φυσικό αέριο, βιοαέριο, κλπ). Είναι εμπορικά διαθέσιμοι οι ακόλουθοι τύποι αεριομηχανών:

- βενζινοκινητήρες αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές,
- κινητήρες Diesel αυτοκινήτων που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές,
- σταθερές μηχανές που έχουν μετατραπεί σε αεριομηχανές ή που έχουν από την αρχή σχεδιαστεί ως αεριομηχανές,
- σταθερές μηχανές διπλού καυσίμου.

Οι κινητήρες Diesel διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- ταχύστροφους,
- μεσόστροφους και
- βραδύστροφους.

Οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης ακόμη και σε μικρά μεγέθη. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μικρών και μεσαίων κινητήρων είναι 35 - 45 %, ενώ σε σύγχρονους μεγάλους κινητήρες φθάνει το 50%. Ο ολικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής με εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης βρίσκεται στην περιοχή του 80%. Η διάρκεια ζωής είναι 15 - 20 έτη και εξαρτάται από το μέγεθος της μονάδας, την ποιότητα του καυσίμου και την ποιότητα της συντήρησης. Οι παλινδρομικοί κινητήρες απαιτούν τακτικότερη συντήρηση απ' ό,τι τα προηγούμενα συστήματα με αποτέλεσμα μικρότερη μέση ετήσια διαθεσιμότητα (80 - 90%).

Οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης είναι κατάλληλες για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και λειτουργούν τόσο με υγρά όσο και με αέρια καύσιμα. Τα χαρακτηριστικά αυτά τις έχουν κάνει μέχρι και σήμερα την πρώτη επιλογή για

εφαρμογές συμπαραγωγής στον τριτογενή τομέα αλλά και στη βιομηχανία όπου απαιτείται χαμηλή ή μέση τάση.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με ΜΕΚ είναι συνεχούς λειτουργίας και παράγουν ζεστό νερό για θέρμανση ή για παραγωγικές διαδικασίες ενώ σε συνδυασμό με λέβητες ανάκτησης θερμότητας και ψύκτες απορρόφησης παράγουν ατμό και κρύο νερό για ψύξη αντίστοιχα.

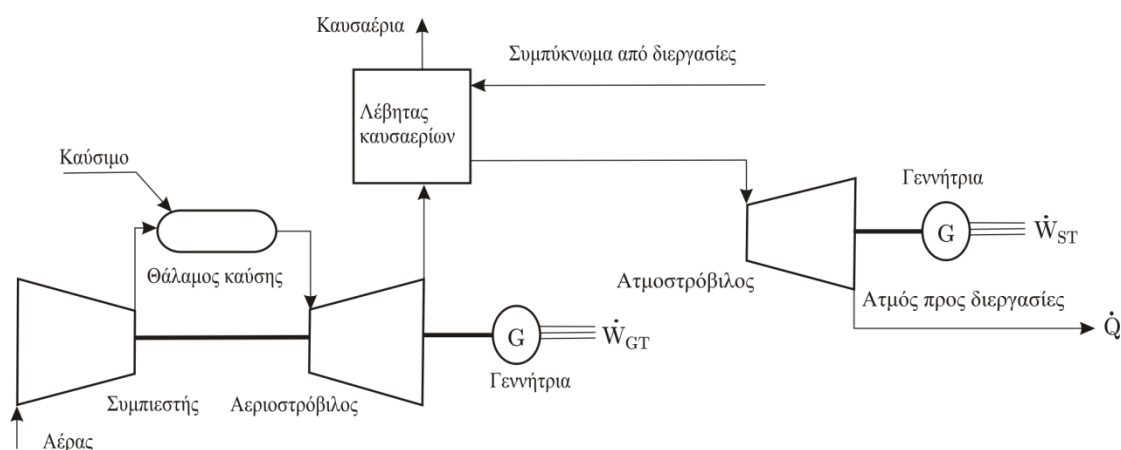
3.3.6 Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου

Ο όρος «συνδυασμένος κύκλος» αναφέρεται σε συστήματα με δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κάποιο εργαζόμενο ρευστό και λειτουργούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο κύκλος υψηλής θερμοκρασίας (κορυφής) αποβάλλει θερμότητα, που ανακτάται και χρησιμοποιείται από τον κύκλο χαμηλής θερμοκρασίας (βάσης) για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα συνδυασμένου κύκλου είναι ο συνδυασμό αεριοστρόβιλου - ατμοστρόβιλου (κύκλοι Joule - Rankine). Η Εικόνα 3-10 δείχνει τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος. Η παραγωγή ατμού σε δύο ή και τρεις διαφορετικές πιέσεις κάνει την εγκατάσταση πιο περίπλοκη αλλά αυξάνει το βαθμό απόδοσης (χρησιμοποιείται στις μεγάλες μονάδες).

Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο στα καυσαέρια του αεριοστρόβιλου (περίπου 17%) επιτρέπει την καύση συμπληρωματικού καυσίμου στο λέβητα καυσαερίων εάν κριθεί αναγκαία για την αύξηση της ισχύος του συστήματος. Η συμπληρωματική καύση αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, αλλά κάνει την εγκατάσταση (και ιδιαίτερα τις διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου) πιο περίπλοκες.

Η ισχύς των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή 20 - 400 MW, ενώ κατασκευάζονται επίσης μικρότερες μονάδες με ισχύ 4 - 11 MW. Η συγκέντρωση ισχύος (ισχύς ανά μονάδα όγκου) των συστημάτων αυτών είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωση ισχύος των συστημάτων απλού κύκλου αεριοστρόβιλου (Joule) ή ατμοστρόβιλου (Rankine)



Εικόνα 3-10. Σύστημα συμπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης.

Ο χρόνος εγκατάστασης είναι 2 - 3 έτη . Η εγκατάσταση μπορεί να γίνει σε δύο στάδια. Εγκαθίσταται πρώτα η μονάδα αεριοστρόβιλου που μπορεί να είναι έτοιμη για λειτουργία σε 12 - 18 μήνες. Ενώ αυτή λειτουργεί, συμπληρώνεται το

σύστημα με τη μονάδα του αμοστροβίλου. Η αξιοπιστία των συστημάτων συνδυασμένου κύκλου είναι 80 - 85%, η μέση διαθεσιμότητα 77 - 85 % και ο ωφέλιμος χρόνος ζωής 15 - 25 έτη.

Είναι επίσης δυνατός ο συνδυασμός κύκλου Diesel με κύκλο Rankine. Στη διάταξη αυτή η μονάδα συμπίεστη - θαλάμου καύσης αεριοστροβίλου αντικαθίσταται από τον κινητήρα Diesel και τους εναλλάκτες θερμότητας που το συνοδεύουν.

3.3.7 Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά

Η ισχύς των συστημάτων αυτών κυμαίνεται στην περιοχή 2 kW - 10 MW. Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός (10 - 30%), αλλά σημασία έχει το γεγονός ότι ένα τέτοιο σύστημα παράγει πρόσθετη ισχύ χωρίς να ξοδεύει καύσιμο. Από κατασκευαστικής πλευράς χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών ώστε να μην παθαίνουν διάβρωση από το οργανικό ρευστό (π.χ. ανοξείδωτος χάλυβας), και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην διαφεύγει το οργανικό ρευστό στην ατμόσφαιρα.

Ο χρόνος εγκατάστασης μικρών συστημάτων (μέχρι 50 kW) και ιδιαίτερα εκείνων που είναι κατάλληλα για χρήση στον εμπορικό - κτιριακό τομέα, είναι 4 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες 1 - 2 έτη. Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητα τους είναι 80 - 90 %. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

3.3.8 Κυψέλες Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μία ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης. Καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει:

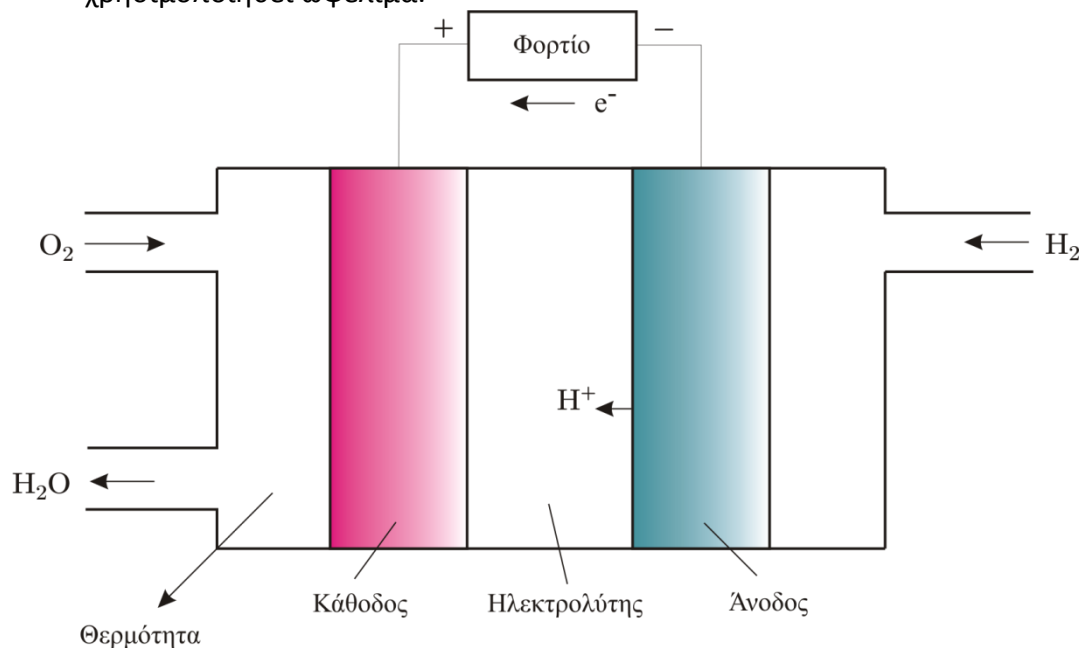
- ηλεκτρική ενέργεια,
- θερμότητα και
- νερό



Εικόνα 3-11. Συστήματα κυψελών καυσίμου μικρής ισχύος.

Στη βασική της μορφή, λειτουργεί ως εξής:

- Υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό.
- Ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτρολυτικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο).
- Η αντίδραση είναι εξώθερμη και παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.



Εικόνα 3-12. Κυψέλη καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι από πολυμερές ή άλλο υλικό, το οποίο επιτρέπει την διέλευση ιόντων, αλλά όχι τη διέλευση των ηλεκτρονίων. Ένα καύσιμο που περιέχει υδρογόνο (π.χ. φυσικό αέριο) εισάγεται από την πλευρά της ανόδου, όπου τα ηλεκτρόνια του υδρογόνου ελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα δίδοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχυνθεί η διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου χρησιμοποιείται ένας καταλύτης υψηλής αγωγιμότητας στα ηλεκτρόδια (π.χ. πλατίνα). Όταν το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι καθαρό υδρογόνο, τα μόνα παράγωγα της διεργασίας αυτής είναι ηλεκτρικό ρεύμα, καθαρό νερό και θερμότητα.

Οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου χαρακτηρίζονται από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν και είναι:

- PAFC - Φωσφορικό οξύ
- MCFC - Τηγμένα ανθρακικά άλατα
- SOFC - Σταθεροποιημένα οξειδία
- PEMFC - Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

- AFC – Αλκάλια

Οι κυψέλες καυσίμου είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό και εμπορικό – κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με το φυσικό αέριο). Κύρια πλεονεκτήματα τους είναι τα ακόλουθα:

- η αρθρωτή (modular) δομή, που διευκολύνει την κατασκευή μονάδων με την επιθυμητή ισχύ,
- η διατήρηση υψηλού ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης ακόμα και σε μερικό φορτίο (δηλαδή φορτίο μικρότερου του ονομαστικού),
- η ευκολία αυτοματισμού,
- οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και
- η χαμηλή στάθμη θορύβου.

Χάρη στον υψηλό βαθμό απόδοσης και τα καθαρά καύσιμα που χρησιμοποιούνται οι εκπομπές CO₂ και SO₂ είναι κατά 10 – 100 φορές χαμηλότερες από εκείνες των άλλων συστημάτων. Ειδικότερα, επειδή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι σημαντικά μικρότερες της καύσης, οι εκπομπές NO_x είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους από τις εκπομπές των συστημάτων που στηρίζονται στην καύση. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων και η χαμηλή στάθμη θορύβου κάνουν τις κυψέλες καυσίμου πιο κατάλληλες από άλλα συστήματα για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές και σε κτίρια όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, κλπ.

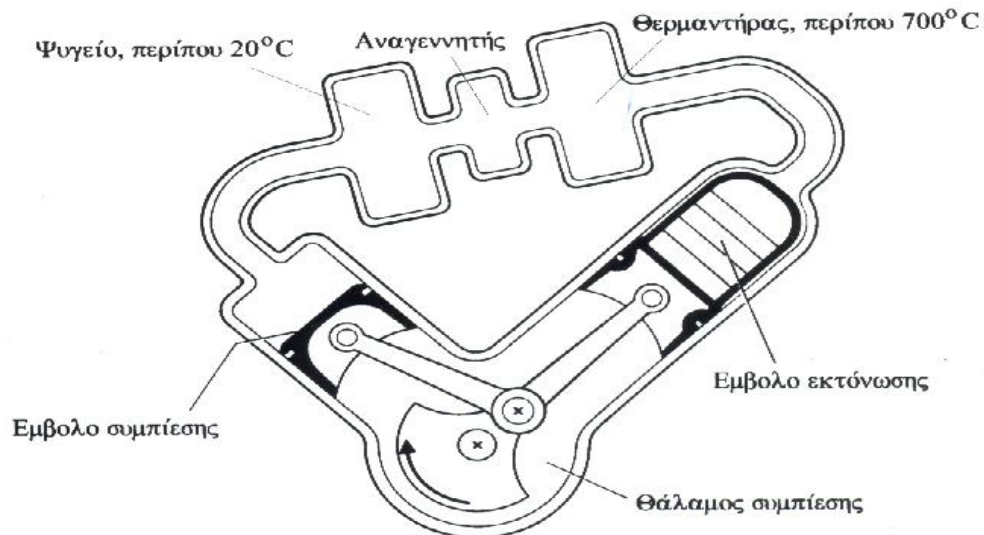
Μειονεκτήματα αυτού του συστήματος συμπαραγωγής είναι:

- το υψηλό κόστος κατασκευής και
- η σχετική μικρή διάρκεια ζωής.

3.3.9 Μηχανές Stirling

Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας είναι επίσης δυνατή με μηχανές Stirling. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η τεχνική αυτή σε σχέση με τα συστήματα Diesel αεριοστρόβιλων ή ατμοστρόβιλων είναι τα εξής:

- η δυνατότητα υψηλότερου βαθμού απόδοσης,
- η μεγαλύτερη ευελιξία καυσίμου,
- η καλή συμπεριφορά σε μερικό φορτίο,
- οι χαμηλές εκπομπές ρύπων,
- η χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.



Εικόνα 3-13. Απλοποιημένη απεικόνιση κινητήρα Stirling.

Αέριο (π.χ. υδρογόνο, ήλιο, κλπ.) συμπιέζεται και εκτονώνεται σε διάταξη κυλίνδρου- δύο εμβόλων με αποτέλεσμα την περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Το αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας χωρίς να συμμετέχει στην καύση (κινητήρας εξωτερικής καύσης).

Η εξωτερική καύση στις μηχανές Stirling επιτρέπει τη χρήση διαφόρων καυσίμων (υγρά ή αέρια καύσιμα, άνθρακας, αέρια ή υγρά προερχόμενα από άνθρακα, καύσιμα προερχόμενα από βιομάζα ακόμη και απορρίμματα). Επιπλέον είναι δυνατή η αλλαγή καυσίμου χωρίς διακοπή της λειτουργίας ή μετατροπή ρυθμίσεων του κινητήρα. Χάρη στην ευελιξία τους οι μηχανές αυτές μπορούν επίσης να αποτελέσουν στοιχεία ηλιακών ή πυρηνικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ή συμπαραγωγής.

