

Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης

Φωτοβολταϊκά Συστήματα



4η έκδοση

ISBN 978-960-456-528-3

© Copyright, Ιωάννης Φραγκιαδάκης, Εκδόσεις ΖΗΤΗ,
Τέταρτη έκδοση Σεπτέμβριος 2019, Θεσσαλονίκη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση
Βιβλιοδεσία

Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ Ι.Κ.Ε.

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας
Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392.072.222 - Fax: 2392.072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Αρμενοπούλου 27, 546 35 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310.203.720, Fax: 2310.211.305 • e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ:

Χαριλάου Τρικούπη 22, 106 79 Αθήνα
Τηλ.-Fax: 210.3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Πρόλογος

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού (ΦΒ) φαινομένου έγινε το 1839, από τον πειραματικό Φυσικό Edmund Becquerel, σε ηλεκτρολυτικά υγρά. Πέρασαν περισσότερα από εκατό χρόνια παρατηρήσεων και πειραματικών προσπαθειών για την ανάδειξη της σημασίας και του ρόλου του φαινομένου αυτού και την αξιοποίησή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 1954, παρασκευάστηκε η πρώτη ΦΒ κυψελίδα κρυσταλλικού Πυριτίου, με επαφή ημιαγωγών, με απόδοση 4,5% και μετά από μερικούς μήνες 6%, από τους D.M. Chapin, C.S. Fuller και G.L. Pearson. Έκτοτε εντατικοποιήθηκαν οι προσπάθειες για δημιουργία ΦΒ στοιχείων υψηλής και σταθερής απόδοσης. Σήμερα, η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα ωριμότητας, που προδιαγράφουν με σιγουριά την ευρεία διείσδυσή τους, μέσα στην τρέχουσα δεκαετία, στο ενεργειακό δυναμικό κάθε χώρας. Ως πηγές ενέργειας έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά την αέναη, αποδοτική και εξαιρετικά ήπια και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις αναπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, έχει δοθεί ήδη σημαντική βαρύτητα τόσο στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας του βασικού κυττάρου μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, όσο και της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, που συμπληρώνουν μια ολοκληρωμένη ΦΒ εγκατάσταση. Την προηγούμενη δεκαετία, πολλές από τις χώρες αυτές προχώρησαν στην υλοποίηση πιλοτικών προγραμμάτων ΦΒ εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, με στόχο την απόκτηση σχετικής τεχνογνωσίας και την προετοιμασία τους για δραστηριοποίηση σε έργα αντίστοιχα μεγάλης κλίμακας.

Στη χώρα μας, παρά το υψηλό ηλιακό δυναμικό, το μη ενθαρρυντικό, μέχρι πρότινος, θεσμικό πλαίσιο για τα φωτοβολταϊκά, σε συνδυασμό με το υψηλό, προς το παρόν, κόστος τους, περιόριζε το ενδιαφέρον των πολιτών για την τεχνολογία αυτή. Πρόσφατα, η θέσπιση ευνοϊκότερου νομοθετικού πλαισίου για τις Α.Π.Ε. και ιδιαιτέρως για τα φωτοβολταϊκά, αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον του κοινού, τόσο για αυτοπαραγωγή όσο και για επενδύσεις μεγάλης κλίμακας.

Παράλληλα, οι υψηλοί ρυθμοί εργοστασιακής παραγωγής ΦΒ πλαισίων διεθνώς καθώς και οι αυξανόμενοι ρυθμοί εγκατάστασής τους σε παγκόσμια κλίμακα, ενισχύουν την προοπτική ανάπτυξης νέων επαγγελματικών δραστηριοτήτων στο συγκεκριμένο τομέα. Στα πλαίσια αυτής της προοπτικής, η συμβολή των τριτοβάθμιων εκπαιδευτικών ιδρυμάτων της χώρας μας θα είναι καθοριστική στους τομείς της εκπαίδευσης και της τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης.

Σκοπός του συγγράμματος και οργάνωση της ύλης του

Σκοπός και περίγραμμα ύλης

Κατευθυντήρια γραμμή για τη συγγραφή του βιβλίου αυτού απετέλεσε η επιδίωξη δημιουργίας ενός εκπαιδευτικού βοηθήματος, σε επίπεδο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, το οποίο, αφ' ενός να καλύπτει επαρκώς το θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο της τεχνολογίας των ΦΒ συστημάτων, αφ' ετέρου να παρέχει στον εκπαιδευόμενο τα απαραίτητα εφόδια είτε για επαγγελματική αξιοποίηση είτε για μεταπτυχιακές σπουδές.

Δόθηκε βαρύτητα αφ' ενός στην εννοιολογική θεμελίωση των θεμάτων που αφορούν στην ηλιακή ακτινοβολία, στο μηχανισμό εμφάνισης του ΦΒ φαινομένου και στη λειτουργία των ΦΒ στοιχείων, αφ' ετέρου στη λεπτομερή μελέτη των ΦΒ συστημάτων και στο μεθοδολογικό καθορισμό του κατάλληλου μεγέθους τους, που ολοκληρώνεται με την εξέταση επιλεγμένων παραδειγμάτων τυπικών ΦΒ εφαρμογών. Η διάρθρωση της ύλης ακολουθεί τη μεθοδολογία της προσέγγισης του κύριου στόχου, δηλαδή της μεθοδολογίας υπολογισμού ενός ΦΒ συστήματος, αφού προηγουμένως μελετηθούν τα φαινόμενα, η τεχνολογία και οι φυσικές ποσότητες που αφορούν στο ΦΒ φαινόμενο. Η παρουσίαση των θεμάτων γίνεται με γνώμονα την κριτική αναζήτηση της σημασίας των εννοιών, στα πλαίσια, βεβαίως, του εκπαιδευτικού χαρακτήρα του βιβλίου. Ο ενδιαφερόμενος για περισσότερη ανάλυση και πληροφορία στο αντικείμενο, θα βρει πληθώρα πρόσφατων αναφορών σε κάθε ειδικού ενδιαφέροντος θέμα καθώς και αναφορές σε καταξιωμένα συγγράμματα που περιλαμβάνονται στον πίνακα βιβλιογραφίας.

Σε γενικές γραμμές, παρουσιάζεται αναλυτικά το ΦΒ φαινόμενο, η ερμηνεία του και οι παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνισή του. Εξετάζεται σύντομα η σχετική τεχνολογία παρασκευής της φωτοβολταϊκής κυψελίδας και των ΦΒ πλαισίων. Στη συνέχεια, μελετάται η μεθοδολογία υπολογισμού του μεγέθους ενός ΦΒ συστήματος, αρχικά για συνεχείς αίθριες ημέρες και στη συνέχεια, με δυνατότητα ορισμένων ημερών αυτονομίας, με εφαρμογή της διατήρησης της παρεχόμενης από τον ήλιο ενέργειας. Διατυπώνεται η σχέση εξάρτησης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία, με βάση το ηλιακό δυναμικό, τις συνθήκες λειτουργίας και τις δυνατότητες του ΦΒ πλαισίου. Ομοίως, εξετάζεται ο προσδιορισμός των υπολοίπων τμημάτων ενός ΦΒ συστήματος. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της μεθοδολογίας υπολογισμού των ΦΒ υβριδικών συστημάτων, αφού προηγουμένως μελετηθεί συνοπτικά η τεχνολογία της αιολικής ενέργειας.

Αναλυτική παρουσίαση του περιεχομένου των κεφαλαίων

Στην Εισαγωγή περιλαμβάνεται μια γενική παρουσίαση των συμβατικών καθώς και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, στα χαρακτηριστικά, στη σημασία και στην αξιοποίησή τους, από την Αρχαιότητα μέχρι σήμερα.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Εξετάζεται η προέλευσή της, τα χαρακτηριστικά της στην επιφάνεια της γης και η μεταβολή της κατά τη διάρκεια της ημερήσιας κίνησης του ήλιου. Διερευνάται, επίσης, η σημασία του προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη, για τη μεγιστοποίηση της συλλεγόμενης ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια σύντομη αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στους ημιαγωγούς, δεδομένου ότι το ΦΒ φαινόμενο εμφανίζεται με έμφαση σ' αυτούς. Ο στόχος είναι να αναδειχθεί η σημασία των χαρακτηριστικών της ύλης που συμβάλουν σ' αυτή την ελπιδοφόρα μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η δίοδος ημιαγωγών, που έφερε την επανάσταση στο χώρο των ηλεκτρονικών, στις αρχές του δεύτερου μισού του 20ου αιώνα, σε συνδυασμό με το φως, δημιούργησε νέα προοπτική για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στο φαινόμενο της γένεσης της ηλεκτρικής ενέργειας από το φως που απορροφάται από διάταξη υλικών. Εξετάζονται αναλυτικά όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή ενός ΦΒ στοιχείου κατά τη μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική και διερευνώνται τα όριά της. Θεμελιώνονται οι βασικές έννοιες και η ορολογία της ΦΒ παραγωγής ενέργειας και εξετάζεται η σχέση εξάρτησης της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Παρόμοια αναλυτική εξέταση γίνεται και για τη βιομηχανική μονάδα φωτοβολταϊκής παραγωγής, το ΦΒ πλαίσιο καθώς και τους συνδυασμούς τους σε ΦΒ συστοιχία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία και οι δυνατότητες των ηλεκτρικών συσσωρευτών, δεδομένης της σημασίας τους στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Εξετάζεται, σε συντομία, η λειτουργία και η σημασία των ηλεκτρονικών συσκευών που απαιτούνται σ' ένα ΦΒ σύστημα, προκειμένου να μεταφερθεί, να αποθηκευτεί ή να μετατραπεί η παραγόμενη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά στην παρουσίαση της μεθοδολογίας υπολογισμού των υποσυστημάτων ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Προηγείται θεωρητική ανάλυση για τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών τους, δηλαδή της ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχίας και της χωρητικότητας του συσσωρευτή, με απαίτηση πλήρους κάλυψης του ημερήσιου φορτίου ζήτησης και δυνατότητα αυτονομίας αποθήκευσης ορισμένων ημερών το μήνα. Προσδιορίζονται, επίσης, οι ηλεκτρικές διατάξεις ελέγχου και μετατροπής-προσαρμογής ηλεκτρικών τάσεων καθώς και το κατάλληλο ηλεκτροπα-

ραγωγό ζεύγος, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή σε περιόδους αδυναμίας του συστήματος. Το κεφάλαιο συμπληρώνεται με μερικά αντιπροσωπευτικά παραδείγματα ΦΒ εφαρμογών.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται στη μελέτη των ΦΒ υβριδικών συστημάτων. Εξετάζονται οι κύριες μεθοδολογίες προσδιορισμού του μεγέθους των βασικών υποσυστημάτων τους, δηλαδή της ΦΒ συστοιχίας, της ανεμογεννήτριας (ΑΓ) και του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (H/Z), αν περιλαμβάνεται. Για διευκόλυνση της μελέτης τους, προηγείται μια σύντομη αναφορά στην αιολική ενέργεια και σκιαγραφείται η μεθοδολογία υπολογισμού του μεγέθους ανεμογεννήτριας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων σχετικών εφαρμογών. Τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν μειωμένη στοχαστικότητα σε σχέση με κάθε μια από τις συνδυαζόμενες ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές κι αυτό αποτελεί το βασικό πλεονέκτημά τους. Η εξέταση του ολικού κόστους του υβριδικού συστήματος σ' όλη τη διάρκεια ζωής του, με αναγωγή του σε ολικό κόστος πρώτου έτους εγκατάστασης (μέθοδος υπολογισμού κόστους κύκλου ζωής του συστήματος, LCC), οδηγεί στο βέλτιστο συνδυασμό των συνιστωσών του συστήματος, για την κάλυψη των φορτίων ζήτησης της εφαρμογής.

Κάθε κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σειρά προτεινομένων ερωτήσεων και προβλημάτων, απαραίτητων για την εμπέδωση των θεμάτων του κεφαλαίου. Η προσεκτική επιλογή, εκ μέρους του διδάσκοντα, των θεμάτων που θεωρεί ως σημαντικότερα για τον τελικό σκοπό του μαθήματος, ως μέρους ενός συνολικού προγράμματος σπουδών, θα βοηθήσει ιδιαίτερα στην επιτυχία των στόχων του παρόντος συγγράμματος. Είναι γεγονός, πάντως, ότι η ουσιαστική αφομοίωση και κατανόηση των θεμάτων αυτών απαιτεί και εργαστηριακή εμπέδωσή τους, μέσα από μια σειρά καλά μελετημένων εργαστηριακών ασκήσεων, ώστε ο διδασκόμενος να αποκτήσει και πρακτική εμπειρία επί του αντικειμένου.

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις εγκάρδιες ευχαριστίες μου στους συναδέλφους και φίλους, Παναγιώτη Τζανετάκη, αναπληρωτή καθηγητή του Φυσικού τμήματος του Πανεπιστημίου Κρήτης και Μιχάλη Κτενιαδάκη, Μηχανολόγο-Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, επίκουρο καθηγητή του ΤΕΙ Κρήτης, για την καλοσύνη τους να αφιερώσουν αρκετό απ' τον πολύτιμο χρόνο τους στην ανάγνωση τμημάτων του βιβλίου αυτού και να συμβάλουν, με τις εύστοχες υποδείξεις και παρατηρήσεις τους και την εποικοδομητική κριτική τους, στην ουσιαστική βελτίωση του κειμένου του.

Ιωάννης Φραγκιαδάκης

Σχόλια του συγγραφέα για τη 2η έκδοση του βιβλίου

Στα πλαίσια της προετοιμασίας της δεύτερης έκδοσης του συγγράμματος έγιναν σημαντικές βελτιώσεις στα κείμενα της πρώτης έκδοσης, με σκοπό την ολοκληρωμένη παρουσίασή του. Στην προσπάθεια αυτή, πολύτιμες υπήρξαν οι εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις πολλών συναδέλφων, που μου έκαναν την τιμή να το μελετήσουν με κριτική διάθεση, καθώς και των σπουδαστών που το χρησιμοποίησαν ως διδακτικό βοήθημα. Αισθάνομαι την υποχρέωση να τους ευχαριστήσω εγκάρδια για τη σημαντική βοήθειά τους. Ιδιαίτερος, θέλω να ευχαριστήσω το συνάδελφο Φώτη Μαυροματάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Γ.Τ.Θ.Ε. του ΤΕΙ Κρήτης, τον Δρ. Φυσικό κ. Εμμ. Στρατάκη, Επιστημονικό Συνεργάτη του ΤΕΙ Κρήτης και τον κ. Ιωάννη Πνευματικό, Λέκτορα στο τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για τις εύστοχες και ουσιαστικές υποδείξεις τους.

Έχω την ελπίδα, η προσπάθεια αυτή να επιτύχει του στόχου της και η δεύτερη έκδοση του συγγράμματος να ανταποκριθεί πλήρως, τόσο στις επιστημονικές και εκπαιδευτικές απαιτήσεις και ανησυχίες διδασκόντων και σπουδαστών, όσο και στις προσδοκίες εκείνων που θα το αξιοποιήσουν στις επαγγελματικές τους δραστηριότητες, ως πηγή αναφοράς στα θέματα της Φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και των εφαρμογών της.

Σχόλια του συγγραφέα για την 3η έκδοση του βιβλίου

Με την ευκαιρία της 3ης έκδοσης του βιβλίου αυτού, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που, είτε με τις εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις τους, είτε με την εμπιστοσύνη τους στις προηγούμενες εκδόσεις, συνέβαλαν στη συνέχιση της προσπάθειας αναβάθμισης και ολοκλήρωσής του.

Σχόλια του συγγραφέα για την 4η έκδοση του βιβλίου

Η τέταρτη έκδοση του βιβλίου βασίστηκε στη γενικότερη βελτίωση του κειμένου κυρίως, όμως, στην εκτεταμένη επικαιροποίηση των δεδομένων εξέλιξης της τεχνολογίας των ΑΠΕ. Η δραματική πτώση του ειδικού κόστους των φωτοβολταϊκών (€/Wp), μετά το 2007, δημιούργησε νέα δεδομένα στη συμμετοχή τους στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές αλλαγές συμβαίνουν και στον τομέα της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, με βελτιώσεις της τεχνολογίας των συσσωρευτών.