3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος

Σύστημα	Ηλεκτρική ισχύς	Ετήσια μέση διαθεσιμότητα	Ηλεκτρική απόδοση		Συνολική απόδοση	Ισχύς/Θερμότητα
	MW	%	Φορτίο 100%	Φορτίο 50%	%	—
Ατμοστρόβιλος	0.5-100	90-95	14-35	12-28	60-85	0.1-0.5
Αεριοστρόβιλος ανοιχτού κύκλου	0.1-100	90-95	25-40	18-30	60-80	0.5-0.8
Αεριοστρόβιλος κλειστού κύκλου	0.5-100	90-95	30-35	30-35	60-80	0.5-0.8
Συνδυασμένου κύκλου Joule-Rankine	4-100	77-85	35-45	25-35	70-88	0.6-2.0
Μηχανή Diesel	0.07-50	80-90	35-45	32-40	60-85	0.8-2.4
Μηχανές εσωτερικής καύσης(“πακέτα”)	0.015-2	80-85	27-40	25-35	60-80	0.5-0.7
Κυψέλες καυσίμου	0.04-50	90-92	37-45	37-45	85-90	0.8-1.0
Μηχανές Stirling	0.003-1.5	85-90	35-50	34-49	60-80	1.2-1.7

Πίνακας 3-1 τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής

3.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε συστήματος

	<u>Πλεονεκτήματα</u>	<u>Μειονεκτήματα</u>
Ατμοστρόβιλοι	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση Μεγάλη ποικιλία καυσίμων Μεταβαλλόμενος λόγος θέρμανση προς ισχύ ,δυνατότητα κάλυψης περισσότερων της μιας βαθμίδων θερμότητας Διαθέσιμο μεγάλο εύρος μεγεθών Μεγάλη διάρκεια ζωής 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος Αργή εκκίνηση
Αεριοστρόβιλοι	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή αξιοπιστία Σταθερή υψηλή ταχύτητα που επιτρέπει – έλεγχο συχνότητας της ηλεκτρικής παραγωγής Υψηλός λόγος ισχύος ανά μονάδα όγκου Σχετικά φθινό κόστος επένδυσης ανά KWe Μεγάλο εύρος καυσίμων (diesel, LPG, νάφθα, βιομάζα) Χαμηλές εκπομπές ρύπων. 	<ul style="list-style-type: none"> Περιορισμένος αριθμός μεγεθών Μειωμένη μηχανική απόδοση σε σύγκριση με τις ΜΕΚ Υψηλά επίπεδα θορύβου Χαμηλή απόδοση σε μερικό φορτίο Η παραγωγή μειώνεται με την άνοδο της εξωτερικής θερμοκρασίας
Μηχανές εσωτερικής καύσης	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση ισχύος για ένα μεγάλο εύρος φορτίων Η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές φορτίου είναι ταχύτερη, χωρίς να παρουσιάζεται έντονη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά τις μεταβατικές περιόδους Σχετικά φθινό κόστος επένδυσης ανά KWe Μεγάλο εύρος μεγεθών από 3KWe Γρήγορη εκκίνηση (15sec) ακόμη και σε πλήρες φορτίο – σε αεριοστρόβιλους 0.5-2ώρες Χαμηλό κόστος επένδυσης σε μικρά μεγέθη Λειτουργία ακόμη και με αέριο χαμηλής πίεσης(κάτω από 1 bar). 	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλες ανάγκες νύξης Χαμηλός λόγος ισχύος ανά μονάδα όγκου Υψηλά επίπεδα θορύβου Υψηλό κόστος συντήρησης
Μηχανές Stirling	<ul style="list-style-type: none"> Λιγότερα κινούμενα μέρη, λιγότερες τριβές Κατάλληλο για μαζική παραγωγή Παραγωγή ισχύος ανεξάρτητη από την παραγωγή θερμότητας Υψηλός θεωρητικά βαθμός απόδοσης Εύκολος έλεγχος 	<ul style="list-style-type: none"> Έλλειψη εμπειρίας Μεγάλο κόστος λόγω της νέας τεχνολογίας
Μικροτουρμπίνες	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή αξιοπιστία χάρη στα λίγα κινούμενα μέρη Απλή εγκατάσταση Μικρό κόστος συντήρησης Συμπαγές μέγεθος Χαμηλό βάρος Χαμηλά επίπεδα θορύβου Χαμηλά επίπεδα εκπομπών ρύπων Υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος
Κυψέλες καυσίμου	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλά επίπεδα ρύπων και θορύβου Υψηλή απόδοση για ένα μεγάλο εύρος φορτίων Βαθμωτός σχεδιασμός, απλή κατασκευή Γρήγορες αλλαγές φορτίου, μικρό κόστος συντήρησης Μεταβαλλόμενος λόγος θέρμανση προς ισχύ 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλό κόστος Μειωμένη Αργή εκκίνηση Διάβρωση των ηλεκτρολυτών
Συνδυασμένου κύκλου	<ul style="list-style-type: none"> Μεγάλη ισχύς συγκέντρωσης(ισχύς/ μονάδα όγκου) 	<ul style="list-style-type: none"> Περίπλοκη εγκατάσταση(διάταξη ρυθμίσεων και ελέγχου) Μειωμένος βαθμός απόδοσης σε λειτουργία σε μερικό φορτίο

Πίνακας 3-2 πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων συμπαραγωγής

3.6 Μικροσυμπαγωγή και Τριπαραγωγή

Δύο νέες τεχνολογίες οι οποίες έχουν βασιστεί πάνω στην ιδέα της συμπαραγωγής είναι η μικροσυμπαγωγή (microCHP) και η τριπαραγωγή (trigeneration).

Οι μονάδες μικροσυμπαγωγής προορίζονται κυρίως για οικιακή χρήση. Ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλες εφαρμογές όπως σε μικρά ξενοδοχεία, εμπορικά καταστήματα, γραφεία και πολυκατοικίες. Επιπλέον μπορούν να διαστασιολογηθούν για τις απαιτήσεις του εκάστοτε χρήστη. Μία μονάδα μικροσυμπαγωγής συνδυάζει τις δυνατότητες ενός υψηλής απόδοσης λέβητα με μία μικρή γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.6.1 Τριπαραγωγή

Η τριπαραγωγή (trigeneration) είναι μία νέα τεχνολογία, η οποία στηρίζεται στην ιδέα της συμπαγωγής και χρησιμοποιείται στις χώρες της νότιας Ευρώπης. Είναι η ταυτόχρονη παραγωγή μηχανικής ενέργειας (που συχνά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια), θέρμανσης και ψύξης από μία και μόνη πηγή θερμότητας, όπως αυτές των καυσίμων ή η ηλιακή ενέργεια. Σε θερμότερα κλίματα η ανάγκη για θέρμανση είναι περιορισμένη σε λίγες χειμερινούς μήνες. Υπάρχει, ωστόσο, σημαντική ανάγκη για ψύξη κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Η θερμότητα από μία μονάδα συμπαγωγής στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψύξης, μέσω ενός ψύκτη απορρόφησης.

Η τριπαραγωγή, αποτελείται από συστήματα ΣΗΘ σε συνδυασμό με ψύκτες απορρόφησης. Το βασικό τμήμα μιας εγκατάστασης ΣΗΘ είναι η μηχανή που παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η μηχανή αυτή χαρακτηρίζει την εγκατάσταση. Οι βασικές τεχνολογίες είναι:

- Αεριοστρόβιλος.
- Ατμοστρόβιλος.
- Συνδυασμένος κύκλος.
- Παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης (κύκλος Diesel ή Otto).
- Κυψέλες καυσίμου.
- Κινητήρες Stirling.
- Ψύκτης απορρόφησης

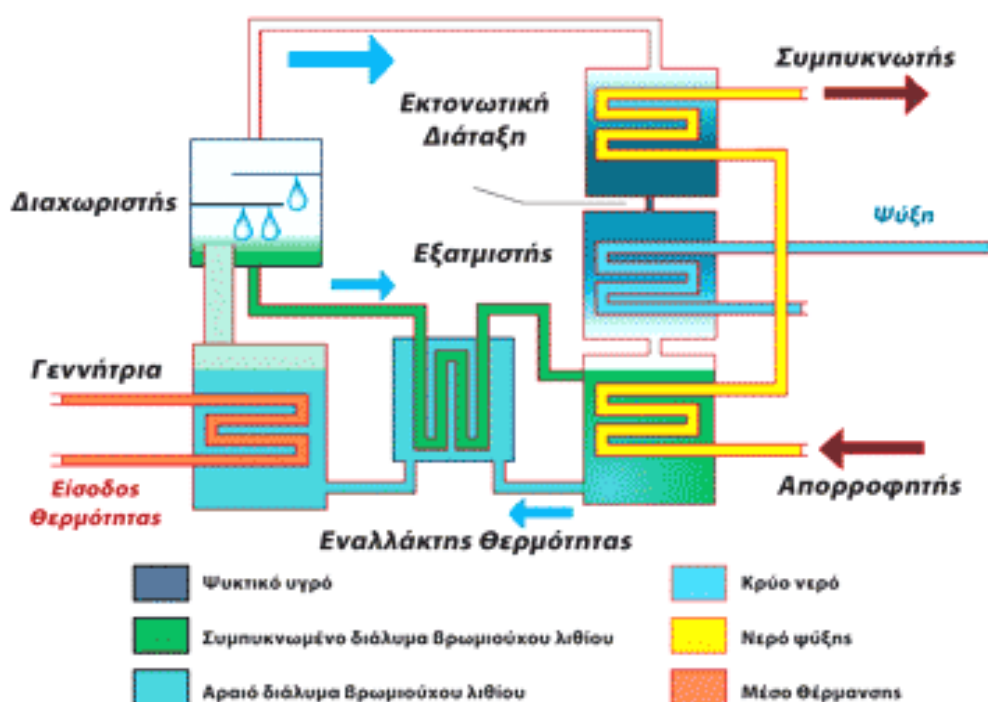
Οι ψύκτες απορρόφησης βασίζονται στη συμπύκνωση και την εξάτμιση για να παράγουν ψύξη. Αυτοί που λειτουργούν με αέριο, έχουν έναν εξατμιστή και έναν συμπυκνωτή, που διαστέλλει το ψυκτικό μέσο για να παράγει ψύξη. Αντί για μηχανικό συμπιεστή, αυτοί οι ψύκτες χρησιμοποιούν μια πηγή θερμότητας που είναι είτε άμεσα προωθούμενη με τη χρήση ενός καυστήρα, είτε έμμεσα προωθούμενη με τη χρήση ατμού, ζεστού νερού ή απορριπτόμενης θερμότητας. Οι ψύκτες απορρόφησης που παρέχονται στο εμπόριο λειτουργούν με ατμό, ζεστό νερό ή αέρια καύσης.

3.6.1.1 Βασική αρχή λειτουργίας ψύκτη απορρόφησης

Στην απλή του μορφή, ένας ψύκτης απορρόφησης αποτελείται από έναν εξατμιστή, έναν συμπυκνωτή, έναν απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Στον κύκλο συμπίεσης η ψύξη παράγεται στον εξατμιστή όπου το

ψυκτικό μέσο εξατμίζεται και θερμότητα μεταφέρεται στον συμπυκνωτή όπου και το μέσο συμπυκνώνεται. Η απαιτούμενη ενέργεια για την μεταφορά θερμότητας από χαμηλότερη προς υψηλότερη θερμοκρασία παρέχεται από τον συμπιεστή.

Στον κύκλο ψύξης, η συμπίεση του ατμοποιημένου ψυκτικού μέσου πραγματοποιείται στον απορροφητή, στην αντλία και την γεννήτρια σε συνδυασμό, αντί για μηχανική συμπίεση. Ο ατμός που παράγεται στον εξατμιστή απορροφάται από το υγρό μέσο απορρόφησης στον απορροφητή, το οποίο στη συνέχεια αντλείται στην γεννήτρια από όπου το ψυκτικό μέσο απελευθερώνεται ως ατμός και εν συνεχεία συμπυκνώνεται. Το αναγεννημένο ισχυρό διάλυμα του μέσου απορρόφησης οδηγείται πάλι στον απορροφητή για να ανακτήσει και πάλι το ψυκτικό μέσο. Θερμότητα παρέχεται στην γεννήτρια σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και απορρίπτεται από τον απορροφητή σε χαμηλή θερμοκρασία.



Εικόνα 3-14. Αρχή λειτουργίας ψύκτη απορρόφησης.

3.6.1.2 Ζεύγη εργασίας

Σε έναν κύκλο απορρόφησης, το ψυκτικό μέσο και το μέσο απορρόφησης αποτελούν το ζεύγος εργασίας (working pair). Πολλά ζευγάρια έχουν προταθεί αλλά μόνο δύο χρησιμοποιούνται σήμερα: αμμωνία με νερό σαν απορροφητή και νερό με διάλυμα βρωμιούχου λιθίου ως απορροφητή. Το ζεύγος αμμωνία/νερό συναντάται κυρίως σε εφαρμογές ψύξης με χαμηλές θερμοκρασίες εξάτμισης κάτω από 0°C. Το ζεύγος νερό/LiBr χρησιμοποιείται ευρέως για τις περιπτώσεις κλιματισμού όπου δεν απαιτούνται θερμοκρασίες χαμηλότερες από 0°C. Τα επίπεδα πίεσης στις συσκευές αμμωνίας/νερού είναι συνήθως άνω της ατμοσφαιρικής ενώ τα συστήματα με νερό/LiBr λειτουργούν κάτω από μερικό κενό.

Οι ροές θερμότητας στον κύκλο ψύξης είναι οι ακόλουθες:

- παροχή θερμότητας και παραγωγή ψύξης σε χαμηλό θερμοκρασιακό επίπεδο.
- απόρριψη θερμότητας στον συμπυκνωτή σε ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο.
- απόρριψη θερμότητας από τον απορροφητή σε ενδιάμεσο θερμοκρασιακό επίπεδο,
- παροχή θερμότητας στη γεννήτρια σε υψηλό θερμοκρασιακό επίπεδο.

Στα συστήματα ψύξης με απορρόφηση που χρησιμοποιούν LiBr/νερό η θερμότητα πρέπει να παρέχεται σε θερμοκρασία 60 - 80°C ενώ μπορεί να φτάσει και έως 150°C σε σύστημα διπλού κελύφους. Για συστήματα που χρησιμοποιούν αμμωνία/νερό η απαιτούμενη θερμοκρασία της παρεχόμενης θερμότητας είναι 100 - 120°C.

3.6.1.3 Ψύκτες LiBr

Τα περισσότερα συστήματα με νερό/LiBr ως ζεύγος εργασίας έχουν σχεδιαστεί για εφαρμογές κλιματισμού. Για ιστορικούς λόγους οι δυναμικότητες δίδονται σε ψυκτικούς τόνους RT (ΗΠΑ). Ένας ψυκτικός τόνος αντιστοιχεί περίπου σε 3.5 kWth παραγόμενης ψύξης.

Συσκευές μονού κελύφους

Οι περισσότεροι κατασκευαστές προσφέρουν συσκευές μονού κελύφους από περίπου 100 RT έως 1500 RT, δηλαδή από 350 kWth έως 5.2 MWth. Αυτές τροφοδοτούνται από ατμό από 135 έως 205 kPa g (1 - 2 bar gauge, 2-3 bar), ο οποίος αντιστοιχεί σε θερμοκρασία ατμού από 110 έως 120°C. Εναλλακτικά μπορούν να τροφοδοτηθούν από ζεστό νερό από 115 έως 150°C και μέγιστη πίεση 9 bar. Το COP τους κυμαίνεται από 0.6 έως 0.7. Η κατανάλωση ατμού μιας μηχανής μονού κελύφους είναι περίπου 2.3 kg/h ανά kWth. Η παροχή του ζεστού νερού κυμαίνεται από 30 έως 72 kg/h ανά kWth ανάλογα με την επιτρεπόμενη θερμοκρασιακή διαφορά.

Μηχανές διπλού κελύφους

Οι μηχανές διπλού κελύφους είναι περίπου στο ίδιο εύρος δυνατοτήτων με τις μηχανές μονού κελύφους. Η ελάχιστη ικανότητα ψύξης που προσφέρεται από μερικούς κατασκευαστές είναι λίγο μεγαλύτερη: 200 RT για μια εταιρεία 350 RT για άλλη εταιρεία (700 και 1200 kWth αντίστοιχα). Ατμός είναι το προτιμότερο μέσο που χρησιμοποιείται για την παροχή θερμότητας. Ο ατμός εδώ θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 9 και 10 bar gauge, 10 - 11 bar, or 1100 to 1200 kPa, συνθήκες που αντιστοιχούν σε θερμοκρασία από 175 έως 185°C. Είναι επίσης δυνατόν η τροφοδότηση των συσκευών αυτών με ζεστό νερό, θερμοκρασίας μεταξύ 155 και 205°C. Ο συντελεστής απόδοσης COP σε κάθε περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 0.9 και 1.2. Η κατανάλωση ατμού στις συσκευές διπλού κελύφους είναι περίπου 1.4 kg/h ανά kWth.