Τα νέα δεδομένα καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τις βελτιωτικές επεμβάσεις, τόσο στο κυρίως κείμενο, όσο και στα αναλυτικά παραδείγματα και στις προτεινόμενες ασκήσεις των κεφαλαίων του βιβλίου, μερικές απ' τις οποίες αναθεωρήθη-

καν ριζικά. Θεωρήθηκε, επίσης, σκόπιμο να παρουσιαστεί αναλυτικά, η διαδικασία της αμφίδρομης λειτουργίας αυτοπαραγωγικού συστήματος ΑΠΕ συνδεδεμένου στο δίκτυο. Αναφερόμαστε στο σύστημα net-metering, που φαίνεται να παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα για μεμονωμένους αυτοπαραγωγούς, ΟΤΑ και συνεταιρισμούς.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή

Οι συμβατικές και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	1
I. Η ενέργεια ως στόχος και ως προοπτική ανάπτυξης	1
II. Οι πηγές ενέργειας σήμερα	3
II.α. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	3
II.β. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	6
III. Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας	16

1ο Κεφάλαιο

Η Ηλιακή ακτινοβολία

1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	23
1.1.1 Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	23
1.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	29
1.1.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη της ΗΜ ακτινοβολίας	30
1.1.2.2 Φωτομετρικά μεγέθη	37
1.2 Η ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης	39
1.2.1 Ο ήλιος	39
1.2.2 Η ακτινοβολία του ήλιου	40
1.2.3 Η ηλιακή σταθερά	40
1.2.4 Στοιχεία ατμοσφαιρικής Φυσικής	41
1.2.4.1 Τα κύρια αέρια της ατμόσφαιρας και η σημασία τους	44
1.2.4.2 Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας	46
1.2.4.3 Η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης στη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας	46
1.2.5 Ολική, απευθείας, διάχυτη και διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία. Ορολογία ...	55
1.3 Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας και της φασματικής της κατανομής	63
1.4 Η κίνηση της γης γύρω απ' τον ήλιο. Οι συντεταγμένες της θέσης του ήλιου σε σύστημα παρατηρητή	67
1.4.1 Χρόνος ανατολής – δύσης ήλιου. Διάρκεια ημερήσιου τόξου	72
1.5 Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο	74
1.6 Ηλιοφάνεια	76

1.7	Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος	77
1.8	Εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας	78
1.8.1	Δυνατότητα αξιοποίησης της ΦΒ ενέργειας	80
1.9	Προσανατολισμός του συλλέκτη	82
1.9.1	Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη	82
1.9.2	Προσανατολισμός συλλέκτη ως προς τον αληθή Νότο	85
1.9.2.1	Προσδιορισμός του αληθούς Νότου	85
1.9.2.2	Ο αληθής ηλιακός χρόνος και η Εξίσωση του Χρόνου	85
1.9.2.3	Προσδιορισμός του αληθούς Νότου με βάση τον τοπικό ωρολογιακό χρόνο	88
1.9.3	Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμούς τους	90
1.9.3.1	Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης. Γωνία κλίσης για βέλτιστη ενεργειακή απολαβή συλλέκτη	90
1.9.3.2	Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της γωνίας κλίσης του συλλέκτη	94
1.9.3.3	Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από ένα ή δύο άξονες	95
1.10	ΦΒ συλλέκτες ειδικής διαμόρφωσης	99
1.10.1	ΦΒ πλαίσια συγκεντρωτικού τύπου	99
1.10.2	ΦΒ συστήματα μέσης και χαμηλής συγκέντρωσης	101
1.11	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών ΦΒ συγκροτήματος	102
	Μοντέλο προσδιορισμού της απόστασης μεταξύ διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών	104
	Ερωτήσεις και προβλήματα	110

2ο Κεφάλαιο

Στοιχεία από τη Φυσική Στερεάς Κατάστασης.

Η επαφή ημιαγωγών τύπου p και n

2.1	Η έννοια της διάχυσης	117
2.2	Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή της επαφής δύο σωμάτων	120
2.2.1	Ο ρόλος του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου	122
2.3	Ημιαγωγοί. Επαφή p-n ημιαγωγών	123
2.3.1	Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών	123
2.3.2	Διάκριση των υλικών με κριτήριο την αγωγιμότητά τους, σύμφωνα με τη θεωρία ζωνών	128
2.3.3	Στατιστική Fermi σε μέταλλα και ημιαγωγούς	129
2.3.3.1	Μέταλλα	130

2.3.3.2	Ενδογενής ημιαγωγός	132
2.3.3.3	Οι συγκεντρώσεις των φορέων στον ενδογενή ημιαγωγό	133
2.3.4	Ημιαγωγοί πρόσμειξης	135
2.3.5	Επαφή ημιαγωγών p-n	138
2.3.5.1	Η στάθμη Fermi στην επαφή p-n	142
2.3.5.2	Τάξη μεγέθους ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου	143
2.4	Ηλεκτρική συμπεριφορά της επαφής p-n	143
2.4.1	Εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικής τάσης στην πραγματική επαφή p-n	143
2.4.2	Φορείς πλειονότητας και μειονότητας	145
2.4.3	Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης μιας επαφής p-n	149
2.4.4	Τάση διάσπασης επαφής	152
	Ερωτήσεις και προβλήματα	153

3ο Κεφάλαιο

Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

3.1	Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την ύλη	159
3.1.1	Φωτοαγωγιμότητα	163
3.1.2	Εύχρηστη μορφή της σχέσης E-λ	164
3.2	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	165
3.2.1	Οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου στους ημιαγωγούς	165
3.2.2	Λεπτομέρειες εσωτερικών διεργασιών. Το ηλεκτρικό πεδίο επαφής και ο ρόλος του	165
3.2.3	Τα ηλεκτρικά ρεύματα στο εσωτερικό ενός ΦΒ στοιχείου	168
3.2.4	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	169
3.2.5	Ηλεκτρική συμπεριφορά φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου	171
3.2.6	Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου	173
3.2.7	Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος	174
3.2.8	Καμπύλη φόρτου	175
3.2.9	Το ΦΒ φαινόμενο... περιληπτικά	176
3.3	Η τεχνολογία του ΦΒ στοιχείου	177
3.3.1	Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n ΦΒ στοιχείων	177
3.3.2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου	181
3.3.2.1	Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων	183
3.3.2.2	Οργανικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία	184
3.3.3	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ΦΒ στοιχείου. Αντιαντακλαστική επίστρωση	186
3.4	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	188
3.4.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου	188

3.4.2	Η καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου	190
3.4.3	Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων. Η έννοια της ισχύος αιχμής	191
3.4.4	Εξάρτηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας	192
3.4.5	Παράγων πλήρωσης ΦΒ στοιχείου	193
3.4.6	Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου	194
3.4.6.1	Εξάρτηση της ισχύος αιχμής και της απόδοσης του ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας	196
3.4.6.2	Θεωρητικό όριο της απόδοσης των ΦΒ στοιχείων	197
3.4.6.3	Αναλυτικός προσδιορισμός του ιδανικού ορίου απόδοσης των ΦΒ στοιχείων	198
3.4.7	Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	205
3.4.8	ΦΒ στοιχεία ειδικής σχεδίασης, βελτιωμένης απόδοσης	209
3.5	Μείωση κόστους των φωτοβολταϊκών με την εξέλιξη της τεχνολογίας	210
3.6	Τρόποι σύνδεσης ΦΒ στοιχείων	211
3.7	Το Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	213
3.7.1	Κατασκευαστικά στοιχεία	213
3.7.2	Η ονομαστική ισχύς ενός ΦΒ πλαισίου. Συνθήκες κανονικής λειτουργίας	217
3.8	Απόδοση του ΦΒ πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν	218
3.8.1	Συντελεστής απόδοσης του ΦΒ πλαισίου	218
3.8.1.1	Αναλυτική παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν το συντελεστή απόδοσης	221
3.8.2	Κατανομή θερμοκρασίας σε ΦΒ πλαίσιο	227
3.8.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου. Εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία κυψελίδας του ΦΒ πλαισίου	228
3.8.4	Πειραματικά αποτελέσματα για την εξάρτηση της μέγιστης ισχύος ΦΒ πλαισίου από τη θερμοκρασία	230
3.8.5	Σημείο λειτουργίας του ΦΒ πλαισίου κάτω από διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας	232
3.9	Προβλήματα σκίασης ή βλάβης ενός ΦΒ στοιχείου του πλαισίου. Διατάξεις προστασίας της λειτουργίας των ΦΒ πλαισίων	233
3.10	Επιμερισμός του κόστους κατασκευής του ΦΒ πλαισίου	235
3.11	Το ΦΒ σύστημα	236
3.11.1	Συντελεστής απόδοσης ΦΒ συστοιχίας	238
3.11.2	Βασική μορφή ενός ΦΒ συστήματος	241
	Ερωτήσεις και προβλήματα	244

4ο Κεφάλαιο

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και διαχείριση ισχύος σε ΦΒ συστήματα

4.1	Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές	253
4.1.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή	253
4.1.2	Συσσωρευτής Μολύβδου - Θεικού οξέος (Pb/H ₂ SO ₄)	256
4.1.3	Χρόνος ζωής συσσωρευτή	260
4.1.4	Προσδιορισμός της κατάστασης φόρτισης συσσωρευτή (State Of Charge, SOC)	261
4.1.5	Εξάρτηση της χωρητικότητας συσσωρευτή από τους κύκλους λειτουργίας του με δεδομένο βάθος εκφόρτισης	263
4.1.6	Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή	264
4.1.6.1	Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Πάγωμα του ηλεκτρολύτη	265
4.1.7	Αναγωγή της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία αναφοράς	266
4.1.8	Ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή	266
4.1.9	Αυτοεκφόρτιση συσσωρευτή	267
4.1.10	Απόδοση ενέργειας και φορτίου	267
4.1.11	Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή	268
4.1.12	Καμπύλη φόρτου σε ΦΒ σύστημα με και χωρίς συσσωρευτές	268
4.2	Τα ηλεκτρονικά των φωτοβολταϊκών	272
4.2.1	Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή	272
4.2.2	Μετατροπείς (converters) DC-DC, DC-AC και AC-DC	275
	Ερωτήσεις και προβλήματα	281

5ο Κεφάλαιο

Φωτοβολταϊκά συστήματα

5.1	Χαρακτηριστικά, κατηγορίες και σύνθεση των ΦΒ συστημάτων	285
5.1.1	Χαρακτηριστικά των ΦΒ συστημάτων	285
5.1.2	Κατηγορίες και σύνθεση ΦΒ συστημάτων	285
5.2	Αυτόνομα ΦΒ συστήματα	289
5.2.1	Ροή ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στην κατανάλωση	289
5.2.2	Μελέτη - σχεδιασμός αυτόνομου ΦΒ συστήματος	291
5.2.3	Καθορισμός των υποσυστημάτων ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Κάλυψη των ημερησίων ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής	291
5.2.3.1	Συσχέτιση παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα ΦΒ σύστημα	292
5.2.3.2	Ημερήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	293
5.2.3.3	Ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια φορτίων κατανάλωσης	293
5.2.3.4	Ενεργειακό ισοζύγιο ημερησίως παραγόμενης-καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας	293

5.2.3.5	Συντελεστές απωλειών μεταφοράς ενέργειας	295
5.2.3.6	Συντελεστές απόδοσης ΦΒ συστοιχίας - ΦΒ συστήματος	297
5.2.3.7	Λόγος επίδοσης ΦΒ συστοιχίας - ΦΒ συστήματος	297
5.2.3.8	Αποδοτικότητα ΦΒ συστοιχίας - Συντελεστής χρησιμοποίησης	299
5.2.4	Στιγμαϊκές και μέσες τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών της ηλιακής ακτινοβολίας και της αποδιδόμενης μέγιστης ισχύος ΦΒ ενέργειας	302
5.2.5	Συσχέτιση της ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχίας με την παραγόμενη απ' αυτήν ηλεκτρική ισχύ	304
5.2.6	Συσχέτιση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με την ονομαστική δυνατότητα μιας ΦΒ συστοιχίας	305
5.2.6.1	Εμπειρική σχέση προσδιορισμού του λόγου επίδοσης PR_T	307
5.2.7	Ισοδύναμοι χρόνοι ηλιοφάνειας και αποδοτικότητας ΦΒ συστοιχίας	311
5.2.8	Υπολογισμός της ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχίας	313
5.2.8.1	Ενεργειακά στοιχεία που προσδιορίζουν το φωτοβολταϊκό δυναμικό ενός τόπου	314
5.2.9	Υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας της συστοιχίας συσσωρευτών ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος	317
5.2.9.1	Εκτίμηση των οριακών τιμών του βάθους εκφόρτισης συσσωρευτή ..	319
5.3	Καθορισμός της ΦΒ συστοιχίας	321
5.3.1	Σχεδιασμός - Κριτήρια	321
5.3.2	Οικονομικά στοιχεία	326
5.4	Προσδιορισμός αυτόνομου ΦΒ συστήματος με απαίτηση αυτονομίας ορισμένων ημερών	330
5.4.1	Ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας για κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων η συννεφιασμένων ημερών αυτονομίας	331
5.4.2	Χωρητικότητα συσσωρευτή με βάση την αυτονομία του ΦΒ συστήματος για η συννεφιασμένες ημέρες	333
5.4.3	Κόστος ενέργειας αυτόνομου ΦΒ συστήματος σε σχέση με τις ημέρες αυτονομίας	334
5.4.4	Ενεργειακή αποδοτικότητα ΦΒ πλαισίων διαφορετικής τεχνολογίας	340
5.5	Παραδείγματα υπολογισμού αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση την αυτονομία του συσσωρευτή	344
	Παράδειγμα 1. Αυτόνομο ΦΒ φωτιστικό δρόμων και δημόσιων χώρων	344
	Παράδειγμα 2. Υπολογισμός ΦΒ συστήματος για παραθεριστική κατοικία	346
	Παράδειγμα 3. Μελέτη αυτόνομου ΦΒ αντλητικού συστήματος	352
	Ερωτήσεις και προβλήματα	365

6ο Κεφάλαιο

ΦΒ Υβριδικά Συστήματα

6.1	Αιολική ενέργεια	371
6.1.1	Η ταχύτητα του ανέμου	371
6.1.1.1	Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος	379
6.1.1.2	Επίδραση μεμονωμένων εμποδίων στη ροή του ανέμου	379
6.1.2	Ισχύς κινητικής ενέργειας ανέμου	380
6.1.3	Ανεμογεννήτριες	381
6.1.3.1	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια	381
6.1.4	Αιολικά συστήματα	383
6.1.5	Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική	383
6.1.6	Μεθοδολογία καθορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ	388
6.1.6.1	Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος ανεμογεννήτριας	389
6.1.6.2	Διαδοχικά βήματα προσδιορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ. Περίπτωση πλήρους κάλυψης φορτίου	395
6.1.6.3	Αιολικό υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους	397
6.2	ΦΒ υβριδικά συστήματα	397
6.2.1	Σχεδιασμός ΦΒ υβριδικού συστήματος	399
6.2.2	Στατιστικός υπολογισμός των συντελεστών $CF_{\Phi B}$ και $CF_{ΑΓ}$, με βάση τα ηλιακά και ανεμολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης	403
6.2.3	Αναλυτική παρουσίαση των βασικών μεθοδολογιών υπολογισμού ενός ΦΒ υβριδικού συστήματος	405
6.2.3.1	ΦΒ υβριδικό σύστημα με ΑΓ και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας	407
6.2.3.2	ΦΒ υβριδικό σύστημα, με ΑΓ και συσσωρευτή, σε συνεργασία με συμβατική ενεργειακή πηγή. Μέθοδος προσδιορισμού του συστήματος με βάση το ελάχιστο κόστος κύκλου ζωής του ΦΒ υβριδικού συστήματος	411
6.3	Η αμφίδρομη λειτουργία συστήματος ΑΠΕ συνδεδεμένου στο δίκτυο (Net metering)	422
6.3.1	Η έννοια του ενεργειακού συμψηφισμού (net metering)	422
6.3.2	Νομοθεσία	423
6.3.3	Καταμέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ΦΒ συστήματα με τη διαδικασία net metering	425
6.3.4	Το προφίλ της ημερήσιας μεταβολής της κατανάλωσης της εφαρμογής	426
6.3.5	Παράδειγμα εφαρμογής της διαδικασίας net metering	427
	Ερωτήσεις και προβλήματα	432

Παραρτήματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αναγωγή τιμών πυκνότητας ισχύος και ενεργειακής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας, από οριζόντιο σε κεκλιμένο επίπεδο	439
---	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Θερμικό μοντέλο ΦΒ πλαισίου – Θερμοκρασία κυψελίδας ΦΒ πλαισίου	451
---	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Τεχνικά στοιχεία ΦΒ συστημάτων	458
--------------------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Χάρτες κατανομής της μέσης ετησίως ημερήσιας απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας, βέλτιστης γωνίας κλίσης ΦΒ συστοιχιών και ενεργειακής αποδοτικότητας σταθερών και ηλιοτροπικών ΦΒ συστημάτων	463
--	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα	469
--	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Ορολογία Φωτοβολταϊκής τεχνολογίας	476
--	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	485
---------------------------	------------

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ	487
-----------------------------	------------

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συμβατικές και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ι. Η ενέργεια ως στόχος και ως προοπτική ανάπτυξης

Η ενέργεια απετέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σ' όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητές που του παρείχε απλόχερα η ίδια η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του.

Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, για ριζική επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος. Η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα, όμως, δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία μας να διασφαλίσουμε την ελεγχόμενη παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας.

Συνάμα, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας κυρίως της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων.

Όλα τα μηνύματα έδειχναν πια καθαρά, ότι η συνέχιση της πορείας μας στο μέλλον επιβάλλει την αλλαγή της καθημερινής νοοτροπίας μας και την αναθεώρηση των αξιών της ζωής, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της έννοιας και των στόχων της τεχνολογικής ανάπτυξης. Είναι πολύ σημαντικό και επιπλέον εξαιρετικά χρήσιμο για την ορθή επιλογή των μέτρων περιβαλλοντικής αποκατάστασης, να συνειδητοποιήσουμε το εντυπωσιακά μεγάλο μέγεθος της χρονικής απόκρισης του φυσικού μας κόσμου, σε κλιματικές μεταβολές. Απαιτούνται δε-

καετίες για να διαπιστωθούν τα πρώτα ενθαρρυντικά θετικά αποτελέσματα, των όποιων σημερινών διορθωτικών επεμβάσεων μας στο οικολογικό σύστημα. Η αποδοχή των ριζικών αυτών αλλαγών στον τρόπο ζωής μας καθώς και στην τροποποίηση του είδους και του τρόπου παραγωγής ενέργειας και στόχων της τεχνολογίας, είναι η πιο δύσκολη φάση προσαρμογής μας στη νέα κατάσταση. Η ανησυχία και ο σκεπτικισμός των ολίγων οικολόγων, κάποτε, αποτελεί σήμερα καθημερινό προβληματισμό των περισσότερων.

Η διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992, προσδιόρισε το πρόβλημα στις πραγματικές του διαστάσεις, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για τη σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Αιτία; Οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των αναπτυσσόμενων χωρών. Στην επόμενη διάσκεψη στο Κιότο της Ιαπωνίας, το Δεκέμβριο του 1997, υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο (Πρωτόκολλο του Κιότο) και τέθηκε τελικά σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Δυστυχώς, η εφαρμογή του δεν βρίσκει όλα τα κράτη πρόθυμα να ανταποκριθούν στις δεσμεύσεις που προβλέπει. Το Δεκέμβριο του 2012, στην Ντόχα του Κατάρ αποφασίστηκε η επέκταση, μέχρι το 2020, της ισχύος του Πρωτοκόλλου του Κιότο, που προέβλεπε μείωση των εκπομπών ρυπογόνων αερίων κατά 5,2%, κάτω από τα επίπεδα του 1990. Στην ΕΕ, τα κράτη μέλη και η Ισλανδία έχουν δεσμευτεί να επιτύχουν από κοινού μείωση των συνδυασμένων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, μέχρι το 2020, κατά 20%, σε σύγκριση με το επίπεδο του 1990.

Πάντως, παρά τις αντιδράσεις των ολίγων, αλλά ισχυρών αυτού του κόσμου, η ευαισθητοποίηση και η κινητοποίηση των πολιτών ολοένα και αυξάνει. Η εκφραζόμενη, ποικιλοτρόπως, πρόθεση αντιμετώπισης του θέματος σε διεθνή κλίμακα, δείχνει ότι συνειδητοποιούμε αργά, αλλά σταθερά, πως η τεχνολογία, ως καρπός ανώτερης πνευματικής εργασίας, πρέπει να έχει στόχο να θεραπεύει και να υπηρετεί τον άνθρωπο, με σεβασμό προς το οικοσύστημα που τον φιλοξενεί. Αυτό το οικοσύστημα, χώρος ανάπτυξης και διαβίωσης όλων των μορφών ζωής, δεν είναι υπόθεση μερικών ανθρώπινων γενεών. Χρειάστηκαν 5 δισεκατομμύρια χρόνια για να εξιδανικευτούν οι κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη μας, σε τέτοιο βαθμό, που να συμβάλλουν στη δημιουργία της ζωής.

Είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο, η σημαντική συμβολή των πηγών ενέργειας μεγάλης ισχύος στην τεχνολογική πρόοδο, απ' την οποία προέκυψαν πολλά θετικά αποτελέσματα. Μέσα από την ιστορική αναγκαιότητα των συμβατικών καυσί-

μων ξεπήδησαν νέες και συνεχώς βελτιώνονται παλαιότερες μέθοδοι, εξευγενισμένης παραγωγής ενέργειας, χωρίς πρακτικά οικολογικές επιβαρύνσεις. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες.

II. Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του, διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με πεπερασμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές, που καθημερινά και αέναα, μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες, που χαρακτηρίζονται ως **μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας** ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, γαιάνθρακας, φυσικό αέριο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δεύτερες, οι **ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**, έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη απ' τον Ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (Ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλασσίων ρευμάτων. Απορροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

II.a. Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

► Ορυκτά καύσιμα

Στα ορυκτά καύσιμα ανήκουν ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Ο γαιάνθρακας (Λιθάνθρακας, λιγνίτης, τύρφη)

Ονομάζεται, έτσι, κυρίως ο άνθρακας που εξορύσσεται από τη Γή (Ορυκτός άνθρακας), σε αντιδιαστολή των άλλων ανθράκων όπως του ξυλάνθρακα, του οπτάνθρακα (κωκ) κ.λπ.. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα διακρίνονται: σε: λιθάνρακες, φαιάνθρακες (Λιγνίτες) και τύρφη. Απετέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σ' αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση του ορυκτού άνθρακα.

Το πετρέλαιο

Ήταν γνωστό από την αρχαιότητα, στους Εβραίους και τους Αιγυπτίους. Στη Δύση, γινόταν περιορισμένη χρήση του σε φωτισμό και την ιατρική, μέχρι το τέλος του 15^{ου} αιώνα, οπότε άρχισε η βιομηχανική του εκμετάλλευση. Η παγκόσμια παραγωγή του εντατικοποιήθηκε από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ενώ από τα μέσα του 20^{ου}, οι ρυθμοί εκμετάλλευσης πήραν εκρηκτικές διαστάσεις. Σήμερα, μετά από δύο πετρελαϊκές κρίσεις (1973 και 1979) και τη διαπίστωση ορατών πλέον επιπτώσεων στο περιβάλλον μας, συνειδητοποιούμε την ανάγκη αλλαγής του τρόπου ζωής μας και αναζήτησης λύσεων από το χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, αποκτά ιδιαίτερο νόημα η εφαρμογή αυστηρότερης πολιτικής στον τομέα της ορθολογικής χρήσης και εξοικονόμησης ενέργειας.

Τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55%, στις υπό ανάπτυξη. Στις τελευταίες, το ποσοστό χρήσης πετρελαίου, ως ενεργειακής πηγής, συνεχίζει να αυξάνει, ενώ στις αναπτυγμένες χώρες παρατηρείται τάση μείωσής του, με σταδιακή διεύρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματά των πηγών αυτών θα επαρκέσουν ακόμα για περίπου 200 χρόνια για το κάρβουνο, 60 χρόνια για το φυσικό αέριο και 50 χρόνια για το πετρέλαιο.

Η καύση του άνθρακα, του πετρελαίου και των παραγώγων του δίδει, ως άμεσα προϊόντα, το CO₂, τα οξείδια του αζώτου και του θείου. Οι αυξημένες ποσότητες των αερίων αυτών, που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, αποτελούν πια μόνιμη απειλή για το μέλλον μας, προκαλώντας ισχυρές κλιματικές αλλαγές και επιβαρυντική απόκλιση από τις κανονικές συνθήκες ισορροπίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Το φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο είναι μείγμα υδρογονανθράκων, αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο. Είναι άχρωμο, αόρατο και άοσμο. Εξορύσσεται από υπόγειες κοιλότητες του στερεού φλοιού της γης, όπου σχηματίστηκε προ εκατομμυρίων ετών, από ποσότητες οργανικής ύλης (φυτών και μικρών θαλάσσιων ζώων), που θάφτηκαν εκεί, με τρόπο παρόμοιο με τον τρόπο σχηματισμού του πετρελαίου. Μεταφέρεται υπό πίεση από τον τόπο εξόρυξης προς τους τόπους αξιοποίησης με κατάλληλους αγωγούς. Χρησιμοποιείται για θέρμανση οικιών και βιομηχανικών μονάδων, κίνηση οχημάτων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για λόγους προστασίας, προσδίδεται τεχνητά χαρακτηριστική οσμή, ώστε να γίνεται αντιληπτό σε τυχόν διαρροές. Σημαντικό πλεονέκτημα του αποτελεί η φιλικότερη προς το περιβάλλον καύση του σε σχέση με το πετρέλαιο και το κάρβουνο.

♦ Η πυρηνική ενέργεια

Από το 1945 και μετά, προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Η Γαλλία είναι από τις χώρες που έδωσαν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη της, χρησιμοποιώντας, κατά την περίοδο της δεκαετίας του 70, το μη πειστικό πια επιχείρημα της παραγωγής καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αντιλαμβανόμαστε με απόγνωση, την αδυναμία μας να λύσουμε το πρόβλημα της ανεξέλεγκτης διασποράς των πυρηνικών όπλων ή της διασφαλισμένης αποθήκευσης των πυρηνικών αποβλήτων και αισθανόμαστε τρόμο για τα ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά, αυτό στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβανίας (ΗΠΑ), τον Απρίλιο του 1979, εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Ρωσίας, τον Απρίλιο του 1986 και το πιο πρόσφατο, το Μάρτιο του 2013, στη Fukushima της Ιαπωνίας προβλημάτισαν όλο τον κόσμο. Συνειδητοποίησε με τρόμο την αδυναμία του μπροστά στα εκτεταμένα καταστροφικά αποτελέσματα ενός πυρηνικού ατυχήματος, είτε από ανθρώπινο λάθος είτε από ισχυρά φυσικά φαινόμενα.

Η πυρηνική ενέργεια προορίζεται, στο βαθμό που έχει αναπτυχθεί σήμερα, κυρίως για παραγωγή *ηλεκτρισμού βάσης*, δηλαδή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής ισχύος χωρίς δυνατότητα κάλυψης των διακυμάνσεων ζήτησης. Καλύπτει το 4,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 11% της παγκοσμίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε



Σχήμα Ε1. Το πυρηνικό εργοστάσιο της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία, στο οποίο τον Μάρτιο του 2011 προκλήθηκαν εκτεταμένες καταστροφές εξαιτίας ενός μεγάλου σεισμού της και του τσουνάμι που τον ακολούθησε. Σημειώθηκαν εκρήξεις σε αντιδραστήρες του σταθμού και καταγράφηκε διαρροή μεγάλης ποσότητας ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

πυρηνικά εργοστάσια ανέρχεται σε ~402 GW (2018). Στην Ευρώπη φτάνει ~162 GW, με τη Γαλλία στα ~63 GW. Το περιορισμένο των κοιτασμάτων του βασικού υλικού (Ουράνιο 235), τα πυρηνικά απόβλητα και η απειλητική πιθανότητα ολοσχερούς καταστροφής του κόσμου μας, είτε από την υποτιθέμενη υπό έλεγχο πυρηνική αντίδραση είτε από την ανεξέλεγκτη διασπορά των πυρηνικών όπλων, βάζουν φρένο στη χρήση της.

Όλες οι μεγάλης πυκνότητας ισχύος συμβατικές πηγές ενέργειας, εκτός από την αδιαμφισβήτητη προσφορά τους στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης και τη μεγάλη συμβολή τους στη βελτίωση της διαβίωσης του ανθρώπου, συνδέονται δυστυχώς με πολύ σοβαρές και εμφανώς αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Έτσι, ενισχύεται διεθνώς η άποψη για μερική, σε πρώτη φάση, αντικατάστασή τους με άλλες πηγές ενέργειας, που να μη ρυπαίνουν και να ενσωματώνονται φιλικά στο περιβάλλον, τις λεγόμενες *ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*.

II.β. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία. Εξαίρεση αποτελεί, εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων, που οφείλονται στη βαρυτική δράση, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης, καθώς και τη γεωθερμική, όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο.

Υδατόπτωση

Αποτελεί έναν από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος, οικολογικά καθαρής, ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Εκμεταλλευόμαστε την ύπαρξη φυσικών λεκανών συλλογής των ομβρίων υδάτων σε συγκεκριμένες περιοχές, με κατάλληλη εδαφική διαμόρφωση, κατασκευάζοντας φράγματα. Η υδατόπτωση κινεί υδροστροβίλους, που με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος, παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια, μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω του κατακλυσμού με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.



Σχήμα Ε2. Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του Λάδωνα, στην Αρκαδία.

Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλασσίων ρευμάτων

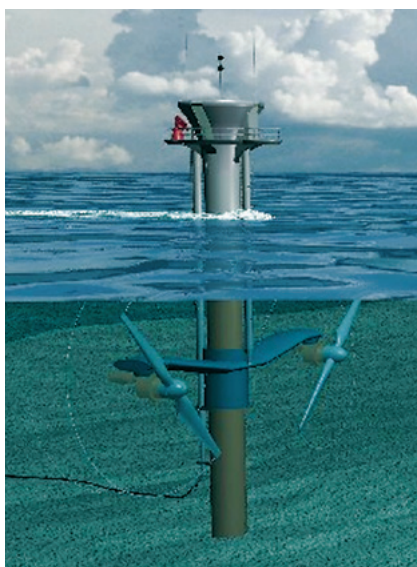
Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλασσίων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στη Βρετάνη της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW. Εντυπωσιακό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματισμό είναι η διάταξη με το όνομα Pelamis (είδος θαλάσσιου φιδιού). Η διάταξη που δείχνεται στη φωτογραφία του σχήματος Ε3α, αποτελείται από τέσσερις κυλίνδρους, με δυνατότητα αρθρωτής κίνησης μεταξύ τους, σε κατακόρυφο επίπεδο. Υπό την επίδραση του κυματισμού αλλάζει η γωνία μεταξύ τους με αποτέλεσμα την άσκηση δυνάμεων σε έμβολα τοποθετημένα άνω και κάτω, στις πλευρές που συνδέονται μεταξύ τους. Έχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ισχύ 750 kW. Σε προχωρημένο πειραματικό στάδιο βρίσκεται επίσης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες, όπως δείχνεται στη σχηματική παράσταση (Σχήμα Ε3β).

Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλασσίων ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερη της τυπικής ταχύτητας των ανέμων. Η εφαρμογή τους, πάντως, πρόκειται να είναι περιορισμένη, σε θέσεις που υπάρχουν ισχυρά θαλάσσια ρεύματα (Σχήμα Ε3β). Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα που μελετάται, αφορά στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων σε ειδικές κατασκευ-

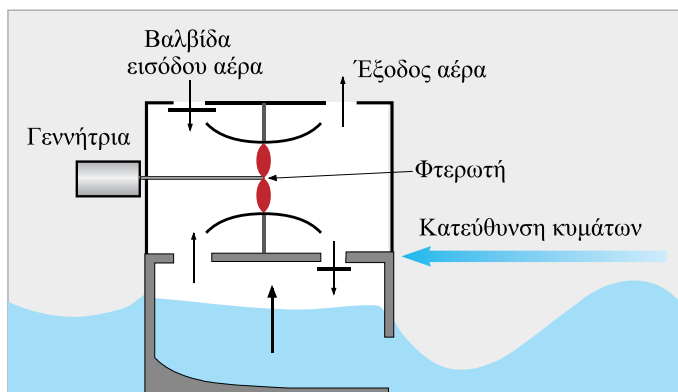
α. Το Pelamis σε λειτουργία. Το πρωτότυπο είναι τοποθετημένο στο European Marine Energy Center, στο Orkney της Σκωτίας.



β. Σχηματική παράσταση υπο-θαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας.



γ. Σχηματική παράσταση συστήματος κίνησης ανεμογεννήτριας με συμπίεση του εσωτερικού αέρα στη διάταξη, με αξιοποίηση του κυματισμού.