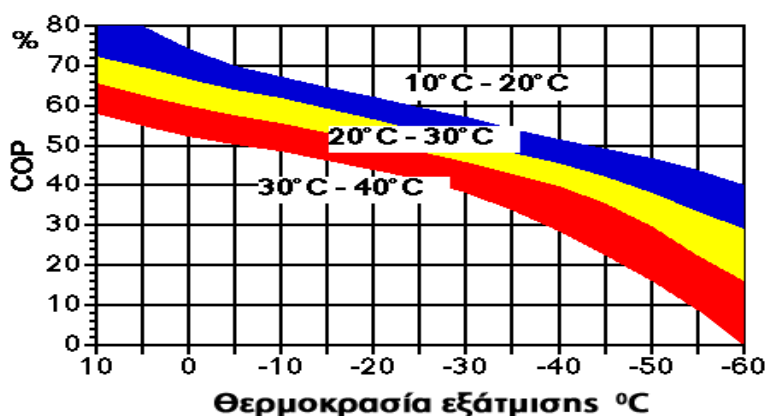
Απόδοση

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μετριέται σε σχέση με παραγωγή ψύξης προς την παρεχόμενη θερμότητα- συντελεστή απόδοσης (COP). Οι ψύκτες μονού κελύφους έχουν τυπικό συντελεστή απόδοσης γύρω στο 0.7, οι ψύκτες διπλού κελύφους έχουν τυπικό συντελεστή απόδοσης γύρω στο 1.1. Αυτό σημαίνει ότι ο ψυκτικός πύργος που απαιτείται για ένα ψύκτη διπλού κελύφους είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για ένα ψύκτη μονού κελύφους (περίπου 40%). Η πολυπλοκότητα των συσκευών διπλού κελύφους αυξάνει αντιστοίχως και το κόστος τους. Τα συστήματα διπλού κελύφους είναι διαθέσιμα για ισχύεις από 400 ως 1000 RT. Όλοι οι εμπορικά διαθέσιμοι ψύκτες απορρόφησης αποβάλλουν θερμότητα σε ένα κύκλωμα με πύργο ψύξης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμοκρασία στο κύκλωμα αυτό είναι 32 με 37°C (οι μονάδες χαμηλής θερμοκρασίας ζεστού νερού των Sanyo και Yazaki απαιτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες 30 με 35°C).

3.6.1.4 Ψύκτες αμμωνίας νερού

Οι Ψύκτες αμμωνίας - νερού σχεδιάστηκαν αρχικά για βιομηχανικές εφαρμογές ψύξης, π.χ. για ψύξη τροφών, χαμηλές με θερμοκρασίες εξάτμισης μέχρι 60°C. Αυτό το είδος των μηχανών είναι προτεινόμενο να χρησιμοποιείται όταν απαιτούνται θερμοκρασίες κάτω από 0°C, αφού οι μονάδες με νερό/LiBr δεν μπορούν να λειτουργήσουν στις θερμοκρασίες αυτές. Η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να παρέχεται ο ατμός για να «πυροδοτήσει» μια μονάδα εξαρτάται από τη διαθέσιμη θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού και από τη θερμοκρασία ψύξης που θέλουμε να πετύχουμε.

Απόδοση



Εικόνα 3-15. Συντελεστής απόδοσης (COP) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Το παραπάνω διάγραμμα δίνει μια ένδειξη του συντελεστή απόδοσης (COP), μιας διαδικασίας απορρόφησης NH₃-μονής φάσης, εξαρτώμενο από θερμοκρασία της εξάτμισης και του νερού ψύξης. Οι χρωματιστές γραμμές αναφέρονται σε εύρος θερμοκρασίας νερού ψύξης.

Τα μηχανήματα αμμωνίας κοστίζουν περίπου € 1250 με 1750 ανά ψυκτικό τόνο. Αν κάποιος εξάγει συμπερασματικά τις σχέσεις στο διάγραμμα, μπορεί να συμπεράνει ότι COP που υπερβαίνει το 0.6 είναι αναμενόμενο στις περισσότερες εφαρμογές. Σε περιπτώσεις επιλογής συστήματος με αμμωνία/νερό, αντί για νερό/LiBr, τότε η απόδοση, οι απαιτήσεις σε θερμότητα και οι θερμοκρασιακές απαιτήσεις θα κυμαίνονται περίπου στα ίδια επίπεδα με το σύστημα νερού/LiBr.

3.6.2 Μικροσυμπαγωγή

Οι μονάδες ΣΗΘ που έχουν ηλεκτρική ισχύ λιγότερη από 10kW εντάσσονται στην υποκατηγορία της μικροσυμπαγωγής. Τα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαγωγής χρησιμοποιούνται συνήθως ως συσκευές θέρμανσης παρέχοντας θέρμανση χώρων και ζεστού νερού χρήσης σε κατοικίες και εμπορικά κέντρα όπως και οι συμβατικοί λέβητες.

Αντίθετα όμως με τους λέβητες, τα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαγωγής παράγουν ηλεκτρισμό μαζί με θερμότητα σε πολύ υψηλές αποδόσεις εξασφαλίζοντας εξοικονόμηση καυσίμου, μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και μείωση του κόστους λειτουργίας. Οι περισσότερες μονάδες λειτουργούν παράλληλα με το δίκτυο, έτσι ώστε το κτίριο να καλύπτει τις ανάγκες του σε ηλεκτρισμό από το δίκτυο ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά και ταυτόχρονα να πωλεί στο δίκτυο, το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει. Η θερμότητα από τα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαγωγής χρησιμοποιείται είτε για θέρμανση χώρων και νερού, είτε πιθανόν για κλιματισμό.

Τα συστήματα αυτά έχουν δυνατότητα χρήσης και στα καταλύματα. Ως «καταλύματα» ορίζονται μικρά ξενοδοχεία στην εξοχή, απομονωμένα καταφύγια, εξοχικές κατοικίες για την καλοκαιρινή περίοδο, καταφύγια, μικρά κάστρα και μοναστήρια.

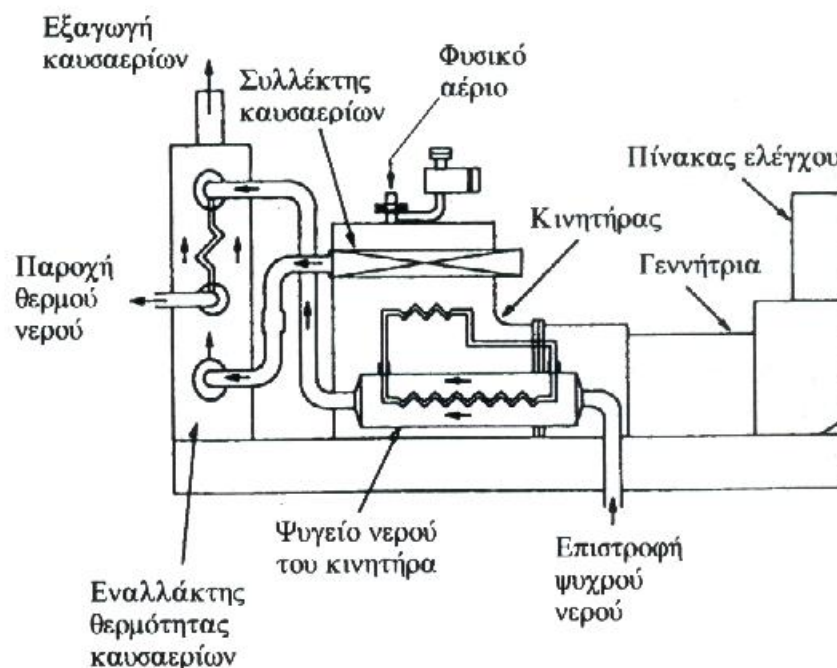
3.6.2.1 Τεχνολογίες και καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα συμπαγωγής

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μικρών σε κλίμακα συστημάτων συμπαγωγής είναι η ευκολία εγκατάστασης και χρήσης. Παραδίδονται έτοιμα για λειτουργία σε ηχομονωτικό κέλυφος μεγέθους παραπλήσιο με ένα κοινό λέβητα και το μόνο που χρειάζονται είναι συνδέσεις για νερό, ηλεκτρισμό και καύσιμο. Διάφορες συμβατικές και μη τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογή σε μικρής κλίμακας συστήματα συμπαγωγής. Ενώ τα παλινδρομικά συστήματα είναι ήδη στο εμπόριο, οι μηχανές Stirling, οι μικροστρόβιλοι αερίου και τα συστήματα ORC (Organic Rankine Cycle Systems) πρόκειται να δοθούν σύντομα στην αγορά, αφού υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός επιτυχημένων επιδεικτικών έργων σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως η Αυστρία. Κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη και στερεού οξειδίου καυσίμου είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο, με κάποιο αριθμό πιλοτικών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 3-16 Συστήματα Συμπαραγωγής Μικρής Κλίμακας από 7-20 kWel και 10-43 kWth, Αυστριακής κατασκευής

Μέχρι τώρα, η χρήση των συμβατικών καυσίμων φυσικό αέριο, υγραέριο, πετρέλαιο είναι συνηθέστερη στα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαραγωγής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια διερευνάται η χρήση βιοντίζελ και κραμβέλαιου στις μηχανές ντίζελ. Η ανάπτυξη των συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας, παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον σε ευαίσθητες οικολογικά περιοχές ιδιαίτερα όταν γίνεται χρήση κραμβέλαιου ή βιοντίζελ, λόγω της εξαιρετικής βιοαποικοδομισιμότητας και της χαμηλής τοξικότητάς τους. Τέτοιου είδους συστήματα, αφ' ενός μεν, έχουν μεγάλη αποδοτικότητα, αφετέρου, δεν παράγουν απευθείας ρύπους συμβάλλοντας έτσι στην εξασφάλιση αειφόρου ενέργειας. Για τους λόγους αυτούς αρκετά καταφύγια κάνουν χρήση συστημάτων μικρής κλίμακας συμπαραγωγής με κραμβέλαιο / βιοντίζελ. Επίσης, αρκετές εταιρείες επιχειρούν την κατασκευή κινητήρων από συσσωματώματα ξύλου (pellets) και από ηλιακούς συλλέκτες. Ωστόσο, τα συστήματα που κατασκευάζουν αυτές οι εταιρείες είναι ακόμα σε πιλοτικό στάδιο.



Εικόνα 3-17 Σχηματική απεικόνιση τυποποιημένης μονάδας συμπαραγωγής με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης [Jennekens, 1989]

3.6.2.2 Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας

Τα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαραγωγής εγκαθίστανται όπως ακριβώς και ένας σύγχρονος λέβητας. Για παράδειγμα, τοποθετούνται σε κουζίνες ή σε υπόγεια μέσα σε δοχεία που προσομοιάζουν καταψύκτη, με το ίδιο επίπεδο θορύβου και τον ίδιο όγκο. Η συντήρησή τους είναι απλή, π.χ. ένα σύστημα μικροσυμπαραγωγής γνωστής εταιρείας χρειάζεται συντήρηση κάθε 3.500 ώρες λειτουργίας. Ανάλογα με τις ανάγκες που πρέπει να καλύψουν, οι μονάδες μικροσυμπαραγωγής μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικούς τρόπους:

- Έχοντας ως κύρια λειτουργία την παραγωγή θερμότητας

Η ελεγχόμενη μεταβλητή για την λειτουργία των μονάδων μικροσυμπαραγωγής για παραγωγή θερμότητας, είναι πάντα οι απαιτήσεις σε θέρμανση. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται παραπροϊόν της διαδικασίας και προορίζεται για ίδια χρήση ή για τροφοδότηση του δικτύου. Τα μικρής κλίμακας συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να ενισχύονται από επιπρόσθετους λέβητες με σκοπό την κάλυψη της απαιτούμενης θερμότητας.

- Έχοντας ως κύρια λειτουργία την παραγωγή ηλεκτρισμού

Η ελεγχόμενη μεταβλητή για την λειτουργία των μονάδων μικροσυμπαραγωγής, για παραγωγή ηλεκτρισμού, είναι πάντα οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους γίνεται:

- *Παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο.* Οι μονάδες μικροσυμπαραγωγής προμηθεύουν τους καταναλωτές ενέργεια μέχρι να φτάσουν τη μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενώ οι υπόλοιπες ανάγκες καλύπτονται από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- *Ανεξάρτητα* για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών (πολύ συχνά σε συνδυασμό με συστοιχία μπαταριών).
- *Εφεδρικά.* Η θερμική ενέργεια, η οποία παράγεται ταυτόχρονα από μονάδες μικροσυμπαραγωγής θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν καλύτερα σε κατάλληλες δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας ή άλλες μονάδες αποθήκευσης θερμότητας.

- Έχοντας ως κύρια λειτουργία τη Συνδυασμένη Παραγωγή Θερμότητας και Ηλεκτρισμού

Είναι πιθανή η εφαρμογή συνδυασμένων τρόπων λειτουργίας, όπως για παράδειγμα:

1. Κίνηση με θερμότητα, λαμβάνοντας υπόψη την αιχμή του φορτίου.
2. Μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια και /ή ζήτηση σε θερμότητα.
3. Ελάχιστη ηλεκτρική ενέργεια και /ή ζήτηση σε θερμότητα.

Ο διαφορετικός τρόπος λειτουργίας τους επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας, το οποίο επιλέγει τη βέλτιστη λειτουργία για τις συγκεκριμένες ανάγκες.

Γενικά, χωρίς όμως να λείπουν οι εξαιρέσεις, ο πρώτος από τους τρόπους αυτούς προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα. Για σταθμούς συμπαραγωγής του συστήματος ηλεκτρισμού της χώρας, η επιλογή του τρόπου λειτουργίας, εξαρτάται από τις ευρύτερες ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές ηλεκτρισμού και θερμότητας.

4 Εφαρμογή υβριδικού συστήματος ΑΠΕ σε ξενοδοχείο της Αθήνας

4.1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία μελετάει το σενάριο εγκατάστασης υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ξενοδοχείο της Αθήνας. Αρχικά, εξετάζεται το σενάριο βάσης, όπου όλη η ηλεκτρική ισχύς προμηθεύεται από το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, η απαραίτητη θερμική καλύπτεται από έναν απλό λέβητα φυσικού αερίου, ενώ η ψυκτική ισχύς καλύπτεται από απλές κλιματιστικές μονάδες. Στη συνέχεια εξετάζεται το σενάριο της εγκατάστασης υβριδικού συστήματος ΑΠΕ όπου, η θερμική ισχύς καλύπτεται από μονάδα συμπαραγωγής, η ηλεκτρική ισχύς καλύπτεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία εγκατεστημένα στην οροφή του κτιρίου και από το σύστημα συμπαραγωγής, ενώ όταν υπάρχει έλλειμμα ισχύος καλύπτεται από το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Το ψυκτικό φορτίο καλύπτεται από ψύκτη απορρόφησης που λειτουργεί με τη θερμότητα της μονάδος συμπαραγωγής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων και γίνεται σύγκριση των οικονομικών μεγεθών τους, ώστε να εκτιμηθεί ποιο από τα δύο είναι προτιμότερο. Διευκρινίζεται, πως αντίθετα με αρκετές μελέτες στην παρούσα εργασία εξετάζεται το κάθε σενάριο στη φάση της κατασκευής του κτιρίου και όχι η περίπτωση ενεργειακής επέμβασης σε υφιστάμενο σύστημα.