Σχήμα Ε3. Διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων (α και γ), της παλλιρροϊκής κίνησης και των θαλασσίων ρευμάτων (β).

ές, στις οποίες ενσωματώνεται ανεμογεννήτρια και μέρος των οποίων είναι βυθισμένο στη θάλασσα (Σχήμα Ε3γ). Κατά τον κυματισμό, ό εισερχόμενος όγκος νερού συμπιέζει τον περιεχόμενο αέρα, ο οποίος, ρέοντας μέσω της κεντρικής χοάνης, θέτει σε περιστροφή τη φτερωτή της ανεμογεννήτριας. Η διάταξη των βαλβίδων εισόδου-εξόδου του αέρα, είναι τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά, ανεξάρτητα από τη φάση συμπίεσης ή εκτόνωσης του εσωτερικού αέρα, κατά τον κυματισμό.

Βιομάζα

Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκοσμίως απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

Γεωθερμική ενέργεια

Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, η θέρμανση των γεωθερμικών ρευστών αποδίδεται κυρίως, στην εκλυόμενη ενέργεια κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών ισοτόπων στο στερεό φλοιό της γης. Όταν η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών είναι χαμηλή, η ενέργειά τους χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών μονάδων, ιχθυοκαλλιεργειών, κ.α., ενώ στις περιπτώσεις που η θερμοκρασία των ατμών είναι υψηλή ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για



Σχήμα Ε4.
Γεωθερμική
γεώτρηση στη
Νέα Κεσσάνη
(Ν. Ξάνθης).

την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανέρχεται^{1α} παγκοσμίως σε ~14,6 GW (2018). Στη χώρα μας^{1β}, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται σε θέρμανση κατοικιών, στην ιχθυοκαλλιέργεια, σε θερμοκηπιακές μονάδες κ.α., σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του Βορειοανατολικού και Κεντρικού Αιγαίου.

Αιολική ενέργεια

Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σήμερα σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Η παγκοσμίως εγκατεστημένη^{2α} ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών, από 7,6 GW, το 1997, έφτασε τα 600 GW το 2018 και αντίστοιχα στην Ευρώπη, τα 179 GW. Στον πίνακα Ε1 αναφέρονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ανεμογεννητριών.

Πίνακας Ε1. Εγκατεστημένη^{2β} ισχύς Αιολικών και Φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες χώρες και παγκοσμίως.

Χώρα		Εγκατεστημένη ισχύς (2018)	
		Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (GW _p)
Ευρώπη	Γερμανία	59,3	45,4
	Ισπανία	23,5	5,9
	Ιταλία	10,0	20,0
	Ολλανδία	4,5	4,2
	Ηνωμένο Βασίλειο (UK)	20,7	13,1
	Ελλάς	2,8	2,7
	Ευρώπη	178,8	122,6
Άλλες χώρες	Ινδία	35,0	21,7
	Ιαπωνία	3,7	55,5
	Κίνα	221,0	174,6
	ΗΠΑ	96,0	63,0
	Παγκοσμίως	600,3	515,0

1α. The Top 10 Geothermal Countries 2018. <http://www.thinkgeoenergy.com/the-top-10-geothermal-countries-2018-based-on-installed-generation-capacity-mwe/>

1β. Το «state of the art» για τις χρήσεις της Γεωθερμίας σε Ευρώπη και Ελλάδα. <https://energypress.gr/news/state-art-gia-tis-hriseis-tis-geothermias-se-eyropi-kai-ellada>

2α. Global Wind Energy Council (GWEC), 2018.

2β. International Energy Agency (I.E.A.), Annual Report 2018 – Renewables 2018, Global Status Report – EUROBSERV'ER, Photovoltaic Energy Barometer 2018.



Σχήμα Ε5. Αιολικό πάρκο στην περιοχή Αχλάδια Σητείας Κρήτης, ισχύος 27,5 MW).

Στη χώρα μας λειτουργούν αρκετά αιολικά πάρκα, με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικές δεκάδες MW, κυρίως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ. Η εγκαταστημένη^{2γ} ισχύς έφτασε στα 2,83 GW (2018). Η ΔΕΗ έχει εγκαταστήσει στον Ελλαδικό χώρο, 24 MW κι απ' αυτά αρκετά στα νησιά (Κύθνος 5×20 kW, Μύκονος 100 kW, Κάρπαθος 175 kW κ.α.). Τα υπόλοιπα έχουν εγκατασταθεί από άλλους φορείς, κυρίως από την Τοπική Αυτοδιοίκηση και ιδιώτες. Στην Κρήτη, όπου η ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων της ΔΕΗ, φθάνει τα 700 MW, λειτουργούν, ήδη, σε αρκετές περιοχές του νησιού μερικά μεγάλα αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος ~152 MW (Λασιθί: Μονή Τοπλού (6,6 MW, Μιτάτο (10,2 MW), περιοχή Αχλάδια (συνολικά, ~30 MW), Χαντράς (9,9 MW), Ξερολίμνη (10,2 MW), Χώνος (συνολικά, ~20 MW) κ.α. μικρότερα. Ηράκλειο: Μεγάλη βρύση (~5 MW), Πρινιάς 3,4 MW)).

Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, σε πολλά σημεία της χώρας μας βρίσκεται σε εξαιρετικά υψηλά επίπεδα για παραγωγή ηλε-

^{2γ}. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), 2018.

κτρικής ενέργειας. Στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μια μέση ετησίως τιμή, από 7 έως 11 m/s, το οποίο υπερκαλύπτει την αποδοτική για τις ανεμογεννήτριες, περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κατ' επέκταση τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών. Συνεπώς, ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

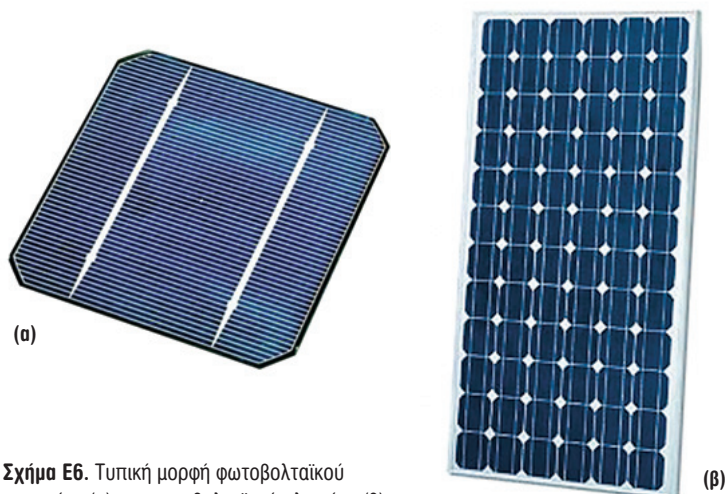
Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (*photovoltaic cell*) είναι, γενικά³, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου.

Όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται προκαλείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα (φωτόρρευμα), ανάλογο της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Η αναπτυσσόμενη σε ένα τυπικό ΦΒ στοιχείο, συνεχής ηλεκτρική τάση ανοικτού κυκλώματος, βρίσκεται στην περιοχή $0,5 \div 0,7$ V, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των $10 \div 40$ mA/cm², για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m².

Η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, παρ' ότι το ΦΒ φαινόμενο είχε παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα από τον Becquerel, το 1839. Το 1954 ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Πυριτίου Si, με σχηματισμό επαφής p-n, με διάχυση και με απόδοση 6%, από τους Fuller, Pearson και Chapin. Οι αρχικές εμπορικές κατασκευές, πολύ υψηλού κόστους (1000 \$/W_p το 1956), με σχετικά μικρή απόδοση 5-10 %, παρασκευάστηκαν από κρυσταλλικά υλικά, κυρίως από κρυσταλλικό Πυρίτιο (c-Si).

Σήμερα οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων από κρυσταλλικό Πυρίτιο, βρίσκονται περί το 22%, για ΦΒ πλαίσια διαστημικών κατασκευών και στο διάστημα 14-18% για βιομηχανική-οικιακή χρήση, το δε κόστος των τελευταίων κυμαίνεται στην περιοχή $0,5 \div 1$ €/W_p (Peak Watt, η έννοια αυτή ορίζεται στην

3. Γενικά, η απορρόφηση φωτός στην επαφή (σύμφυση) δύο σωμάτων προκαλεί το ΦΒ φαινόμενο. Περιορίζουμε στην αναφορά της επαφής ημιαγωγών τύπων p και n, διότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου στοιχείου ανταποκρίνονται σήμερα στις απαιτήσεις μιας βιομηχανικά αξιοποιήσιμης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα Ε6. Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου (α) και φωτοβολταϊκού πλαισίου (β).

§ 3.4.3), για εγκαταστάσεις μικρών συστημάτων, μεγέθους μέχρι μερικά kW_p . Στις εγκαταστάσεις σχετικά μεγάλης ισχύος αιχμής, το κόστος αγοράς ΦΒ πλαισίων, ανά W_p , μειώνεται σε συνάρτηση με το μέγεθος του συστήματος. Σε μεγάλα συστήματα, άνω του MW_p , το κόστος αυτό μειώνεται σχεδόν στο ήμισυ του αντίστοιχου των εγκαταστάσεων μικρής ισχύος.

Κατά τη δεκαετία του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του βασικού φωτοαγωγίμου υλικού. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένη επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού (άμορφο Πυρίτιο, a-Si). Βασίζονται στη μεταφορά και εναπόθεση του υλικού, με τη μορφή ατόμων είτε από στερεό στόχο, με κρούσεις επαρκώς επιταχυνθέντων ιόντων πλάσματος (Sputtering), είτε από λιωμένο υλικό σε συνθήκες υψηλού κενού (Εξαέρωση) είτε κατά τη διάρκεια εκκένωσης αερίου ενώσεως του αποτιθέμενου στοιχείου (Glow Discharge, GD), είτε με καταλυτική θερμική διάσπαση υδρογονούχων ενώσεων Πυριτίου (Σιλάνιο).

Οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ στοιχείου οδήγησαν, τελικά, σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα. Π.χ. με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λειωμένη φάση, παρασκευάστηκαν ΦΒ στοιχεία, με εργαστηριακή απόδοση $\sim 15\%$. Η επιφάνειά τους εμφανίζει μονο-κρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύ-κρυσταλλικό.

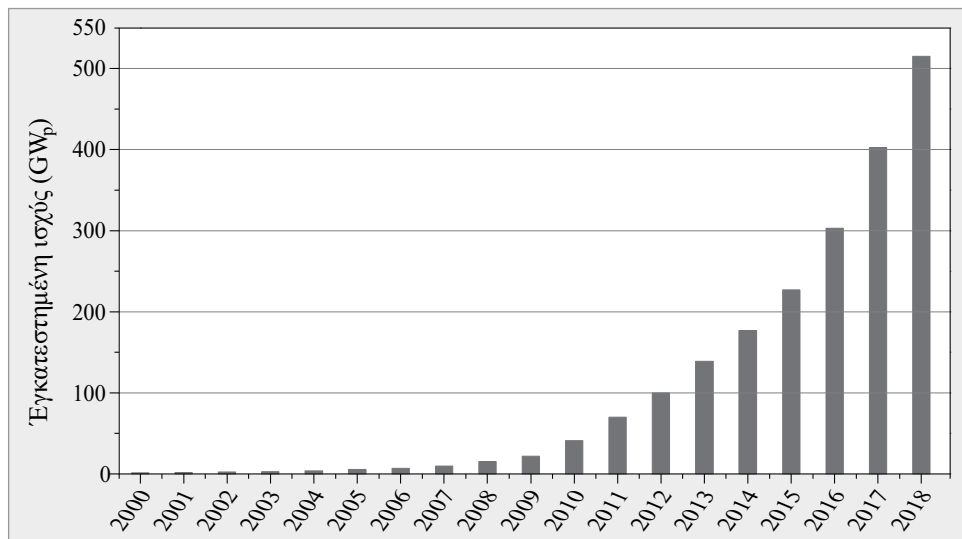


Σχήμα Ε7. Ο φωτοβολταϊκός σταθμός στην Olmedilla, Ισπανία (60 MW_p).

Το πολυ-κρυσταλλικό Πυρίτιο (mc-Si), χρησιμοποιείται για την παρασκευή ΦΒ στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική απόδοση (ΦΒ πλαίσιο) 12-13%, πολύ κοντά στη βιομηχανική απόδοση των ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου. Οι προηγούμενες τιμές απόδοσης είναι ενδεικτικές, εξαρτώμενες από το βασικό υλικό και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διάταξης.

Πολλά ΦΒ στοιχεία ($33 \div 36$) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (*Open circuit*) $17 \div 22\text{V}$. Το πλήθος των ΦΒ στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου-θειικού οξέως ($\text{Pb}/\text{H}_2\text{SO}_4$), ονομαστικής τάσης 12V, όπως αναλύεται στην § 3.7.

Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται *φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module)*, αποτελεί δε τη βασική μονάδα σύνθεσης μεγαλύτερων συστημάτων, που ονομάζονται *συστοιχίες*. Χρησιμοποιείται επίσης, σπανιότερα, η ορολογία, *φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator)*, όταν αναφερόμαστε στο κύριο τμήμα του ΦΒ σταθμού, το οποίο παράγει τη ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια. Η εμπρός επιφάνεια του πλαισίου προστατεύεται από γυάλινη πλάκα, ενώ η πίσω πλευρά καλύπτεται από υγρομονωτική ουσία, υψηλής αντοχής στο χρόνο.



Σχήμα Ε8. Χρονική εξέλιξη της παγκοσμίως εγκατεστημένης ισχύος αιχμής ΦΒ συστημάτων, στο χρονικό διάστημα 2000-2018.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ένα ΦΒ πλαίσιο, κάτω από δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή, όταν συνδεθεί στα άκρα του καταναλωτής κατάλληλης αντίστασης. Η μέγιστη ισχύς σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ΦΒ στοιχείου (πρότυπες συνθήκες), αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται *ισχύς αιχμής* (§ 3.2.7 και 3.4.3). Στο εμπόριο διατίθενται ΦΒ πλαίσια κρυσταλλικού, πολύκρυσταλλικού και αμόρφου Πυριτίου αλλά και άλλων τεχνολογιών, σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές ΦΒ στοιχείων, μερικών W_p , χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως λ.χ. οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ, ΦΒ συστημάτων, χρησιμοποιούνται, συνήθως, ΦΒ πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως ~320 W_p (Τον Μάρτιο του 2019, ανακοινώθηκε από την εταιρεία SunPower, η κατασκευή ΦΒ πλαισίων 400 W_p και 415 W_p).

Η ΦΒ ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα

Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ συστημάτων, από 1,4 GW_p το 2000 (~0,3 GW_p το 1991) έφτασε τα 515 GW_p στο τέλος του 2018 (Πίνακας Ε1 και σχήμα Ε8. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του σχ. Ε8, η εγκατεστημένη ισχύς αιχμής των ΦΒ συστημάτων αυξάνει με υψηλούς ετήσιους ρυθμούς. Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν

εγκατασταθεί ή εγκαθίστανται: στην Κίνα (Tengger Desert Solar Park, 1,55 GW_p), στην Ινδία (Bhadla Solar Park, 2,26 GW_p), στην Ισπανία (Puertollano 47 MW_p, Olmedilla 60 MW_p), Γερμανία (Waldpolenz, 40 MW_p, Fisterwalde, 70 MW_p), Πορτογαλία (Septra 11 MW_p), Ιταλία (Montalto di Castro, 84,2 MW_p), Καναδάς (Santia, 97 MW_p).

Στην Ελλάδα, η εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, ανερχόταν το 2018 σε 2,67 GW_p, εκ των οποίων τα ~373 MW_p αφορούν σε ΦΒ στις στέγες. Στα μη διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό δίκτυο νησιά (περιλαμβανομένης της Κρήτης⁴), η εγκατεστημένη ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκών έφτασε τα 160 MW_p. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς ΦΒ σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύθνο (100 kW_p), στη νήσο Γαύδο (30 kW_p) καθώς και ΦΒ αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα⁵ βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας.

Ενδιαφέρουσα εφαρμογή αποτελούν τα ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kW_p). Μέχρι το 1991, οπότε άρχισε η σταδιακή απόσυρση των εγκαταστάσεών του, βρισκόταν σε λειτουργία στην Αγία Ρουμέλη, κοντά στα Σφακιά (Νοτιοδυτική Κρήτη), ο πρώτος στην Ευρώπη (1982), πιλοτικός ΦΒ σταθμός με ισχύ 50 kW_p, υπό την ευθύνη της ΔΕΗ.

Η ερευνητική δραστηριότητα διεξάγεται, κυρίως, στα Πανεπιστήμια, ΙΤΕ, Κέντρο Ερευνών Δημόκριτος κ.ά. Στο Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο (ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. - πρώην ΤΕΙ Κρήτης), λειτουργεί από το 1992 ένα εξειδικευμένο εργαστήριό του, με το συμβολικό όνομα "Φωτοβολταϊκό Πάρκο" (Παράρτημα Ε). Ξεκίνησε το 1987, με κοινή προγραμματική πρόταση του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. και του Πανεπιστημίου Κρήτης. Περιλαμβάνει πλήρεις εργαστηριακές εγκαταστάσεις και ΦΒ πεδίο με ισχύ, περίπου, 7 kW_p και έχει ως κύριους στόχους την εκπαίδευση, την έρευνα και την ανάπτυξη στον τομέα της ΦΒ τεχνολογίας και των εφαρμογών της.

III. Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας

Στη χώρα μας, τα προγράμματα ανάπτυξης των ΑΠΕ υποστηρίζονται και προωθούνται από πλευράς επίσημης πολιτείας, από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), που είναι ερευνητικός φορέας εποπτευόμενος από τη Γενική

4. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας (Ε.Π.Ε.) Κρήτης (1998). Επίσης, το 2007 ξεκίνησε η διαδικασία αδειοδότησης για εγκατάσταση ΦΒ σταθμών ισχύος 52,5 MW_p στην Κρήτη.

5. Παράρτημα Ε, Πίνακας Π7.

Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) του Υπουργείου Ανάπτυξης, τα Περιφερειακά Ενεργειακά Γραφεία, τη ΔΕΗ, τα Ιδρύματα Τεχνολογίας και Έρευνας, τα Πανεπιστήμια, την Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α.

Εκτός αυτών, διαπιστώνεται αυξημένη δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα, σ'όλο το φάσμα των εφαρμογών των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη τους ενισχύεται από σχετικά προγράμματα της ΕΕ (έρευνα και εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α.).

Σημαντικό βήμα προώθησης των ΑΠΕ στη χώρα μας, μέσα στην τελευταία δεκαετία, μέχρι και το 2010, η θεσμοθέτηση πιο ενισχυτικού νομοθετικού πλαισίου εγκατάστασης και αξιοποίησής τους. Στη συνέχεια, η μεγιστοποίηση των επιπτώσεων της κρίσης στη χώρα μας οδήγησε σε δραστική αναθεώρηση της προηγούμενης ενεργειακής τιμολογιακής πολιτικής στον τομέα των ΑΠΕ και ιδιαίτερα στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς.

Σ' αυτό συνετέλεσε η συνειδητοποίηση, από τις κυβερνήσεις των κρατών, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στον πλανήτη μας, από την αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων (Πρωτόκολλο Κιότο), σε συνδυασμό, βεβαίως, με τα οικονομικά κίνητρα και οφέλη από επενδύσεις στον τομέα των ΑΠΕ.

Η ραγδαία μείωση των τιμών των φωτοβολταϊκών, μετά το 2007, είχε ως αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής kWh από Φωτοβολταϊκά, να είναι πλέον συγκρίσιμο με αυτό της kWh από συμβατικά καύσιμα, με αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για τη δημιουργία νέων μεγάλων ΦΒ μονάδων.

Θεσμικό πλαίσιο

Τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε νέος νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ν. 3468/06), με ιδιαιτέρως ευνοϊκά κίνητρα σε ιδιώτες, αλλά κυρίως σε επιχειρήσεις που σκοπεύουν να επενδύσουν στην παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας. Τα βασικά σημεία-κίνητρα του νέου νόμου είναι:

- Επιδοτείται η αρχική εγκατάσταση σε ποσοστό από 30% έως 55% της αξίας του συστήματος, ενώ επιδοτούμενο είναι και το επιτόκιο σε περίπτωση δανεισμού (Αναπτυξιακός νόμος 3299/04).
- Η τιμή πώλησης της ηλιακής κιλοβατώρας ορίστηκε σε 0,40-0,50 ευρώ ανάλογα με την ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον τόπο εγκατάστασης, μεγαλύτερη στα νησιά και μικρότερη στην ηπειρωτική χώρα.

- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων θα μπορεί να πωλείται στη ΔΕΗ εγγυημένα για μία 20ετία, σε τιμή η οποία θα αναπροσαρμόζεται με βάση τον πληθωρισμό ή τις αυξήσεις των τιμολογίων της ΔΕΗ.
- Η σύμβαση πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ ισχύει για 10 έτη και μπορεί να παρατείνεται για επιπλέον 10, μονομερώς, με έγγραφη δήλωση του παραγωγού.

Τον Ιανουάριο του 2009 ψηφίστηκε ο νόμος 3734/2009, όπου κυρίως τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου και ρυθμίζονται θέματα αδειοδότησης και τιμολόγησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Η σύμβαση εγγυημένης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συνάπτεται για είκοσι (20) έτη, με τιμή αναφοράς από σχετικό πίνακα σταδιακά αποκλιμακούμενης τιμής της κιλοβατώρας μέχρι το 2014, που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος υπογραφής της σύμβασης. Δίδεται, επίσης, η δυνατότητα, μετά από κοινή υπουργική απόφαση (ΚΥΑ), εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια, με συμφωνισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο και της καταναλισκόμενης απ' αυτό, μέσα στον κύκλο καταμέτρησης (Δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας).

- ♦ ΚΥΑ 1079/4-6-2009: Ειδικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις και ιδίως σε δώματα και στέγες.

Μέσα στο 2010 ενισχύθηκε το θεσμικό πλαίσιο των ΑΠΕ με τον επόμενο νόμο και σχετικές ΚΥΑ:

- ♦ Νόμος 3851/2010 ΦΕΚ 85Α'/4-6-2010. Επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας ΥΠΕΚΑ. Με το νόμο αυτό απλοποιούνται δραστικά οι διαδικασίες αδειοδότησης. Οι προτάσεις αδειοδότησης υποβάλλονται στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η οποία είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή. Η ΡΑΕ πλέον, εκτός των γνωμοδοτικών και εισηγητικών αρμοδιοτήτων της, έχει και την αρμοδιότητα έκδοσης των αποφάσεων αδειοδότησης έργων ΑΠΕ.
- ♦ ΚΥΑ 1557/22-9-2010: Συμπλήρωση του Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

Από τις αρχές του 2012 έως τα μέσα του 2014, ελήφθησαν μια σειρά αποφάσεων επανακαθορισμού του θεσμικού πλαισίου για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Η περίοδος της οικονομικής κρίσης στη χώρα μας έχει τις επιπτώσεις της και σ' αυτόν τον τομέα, με ανατροπή του προηγούμενου καθεστώτος

ισχυρής επιδότησης της παραγόμενης kWh από φωτοβολταϊκά. Στόχος, μεταξύ άλλων, να υπάρξει σταδιακή απόσβεση του ελλείμματος στον ειδικό λογαριασμό των ΑΠΕ. Με τις αποφάσεις αυτές περιορίζονται δραστικά τα πλαίσια λειτουργίας και αναστέλλονται οι διαδικασίες αδειοδότησης και χορήγησης προσφορών σύνδεσης για φωτοβολταϊκούς σταθμούς (ΦΕΚ 2317 Β /10-8-2012), αυξήθηκε το Ειδικό Τέλος Μείωσης Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου (Απόφαση ΡΑΕ, 698/2012), επεβλήθη έκτακτη εισφορά αλληλεγγύης (ΦΕΚ Α 222/12-11-2012), καθώς και επιπλέον έκτακτη εισφορά το 2013 (ν. 4152/2013). Με τους νόμους 4203/2013 (ΦΕΚ Α 235/2013) και 4223/2013 (ΦΕΚ Α 287/2013) εισήχθησαν νέες ρυθμίσεις και τροποποιήθηκαν ισχύουσες διατάξεις σε θέματα ΑΠΕ. Με το ν. 4254/2014 (ΦΕΚ Α 85/7-4-2014), ορίζονται νέες τιμές τιμολόγησης της κιλοβατώρας από σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ και καθορίζεται η επανεκκίνηση της διαδικασίας αξιολόγησης για υποβληθείσες αιτήσεις αδειοδότησης φωτοβολταϊκών σταθμών, των οποίων η εξέταση είχε ανασταλεί το 2012.

Με τις Υπουργικές αποφάσεις Αριθμ. ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ. 24461/2014 και ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/ οικ.175067/2017, τίθεται σε εφαρμογή η διαδικασία του ενεργειακού συμψηφισμού (Net metering) καθώς και αυτή του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού (virtual net metering). Η διαδικασία αφορά στον ενεργειακό συμψηφισμό της παραγόμενης και της καταναλισκομένης ηλεκτρικής ενέργειας, για αυτοπαραγωγούς φωτοβολταϊκών σταθμών. Ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός αφορά και σε εγκαταστάσεις κατανάλωσης του αυτοπαραγωγού, που δεν βρίσκονται όλες στον ίδιο ή όμορο χώρο με το φωτοβολταϊκό σταθμό ή δεν συνδέονται με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού σταθμού. Με την εφαρμογή της ΥΑ ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.175067 (ΦΕΚ 1547Β/5.5.2017), η εκκαθάριση του ενεργειακού συμψηφισμού γίνεται πλέον ανά τριετία, ενώ προηγουμένως γινόταν ετησίως.

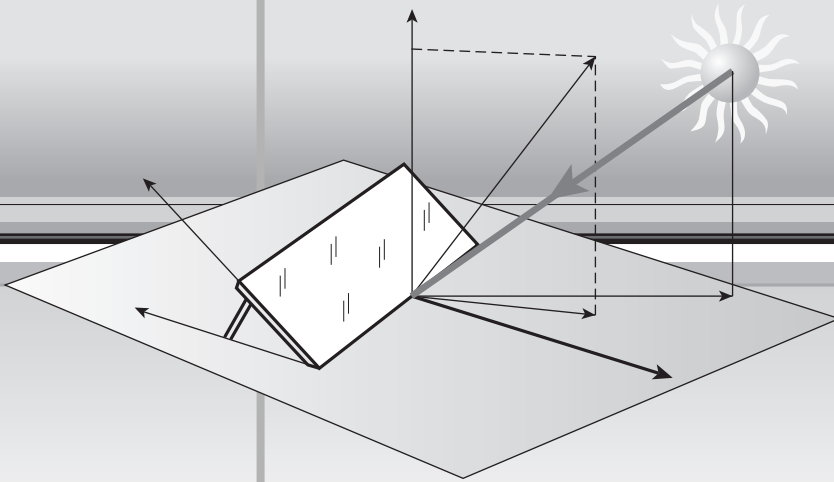
Με το νόμο 4513/18 καθιερώνεται το νομικό πλαίσιο για τις Ενεργειακές Κοινότητες. Η Ενεργειακή Κοινότητα είναι αστικός συνεταιρισμός αποκλειστικού σκοπού με στόχο την προώθηση της κοινωνικής και αλληλέγγυας οικονομίας, υποστήριξη της καινοτομίας, βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, ενίσχυση της διείσδυσης των Α.Π.Ε. και της αυτοπαραγωγής και μείωση του ενεργειακού κόστους για νοικοκυριά και μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Μέλη μιας Ε. Κοιν. μπορεί να είναι: φυσικά πρόσωπα, νομικά πρόσωπα δημοσίου και ιδιωτικού δικαίου, οι Δήμοι και οι επιχειρήσεις τους καθώς και οι Περιφέρειες. Με την υπουργική απόφαση ΥΠΕΝ/ΔΑΠΕΕΚ/15084/382, (ΦΕΚ 759Β/5.3.2019) θεσπίζεται η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης σε συνδυασμό με συστήματα αυτοπαραγωγής.

Προοπτική

Με βάση τα όσα παρουσιάστηκαν στο εισαγωγικό αυτό τμήμα του βιβλίου, παρατηρείται σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, μια αυξημένη δραστηριότητα στον ευρύτερο τομέα των ΑΠΕ, που προοιωνίζει την αλματώδη ανάπτυξη και ευρεία ενσωμάτωσή τους στην ενεργειακή παραγωγή, μέσα στην πρώτη εικοσαετία του νέου αιώνα. Η αύξηση της ποσοστιαίας συμμετοχής των ΑΠΕ στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή, με προοπτική να επιτευχθούν οι στόχοι του Πρωτοκόλλου του Κιότο μέχρι το 2020 και οι αντίστοιχες δεσμεύσεις στα πλαίσια της ΕΕ, δημιουργούν την ελπίδα ότι θα επιφέρει δραστικό περιορισμό στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, που θα εκλύονταν από την καύση ενεργειακά ισοδύναμης ποσότητας συμβατικών καυσίμων. Κατά συνέπεια, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό δυναμικό παγκοσμίως, σε συνέργεια με άλλα παράλληλα διορθωτικά μέτρα που έχουν αποφασισθεί, αναμένεται να συμβάλλουν καταλυτικά στην αποκατάσταση της διαταραγμένης θερμοκρασιακής ισορροπίας του πλανήτη μας, στα φυσιολογικά επίπεδα.

1ο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ



Η Ηλιακή ακτινοβολία

1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

1.1.1 Η θεωρία της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία, αποτελεί διαδιδόμενη διαταραχή συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα διάδοσης του ΗΜ κύματος στον κενό χώρο, προσεγγίζει τα 300.000 km/s. Εκπέμπεται από τους δομικούς λίθους της ύλης (άτομα, μόρια και ιόντα) και η εκπομπή της σχετίζεται με:

- ▶ τη θερμοκρασία των σωμάτων (θερμική ακτινοβολία)
- ▶ τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων, που προκαλούνται από άλλη αιτία, εκτός της θερμοκρασίας (π.χ. κατά τις κρούσεις επιταχυνόμενων ιόντων ή ηλεκτρονίων με ιόντα ή μόρια του σώματος, με τη δράση μακροσκοπικού ηλεκτρικού πεδίου είτε μετά από απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας από τους δομικούς λίθους).

Στη συνέχεια αναφερόμαστε, σύντομα, στις δύο αυτές περιπτώσεις.

Α. Θερμική ακτινοβολία – Θεωρία του μέλανος σώματος

Η ακτινοβολούμενη, από ένα σώμα, εξαιτίας της θερμοκρασίας του, πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ανά μονάδα μήκους κύματος $E_{\lambda T}$ (μετρούμενη π.χ. σε $W/m^2 \cdot nm$), είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, λ , της θερμοκρασίας του σώματος, T και της φύσης⁶ του σώματος που ακτινοβολεί.

Μέχρι το 1900, η έρευνα γύρω από την εξάρτηση της $E_{\lambda T}$ από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει, είχε καταλήξει σε δύο πειραματικά συμπεράσματα, για δύο διαφορετικές περιοχές μηκών κύματος, την περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος και αυτή των μικρών. Οι αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις αναφέρονταν, ως νόμος ακτινοβολίας του Wien (θεωρητική αναπαράγωγή πειραματικής συμπεριφοράς, με βάση την κλασική θεωρία και ειδικές υποθέσεις), για την περιοχή των μικρών μηκών κύματος $\{E_{\lambda T} \propto (1/\lambda^5) e^{-a/\lambda T}, \text{ όπου } a, \text{ σταθερά}\}$ και ως νόμος των Rayleigh-Jeans, $\{E_{\lambda T} \propto 1/\lambda^4\}$, για την περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος.

6. Η εξάρτηση αυτή περιγράφεται με ένα συντελεστή: την ικανότητα εκπομπής (emissivity ως ιδιότητα του υλικού και ϵ emitance, ως χαρακτηριστικό της επιφάνειας του σώματος), ο οποίος εξαρτάται από το υλικό, τη θερμοκρασία του καθώς και από την κατεύθυνση εκπομπής της ακτινοβολίας σε σχέση με την κάθετη στην επιφάνεια του σώματος.

Το συνδυαστικό κρίκο, μεταξύ των δύο εκφράσεων, προσέθεσε ο Max Planck, εισάγοντας την επαναστατική, για την εποχή του, έννοια της εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, κατά ποσά (quanta και αντίστοιχα, θεωρία των quanta), χωρίς μάλιστα, εξαρχής, να συνειδητοποιήσει το μέγεθος της προσφοράς του στην επιστήμη. Η ιδέα του αυτή έμελλε να ανατρέψει την μέχρι τότε επιστημονική θεώρηση για το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη.