4.2 Εκτιμώμενα φορτία για το ξενοδοχείο

Από τον αλγόριθμο του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Ι εκτιμήθηκαν τα ψυκτικά, θερμικά και ηλεκτρικά φορτία για ένα υποθετικό ξενοδοχείο υπό ανέγερση στο κέντρο της Αθήνας με γεωγραφικό πλάτος 38, γεωγραφικό μήκος 23.75, και υψόμετρο 180 μέτρα. Οι εσωτερικοί τοίχοι και τα πατώματα έχουν αγνοηθεί για λόγους απλότητας και το κτίσμα έχει θεωρηθεί σαν ένας ενιαίος χώρος με τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

Μήκος ορόφου	width = 16 m
Πλάτος ορόφου	length = 20 m
Ύψος ορόφου εισόδου	height ₀ = 7 m
Ύψος υπολοίπων ορόφων	height ₁ = 4 m
Αριθμός ορόφων	numfloor = 7
Συνολικός αριθμός παραθύρων	No _{window} = 74
Ύψος παραθύρου	h _{window} = 2,1 m
Μήκος παραθύρου	l _{window} = 1,5 m
Αριθμός εξωτερικών θυρών	No _{door} = 1
Ύψος θύρας	h _{door} = 3 m
Μήκος θύρας	l _{door} = 2 m
Αριθμός δωματίων	rooms = 70
Αριθμός κλινών	140

Πίνακας 4-1 γεωμετρικά χαρακτηριστικά ξενοδοχείου

Πάχος δομικού υλικού	$d_{brick} = 0,15 \text{ m}$
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δομικού υλικού	$k_{brick} = 0,5 \frac{W}{m \cdot K}$
Πάχος μόνωσης	$d_{insulation} = 0,025 \text{ m}$
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης	$k_{insulation} = 0,03 \frac{W}{m \cdot K}$
Ηλιακή απορροφητικότητα	$\alpha_{wall} = 50\%$

Πίνακας 4-2 δομικά χαρακτηριστικά ξενοδοχείου

Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας οροφής	$U_{ceiling} = 2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πατώματος	$U_{floor} = 2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πόρτας	$U_{door} = 3,5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Πάχος γυάλινης επιφάνειας	$d_{glass} = 0,01 \text{ m}$
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυάλινης επιφάνειας	$h_{space} = 3 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
Αριθμός στρωμάτων τζαμιού	layer = 2
Συντελεστής κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας	SHGC = 0,57
Ωριαίες αλλαγές του αέρα	$ACH = \frac{1,4}{hr}$

Πίνακας 4-3 Χαρακτηριστικά ανοιγμάτων – πόρτας

Μήνας	Αριθμός Ημερών Days	Θερμοκρασία Νερού Δικτύου Ύδρευσης °C T_{water}	Μέση Ημερήσια Θερμοκρασία ανά μήνα (και διακύμανση) °C $T_{air} (S_d)$	Πληρότητα dyn
Ιανουάριος	31	10	9,9 (2,89)	16%
Φεβρουάριος	28	10	9,9 (3,19)	17%
Μάρτιος	31	12	11,8 (3,03)	24%
Απρίλιος	30	15	15,3 (2,51)	34%
Μάιος	31	19	20 (2,73)	39%
Ιούνιος	30	21	24,7 (2,7)	36%
Ιούλιος	31	24	27,7 (2,17)	47%
Αύγουστος	31	24	27,8 (2,11)	45%
Σεπτέμβριος	30	22	24,2 (2,11)	49%
Οκτώβριος	31	19	19,4 (2,98)	28%
Νοέμβριος	30	15	14,7 (3,06)	20%
Δεκέμβριος	31	12	11,3 (3,10)	17%

Πίνακας 4-4 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά περιοχής και εκτιμώμενη πληρότητα

Είδος Συσκευής	Ισχύς(W)	Ημερήσιες Ώρες Χρήσης	Συντελεστής Φορτίου
Τηλεόραση	200	4	1
σεσουάρ μαλλιών	800	0,5	1
Φορτιστές συσκευών	100	2	1

Πίνακας 4-5 Ηλεκτρικές Συσκευές Δωματίων Ξενοδοχείου

Είδος Συσκευής	Ισχύς (W)	Ημερήσιες Ώρες Χρήσης	Συντελεστής Φορτίου
Ψυγεία	1500	24	0,3
Πλυντήρια	4000	4	0,8
Ασανσέρ	10000	2	1
Καταψύκτες	400	24	0,3
Υπολογιστές	300	10	1
Ηλεκτρικές Σκούπες	4000	4	1

Πίνακας 4-6 Ηλεκτρικές Συσκευές Ξενοδοχείου

Δωμάτια	Ισχύς	Ημερήσιες Ώρες Χρήσης
Δωμάτιο ξενοδοχείου	75	5
Δωμάτιο ξενοδοχείου	75	5
Λουτρό Δωματίου	60	2

Πίνακας 4-7 Ηλεκτρικοί Λαμπτήρες των Δωματίων Ξενοδοχείου

Δωμάτια	Ισχύς	Ημερήσιες Ώρες Χρήσης
Διάδρομοι ξενοδοχείου	1500	5
Κουζίνα	500	5
Αποθήκη	60	1
Βοηθητικά δωμάτια προσωπικού	300	2

Πίνακας 4-8 Ηλεκτρικοί Λαμπτήρες του Ξενοδοχείου

Ημερήσια κατανάλωση νερού (ανά δίκλινο δωμάτιο)	$m_{\text{dot}} = 56,8 * 2 \frac{\text{l}}{\text{day}}$
Θερμοκρασία θερμικής άνεσης	$T_{\text{base}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
θερμοκρασία ζεστού νερού χρήσης	$T_{\text{base_water}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

Πίνακας 4-9 Μεταβλητές σχεδιασμού

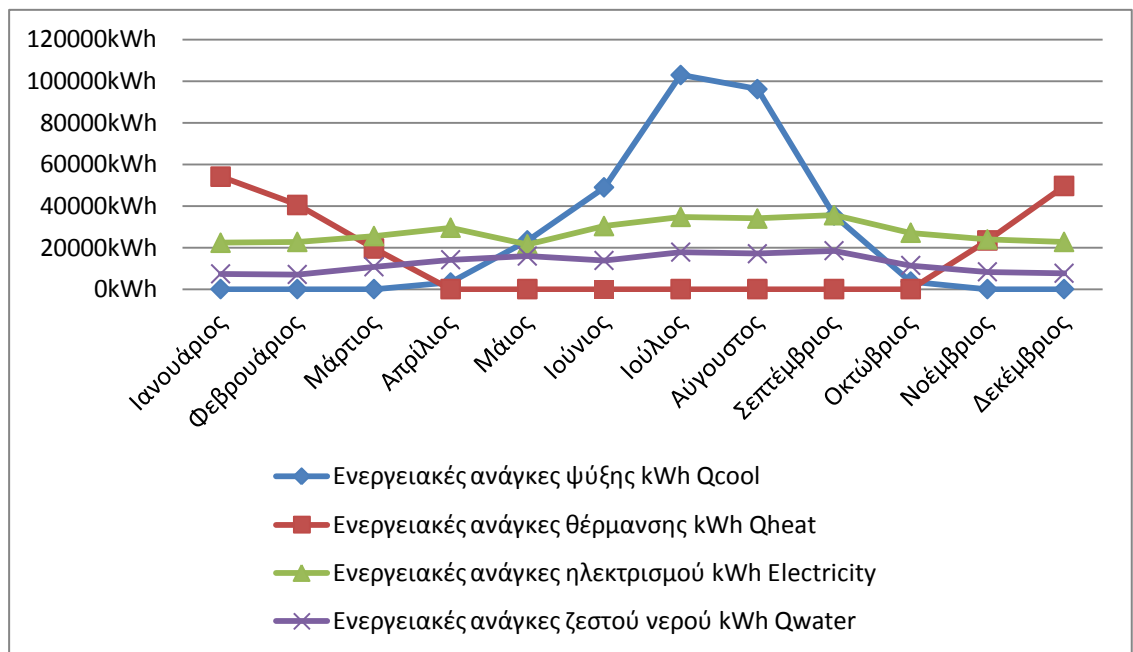
4.2.1 Αποτελέσματα εκτίμησης φορτίων

Τα αποτελέσματα του μοντέλου σε μηνιαία βάση είναι τα κάτωθι:

	<u>Ενεργειακές ανάγκες ψύξης</u> <u>kWh</u> <u>Q_{cool}</u>	<u>Ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης</u> <u>kWh</u> <u>Q_{heat}</u>	<u>Ενεργειακές ανάγκες ηλεκτρισμού</u> <u>kWh</u> <u>Electricity</u>	<u>Ενεργειακές ανάγκες ζεστού νερού</u> <u>kWh</u> <u>Q_{water}</u>
Ιανουάριος	0	54040	22270	7331
Φεβρουάριος	0	40420	22680	7036
Μάρτιος	0	19510	25490	10720
Απρίλιος	3151	0	29500	14130
Μάιος	23410	0	21510	15860
Ιούνιος	48910	0	30300	13760

Ιούλιος	102900	0	34720	17760
Αύγουστος	96110	0	33910	17000
Σεπτέμβριος	35380	0	35520	18460
Οκτώβριος	3580	0	27090	11380
Νοέμβριος	0	23380	23880	8313
Δεκέμβριος	0	49580	22680	7594

Πίνακας 4-10 εκτιμώμενα φορτία ξενοδοχείου



Εικόνα 4-1 Καμπύλες φορτίων

Η μεγάλη ανισοκατανομή στην καμπύλη της ψύξης, σε σχέση με τις υπόλοιπες, οφείλεται στο γεγονός ότι δεν έχει συνυπολογιστεί το πραγματικά ζητούμενο φορτίο το οποίο είναι τρεις φορές μικρότερο από αυτό που θα αποδοθεί στον χώρο λόγω απόδοσης του εξοπλισμού ψύξης κοντά στο 3, για την περίπτωση της κεντρικής κλιματιστική μονάδος.

Θερμότητα	186,9 MWh
Ψύξη	313,4 MWh
Ζεστό νερό	149,400 MWh
Ηλεκτρισμός	339,5 MWh

Πίνακας 4-11 Συνολική ζήτηση ενέργειας

Θερμότητα	18,9%
Ψύξη	31,7%
Ζεστό νερό	15,1%
Ηλεκτρισμός	34,3%

Πίνακας 4-12 Ποσοστά φορτίων στη συνολική ζήτηση

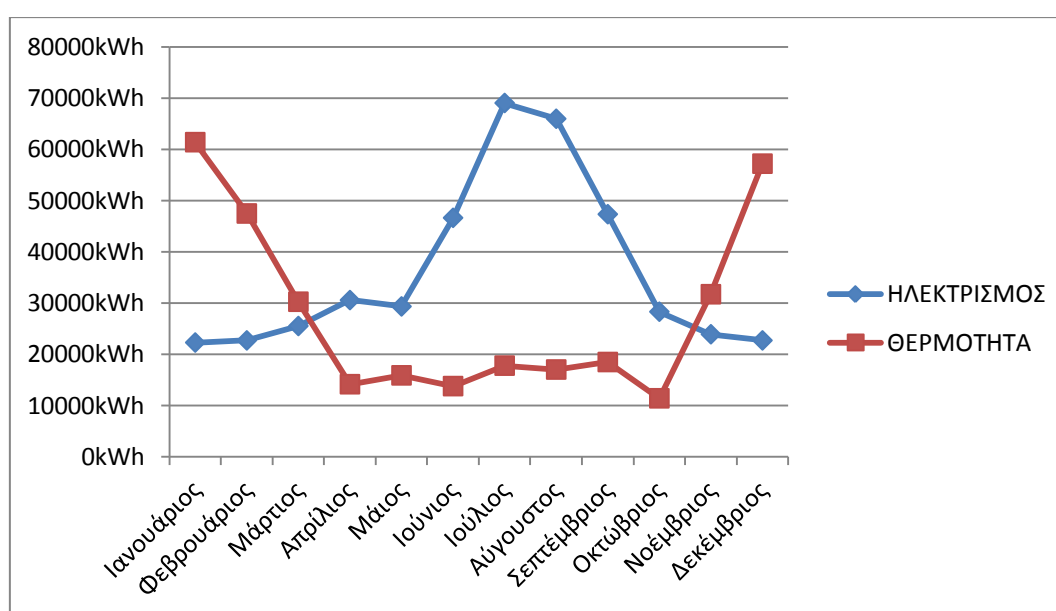
Για να εκτιμηθεί το μέγιστο φορτίο θέρμανσης και ψύξης, μελετάται η περίπτωση των ακραίων θερμοκρασιών για χειμώνα (-3,2 °C) και καλοκαίρι (42 °C) αντίστοιχα ενώ γίνεται η υπόθεση 100% πληρότητας του ξενοδοχείου. Με αυτές τις

παραδοχές βρέθηκε πως το μέγιστο φορτίο που θα χρειαστεί να καλύψει η εγκατάσταση είναι :

Θερμότητα	143,053 kW
Ψύξη	254,692 kW
Ζεστό νερό	61,586 kW
Ηλεκτρισμός	83,321 kW

Πίνακας 4-13 Μέγιστα φορτία ξενοδοχείου (απαραίτητη δυναμικότητα εξοπλισμού)

4.3 Περίπτωση βάσης – ηλεκτροδότηση από εθνικό δίκτυο, ψύξη από κοινά κλιματιστικά, θέρμανση και ζεστό νερό από λέβητα φυσικού αερίου



Εικόνα 4-2 Καμπύλες ηλεκτρισμού - θερμότητας για την περίπτωση βάσης

Για το αρχικό οικονομικό σενάριο υπολογίζεται το χρηματικό ποσό του λογαριασμού της ΔΕΗ βάση της εκτίμησης για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στην κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος προστίθεται και η ανάγκη για ψύξη, με συντελεστή απόδοσης κοινών κλιματιστικών $COP = 3$. Στο αρχικό κόστος της επένδυσης προστίθεται η αγορά κεντρικής μονάδας κλιματισμού, χωρίς να υπολογίζεται το κόστος των αεραγωγών που είναι κοινό και στα δύο σενάρια. Η ανάγκη για θέρμανση και ζεστό νερό καλύπτεται από λέβητα φυσικού αερίου. Η αγορά του λέβητα και το ετήσιο κόστος φυσικού αερίου προτίθενται στην οικονομική μελέτη. Ο λέβητας πρέπει να έχει δυναμικότητα παραγωγής 240 kW, ώστε να μπορεί να καλύψει ταυτόχρονα την μέγιστη ζήτηση σε ζεστό νερό και θέρμανση. Η ψυκτική μονάδα θα πρέπει να έχει δυναμικότητα παραγωγής ισχύος 255 kW ώστε να μπορεί να καλύψει την μέγιστη ζήτηση.

Κόστος φυσικού αερίου	0,62 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	0,12 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
Απόδοση λέβητα	90%
Ετήσιο κόστος για ηλεκτρισμό	52.100 €
Ετήσιο κόστος για φυσικό αέριο	24.530 €
Κόστος μονάδος θέρμανσης (λέβητας αερίου)	8.930 €
Κόστος ψυκτική μονάδος	38.250 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης λέβητα	1.000 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης ψυκτικής μονάδος	1.000 €

Πίνακας 4-14 Οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά ενέργειας κτιρίου για σενάριο βάσης

Άρα το συνολικό ετήσιο κόστος για τις ενεργειακές ανάγκες και τη συντήρηση του εξοπλισμού στη βασική περίπτωση είναι:

78.630 €

Και το συνολικό κόστος της αρχικής αγοράς και εγκατάστασης του βασικού εξοπλισμού:

47.180 €

Με βάση τα παραπάνω οικονομικά μεγέθη πραγματοποιήθηκε η οικονομική εκτίμηση των διαφόρων σεναρίων για ενεργειακές επενδύσεις, στην υπό μελέτη ξενοδοχειακή μονάδα.

4.4 Περίπτωση 2 – Κάλυψη θερμικών φορτίων αποκλειστικά από μονάδα συμπαραγωγής και ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης, συμπληρωματική ηλεκτροδότηση από εθνικό δίκτυο

Στην περίπτωση που αναλύεται, επιλέχθηκε η αποκλειστική κάλυψη των θερμικών φορτίων για ζεστό νερό χρήσης και θέρμανση χώρου, από μονάδα συμπαραγωγής συνολικής ισχύος 306 kW, με θερμική απόδοση 67% και ηλεκτρική απόδοση 30,5%, η οποία λειτουργεί με φυσικό αέριο. Επιπλέον επιλέχθηκε ψύκτης απορρόφησης που λειτουργεί με τη θερμότητα της μονάδος συμπαραγωγής, με ονομαστική ισχύ 255 kW. Στην περίπτωση που η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την μονάδα συμπαραγωγής δεν επαρκεί το φορτίο καλύπτεται από τη διασύνδεση με τη ΔΕΗ, ενώ στην περίπτωση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας αυτή διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ. Ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα για το μοντέλο φορτίου που αναλύθηκε στο σύστημα είναι :

$$P_{HR} = 0,98$$

Το σύστημα τριπαραγωγής αναλύθηκε οικονομικά σε σύγκριση με το σενάριο βάσης για να εκτιμηθεί η δυνατότητα επένδυσης σε αυτό. Τα κριτήρια στη γενική περίπτωση, εκτός από οικονομικά είναι προφανώς και περιβαλλοντικά, αλλά στην παρούσα μελέτη αξιολογείται η οικονομική επένδυση.