Το μοντέλο που χρησιμοποίησε, βασίζεται στη θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών⁷, που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις των δομικών λίθων (άτομα - μόρια - ιόντα), των τοιχωμάτων μιας κοιλότητας του σώματος και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τους στο χώρο της κοιλότητας.

Αν η κοιλότητα επικοινωνεί προς τα έξω με λεπτό αυλό, η εξερχόμενη, από την οπή, ακτινοβολία, σε στενή περιοχή μηκών κύματος, έχει ένταση, που καθορίζεται από το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία, T , της κοιλότητας. Αντίστροφα, κάθε ακτίνα προερχόμενη από άλλο σώμα, εισερχόμενη, δια του αυλού, στο χώρο της κοιλότητας, απορροφάται από τους HM ταλαντωτές (που διεγείρονται σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες). Δηλαδή, η οπή της κοιλότητας λειτουργεί ως “παγίδα” για την προσπίπτουσα HM ακτινοβολία και ταυτόχρονα εκπέμπει ιδανικά, HM ακτινοβολία που οφείλεται στη θερμική κατάσταση των δομικών του λίθων. Το ιδανικό ή πρότυπο αυτό σώμα, με τις ιδιότητες αυτές, ονομάστηκε **μέλαν (μαύρο) σώμα**.

Σύμφωνα με την προηγούμενη παρουσίαση, το μέλαν σώμα έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ακτινοβολία, με ορισμένη φασματική κατανομή, χαρακτηριστική της θερμοκρασίας του. Απορροφά πλήρως κάθε ακτινοβολία, που προσπίπτει επάνω του, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος, λ και τη θερμοκρασία του ή τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει.

Το φάσμα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, παρουσιάζει τα επόμενα χαρακτηριστικά:

- α) Εμφανίζει ένα μέγιστο, το μέγεθος και η θέση (αντίστοιχο μήκος κύματος) του οποίου εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του. Δεξιά του μεγίστου (προς τα μεγάλα μήκη κύματος) κι αριστερά του (προς τα μικρά μήκη κύματος), η ένταση μειώνεται, προς το μηδέν.

7. Η εκπομπή HM ακτινοβολίας συνδέεται άμεσα με ταλαντευόμενα ηλεκτρικά φορτία, όπως είναι οι δομικοί λίθοι της ύλης, δηλαδή, τα άτομα, τα μόρια και τα ιόντα. Ισοδύναμα, αναφερόμαστε στην ταλάντωση της ηλεκτρικής διπολικής ροπής τους.

β) Αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος οδηγεί, σε αύξηση της έντασης σ' όλα τα μήκη κύματος και φυσικά και του μεγίστου, με ταυτόχρονη μετατόπισή του προς τα μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες ενέργειες φωτονίων).

Όπως αναφέρθηκε, ο Planck υπέθεσε ότι η ενέργεια των ταλαντωτών χαρακτηρίζεται από κβάντωση (στάθμες ενέργειας), έτσι ώστε κάθε ενεργειακή μεταβολή μεταξύ διαδοχικών ενεργειακών σταθμών να σχετίζεται με απορρόφηση (διέγερση) από τον ταλαντωτή ή εκπομπή (αποδιέγερση), ενέργειας $U=hn$, όπου h , η σταθερά του Planck ($h=6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s) και ν , η συχνότητα ταλάντωσης του ταλαντωτή. Το φάσμα των ταλαντωτών ηλεκτρικής διπολικής ροπής, καλύπτει, θεωρητικά, εύρος συχνοτήτων από 0 έως ∞ .

Η κατανομή των τιμών της *πυκνότητας ισχύος*⁸ της ΗΜ ακτινοβολίας, που εκπέμπεται απ' την επιφάνεια του μέλανος σώματος, ανά μοναδιαία περιοχή μηκών κύματος, σε κάθε μήκος κύματος λ , αποτελεί τη *συνάρτηση φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος* $E_{\lambda T}$ (W/m²·nm). Υπολογίστηκε από τον Planck και δίδεται από τη σχέση:

$$E_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

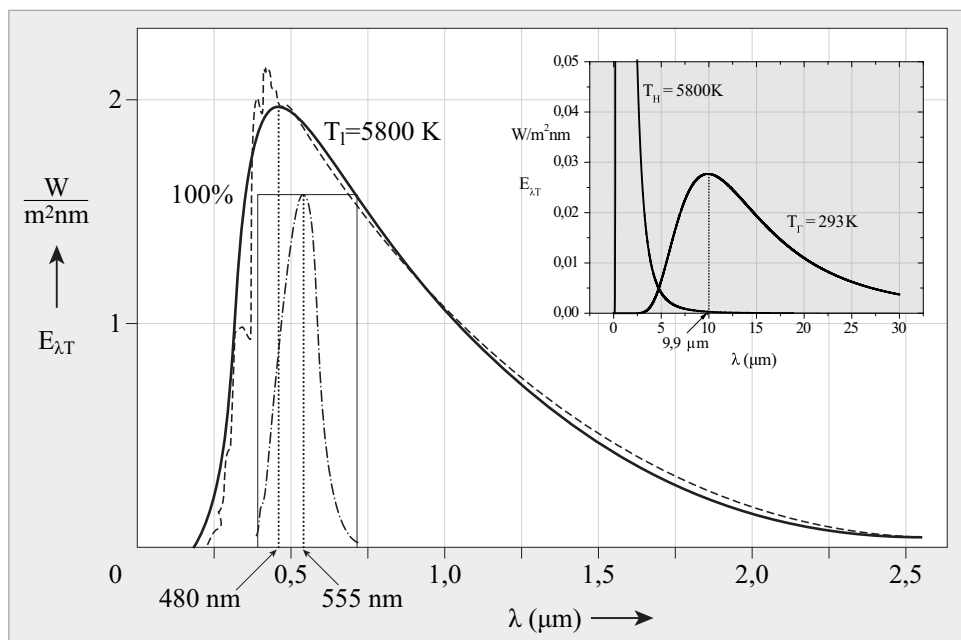
όπου $c_1 = 2\pi c^2 h = 3,746 \cdot 10^{-16}$ Wm², $c_2 = \frac{hc}{k_B} = 0,0144$ m·K, c η ταχύτητα του φωτός ($c=2,997925 \cdot 10^8$ m/s) και k_B , η σταθερά του Boltzmann ($k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Στο σχήμα 1.1, αποδίδεται η γραφική παράσταση της φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος, $E_{\lambda T}$, που αντιστοιχεί στο φως του ήλιου μας (εστιγμένη καμπύλη) καθώς και η καμπύλη μέλανος σώματος, που προσαρμόζεται κατά τον καλύτερο τρόπο στην πειραματική καμπύλη. Η θερμοκρασία⁹ μέλανος σώματος, που αντιστοιχεί στην καμπύλη αυτή, είναι $T \approx 5800$ K. Παρουσιάζει μέγιστο στο $\lambda=480$ nm.

Όταν η θερμοκρασία του μέλανος σώματος αυξάνει τότε, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τιμή του μεγίστου αυξάνει και ταυτόχρονα, το μήκος κύματος

8. Για τον ορισμό του μεγέθους, δείτε την § 1.1.2.1β.

9. Η θερμοκρασία, που προκύπτει από την καλύτερη προσαρμογή της καμπύλης της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, στο φάσμα του πραγματικού σώματος, ονομάζεται ενεργός θερμοκρασία και αποτελεί χαρακτηριστικό του πραγματικού σώματος. Έτσι, προκύπτει ότι η καμπύλη του φάσματος του μέλανος σώματος θερμοκρασίας $T \approx 5800$ K, περιγράφει, κατά τον καλύτερο τρόπο, το πειραματικά καταγεγραμμένο φάσμα του ήλιου.



Σχήμα 1.1. Γραφική παράσταση της συνάρτησης φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, στα όρια της ατμόσφαιρας (Εστιγμένη καμπύλη). Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί σε μέλαν σώμα θερμοκρασίας $T \approx 5800$ K, σε απόσταση $1,5 \times 10^8$ km από τον ήλιο (σημειακή πηγή ακτινοβολίας). Παρουσιάζει μέγιστο στο $\lambda = 480$ nm. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η καμπύλη ευαισθησίας του οφθαλμού του ανθρώπου (διακεκομμένη - εστιγμένη), η οποία εμφανίζει μέγιστο στο $\lambda = 555$ nm (§ 1.1.2.2 και σχήμα 1.6). Στο ένθετο διάγραμμα, άνω-δεξιά, δείχνονται δύο καμπύλες φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, η μία για την ακτινοβολία της Γης (σώμα θερμοκρασίας 20°C) και η άλλη της ηλιακής ακτινοβολίας, στα όρια της ατμόσφαιρας, με κατάλληλη επιλογή της μονάδας στον άξονα της φασματικής πυκνότητας ισχύος, για λόγους ευκρίνειας της γραφικής παράστασης.

που αντιστοιχεί στο μέγιστο, μετατοπίζεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος, ακολουθώντας το νόμο μετατόπισης του μεγίστου της φασματικής κατανομής ή νόμο του Wien $\{\lambda_{\text{μεγ}} \cdot T = 2,897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}\}$. Η μελέτη του φάσματος της ακτινοβολίας ενός σώματος, δίδει τη δυνατότητα καθορισμού του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στο μέγιστο, $\lambda_{\text{μεγ}}$ και στη συνέχεια, με βάση το νόμο Wien, προσδιορίζεται προσεγγιστικά, η θερμοκρασία T , της επιφάνειας του σώματος, θεωρουμένου ως μέλανος σώματος.

Το μοντέλο του μέλανος σώματος αποτελεί την περιγραφή της ιδανικής συμπεριφοράς της ύλης, κατά την εκπομπή και απορρόφηση της ΗΜ ακτινοβολίας. Ο στόχος, βέβαια, είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς των πραγματικών σωμάτων. Κάθε πραγματικό σώμα, συμπεριφέρεται με τρόπο που προσεγγίζει περισ-

σότερο ή λιγότερο τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος. Ποσοτικά αυτό εκφράζεται μ' ένα συντελεστή, την *ικανότητα εκπομπής* (*emittance*), $\epsilon_{\lambda T}$, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας από το πραγματικό σώμα, μέσα σε στενή περιοχή μηκών κύματος, προς την εκπεμπόμενη, στην ίδια περιοχή μηκών κύματος, από το μέλαν σώμα, ίδιας θερμοκρασίας. Παίρνει τιμές από 0 (τέλεια ανακλαστική επιφάνεια ή τέλειος ανακλαστήρας), μέχρι 1 (μέλαν σώμα ή τέλειος απορροφητής), εξαρτώμενες από το υλικό, τη θερμοκρασία του σώματος, από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την κατεύθυνση παρατήρησης της επιφάνειας. Οι τιμές του για κάθε υλικό, μήκος κύματος και θερμοκρασία, υπολογίζονται πειραματικά και καταχωρούνται σε πίνακες δεδομένων, π.χ. στα βιβλία δεδομένων (Handbooks). Συνεπώς, με γνωστή την τιμή της ικανότητας εκπομπής $\epsilon_{\lambda T}$, ενός σώματος, η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας από την επιφάνεια του σώματος, $E_{\lambda T, \sigma}$, δίδεται από τη σχέση:

$$E_{\lambda T, \sigma} = \epsilon_{\lambda T} \cdot E_{\lambda T} \quad (2)$$

όπου $E_{\lambda T}$, η πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας του μέλανος σώματος θερμοκρασίας T , ίδιας με αυτή του πραγματικού. Τα σώματα, των οποίων ο συντελεστής εκπομπής παρουσιάζει ανεξαρτησία από το μήκος κύματος, εξαρτώμενος μόνο από το υλικό και τη θερμοκρασία, ονομάζονται *φαιά* σώματα.

Αποδείχτηκε από τον Gustav R. Kirchhoff (1824÷1887), εντελώς γενικά, ότι η ικανότητα εκπομπής $\epsilon_{\lambda T}$ ενός σώματος, ισούται με την αντίστοιχη απορροφητικότητα του, $\alpha_{\lambda T}$ (Για τον ορισμό της δείτε την §3.1). Δηλαδή

$$\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \quad \text{Νόμος θερμικής ακτινοβολίας του Kirchhoff} \quad (3a)$$

Σύμφωνα με το νόμο αυτό, **κάθε σώμα εκπέμπει εκείνα τα μήκη κύματος θερμικής ακτινοβολίας, τα οποία στην ίδια θερμοκρασία μπορεί να απορροφήσει**. Ισοδύναμα, αν ένα σώμα θερμοκρασίας T , δεν απορροφά μια περιοχή μηκών κύματος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας (δηλαδή, στην περιοχή αυτή ισχύει $\alpha_{\lambda T} \approx 0$), τότε το σώμα αυτό ευρισκόμενο στην ίδια θερμοκρασία, ουσιαστικά, δεν εκπέμπει σ' αυτή τη φασματική περιοχή και άρα γι' αυτή τη φασματική περιοχή ισχύει: $\epsilon_{\lambda T} \approx 0$. Το μέλαν σώμα χαρακτηρίζεται από $\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} = 1$, σ' όλα τα μήκη κύματος. Τα φαιά σώματα, χαρακτηρίζονται από το ότι απορροφούν το ίδιο ποσοστό προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας, σ' όλα τα μήκη κύματος. Στην περίπτωση των φαιών σωμάτων για την ημισφαιρικά εκπεμπόμενη ολική ακτινοβολία, δηλαδή σ' όλα τα μήκη κύματος, ισχύει η ακόλουθη σχέση

$$\epsilon_T = \alpha_T \quad (3\beta)$$

Η εκπεμπόμενη, ημισφαιρικά, πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας σ' όλα τα μήκη κύματος, από μέλαν σώμα θερμοκρασίας T , σε περιβάλλον θερμοκρασίας $T_\pi = 0$ K, δίδεται από τη σχέση:

$$E_T = \sigma \cdot T^4 \quad \text{Νόμος των Stefan - Boltzmann} \quad (4\alpha)$$

όπου σ , η σταθερά του νόμου των Stefan-Boltzmann, με τιμή $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Αν λάβουμε υπ' όψη μας ότι το περιβάλλον, ως άλλο μέλαν σώμα, βρίσκεται σε θερμοκρασία T_π , τότε η προηγούμενη σχέση παίρνει τη μορφή:

$$P_T = \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_\pi^4) \quad (4\beta)$$

δεδομένου ότι $P_T = E_T \cdot S$. Λαμβάνοντας υπ' όψη το νόμο θερμικής ακτινοβολίας του Kirchhoff για το φαιό σώμα (Σχέση 3β), η συνολικά αποβαλλόμενη ισχύς ακτινοβολίας, σ' όλα τα μήκη κύματος, από την επιφάνεια εμβαδού S ενός φαιού σώματος, θερμοκρασίας T , σε περιβάλλον θερμοκρασίας T_π , δίδεται από τη σχέση:

$$P_{T,\sigma} = \epsilon_T \cdot P_T = \epsilon_T \cdot \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_\pi^4) \quad (4\gamma)$$

όπου ϵ_T η ικανότητα εκπομπής του φαιού σώματος.

Στο σχήμα 1.1, δίδεται επίσης η γραφική παράσταση της φασματικής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη, στα όρια της ατμόσφαιρας (εστιγμένη καμπύλη). Οι απορροφήσεις που διακρίνονται στο αριστερό τμήμα της προέρχονται από την απορρόφηση που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία των εσωτερικών στρωμάτων, καθώς αυτή διαπερνά τα ανώτερα, χαμηλής θερμοκρασίας στρώματα (απορροφήσεις των στοιχείων Fe, Ca, Mg κ.α.). Δίδεται, επίσης, η γραφική παράσταση της φασματικής έντασης της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος, που προσαρμόζεται κατά τον καλύτερο τρόπο, στην πειραματική καμπύλη. Διαπιστώνεται ότι, η καμπύλη¹⁰ Planck με την καλύτερη προσαρμογή αντιστοιχεί σε $T = 5800$ K, η οποία ονομάζεται *ενεργός θερμοκρασία του εκπέμποντος σώματος*. Σημειώστε ότι η πειραματική καμπύλη της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί να περιγραφεί με μια συγκεκριμένη

10. Η $E_{\lambda T}(\gamma)$, στη γη προκύπτει από την $E_{\lambda T}(\eta)$, στον ήλιο, αν πολλαπλασιαστεί επί $(R_\eta/d_{\eta\gamma})^2$, όπου R_η , η ακτίνα του ήλιου και $d_{\eta\gamma}$, η απόσταση ήλιου-γης (Άσκηση 9).

καμπύλη Planck, επειδή η ακτινοβολία αυτή δεν προέρχεται από σώμα σε θερμοδυναμική ισορροπία. Το ηλιακό φως προέρχεται, από διάφορα στρώματα της ηλιακής σφαίρας, διαφορετικών θερμοκρασιών. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται η καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού (ορατό φάσμα από ~ 360 nm έως ~ 750 nm, με μέγιστο ευαισθησίας στα 555 nm).

B. Ακτινοβολία διέγερσης

Η ακτινοβολία αυτή προέρχεται από τις αποδιεγέρσεις των ηλεκτρονικών καταστάσεων των ατόμων της ύλης και όχι λόγω της θερμοκρασίας του σώματος. Διηγείρουμε αιτία είναι είτε άλλη ακτινοβολία, που προσπίπτει στο σώμα και απορροφάται από τους δομικούς λίθους της ύλης, είτε οι κρούσεις μεταξύ τους, κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε ιονισμένη ύλη. Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται μ' αυτό τον τρόπο, εξαρτάται από το ποσοστό των διεγερμένων ατόμων, κατά τη συγκεκριμένη ενεργειακή μετάβαση, από την αρχική στην τελική ενέργεια. Ο τρόπος αυτός εκπομπής ακτινοβολίας δεν σχετίζεται με τη θερμοκρασία του σώματος.

Τέτοια ακτινοβολία εκπέμπουν οι πηγές, των οποίων η λειτουργία οφείλεται στην ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται στο αέριο που περιέχουν. Παραδείγματος χάριν, οι λάμπες των ατμών Νατρίου, των ατμών Υδραργύρου, οι λάμπες φθορισμού κ.α.. Το φως που εκπέμπουν δεν οφείλεται στη θερμοκρασία του αερίου, αλλά στην διέγερση των ατόμων του αερίου κατά την εκκένωση που δημιουργείται σ' αυτό. Το φάσμα τους διαφέρει ριζικά απ' αυτό του μέλανος σώματος, χαρακτηριζόμενο από αυξημένες τιμές έντασης στα μήκη κύματος που σχετίζονται με την κυρίαρχη αποδιέγερση των διεγερμένων ατόμων.

1.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία των σωμάτων, που οφείλεται στη θερμοκρασία τους, περιγράφεται ποσοτικά, με χρήση χαρακτηριστικών μεγεθών, που αφορούν την ίδια και την πηγή της ακτινοβολίας (Radiometry). Αντίστοιχα μεγέθη χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της φωτεινής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε δεδομένη επιφάνεια. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ο όρος *φωτομετρία*. Αν και στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, χρησιμοποιούνται κατ' αποκλειστικότητα τα γενικά μεγέθη ακτινοβολίας, για λόγους πληρότητας της παρουσίασης και αντιδιαστολής εννοιών μεταξύ των δύο κατηγοριών μεγεθών, θα αναφερθούμε και στα φωτομετρικά.

1.1.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη της ΗΜ ακτινοβολίας

α. Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας¹¹, P (Radiant Power ή Radiant Flux)

Ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης, σε χρόνο dt , ενέργειας dU , μέσα σε στερεά γωνία $d\Omega$. Δηλαδή

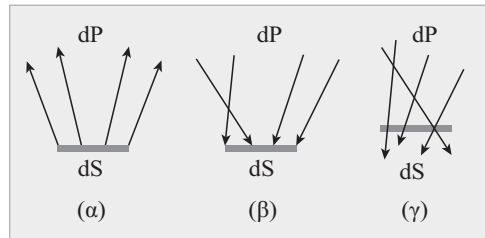
$$P = \frac{dU}{dt} \quad (5)$$

Η μονάδα μέτρησης της ισχύος της ακτινοβολίας, στο SI, είναι το 1 W.

β. Πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, E (Radiant Exitance, Irradiance)

Η πυκνότητα ισχύος αφορά στην ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας σ' όλα τα μήκη κύματος, ανά μονάδα επιφάνειας, απ' την οποία εκπέμπεται¹² (Radiant Exitance ή Radiant Emittance, σχ. (α)) ή προς την οποία προ-σπίπτει ή διαπερνά (Irradiance, σχήματα (β) και (γ), αντίστοιχα), από διάφορες κατευθύνσεις. Προσδιορίζεται από τη σχέση^{12,12α}

$$E = \frac{dP}{dS} \quad (6)$$



όπου dS η στοιχειώδης επιφάνεια, μέσα απ' την οποία διέρχεται ή πάνω στην οποία προσπίπτει ή από την οποία εκπέμπεται, η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας dP . Η μονάδα μέτρησής της, στο SI, είναι το 1 W/m^2 . Η *συνάρτηση φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος*, $E_{\lambda T}$, αφορά την εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος, μέσα σε στενή περιοχή μηκών κύματος από λ έως $\lambda + d\lambda$, από το μήκος κύματος λ , σε θερμοκρασία T του σώματος

$$E_{\lambda T} = \frac{dE}{d\lambda} \quad (7)$$

11. Χρησιμοποιείται επίσης το γράμμα Φ , για την ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας, ενώ για την ενέργεια το U , προκειμένου το γράμμα E να χρησιμοποιηθεί για την πυκνότητα ισχύος.

12. Στην Ελληνική βιβλιογραφία αναφέρεται και ως αφετική ικανότητα της εκπέμπουσας επιφάνειας.

12α. Χρησιμοποιούμε τον κυρίαρχο, στη διεθνή βιβλιογραφία, συμβολισμό E . Όταν θα αναφερόμαστε στις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας, στην επιφάνεια της γης, θα χρησιμοποιούνται σύμβολα που προσδιορίζουν, περισσότερο καθοριστικά, την αντίστοιχη συνιστώσα. Π.χ. για την ολική ακτινοβολία το σύμβολο είναι G (Global), για την απευθείας ακτινοβολία το B (Beam) και για τη διάχυτη, το D (Diffuse).

Συνήθεις μονάδες μέτρησης της $E_{\lambda T}$, είναι οι $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{nm}$ ή $1 \text{ W/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ εκφράζοντας το $d\lambda$ σε nm ή σε μm αντίστοιχα.

γ. Ένταση ακτινοβολίας, J

Ως ένταση ακτινοβολίας ονομάζουμε την ισχύ που διαπερνά κάθετα την μονάδα επιφάνειας, τοποθετημένη στη θέση προσδιορισμού και δίδεται από τη σχέση:

$$J = \frac{dP}{dS_{\perp}} \quad (8)$$

όπου dP , η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας, η οποία διαπερνά κάθετα τη στοιχειώδη επιφάνεια¹³ dS_{\perp} . Μονάδα της έντασης ακτινοβολίας στο SI, είναι το 1 W/m^2 . Αποτελεί μερική περίπτωση εφαρμογής του ορισμού της πυκνότητας ισχύος E (*Irradiance*), στην περίπτωση δέσμης παραλλήλων ακτίνων που διαπερνά κάθετα την επιφάνεια και αφορά στο πεδίο ακτινοβολίας. Ομοίως, ορίζεται η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας, περιορίζοντας ενεργειακά το φάσμα στην περιοχή του ορατού και έχει την ίδια μονάδα (1 W/m^2).

δ. Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, I (*Radiant Intensity*)

Καθορίζει το ποσό της ροής ακτινοβολίας dP , ανά μονάδα στερεάς γωνίας και υπολογίζεται από τη σχέση (Σχήμα 1.2α):

$$I = \frac{dP}{d\Omega} \quad (9)$$

Η μονάδα μέτρησής της, στο SI, είναι το 1 W/sr .



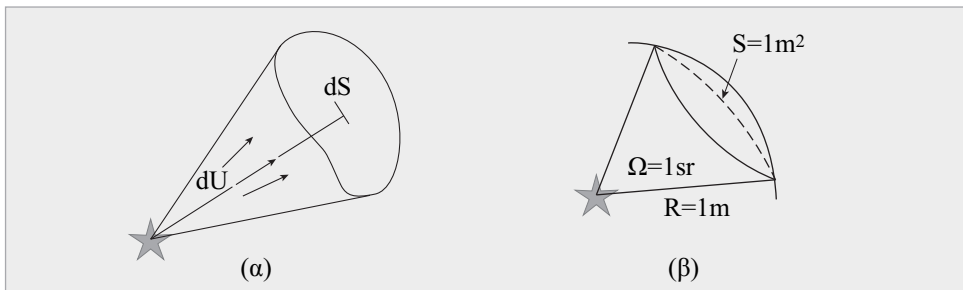
Σχήμα 1.2. (α) Ορισμός της φωτοβολίας I , της πηγής Π , προς ορισμένη κατεύθυνση **(β)** Ορισμός της στερεάς γωνίας.

13. Το σύμβολο \perp δηλώνει την καθετότητα των ακτίνων στην αντίστοιχη επιφάνεια.

Ορισμός στερεάς γωνίας, Ω . Μια στοιχειώδης στερεά γωνία $d\Omega$, με κορυφή O (Σχήμα 1.2β), προσδιορίζεται ως εξής: Έστω μια σφαίρα με κέντρο το O και ακτίνα R . Θεωρήστε τις άπειρες ημιευθείες Ox , οι οποίες ξεκινώντας από το κέντρο O , αποκόπτουν από τη σφαιρική επιφάνεια ένα τμήμα στοιχειώδους εμβαδού dS . Η αντίστοιχη στερεά γωνία $d\Omega$ ορίζεται από το πηλίκο

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} \quad (10)$$

Η μονάδα της στερεάς γωνίας είναι το 1 sr (1 sr = 1 steradian = 1 στερακτίνο. Αδιάστατη μονάδα). 1 sr είναι η στερεά γωνία της οποίας οι γενέτειρες ευθείες προσδιορίζουν, σε σφαίρα ακτίνας 1 m, τμήμα της σφαιρικής επιφάνειας, εμβαδού 1 m^2 (Σχήμα 1.3β). Ολόκληρη η σφαίρα αντιστοιχεί σε στερεά γωνία $4\pi \text{ sr}$.



Σχήμα 1.3. (α) Ορισμός της ισχύος της ακτινοβολίας. (β) Ορισμός στερακτινίου.

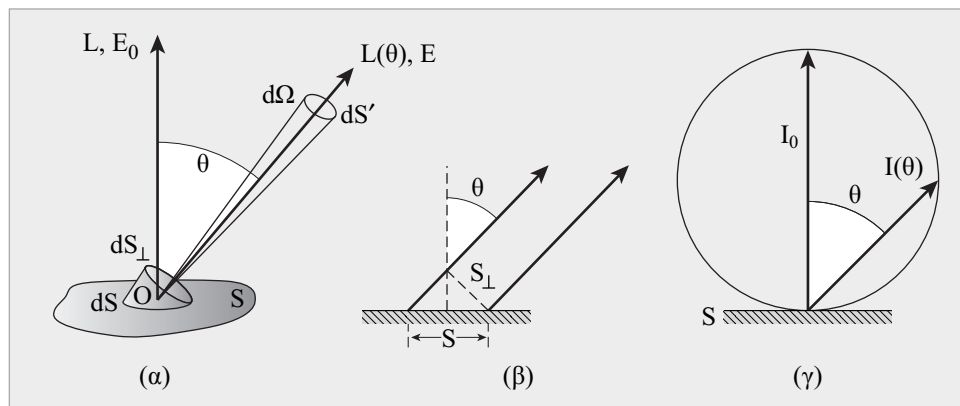
ε. Γωνιακή αφετική ικανότητα, L (Radiance)

Το μέγεθος αυτό αφορά είτε στην εκπομπή ακτινοβολίας από επιφάνεια είτε στη δίοδο της ακτινοβολίας από επιφάνεια και ιδιαίτερα αναφέρεται σε εκτεταμένες πηγές ΗΜ ακτινοβολίας. Ορίζεται ως η ισχύς ακτινοβολίας, dP , ανά μονάδα φαινομένης¹⁴ επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας,

$$L = \frac{d^2P}{dS_{\perp} \cdot d\Omega} = \frac{d^2P}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} \quad (11)$$

όπου dS_{\perp} (φαινομένη επιφάνεια), η προβολή της στοιχειώδους επιφάνειας της πηγής dS , σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης ή μέτρησης της δια-

14. Είναι η επιφάνεια, όπως αυτή φαίνεται παρατηρούμενη από κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία θ ως προς την κάθετη στην επιφάνεια. Ισούται με την προβολή της πραγματικής επιφάνειας, σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης.



Σχήμα 1.4. (α) Η στοιχειώδης ροή που εκπέμπεται από τη στοιχειώδη επιφάνεια μέσα από τη στοιχειώδη στερεά γωνία $d\Omega$ είναι dP **(β)** Νόμος Lambert **(γ)** Πολικό διάγραμμα κατανομής της φωτοβολίας φωτεινής πηγής εμβαδού S .

διδόμενης ροής και θ η γωνία της κατεύθυνσης παρατήρησης και της καθέτου στην επιφάνεια της πηγής (Σχήμα 1.4α). Η μονάδα μέτρησής της, στο SI, είναι το $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$.

Νόμος Lambert

Σε πολλές περιπτώσεις εκπομπής ακτινοβολίας από εκτεταμένες επιφάνειες, η γωνιακή αφετική ικανότητα L , εμφανίζεται ανεξάρτητη της γωνίας θ , της κατεύθυνσης παρατήρησης, σε σχέση με την κάθετη ευθεία στην ακτινοβολούσα επιφάνεια (Σχήμα 1.4β). Δηλαδή

$$L(\theta) = L \quad (12)$$

Αυτή η χαρακτηριστική συμπεριφορά μερικών πηγών αναφέρεται ως *νόμος του Lambert*¹⁵. Όσον αφορά στην πυκνότητα ισχύος, E , την οποία εκπέμπει μια πηγή,

15. Η ισχύς του νόμου του Lambert για μια εκτεταμένη φωτεινή πηγή, όπως π.χ. ο ήλιος, δίδει εξήγηση για την ομοιομορφή λαμπρότητα όλων των περιοχών του δίσκου του. Αυτή η ομοιομορφία προκύπτει συγκρίνοντας τη λαμπρότητα δύο κυκλικών διαδοχικών δακτυλίων του ηλιακού δίσκου, που χαρακτηρίζονται από την ίδια φαινόμενη επιφάνεια (επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες). Επειδή ο ήλιος ακολουθεί τον νόμο Lambert η λαμπρότητα των δύο τμημάτων είναι ίδια. Συμπερασματικά, ο δίσκος του ήλιου φαίνεται από τη γη, με την ίδια, σχεδόν, λαμπρότητα σ' όλα του τα σημεία. Παρουσιάζεται το φαινόμενο της "συσκότισης χειλούς", περιμετρικά του δίσκου του ήλιου, οφειλόμενο στο ότι φως από εκεί προέρχεται από στρώματα χαμηλότερης θερμοκρασίας απ' ότι τα εσωτερικά. Επιπλέον φως που προέρχεται από το εσωτερικό του ήλιου, έχει μειωθεί σε ένταση, λόγω μεγαλύτερης διαδρομής των φωτονίων μέσα από τα απορροφούντα ανώτερα στρώματα της χρωμόσφαιρας του ήλιου. Κατά συνέπεια, η ένταση τους είναι μικρότερη σε σχέση με την ένταση των ακτίνων που προέρχονται από το κεντρικό τμήμα του δίσκου.

που ικανοποιεί το νόμο του Lambert, αυτή ακολουθεί μεταβολή συνημιτόνου. Δηλαδή, ο νόμος του Lambert για την πυκνότητα ισχύος γράφεται:

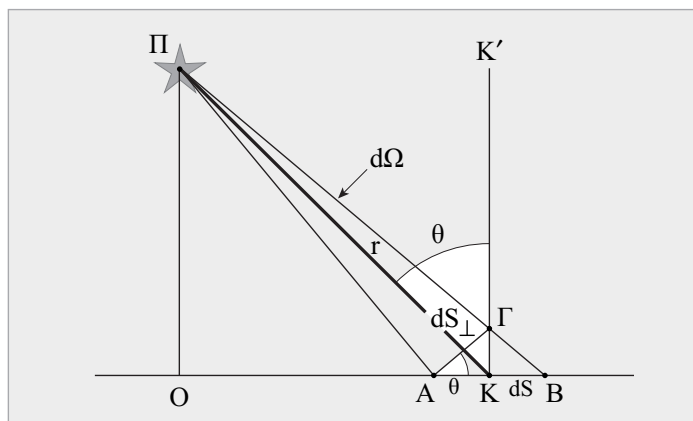
$$E = E_0 \cos \theta \quad (13)$$

όπου θ η γωνία πρόσπτωσης ή εκπομπής της δέσμης, ως προς την κάθετη στην επιφάνεια της πηγής.