Κόστος φυσικού αερίου για συμπαραγωγή	0,055 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	0,12 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
θερμική απόδοση λέβητα συμπαραγωγής	52%
ηλεκτρική απόδοση λέβητα συμπαραγωγής	36%
Απόδοση ψύκτη απορρόφησης	70%
Ετήσιο κόστος για ηλεκτρισμό	12.160 €
Ετήσια έσοδα από πώληση ηλεκτρισμού	1.780 €
Ετήσιο κόστος για φυσικό αέριο	44.800 €
Κόστος μονάδος θέρμανσης (λέβητας συμπαραγωγής)	91.900 €
Κόστος ψυκτική μονάδος (ψύκτης απορρόφησης)	73.950 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης λέβητα συμπαραγωγής	4.290 €
Ετήσιο κόστος συντήρησης ψυκτικής μονάδος	1.000 €

Πίνακας 4-15 Οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά ενέργειας κτιρίου για σενάριο τριπαραγωγής

Άρα το συνολικό ετήσιο κόστος για τις ενεργειακές ανάγκες στη περίπτωση της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με παράλληλη χρήση ψύκτη απορρόφησης, συμπεριλαμβανομένου του κόστους συντήρησης, είναι:

62.250 €

Με ετήσια έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ:

1.780 €

Και το συνολικό κόστος της αρχικής αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού:

165.850 €

4.4.1 Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης

Με τα παραπάνω δεδομένα εφαρμόζεται το πρώτο κριτήριο για την εκτίμηση της επένδυσης, η απλή περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου, χωρίς συνυπολογισμό πληθωριστικών αυξήσεων και τόκων σε περίπτωση δανεισμού.

$$PAK = \frac{\text{ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ}}{\text{ΔΙΑΦΟΡΑ ΕΤΗΣΙΩΝ ΕΞΟΔΩΝ ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ}}$$

$$PAK = 6,5 \text{ χρόνια}$$

Το παραπάνω μέγεθος χρησιμοποιείται για εκτίμηση της περιόδου αποπληρωμής στην περίπτωση αποκλειστικής χρήσης ιδίων κεφαλαίων καθώς, δεν υπολογίζεται το κόστος των τόκων επί του αρχικού κεφαλαίου.

4.4.2 Σκοπιμότητα χρήσης μονάδας συμπαραγωγής

Για την οικονομική αξιολόγηση του σεναρίου χρήσης μονάδας ΣΗΘ και ψύκτη απορρόφησης θα συγκριθεί αυτό με τη συμβατική λύση και θα υπολογιστεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του (*DPB*). Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής *DPB* σε σχέση με τη συμβατική λύση, για σταθερή ετήσια διαφορά λειτουργικού κόστους των δύο σεναρίων (δηλ. $F_{\text{συμβ.}} - F_{\text{ΣΗΘ}} = \text{σταθερό}$), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$DPB = \frac{-\ln \left(1 - \frac{d[(1-f) * K_{\text{ΣΗΘ}} - K_{\text{συμβ}}]}{F_{\text{συμβ}} - F_{\text{ΣΗΘ}}} \right)}{\ln(1+d)}$$

όπου:

DPB : Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής

$K_{\text{ΣΗΘ}}$: Το κόστος επένδυσης του σεναρίου χρήσης μονάδας ΣΗΘ φυσικού αερίου και ψύκτη απορρόφησης

$K_{\text{ΣΥΜΒ}}$: Το κόστος επένδυσης της συμβατικής λύσης

d : Το επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία (επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου)

$F_{\text{ΣΗΘ}}$: Το ετήσιο λειτουργικό κόστος του σεναρίου χρήσης μονάδας ΣΗΘ φυσικού αερίου και ψύκτη απορρόφησης

$F_{\text{ΣΥΜΒ}}$: Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της συμβατικής λύσης

f : Το ποσοστό της κρατικής επιχορήγησης

Προκύπτει, για δανειακή πραγματοποίηση της επένδυσης με επιτόκιο αναγωγής $d = 7\%$ και μηδενική κρατική επιχορήγηση:

$$DPB = 8,971 \text{ χρόνια}$$

4.4.3 Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης

Για την αξιολόγηση της επένδυσης με αυτή τη μέθοδο όλες οι ταμιακές ροές ανάγονται στο πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος. Εκφράζει το συνολικό όφελος μίας επένδυσης, που προκύπτει ως διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$NPV = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{KTP}{(1+r)^t}$$

Όπου :

K_0 : Το κόστος της αρχικής επένδυσης

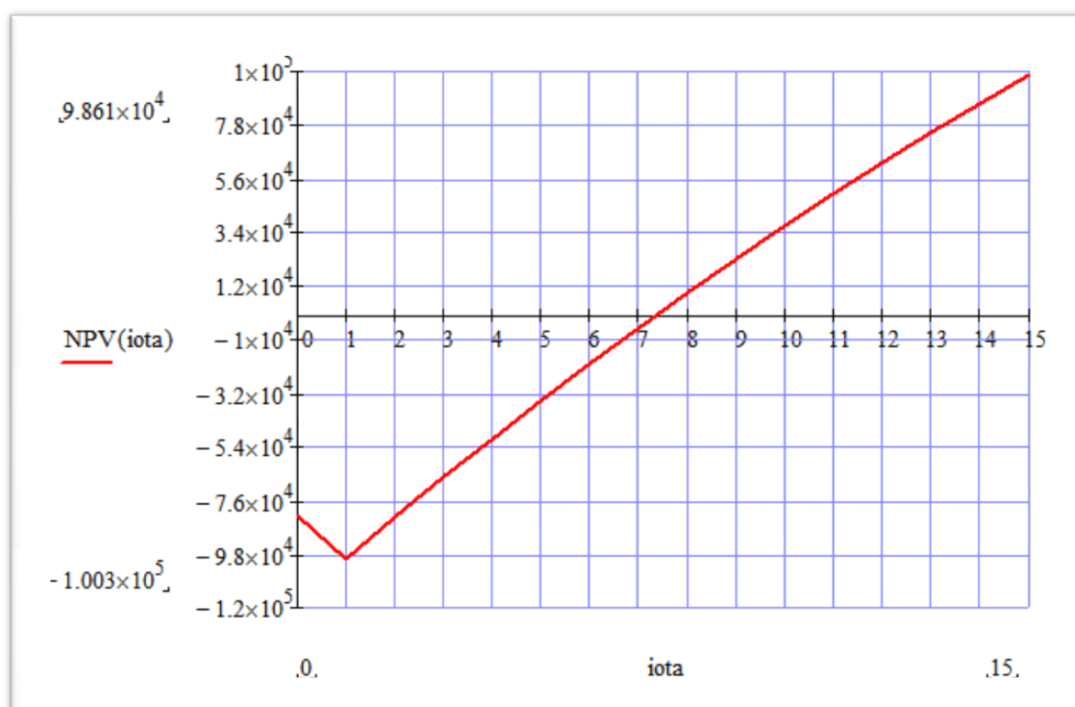
KTP : Οι καθαρές ταμειακές ροές

n : οικονομικός κύκλος της επένδυσης

r : επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία

Η επιλογή του επιτοκίου αναγωγής είναι σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της επένδυσης. Για την περίπτωση της πραγματοποίησης της χωρίς

δανεισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης πληθωρισμού ή το απλό επιτόκιο καταθέσεων, ενώ στην περίπτωση δανεισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί το επιτόκιο δανεισμού. Η εξέλιξη της καθαρής παρούσας αξίας ανάλογα τα χρόνια ζωής της επένδυσης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 4-3 Χρονική εξέλιξη καθαρής παρούσας αξίας

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

$$NPV_{CHP} = 36.810 \text{ €}$$

4.4.4 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης

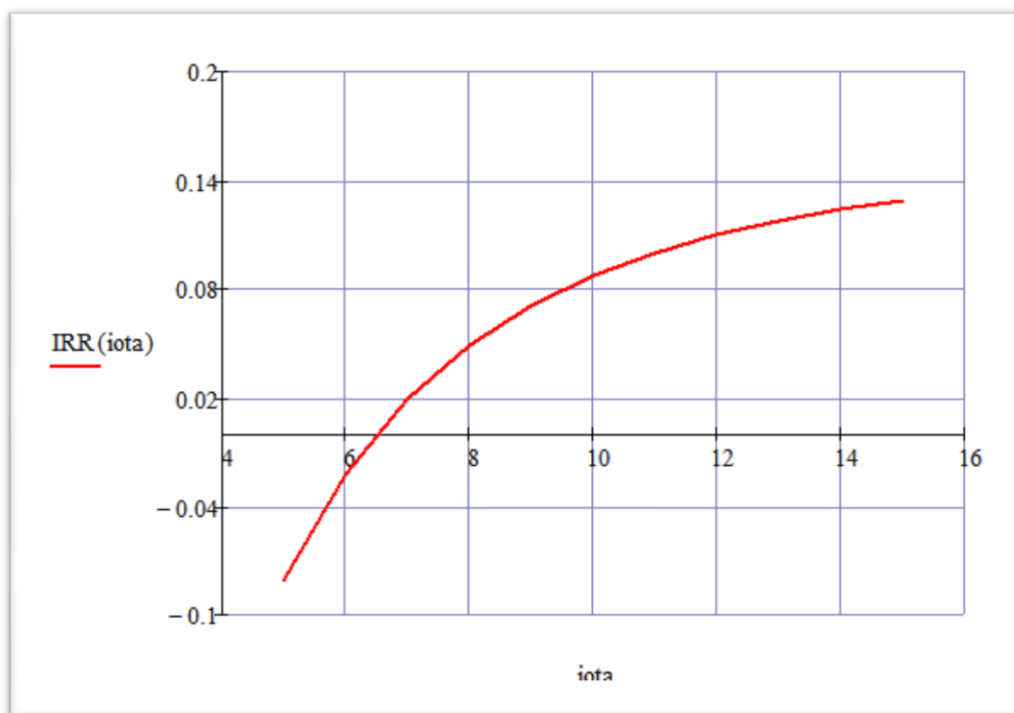
Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) δείχνει την απόδοση του αρχικού κεφαλαίου, προσδιορίζεται ως το επιτόκιο αγοράς που κάνει την καθαρή παρούσα αξία μιας σειράς πληρωμών ίση με το μηδέν. Υπολογίζεται ως λύση της εξίσωσης :

$$NPV_{d=IRR} = 0$$

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

$$IRR = 8,7 \%$$

Και η εξέλιξή του ανάλογα με το χρόνο ζωής της επένδυσης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 4-4 χρονική εξέλιξη του εσωτερικού βαθμού απόδοσης

4.4.5 Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τα οικονομικά μεγέθη αυτής της επένδυσης είναι η βιωσιμότητα της καθώς παρουσιάζει βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από τα επιτόκια δανεισμού και καταθέσεων. Επίσης η καθαρή παρούσα αξία της είναι σημαντικά μεγαλύτερη του μηδενός για το χρόνο ζωής της, οπότε κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με τη συμβατική λύση. Το πρόβλημα που παρουσιάζει είναι το αρκετά μεγάλο αρχικό κεφάλαιο που απαιτεί σε σχέση με τη το σενάριο βάσης. Αν υπάρχει δυνατότητα τραπεζικού δανεισμού με επιτόκιο κοντά στο 7% φάνηκε πως αποπληρώνεται σε χρόνο μικρότερο από το χρόνο ζωής της και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης δείχνει πως υπάρχει περιθώριο κέρδους.

Η λύση της συμπαραγωγής με παράλληλη χρήση ψύκτη απορρόφησης δείχνει πως ακόμη και σε μικρή κλίμακα εμφανίζει θετικούς οικονομικούς δείκτες, χωρίς βέβαια να είναι ιδιαίτερα ελκυστική επενδυτικά λόγω των σχετικά μεγάλων χρόνων απόσβεσης της. Εντούτοις, η χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον μορφών ενέργειας σε ένα ξενοδοχείο εκτός του προφανούς οφέλους της μείωσης των ρύπων, δημιουργεί και καλύτερη εικόνα της επιχείρησης στο κοινό. Άρα η επένδυση κρίνεται θετική, με την προϋπόθεση της δυνατότητας κάλυψης των κεφαλαίων, κάτι που φαίνεται πιο εύκολο στην κατασκευαστική φάση του κτηρίου παρά σαν μορφή μεταγενέστερης επέμβασης.

4.5 Περίπτωση 3 – Κάλυψη θερμικών φορτίων από κοινό λέβητα αερίου, ψυκτικών φορτίων από ηλεκτρική ψυκτική μονάδα και ηλεκτροδότηση από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ

Σε αυτή τη μελέτη καλύπτεται η οροφή της ξενοδοχειακής εγκατάστασης με φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 20 kW με κλίση 32°. Το μέγεθος του συστήματος επιλέχθηκε βάσει της ελεύθερης επιφάνειας της ταράτσας που ήταν δυνατό να καλυφθεί με φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όλη η παραγόμενη ενέργεια του συστήματος πωλείται στη ΔΕΗ και το ξενοδοχείο αγοράζει από το εθνικό δίκτυο την απαιτούμενη ποσότητα για κάλυψη των αναγκών του. Σε αυτήν την περίπτωση η μελέτη πραγματοποιήθηκε σαν να πρόκειται για ανεξάρτητο σύστημα, καθώς οι ενεργειακές ανάγκες του ξενοδοχείου θα καλύπτονται από το σενάριο βάσης. Επί της ουσίας, η βάση σύγκρισης είναι η ίδια με την περίπτωση της συμπαραγωγής

Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	0,12 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ	0,43 $\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
απόδοση φωτοβολταϊκών	10%
Ετήσια έσοδα από πώληση ηλεκτρισμού	12.040 €
Κόστος φωτοβολταϊκών πλαισίων ισχύος 20 kW	60.000 €

Πίνακας 4-16 Οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά ενέργειας κτιρίου για σενάριο φωτοβολταϊκών

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

Ιανουάριος	122,613 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Φεβρουάριος	132,101 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Μάρτιος	167,039 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Απρίλιος	190,182 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Μάιος	195,202 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Ιούνιος	188,39 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Ιούλιος	194,208 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Αύγουστος	191,356 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Σεπτέμβριος	173,487 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Οκτώβριος	1155,62 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Νοέμβριος	125,122 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Δεκέμβριος	115,235 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$

Πίνακας 4-17 εκτιμώμενη ηλιακή ενέργεια ανά μήνα

Συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια 32° :

$$1951 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Με βάση τις απαιτήσεις ασφαλείας και αποδοτικής λειτουργίας των πλαισίων η τοποθέτηση τους οδηγεί στην ετήσια παραγωγή :

28.000 kWh

4.5.1 Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης

Με τα παραπάνω δεδομένα εφαρμόζεται το πρώτο κριτήριο για την εκτίμηση της επένδυσης, η απλή περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου, χωρίς συνυπολογισμό πληθωριστικών αυξήσεων και τόκων σε περίπτωση δανεισμού.

PAK = 5,13 χρόνια

Το παραπάνω μέγεθος χρησιμοποιείται για εκτίμηση της περιόδου αποπληρωμής στην περίπτωση αποκλειστικής χρήσης ιδίων κεφαλαίων καθώς, δεν υπολογίζεται το κόστος των τόκων επί του αρχικού κεφαλαίου.

4.5.2 Σκοπιμότητα χρήσης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για την οικονομική αξιολόγηση του σεναρίου θα υπολογιστεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του (*DPB*) με αποκλειστικές μεταβλητές το αρχικό κόστος και τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρισμού. Προκύπτει, για δανειακή πραγματοποίηση της επένδυσης με επιτόκιο αναγωγής $d = 7\%$ και μηδενική κρατική επιχορήγηση:

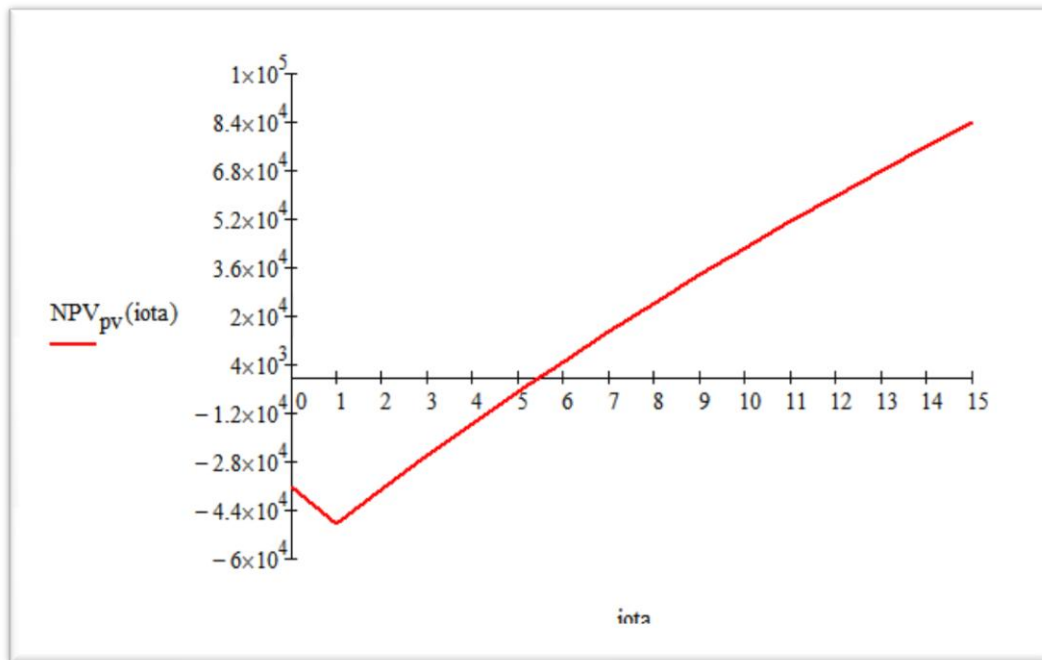
DPB = 6,575 χρόνια

4.5.3 Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

NPV_{PV} = 42.700 €

Η εξέλιξη στο χρόνο ζωής για επιτόκιο αναγωγής 3% της επένδυσης φαίνεται στο γράφημα.



Εικόνα 4-5 χρονική εξέλιξη της καθαρής παρούσας αξίας

4.5.4 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης

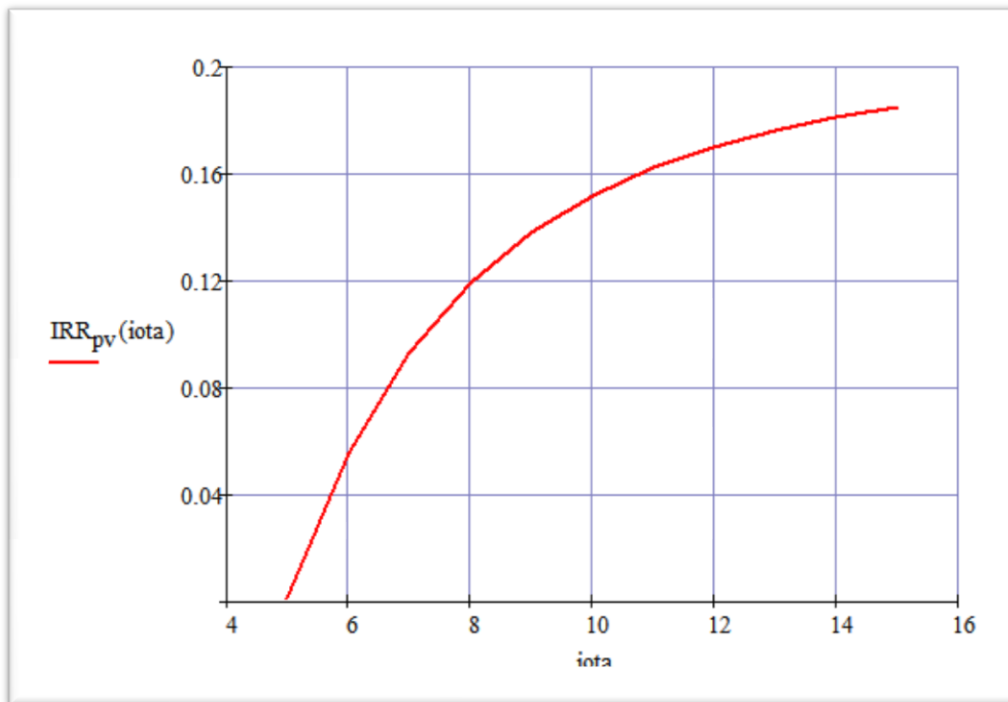
Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) δείχνει την απόδοση του αρχικού κεφαλαίου, προσδιορίζεται ως το επιτόκιο αγοράς που κάνει την καθαρή παρούσα αξία μιας σειράς πληρωμών ίση με το μηδέν. Υπολογίζεται ως λύση της εξίσωσης :

$$NPV_{d=IRR} = 0$$

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

$$IRR = 15,2 \%$$

Και η εξέλιξή του ανάλογα με το χρόνο ζωής της επένδυσης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 4-6 χρονική εξέλιξη εσωτερικού βαθμού απόδοσης

4.5.5 Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τα οικονομικά μεγέθη αυτής της επένδυσης είναι η βιωσιμότητα της καθώς παρουσιάζει βαθμό απόδοσης αρκετά μεγαλύτερο από τα επιτόκια δανεισμού και καταθέσεων. Επίσης η καθαρή παρούσα αξία της είναι σημαντικά μεγαλύτερη του μηδενός για το χρόνο ζωής της, οπότε κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα σε σχέση με τη συμβατική λύση. Η περίοδος αποπληρωμής του δανείου είναι σχετικά μικρή ενώ το μικρότερο αρχικό πρόσθετο κόστος την καθιστά σχετικά εύκολα υλοποιήσιμη.

4.6 Περίπτωση 4 – Κάλυψη θερμικών φορτίων λέβητα συμπαραγωγής, ψυκτικών φορτίων από ψύκτη απορρόφησης και ηλεκτροδότηση από την μονάδα συμπαραγωγής και από φωτοβολταϊκά εγκατεστημένα στην οροφή του κτηρίου με παράλληλη σύνδεση στη ΔΕΗ

Το παρούσα μελέτη εξετάζει την υβριδική χρήση και των δύο μορφών παραγωγής ενέργειας που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Τα δεδομένα είναι ίδια με τις επιμέρους περιπτώσεις.

Το συνολικό ετήσιο κόστος για τις ενεργειακές ανάγκες στη περίπτωση της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού με παράλληλη χρήση ψύκτη απορρόφησης, είναι:

62.250 €

Με ετήσια έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ, από συμπαραγωγή και φωτοβολταϊκά:

13.820 €

Και το συνολικό κόστος της αρχικής αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού συμπαραγωγής και φωτοβολταϊκών, είναι:

177.900 €

4.6.1 Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης

Με τα παραπάνω δεδομένα εφαρμόζεται το πρώτο κριτήριο για την εκτίμηση της επένδυσης, η απλή περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου, χωρίς συνυπολογισμό πληθωριστικών αυξήσεων και τόκων σε περίπτωση δανεισμού.

PAK = 5,963 χρόνια

Το παραπάνω μέγεθος χρησιμοποιείται για εκτίμηση της περιόδου αποπληρωμής στην περίπτωση αποκλειστικής χρήσης ιδίων κεφαλαίων καθώς, δεν υπολογίζεται το κόστος των τόκων επί του αρχικού κεφαλαίου.

4.6.2 Σκοπιμότητα χρήσης μονάδας συμπαραγωγής και φωτοβολταϊκών

Για την οικονομική αξιολόγηση του σεναρίου θα υπολογιστεί η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του (*DPB*) με αποκλειστικές μεταβλητές το αρχικό κόστος και τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρισμού. Προκύπτει, για δανειακή πραγματοποίηση της επένδυσης με επιτόκιο αναγωγής $d = 7\%$ και μηδενική κρατική επιχορήγηση:

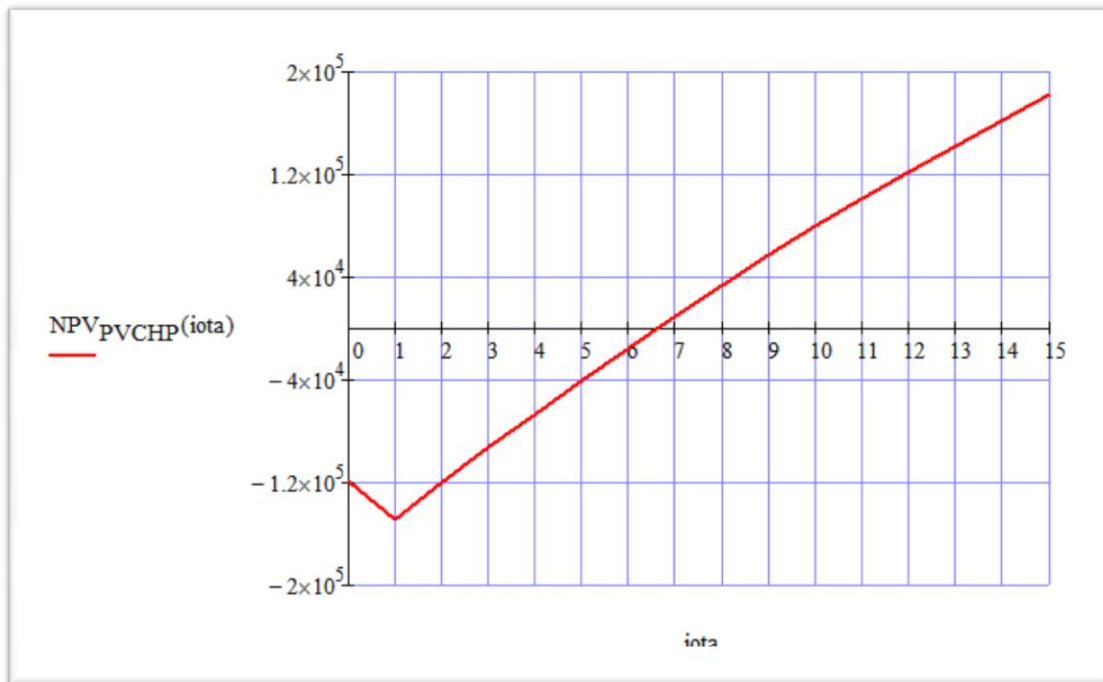
DPB = 7,865 χρόνια

4.6.3 Καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

NPV_{PVCHP} = 79.520 €

Η εξέλιξη στο χρόνο ζωής για επιτόκιο αναγωγής 3% της επένδυσης φαίνεται στο γράφημα.



Εικόνα 4-7 χρονική εξέλιξη της καθαρής παρούσας αξίας

4.6.4 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης

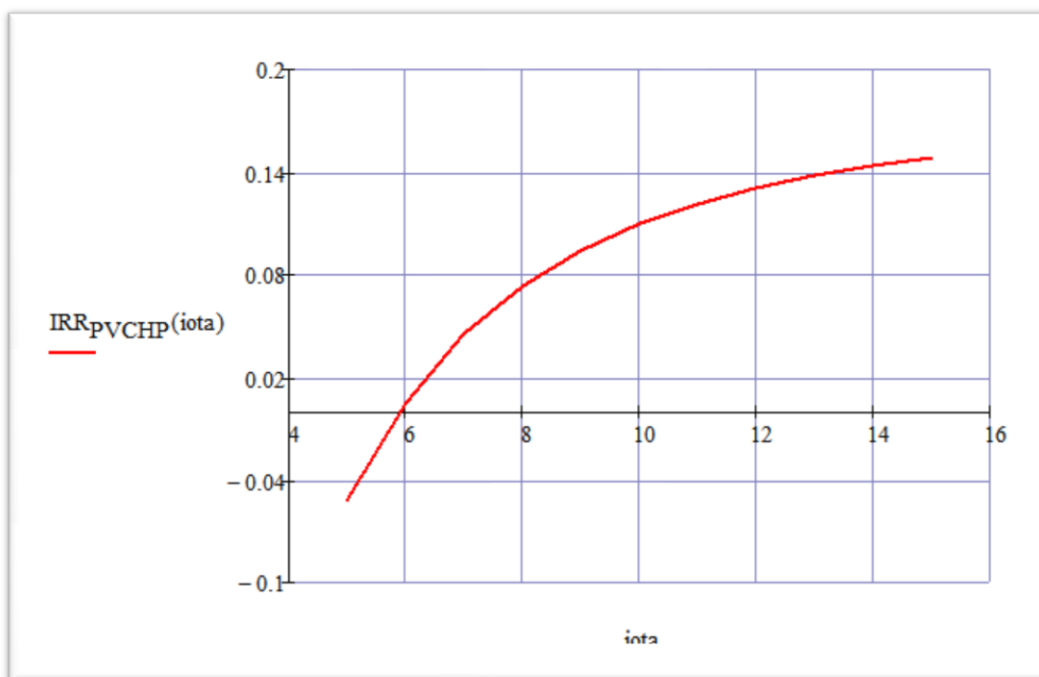
Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) δείχνει την απόδοση του αρχικού κεφαλαίου, προσδιορίζεται ως το επιτόκιο αγοράς που κάνει την καθαρή παρούσα αξία μιας σειράς πληρωμών ίση με το μηδέν. Υπολογίζεται ως λύση της εξίσωσης :

$$NPV_{d=IRR} = 0$$

Για επιτόκιο αναγωγής 3% και χρόνο ζωής της επένδυσης 10 έτη πραγματοποίηση της επένδυσης με ίδια κεφάλαια προκύπτει:

$$IRR = 11 \%$$

Και η εξέλιξή του ανάλογα με το χρόνο ζωής της επένδυσης φαίνεται στο παρακάτω γράφημα.



Εικόνα 4-8 χρονική εξέλιξη του εσωτερικού βαθμού απόδοσης

4.6.5 Συμπεράσματα

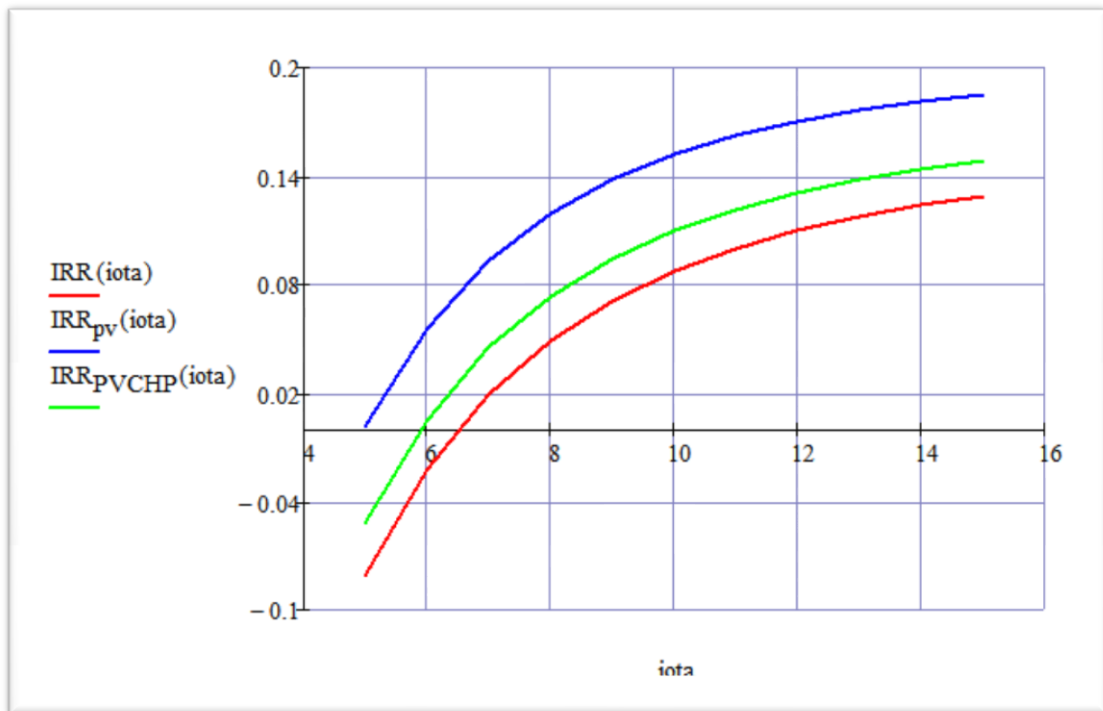
Το σενάριο που μελετήθηκε στην παρούσα παράγραφο συνδυάζει τις δύο ξεχωριστές περιπτώσεις των σεναρίων 2 και 3, επομένως είναι λογικό όλα τα οικονομικά του μεγέθη να βρίσκονται από άποψη αποδοτικότητας ανάμεσα στις τιμές των ξεχωριστών σεναρίων. Σε γενικές γραμμές, εκτιμάται ως συμφέρον σενάριο τόσο επενδυτικά όσο και περιβαλλοντικά αφού συνδυάζει τα υψηλά περιβαλλοντικά οφέλη του σεναρίου 2 με τα υψηλά οικονομικά οφέλη του σεναρίου 3.

4.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

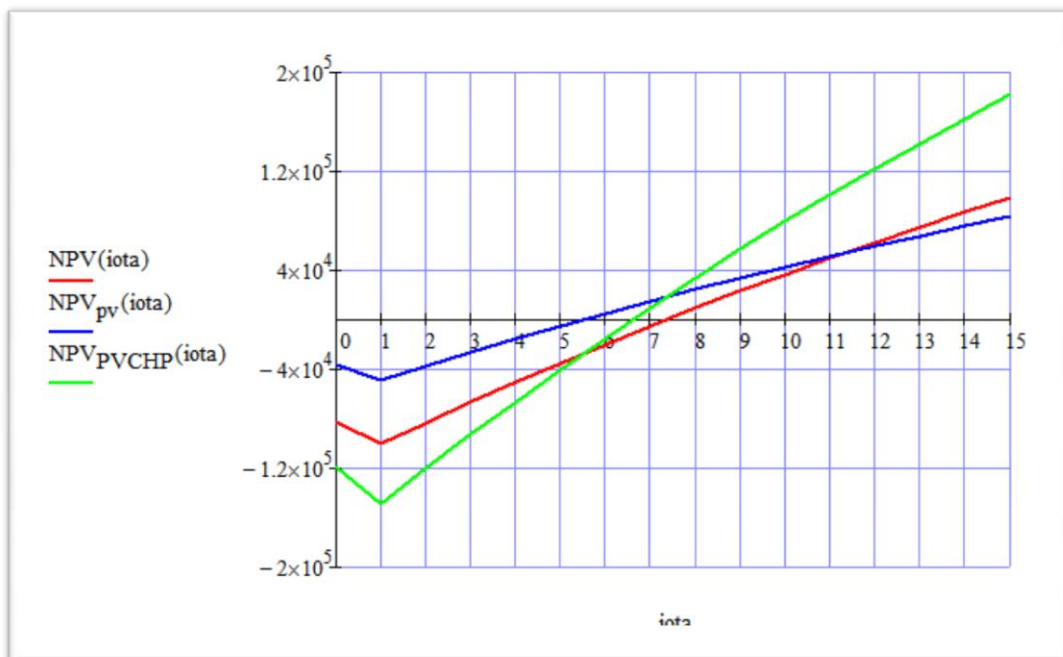
Για λόγους ευχερέστερης σύγκρισης παρατίθενται συνοπτικά τα διαγράμματα των επιμέρους περιπτώσεων και ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την κάθε περίπτωση.

	Περίπτωση 2: μόνο ΣΗΘ	Περίπτωση 3: μόνο φωτοβολταϊκά	Περίπτωση 4: υβριδικό σύστημα ΣΗΘ και φωτοβολταϊκών
Περίοδος ανάκτησης κεφαλαίου	6,5 χρόνια	4,983 χρόνια	5,895 χρόνια
Έντοκη περίοδος αποπληρωμής	8,971 χρόνια	6,341 χρόνια	7,865 χρόνια
Καθαρή παρούσα αξία για 10 έτη	36.810 €	42.700€	79.520 €
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για 10 έτη	8,7%	15,2 %	11 %

Πίνακας 4-18 συνοπτικά αποτελέσματα για κάθε περίπτωση



Εικόνα 4-9 χρονική εξέλιξη εσωτερικού βαθμού απόδοσης



Εικόνα 4-10 χρονική εξέλιξη καθαρής παρούσας αξίας

Η συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει την αποδοτικότερη οικονομική επένδυση σε απλό σύστημα φωτοβολταϊκών λόγω υψηλότερου εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Η επιλογή των 10 ετών χρόνου ζωής της επένδυσης έγινε για λόγους απλότητας και σύγκρισης, καθώς με την παρέλευση των 10 ετών υπεισέρχονται παράγοντες όπως μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και κόστος μεγάλης συντήρησης του συστήματος συμπαράγωγής το 10^ο έτος. Ο

πραγματικός χρόνος ζωής όλων των περιπτώσεων ξεπερνά τα 15 χρόνια. Σε αυτή την περίοδο φαίνεται πως η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης 4 είναι αρκετά μεγάλη χωρίς να έχει συνυπολογιστεί η πληθωριστική αύξηση της τιμής των καυσίμων και του ηλεκτρισμού, η οποία επιφέρει θετικές διορθώσεις στους οικονομικούς δείκτες τόσο της περίπτωσης 2 αλλά και 4.

Αν υπάρχει δυνατότητα δανειακής εξυπηρέτησης της επένδυσης, λόγω υψηλού κόστους, είναι προτιμότερη η περίπτωση 4, η οποία συνδυάζει περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη αλλά και τον σχετικά μεγάλο χρόνο ζωής της μονάδος τριπαραγωγής. Γενικά, η χρήση είτε απλού, είτε υβριδικού συστήματος εναλλακτικών μορφών ενέργειας δείχνει αρκετά ελκυστική και επενδυτικά εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη που προσφέρει. Το μικρό μέγεθος του συστήματος τριπαραγωγής αν και αυξάνει το κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, φαίνεται να συμπεριφέρεται με αποδεκτό τρόπο επενδυτικά. Είναι προφανές πως όσο αυξάνει το μέγεθος της ξενοδοχειακής εγκατάστασης, τόσο πιο αποδοτικά γίνονται τα σενάρια 2 και 4, λόγω αύξησης της κλιμάκωσης μεγέθους της μονάδος συμπααραγωγής.

4.7.1 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Στις μελέτες περιπτώσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεν εκτιμήθηκε η μεταβολή στην τιμή των καυσίμων οποία επιφέρει αλλαγές στον οικονομικούς δείκτες. Μία μελέτη που θα εκτιμούσε με αξιόπιστο τρόπο την μελλοντική τιμή των καυσίμων θα ήταν πιο ακριβής στον υπολογισμό των οικονομικών μεγεθών.

Επίσης, τα μεγέθη της καθαρής παρούσας αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης εκτιμήθηκαν χωρία να υπολογίζεται δανειακή σύμβαση. Η μελέτη των επενδυτικών σχεδίων συναρτήσει των επιτοκίων αγοράς του δανείου αλλά και του χρόνου δανεισμού θα έδινε ακριβέστερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αλλά και θα συνεισέφερε στην βελτιστοποίηση του κέρδους.

Η εκτίμηση των φορτίων του ξενοδοχείου αλλά και της πληρότητας του έγινε με προσεγγιστικό τρόπο λόγω της μη ύπαρξης πραγματικής κατασκευαστική και επενδυτικής μελέτης. Στην περίπτωση που υπάρχει ένα ακριβές κατασκευαστικό σχέδιο άλλα και ακριβής περιγραφή των ηλεκτρικών συσκευών που θα λειτουργούν με παράλληλη επενδυτική διερεύνηση της πληρότητας του ξενοδοχείου, το μοντέλο θα έβγαζε ακριβέστερα αποτελέσματα για την υπό εξέταση περίπτωση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αλγόριθμος υπολογισμού ενεργειακών φορτίων

Μοντέλο Εκτίμησης Ενεργειακών Αναγκών σε Επίπεδο Ξενοδοχείου

1. Περιγραφή Δεδομένων Εισόδου

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

width	Μήκος ορόφου (m)
length	Πλάτος ορόφου (m)
height	Ύψος ορόφου (m)
N_{window}	Αριθμός παραθύρων
h_{window}	Ύψος παράθυρου (m)
l_{window}	Μήκος παράθυρου (m)
N_{door}	Αριθμός πορτών
h_{door}	Ύψος πόρτας (m)
l_{door}	Μήκος πόρτας (m)
Z_{π}	Συντελεστής προσαύξησης λόγω προσανατολισμού
Z_{δ}	Συντελεστής προσαύξησης για την εξίσωση της θερμοκρασίας του χώρου

Δομικά χαρακτηριστικά τοιχωμάτων - μόνωσης

d_{brick}	Πάχος δομικού υλικού (cm)
k_{brick}	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας δομικού υλικού (W/mK)
$d_{\text{insulation}}$	Πάχος μόνωσης (cm)
$k_{\text{insulation}}$	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μόνωσης (W/mK)
α_{wall}	Ηλιακή απορροφητικότητα (%)

Χαρακτηριστικά ανοιγμάτων - πόρτας

U_{ceiling}	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας οροφής (W/m ² K)
U_{floor}	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πατώματος (W/mK)
U_{door}	Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας πόρτας (W/m ² K)
d_{glass}	Πάχος γυάλινης επιφάνειας (cm)
k_{glass}	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας γυάλινης επιφάνειας (W/mK)
h_{space}	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο διάκενο (W/m ² K)
layer	Αριθμός στρωμάτων τζαμιού
SHGC	Συντελεστής κέρδους ηλιακής ακτινοβολίας (%)
ACH	Ωριαίες αλλαγές του αέρα

Λοιπές ανάγκες

m_{dot}	Ημερήσια κατανάλωση νερού (L/day)
------------------	-----------------------------------

Κλιματολογικά χαρακτηριστικά περιοχής

T_{air}	Θερμοκρασία αέρα (K)
T_{water}	Θερμοκρασία νερού του δικτύου ύδρευσης (K)
q_{solar}	Ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία (kWh/m ² day)

Εξοπλισμός Ξενοδοχείου

Boiler _{eff}	Βαθμός απόδοσης λέβητα (%)	
COP	Βαθμός απόδοσης κλιματιστικού	
P _{device_room}	Διάνυσμα ισχύος ηλεκτρικών συσκευών δωματίων (W)	
P _{device_com}	Διάνυσμα ισχύος ηλεκτρικών συσκευών κοινοχρηστων χώρων ξενοδοχείου (W)	
U _{use_dev_room}	Διάνυσμα ημερήσιας χρήσης ηλεκτρικών συσκευών δωματίων(hr/day)	
U _{use_dev_com}	Διάνυσμα ημερήσιας χρήσης ηλεκτρικών συσκευών κοιν. χώρων ξενοδοχείου (hr/day)	
DC _{dev_room}	Διάνυσμα συντελεστή φορτίου ηλεκτρικών συσκευών δωματίων	
DC _{dev_com}	Διάνυσμα συντελεστή φορτίου ηλεκτρικών συσκευών κοιν. χώρων ξενοδοχείου	
P _{light_room}	Διάνυσμα ισχύος ηλεκτρικών λαμπτήρων δωματίων (W)	
U _{use_light_room}	Διάνυσμα ημερήσιας χρήσης ηλεκτρικών λαμπτήρων δωματίων (hr/day)	rooms := 70
P _{light_com}	Διάνυσμα ισχύος ηλεκτρικών λαμπτήρων κοιν. χώρων ξενοδοχείου (W)	
U _{use_light_com}	Διάνυσμα ημερήσιας χρήσης ηλ. λαμπτήρων κοιν. χώρων ξενοδοχείου (hr/day)	
rooms	Δωμάτια ξενοδοχείου	
dyn	Διάνυσμα δυναμικότητας ξενοδοχείου	

Μεταβλητές Σχεδιασμού

T _{base_air_summer}	Θερμοκρασία θερμικής άνεσης (καλοκαίρι) (K)	dyn :=	m _{dot} := 56.8·2 $\frac{L}{day}$	
T _{base_air_winter}	Θερμοκρασία θερμικής άνεσης (χειμώνας) (K)			
T _{base_water}	Θερμοκρασία ζεστού νερού χρήσης (K)			
				16%
				17%
				24%
				34%
		39%		
		36%		
		47%		
		45%		
		49%		
		28%		
		20%		
		17%		

2. Αποτελέσματα Μοντέλου

Q _{heat}	Ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης χώρων (GJ/yr)
Q _{cool}	Ενεργειακές ανάγκες ψύξης χώρων (GJ/yr)
Q _{water}	Ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης νερού χρήσης (GJ/yr)
Q _{lighting}	Ενεργειακές ανάγκες φωτισμού (GJ/yr)
Q _{electric_uses}	Ενεργειακές ανάγκες ηλεκτρικών συσκευών (GJ/yr)
Electricity	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/yr)
Electricity_Cost	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/yr)
Fuel	Κατανάλωση καυσίμου (L/yr)
Fuel_Cost	Κόστος καυσίμου (€/yr)
Emissions	Συνολικές εκπομπές CO ₂ (tCO ₂ /yr)

3. Βοηθητικά Δεδομένα

Φυσικές Σταθερές

Ειδική θερμότητα νερού:

$$c_{p_water} = 4.19 \frac{10^3 J}{kg \cdot K}$$

Πυκνότητα νερού:

$$\rho_{water} = 1 \frac{kg}{L}$$

Ειδική θερμότητα αέρα:

$$c_{p_air} = 1.005 \frac{10^3 J}{kg \cdot K}$$

Πυκνότητα αέρα:

$$\rho_{air} = 1.051 \frac{kg}{m^3}$$

Ημέρες ανά Μήνα - Δείκτης Μηνών

$$Days := (31 \ 28 \ 31 \ 30 \ 31 \ 30 \ 31 \ 31 \ 30 \ 31 \ 30 \ 31)^T$$

$$im = 1..12$$

Δεδομένα από την ASHRAE

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον εξωτερικό αέρα: $h_o := 29 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον εσωτερικό αέρα: $h_i := 8.3 \cdot \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Ανθρώπινες εσωτερικές απολαβές: $Q_{human,im} := (100 \cdot dyn_{im} \cdot rooms \cdot 2 + 1000) \cdot W$

4. Αρχικοί Υπολογισμοί

4.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Οικίας

$A_{window} := N_{o_{window}} \cdot (h_{window} \cdot l_{window})$	Επιφάνεια παραθύρων
$A_{door} := N_{o_{door}} \cdot (h_{door} \cdot l_{door})$	Επιφάνεια πορτών
$A_{wall} := 2 \cdot (\text{height} \cdot \text{length} + \text{height} \cdot \text{width}) - A_{window} - A_{door}$	Επιφάνεια τοίχων
$A_{ceiling} := \text{width} \cdot \text{length}$	Επιφάνεια δαπέδου
$P_{floor} := 2 \cdot (\text{width} + \text{length})$	Περίμετρος πατώματος

4.2 Συντελεστές Μεταφοράς Θερμότητας

Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον τοίχο

$$U_{wall} := \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_{brick}}{k_{brick}} + \frac{d_{insulation}}{k_{insulation}} + \frac{d_{brick}}{k_{brick}} + \frac{1}{h_i}}$$

Συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τα παράθυρα

$$U_{window} := \begin{cases} \text{return } \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_{glass}}{k_{glass}} + \frac{1}{h_i}} & \text{if layer} = 1 \\ \text{return } \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \sum_{i=1}^{\text{layer}} \frac{d_{glass}}{k_{glass}} + \sum_{i=1}^{\text{layer}-1} \frac{1}{h_{space}} + \frac{1}{h_i}} & \text{if layer} > 1 \end{cases}$$

```

Tb,im := for im ∈ 1..12
| Tb,im ← 273K
| Qheat,im ← 1W
| while Qheat,im > 0.001W
| | Tb,im ← Tb,im + 0.1K
| | 
$$z_{w,im} \leftarrow \frac{T_{base\_air\_winter} - T_{b,im}}{s_{d,im}}$$

| | 
$$HDD_{im} \leftarrow Days_{im} \cdot s_{d,im} \cdot \left( z_{w,im} \cdot \text{pnorm}(z_{w,im}, 0, 1) + \text{dnorm}(z_{w,im}, 0, 1) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}$$

| | 
$$T_{sol\_air,im} \leftarrow T_{b,im} + \frac{q_{solar,im} \cdot \alpha_{wall}}{h_o}$$

| | 
$$z_{w\_solair,im} \leftarrow \frac{T_{base\_air\_winter} - T_{sol\_air,im}}{s_{d,im}}$$

| | 
$$HDD_{sol\_air,im} \leftarrow Days_{im} \cdot s_{d,im} \cdot \left( z_{w\_solair,im} \cdot \text{pnorm}(z_{w\_solair,im}, 0, 1) + \text{dnorm}(z_{w\_solair,im}, 0, 1) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}$$

| | Qwall,im ← (1 + Zδ + Zπ) · Uwall · Awall · HDDsol\_air,im
| | Qceiling,im ← (1 + Zδ + Zπ) · Uceiling · Aceiling · HDDsol\_air,im
| | Qfloor,im ← Ufloor · Pfloor · HDDsol\_air,im
| | Qdoor,im ← Udoor · Adoor · HDDsol\_air,im
| | Qwindow,im ← Uwindow · Awindow · HDDim
| | Qcond,im ← Qwall,im + Qceiling,im + Qfloor,im + Qwindow,im + Qdoor,im
| | Qinfiltration,im ← ρair · cp,air · ACH · (height · width · length) · HDDim
| | 
$$Q_{equipment,im} \leftarrow 0.5W \left[ \sum_{k=1}^{rows(P_{device\_room})} \left( P_{device\_room,k} \cdot \frac{Use_{dev\_room,k}}{24} \cdot DC_{dev\_room,k} \cdot (dyn_{im} \cdot rooms) \right) \dots \right]$$

| | 
$$+ \sum_{k=1}^{rows(P_{device\_com})} \left( P_{device\_com,k} \cdot \frac{Use_{dev\_com,k}}{24} \cdot DC_{dev\_com,k} \right)$$

| | Qsolar\_gain,im ← SHGC · Awindow · qsolar,im · Daysim ·  $\frac{\text{day}}{\text{yr}}$ 
| | Qinternal\_gain,im ← (Qhuman,im + Qequipment,im) · Daysim ·  $\frac{\text{day}}{\text{yr}}$ 
| | Qheat,im ← Qcond,im + Qinfiltration,im - Qsolar\_gain,im - Qinternal\_gain,im
| return Tb,im

```

4.3 Βαθμομέρες Θέρμανσης

$$z_{w,im} := \frac{T_{b,im} - T_{air,im}}{s_{d,im}}$$

Μηνιαίες Βαθμομέρες Θέρμανσης

$$HDD_{im} := \text{if} \left[T_{b,im} > T_{air,im}, Days_{im} \cdot s_{d,im} \cdot \left(z_{w,im} \cdot \text{pnorm}(z_{w,im}, 0, 1) + \text{dnorm}(z_{w,im}, 0, 1) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

Μηνιαίες Βαθμομέρες Θέρμανσης - Διόρθωση για Θερμοκρασία Ηλιακής Ενέργειας

$$T_{\text{sol_air_im}} := T_{\text{air_im}} + \frac{q_{\text{solar_im}} \cdot \alpha_{\text{wall}}}{h_0} \quad \text{Θερμοκρασία Ηλιακής Ενέργειας}$$

$$z_{\text{w_solair_im}} := \frac{T_{\text{b_im}} - T_{\text{sol_air_im}}}{s_{\text{d_im}}}$$

$$\text{HDD}_{\text{sol_air_im}} := \text{if} \left[T_{\text{b_im}} > T_{\text{air_im}}, \text{Days}_{\text{im}} \cdot s_{\text{d_im}} \cdot \left(z_{\text{w_solair_im}} \cdot \text{pnorm} \left(z_{\text{w_solair_im}}, 0, 1 \right) + \text{dnorm} \left(z_{\text{w_solair_im}}, 0, 1 \right) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

4.4 Βαθμομέρες Ψύξης

$$z_{\text{s_im}} := \frac{T_{\text{air_im}} - T_{\text{b_im}}}{s_{\text{d_im}}}$$

Μηνιαίες Βαθμομέρες Ψύξης

$$\text{CDD}_{\text{im}} := \text{if} \left[T_{\text{b_im}} < T_{\text{air_im}}, \text{Days}_{\text{im}} \cdot s_{\text{d_im}} \cdot \left(z_{\text{s_im}} \cdot \text{pnorm} \left(z_{\text{s_im}}, 0, 1 \right) + \text{dnorm} \left(z_{\text{s_im}}, 0, 1 \right) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

Μηνιαίες Βαθμομέρες Ψύξης - Διόρθωση για Θερμοκρασία Ηλιακής Ενέργειας

$$z_{\text{s_solair_im}} := \frac{T_{\text{sol_air_im}} - T_{\text{b_im}}}{s_{\text{d_im}}}$$

$$\text{CDD}_{\text{sol_air_im}} := \text{if} \left[T_{\text{b_im}} < T_{\text{sol_air_im}}, \text{Days}_{\text{im}} \cdot s_{\text{d_im}} \cdot \left(z_{\text{s_solair_im}} \cdot \text{pnorm} \left(z_{\text{s_solair_im}}, 0, 1 \right) + \text{dnorm} \left(z_{\text{s_solair_im}}, 0, 1 \right) \right) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

5. Υπολογισμός Αναγκών Θέρμανσης Χώρου

5.1 Θερμικές Απώλειες λόγω Αγωγής

Θερμικές απώλειες από τα τοιχώματα: $Q_{\text{wall_im}} := (1 + Z_{\delta} + Z_{\pi}) \cdot U_{\text{wall}} \cdot A_{\text{wall}} \cdot \text{HDD}_{\text{sol_air_im}}$

Θερμικές απώλειες από την οροφή: $Q_{\text{ceiling_im}} := (1 + Z_{\delta} + Z_{\pi}) \cdot U_{\text{ceiling}} \cdot A_{\text{ceiling}} \cdot \text{HDD}_{\text{sol_air_im}}$

Θερμικές απώλειες από το δάπεδο: $Q_{\text{floor_im}} := U_{\text{floor}} \cdot P_{\text{floor}} \cdot \text{HDD}_{\text{sol_air_im}}$

Θερμικές απώλειες από τα παράθυρα: $Q_{\text{window_im}} := U_{\text{window}} \cdot A_{\text{window}} \cdot \text{HDD}_{\text{im}}$

Θερμικές απώλειες από τις πόρτες: $Q_{\text{door_im}} := U_{\text{door}} \cdot A_{\text{door}} \cdot \text{HDD}_{\text{sol_air_im}}$

Συνολικές Θερμικές Απώλειες λόγω Αγωγής

$$Q_{cond_im} := Q_{wall_im} + Q_{ceiling_im} + Q_{floor_im} + Q_{window_im} + Q_{door_im}$$

5.2 Θερμικές Απολαβές μέσω Ανοιγμάτων

$$Q_{solar_gain_im} := \text{if} \left(T_{base_air_winter} > T_{air_im}, SHGC \cdot A_{window} \cdot q_{solar_im} \cdot Days_{im} \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right)$$

5.3 Θερμικές Απώλειες λόγω Αερισμού

$$Q_{infiltration_im} := \rho_{air} \cdot c_{p_air} \cdot ACH \cdot (\text{height} \cdot \text{width} \cdot \text{length}) \cdot HDD_{im}$$

5.4 Εσωτερικές Απολαβές Θερμότητας

$$Q_{equipment_im} := \left[\sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{device_room})} \left[P_{device_room_k} \cdot \frac{Use_{dev_room_k}}{24} \cdot DC_{dev_room_k} \cdot (\text{dyn}_{im} \cdot \text{rooms}) \right] \dots + \sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{device_com})} \left(P_{device_com_k} \cdot \frac{Use_{dev_com_k}}{24} \cdot DC_{dev_com_k} \right) \right] \cdot 0.5 \cdot W$$

$$Q_{internal_gain_im} := \text{if} \left[T_{base_air_winter} > T_{air_im}, (Q_{human_im} + Q_{equipment_im}) \cdot Days_{im} \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

5.5 Συνολικό Θερμικό Φορτίο

$$Q_{heat_im} := \text{if} \left[(Q_{cond_im} + Q_{infiltration_im}) > (Q_{solar_gain_im} + Q_{internal_gain_im}), Q_{cond_im} + Q_{infiltration_im} - Q_{solar_gain_im} - Q_{internal_gain_im}, 0 \right]$$

6. Υπολογισμός Αναγκών Ψύξης Χώρου

6.1 Θερμικές Απολαβές λόγω Αγωγής

Θερμικές απολαβές από τα τοιχώματα:

$$Q_{wall_im} := (1 + Z_{\delta} + Z_{\pi}) \cdot U_{wall} \cdot A_{wall} \cdot CDD_{sol_air_im}$$

Θερμικές απολαβές από την οροφή:

$$Q_{ceiling_im} := (1 + Z_{\delta} + Z_{\pi}) \cdot U_{ceiling} \cdot A_{ceiling} \cdot CDD_{sol_air_im}$$

Θερμικές απολαβές από το δάπεδο:

$$Q_{floor_im} := U_{floor} \cdot P_{floor} \cdot CDD_{sol_air_im}$$

Θερμικές απολαβές από τα παράθυρα:

$$Q_{window_im} := U_{window} \cdot A_{window} \cdot CDD_{im}$$

Θερμικές απολαβές από τις πόρτες:

$$Q_{door_im} := U_{door} \cdot A_{door} \cdot CDD_{sol_air_im}$$

Συνολικές Θερμικές Απολαβές λόγω Αγωγής

$$Q_{\text{cond,im}} := Q_{\text{wall,im}} + Q_{\text{ceiling,im}} + Q_{\text{floor,im}} + Q_{\text{window,im}} + Q_{\text{door,im}}$$

6.2 Θερμικές Απολαβές μέσω Ανοιγμάτων

$$Q_{\text{solar_gain,im}} := \text{if} \left(T_{\text{base_air_summer}} < T_{\text{air,im}}, \text{SHGC} \cdot A_{\text{window}} \cdot q_{\text{solar,im}} \cdot \text{Days}_{\text{im}} \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right)$$

6.3 Θερμικές Απώλειες λόγω Αερισμού

$$Q_{\text{infiltration,im}} := \rho_{\text{air}} \cdot c_{p_air} \cdot \text{ACH} \cdot (\text{height} \cdot \text{width} \cdot \text{length}) \cdot \text{CDD}_{\text{im}}$$

6.4 Εσωτερικές Απολαβές Θερμότητας

$$Q_{\text{internal_gain,im}} := \text{if} \left[T_{\text{base_air_summer}} < T_{\text{air,im}}, (Q_{\text{human,im}} + Q_{\text{equipment,im}}) \cdot \text{Days}_{\text{im}} \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}}, 0 \right]$$

6.5 Συνολικό Ψυκτικό Φορτίο

$$Q_{\text{cool,im}} := Q_{\text{cond,im}} + Q_{\text{infiltration,im}} + Q_{\text{solar_gain,im}} + Q_{\text{internal_gain,im}}$$

7. Υπολογισμός Αναγκών Θέρμανσης Νερού Χρήσης

Ετήσιες Βαθμομημέρες Ζεστού Νερού

$$\text{WDD}_{\text{im}} := \text{if} \left[(T_{\text{base_water}} - T_{\text{water,im}}) < 0, 0, \text{Days}_{\text{im}} \cdot (T_{\text{base_water}} - T_{\text{water,im}}) \cdot \frac{\text{day}}{\text{yr}} \right]$$

$$Q_{\text{water,im}} := m_{\text{dot}} \cdot \text{dyn}_{\text{im}} \cdot \text{rooms} \cdot 2 \cdot \rho_{\text{water}} \cdot c_{p_water} \cdot \text{WDD}_{\text{im}}$$

8. Υπολογισμός Ηλεκτρικών Αναγκών Φωτισμού

$$Q_{\text{lighting,im}} := \left[\sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{\text{light_room}})} (P_{\text{light_room}_k} \cdot \text{Use}_{\text{light_room}_k} \cdot \text{dyn}_{\text{im}} \cdot \text{rooms}) \right] + \left[\sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{\text{light_com}})} (P_{\text{light_com}_k} \cdot \text{Use}_{\text{light_com}_k}) \right] \cdot \frac{\text{W} \cdot \text{hr}}{\text{day}}$$

9. Υπολογισμός Αναγκών Ηλεκτρικών Συσκευών

$$Q_{\text{electric_uses,im}} := 0.5 \left[\sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{\text{device_room}})} (P_{\text{device_room}_k} \cdot \text{Use}_{\text{dev_room}_k} \cdot \text{DC}_{\text{dev_room}_k} \cdot \text{dyn}_{\text{im}} \cdot \text{rooms}) \right] + \left[\sum_{k=1}^{\text{rows}(P_{\text{device_com}})} (P_{\text{device_com}_k} \cdot \text{Use}_{\text{dev_com}_k} \cdot \text{DC}_{\text{dev_com}_k}) \right] \cdot \frac{\text{W} \cdot \text{hr}}{\text{day}}$$

10. Εκτίμηση Καταναλισκόμενης Ενέργειας

10.1 Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μηνιαία Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας:

$$\text{Electricity}_{im} := \left(Q_{\text{lighting}_{im}} + Q_{\text{electric_uses}_{im}} \right)$$

5 Βιβλιογραφία

- [1] Φραγκόπουλος Χ., Καρυδογιάννης Η. Π., Καραλής Γ. Κ (1994), *Συμπαράγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού*, Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, Αθήνα.
- [2] Ασημακόπουλος Δ., Αραμπατζής Γ. (2008), *Ενεργειακή Ανάλυση Βιομηχανικών Συστημάτων*, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [3] EDUCOGEN (2001), *The European Educational Tool on Cogeneration*, Second Edition.
- [4] Government's Energy Efficiency Best Practice Programme (1997), *How to appraise CHP, a simple investment appraisal methodology*, Good practice guide 227, UK.
- [5] Energy Efficiency - Best Practice Programme (EEBPP) (2004) *Combined heat and power for buildings, Selecting, installing and operating CHP in buildings - a guide for building services engineers*, Good practice guide 388, Action Energy from the Carbon Trust.
- [6] Horlock J. H., (1997), *Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP), Thermodynamics and Economics*, Krieger Publishing Company Malabar Florida.
- [7] RETScreen® (2005) *Combined Heat and Power Project Analysis*, Clean Energy Project Analysis RETScreen® Engineering & Cases Textbook, Third Edition.
- [8] Δημήτρης Γαλανάκης (Μάρτιος 2006) *Φυσικό αέριο και Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης*, Η ελληνική πραγματικότητα.
- [9] CEPE (2004), *The Economics of Cogeneration Technology Adoption and Diffusion: A Deterministic Model*, CE Working Paper N.27.
- [10] Mississippi Cooling, Heating, and Power (Micro-CHP) and Bio-fuel Center (2004), *Cooling, Heating, and Power for Buildings (CHP-B) Instructional Module*, Mississippi State.
- [11] Mississippi Cooling, Heating, and Power (Micro-CHP) and Bio-fuel Center (2005), *micro- Cooling, Heating, and Power (m-CHP) Instructional Module*, Mississippi State.

- [12] U.S. Department of Energy (2002), *Combined Heat and Power Cost Reduction Strategies*, Office of industrial technologies, Energy efficiency and renewable energy
- [13] Dijkstra S. (2006), *Clean Development through Cogeneration: Combined Heat and Power Generation Projects in the Clean Development Mechanism*, World Alliance for Decentralized Energy (WADE).
- [14] Government's Energy Efficiency Best Practice Programme (2000), *Reducing energy waste in the NHS*, Good practice guide 261, UK.
- [15] Government's Energy Efficiency Best Practice Programme (1996), *Small - scale combined heat and power for buildings*, Good practice guide 176, UK.
- [16] DETR (1999) *Introduction to large - scale combined heat and power*, Good practice guide 43, Energy Efficiency, Best Practice Programme, Building Research Energy Conservation Support Unit.
- [17] California energy commission (2000), *Guidebook for combined heat and power*, consultant report, report date September 1999.
- [18] Smith M. (2003), *Gas turbines and micro turbines for distributed Energy Applications*, Office of Distributed Energy and Electric Reliability, U.S. Department of Energy, March 5.
- [19] Περδικέας Ν., (2008), *Σχεδιασμός Συστήματος Συμπαράγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Θερμότητας σε Νοσοκομειακή Μονάδα*, Αθήνα
- [20] Κοκκινάκος Π (2011), *Τεχνοοικονομική ανάλυση εγκατάστασης μονάδας συμπαράγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε ξενοδοχειακό συγκρότημα*, Αθήνα
- [21] Μουζακίτης Π., (2005), *Μελέτη σκοπιμότητας εγκατάστασης Συστήματος Συμπαράγωγής στο Νοσοκομείο ΚΑΤ*, Αθήνα
- [22] Αγτζόγλου Γ., Ζιώγος Β., (2008), *Διερεύνηση των δυνατοτήτων διείσδυσης συστημάτων συμπαράγωγής σε κτίρια*, Θεσσαλονίκη
- [23] C.P. Underwood, F.W.H. Yik, (2004), *Modelling Methods for Energy in Buildings*, Blackwell Publishing
- [24] American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2009.

- [25] Center for Information Sharing, Inc. (through Sierra Pacific Power Company), (1991), *How to Reduce Your Energy Costs*, 2nd ed. Boston
- [26] J. F. Kreider and A. Rabl (1994), *Heating and Cooling of Building*, New York, McGraw-Hill
- [27] F. C. McQuiston and J. D. Parker. *Heating, Ventilating, and Air Conditioning*. 4th ed. New York: Wiley, 1994.
- [28] *Radiant Barrier Attic Fact Sheet*, DOE/CE-0335P. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 1991.
- [29] *Replacement Windows*, Consumer Reports, Yonkers, NY: Consumer Union. October 1993, p. 664.
- [30] H. J. Sauer, Jr., and R. H. Howell, *Principles of Heating, Ventilating, and Air Conditioning*, Atlanta: ASHRAE, 1994.
- [31] *Refrigeration and Air Conditioning*, W. F. Stoecker and J. W. Jones, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [32] Καγκαράκης Κ., *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1987.
- [33] Tom Markvart & Luis Castaner, *Practical Handbook of Photovoltaics – Fundamentals and Applications*, Elsevier, 2003
- [34] Friedrich Sick and Thomas Erge, *Photovoltaics in Building*, International Energy Agency, Paris 1996
- [35] Σταμάτης Δ. Περδιός, *Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις*, ΤΣΕΛΚΑ-4Μ Εκδοτική, Αθήνα 2007
- [36] J. Benemann, O. Chehab and E. Schaar-Gabriel, *Building-integrated PV module*,. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **67** (2001), pp. 345–354.
- [37] M. Oliver and T. Jackson, *Energy and economic evaluation of building-integrated photovoltaics*, *Energy* **26** (2001), pp. 431–439.
- [38] Καπλάνης Σ., *Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων*, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα 2004
- [39] *Planning and Installing Photovoltaic Systems guide for installers, architects and engineers*, The German Energy Society (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS LV Berlin BRB), 2008

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
<http://www.hachp.gr>
<http://www.retscreen.net>
www.aerioattikis.gr
www.dei.gr
<http://www.cres.gr>
<http://www.tema.gr>
<http://www.depa.gr>
<http://www.htexp.gr>
<http://www.ashrae.gr>
<http://cogen.org>
<http://www.bchp.org>
<http://www.nrel.gov/>
<http://www.selasenergy.gr/>
<http://www.pv-power-plants.com>
<http://www.pvresources.com>
<http://www.helapco.gr>
<http://www.photovoltaic-energy.gr>
<http://www.nrel.gov/>