στ. Νόμος μεταβολής της έντασης της ακτινοβολίας από σημειακή πηγή.

Εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος από τη γωνία πρόσπτωσης σε επιφάνεια.

Ας θεωρήσουμε μια πηγή ακτινοβολίας, Π , η οποία ακτινοβολεί με ισχύ P , ισότροπα προς όλες τις κατευθύνσεις. Θέλουμε να εξάγουμε σχέση αναλυτικής έκφρασης της εξάρτησης της πυκνότητας ισχύος $E(r, \theta)$, από την απόσταση r , του σημείου μέτρησης από την πηγή, καθώς επίσης και την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης, θ , των ακτίνων σε δεδομένη επιφάνεια. Η $E(r, \theta)$ ισούται με το πηλίκο της ροής dP , που περιέχεται στη στερεά γωνία $d\Omega$, δια της επιφάνειας dS , πάνω στην οποία προσπίπτει (ίχνος AB , σχήμα 1.5). Η στερεά γωνία $d\Omega$, υπολογίζεται, σύμφωνα με τον ορισμό της: $d\Omega = dS_{\perp} / r^2 = dS \cdot \cos \theta / r^2$, όπου dS_{\perp} , το εμβαδόν της στοιχειώδους επιφάνειας, κάθετης στη διεύθυνση ΠK , των ακτίνων και η οποία αποτελεί προβολή της dS σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση αυτή (στο σχήμα δείχνεται με το ίχνος $A\Gamma$).



Σχήμα 1.5. Νόμος ελάττωσης της πυκνότητας ισχύος σε επίπεδη επιφάνεια. Μέσα από τις επιφάνειες dS και dS_{\perp} περνά η ίδια στοιχειώδης ροή ακτινοβολίας, dP , που δίδει ως αποτέλεσμα τη σχέση Lambert: $E(r, \theta) = E_0(r, 0) \cos \theta$.

Για την πυκνότητα ισχύος πάνω στην επιφάνεια προκύπτει

$$1) \text{ Εξάρτηση από τη γωνία πρόσπτωσης: } E(r, \theta) = \frac{dP}{dS} = \frac{dP}{dS_{\perp}} \cdot \frac{dS_{\perp}}{dS} \Rightarrow$$

$$E(r, \theta) = E(r, 0) \cdot \cos\theta \quad (\text{Νόμος Lambert}) \quad (13a)$$

$$2) \text{ Εξάρτηση από την απόσταση: } E(r, 0) = \frac{dP}{dS_{\perp}} = \frac{dP}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dS_{\perp}} = I \cdot \frac{dS_{\perp}}{r^2} \cdot \frac{1}{dS_{\perp}} \Rightarrow$$

$$E(r, 0) = \frac{I}{r^2} \quad (14)$$

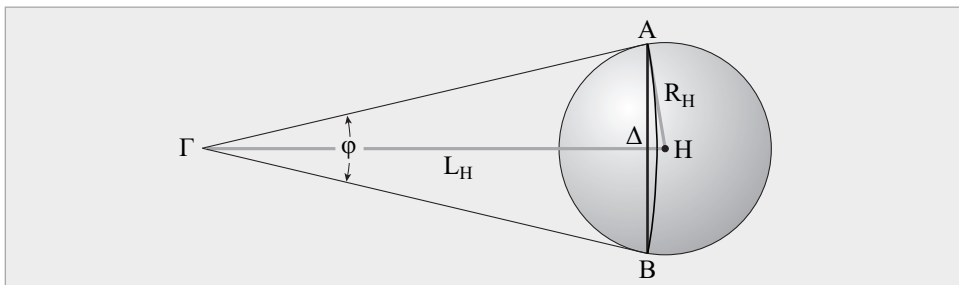
3) Συνδυάζοντας τις σχέσεις (13a) και (14), προκύπτει η γενικότερη σχέση.

$$E(r, \theta) = \frac{I \cdot \cos\theta}{r^2} \quad (15)$$

Η σχέση (15) δίδει την αναλυτική εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος σε σημείο, που απέχει απόστασή r , από την σημειακή πηγή, φωτοβολίας I και από την γωνία θ , με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες στην επιφάνεια (Νόμος ελάττωσης της πυκνότητας ισχύος με το τετράγωνο της απόστασης απ' την πηγή και εξάρτησης από τη γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια).

Λυμένα προβλήματα

1. Η απόσταση γης – ήλιου προσεγγιστικά, είναι $\Gamma H = L_H = 150.000.000 \text{ km}$ και η ακτίνα του $R_H = 700.000 \text{ km}$. Να υπολογιστούν η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στο δίσκο του ήλιου και η φαινομένη διάμετρός του.



Λύση: Λαμβάνοντας υπ' όψη τη μεγάλη απόσταση μεταξύ παρατηρητή – ήλιου, η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στο φαινόμενο δίσκο του ήλιου, διαμέτρου $D_\delta = AB$ και εμβαδού S , μπορεί να υπολογιστεί, προσεγγιστικά, από τη σχέση:

$$\Omega = \frac{S_{AB}(\Gamma, \Gamma A)}{\Gamma A^2} \approx \frac{S_{AB}(\Delta, \Delta A)}{\Gamma A^2} = \frac{\pi \cdot R_H^2}{L_H^2} = \pi \cdot \left(\frac{R_H}{L_H} \right)^2 \Rightarrow$$

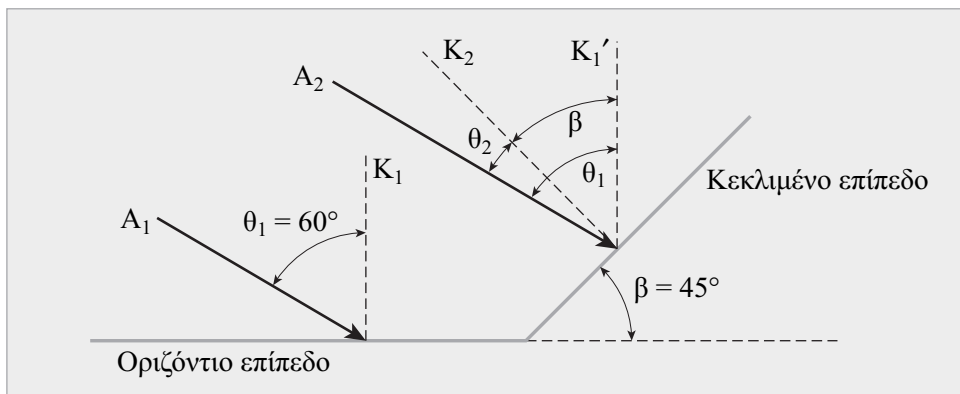
$$\Omega = 6,84 \times 10^{-5} \text{ sr}$$

και η φαινόμενη διάμετρος από τη σχέση:

$$\eta\mu\left(\frac{\varphi}{2}\right) = \frac{R_H}{L_H} \Rightarrow \varphi = 4,666 \times 10^{-3} \text{ rad} \Rightarrow$$

$$\varphi = 0,5348^\circ = 32' 5''$$

2. Η πυκνότητα ισχύος παράλληλων ακτίνων HM ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο, με γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 = 60^\circ$, είναι $E = 1000 \text{ W/m}^2$. Να υπολογιστεί η πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο καθώς και σε κεκλιμένο επίπεδο, γωνίας κλίσης 45° , όπως στο επόμενο σχήμα.



Λύση: α) Πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο:

$$E_{op} = E \cdot \sin\theta_1 = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \sin(60^\circ) = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

β) Πυκνότητα ισχύος στο κεκλιμένο επίπεδο:

Υπολογίζουμε πρώτα τη γωνία πρόσπτωσης στο κεκλιμένο επίπεδο. Η πα-

ραλληλότητα μεταξύ των ακτίνων A_1 και A_2 καθώς και μεταξύ των κατακορύφων K_1 και K'_1 οδηγεί στην ισότητα της γωνίας μεταξύ των διευθύνσεων A_2 και K'_1 με τη θ_1 . Η καθετότητα των διευθύνσεων K_1 και K_2 με τις αντίστοιχες πλευρές της γωνίας κλίσης β του επιπέδου, οδηγεί στην ισότητα της γωνίας μεταξύ των διευθύνσεων K_1 και K_2 , με τη β . Άρα, η θ_2 προκύπτει ως διαφορά των γωνιών θ_1 και β : $\theta_2 = \theta_1 - \beta = 60^\circ - 45^\circ = 15^\circ$. Κατά συνέπεια, η πυκνότητα ισχύος στο κεκλιμένο επίπεδο, E_t , προκύπτει ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} E_t &= E \cdot \sin\theta_2 = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \sin(15^\circ) = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 0,966 \\ &= 966 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

Στην παράγραφο 1.3 θα αναφερθούμε στα όργανα μέτρησης της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο είναι το πυρανόμετρο, λεπτομέρειες των τεχνικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας του οποίου θα γνωρίσουμε εκεί. Η ένδειξή του είναι τάση στην περιοχή των μερικών mV. Κάθε πυρανόμετρο αναγράφει την ευαισθησία του σε $\text{V/W} \cdot \text{m}^{-2}$, με βάση την οποία η ένδειξη τάσης μετατρέπεται σε $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Συνεπώς, στην περίπτωση δέσμης παραλλήλων ακτίνων, με ένταση 1000 W/m^2 , ένα πυρανόμετρο τοποθετούμενο στο οριζόντιο επίπεδο θα έδινε τάση αντίστοιχη των 500 W/m^2 , ενώ τοποθετούμενο στο κεκλιμένο επίπεδο που αναφέρεται στο πρόβλημα αυτό, θα έδινε τάση αντίστοιχη των $966 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

1.1.2.2 Φωτομετρικά μεγέθη

Σε πλήρη αντιστοιχία με τα μεγέθη που περιγράφουν γενικά την ΗΜ ακτινοβολία, τα φωτομετρικά μεγέθη, που αναφέρονται μόνο στο ορατό τμήμα της (Σχήμα 1.6), διαχωρίζονται συχνά με τον δείκτη v (από το visual=ορατό) και ορίζονται με τις ίδιες σχέσεις με τα πρώτα. Σ' αυτή την περίπτωση, όλα τα αναφερόμενα μεγέθη αφορούν στο ορατό¹⁶ φάσμα. Οι ορισμοί των μεγεθών αυτών και οι αντίστοιχες μονάδες τους περιέχονται στον πίνακα 1.

16. Η συνάρτηση $V(\lambda)$, καμπύλη P, του σχήματος 1.6, παρουσιάζει μέγιστο (κατά σύμβαση ίσο με 1), στο $\lambda=555 \text{ nm}$. Το φωτομετρικό ισοδύναμο (Φ_I), αφορά στην ισοδυναμία των lumens της φωτεινής ροής μονοχρωματικής ακτινοβολίας με $\lambda=555 \text{ nm}$ και ισχύος ίσης με 1 Watt , δηλαδή $\Phi_I=683 \text{ lm/W}$. Άρα, ισχύς 1 W μονοχρωματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ισοδυναμεί με 683 lm φωτεινής ροής ακτινοβολίας. Σε άλλο μήκος κύματος, 1 W ΗΜ ακτινοβολίας ισοδυναμεί με $683 \cdot V(\lambda) \text{ lm}$, φωτεινής ροής.

Πίνακας 1.1. Μεγέθη HM ακτινοβολίας και αντίστοιχη ορολογία της Φωτεινής ακτινοβολίας

Μεγέθη ΗΜ ακτινοβολίας				Μεγέθη ορατού φάσματος (Φωτομετρία)			
	Σύμβολο	Σχέση ορισμού	Μονάδα		Σύμβολο	Σχέση ορισμού	Μονάδα
Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας Radiant Power ή Radiant Flux	P ή Φ	$P = \frac{dU}{dt}$	W	Φωτεινή ισχύς ή Φωτεινή ροή Luminous power ή Luminous flux	P_V ή Φ_V	$\Phi_V = \frac{dU_V}{dt}$	lm
Πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, Irradiance, Radiant Exitance ή Radiant Emittance	E	$E = \frac{dP}{dS}$	W/m ²	Πυκνότητα φωτεινής ακτινοβολίας ή Φωτισμός, Illuminance	E	$E = \frac{d\Phi_V}{dS}$	Lx
Ένταση ακτινοβολίας	J	$J = \frac{dP}{dS_{\perp}}$	W/m ²	Ένταση ακτινοβολίας,	J_V	$J = \frac{d\Phi}{dS_{\perp}}$	W/m ²
Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, I Radiant Intensity	I	$I = \frac{dP}{d\Omega}$	W/sr	Φωτοβολία ή ένταση φωτεινής πηγής Luminous intensity	I_V	$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}$	$\frac{lm}{sr} = 1cd^{17}$
Γωνιακή αφετική ικανότητα, L Radiance	L	$L = \frac{d^2P}{dS_{\perp} \cdot d\Omega}$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	Λαμπρότητα, Luminance	L_V	$L_V = \frac{d^2\Phi_V}{dS_{\perp} \cdot d\Omega}$	$\frac{lm}{m^2 \cdot sr} = \frac{cd}{m^2}$

17. Η μονάδα της φωτοβολίας ονομάζεται Candela (1 cd), αποτελεί θεμελιώδη μονάδα του διεθνούς συστήματος (SI) μονάδων και καθορίστηκε στη συνάντηση της Διεθνούς Επιτροπής Μέτρων και Σταθμών το 1979. 1 cd ορίζεται ως η φωτοβολία μιας σημειακής μονοχρωματικής φωτεινής πηγής, συχνότητας 540×10^{12} Hz ή μήκους κύματος 555 nm (μέγιστο ευαισθησίας ανθρώπινου οφθαλμού, σχήμα 1.6), η οποία διδαι γωνιακή ροή ακτινοβολίας (Radiant intensity), ίση με 1/683 W/sr. Πριν το 1979, η 1 cd οριζόταν ως το 1/60 της φωτοβολίας που εκπέμπεται κάθετα από 1 cm² λευκόχρυσου (Pt), ευρισκόμενου στη θερμοκρασία τήξης του (~1770 °C), μέσα σε στερεά γωνία 1 sr.



Φωτοβολταϊκά συστήματα

Φωτοβολταϊκά συστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται, λεπτομερώς, το ενεργειακό δυναμικό των ΦΒ συστημάτων και προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ του ηλιακού δυναμικού σ' ένα τόπο, με την αποδιδόμενη από μια ΦΒ συστοιχία, ηλεκτρική ενέργεια. Σκοπός είναι η εύρεση των σχέσεων εκείνων που οδηγούν στον υπολογισμό των τυπικών χαρακτηριστικών μιας ΦΒ συστοιχίας, με βάση τις ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής και τα ηλιακά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης του συστήματος. Περιλαμβάνει επίσης, τον προσδιορισμό της χωρητικότητας του απαιτούμενου συσσωρευτή, αν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρόκειται να αξιοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο. Μελετάται, αρχικά, η περίπτωση συνεχόμενων αίθριων ημερών και στη συνέχεια, η γενικότερη περίπτωση της αυτόνομης λειτουργίας του συστήματος, για ορισμένο αριθμό συνεφιασμένων ημερών. Η παρουσίαση των αυτόνομων ΦΒ συστημάτων ολοκληρώνεται με παραδείγματα τυπικών, για την κατηγορία αυτή, εφαρμογών. Τα ΦΒ υβριδικά συστήματα και οι κύριες μεθοδολογίες προσδιορισμού των βασικών συνιστωσών τους (συνδυασμός ΦΒ συστοιχίας με ανεμογεννήτρια ή/και Η/Ζ), εξετάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6.

Γενικότερα, η εγκατάσταση ενός ΦΒ συστήματος αποτελεί το στάδιο εφαρμογής μιας ολοκληρωμένης μελέτης*, στα πλαίσια της διαδικασίας αδειοδότησης του έργου, που καλύπτει όλο το φάσμα των επιμέρους τμημάτων του (Χωροθέτηση του συστήματος, επιλογή των ΦΒ πλαισίων, βάσεις εγκατάστασής τους, καλωδιώσεις, ηλεκτρολογικοί πίνακες, ηλεκτρονικές διατάξεις, αντικεραυνική προστασία κ.α). Η μελέτη ολοκληρώνεται με την οικονομοτεχνική ανάλυση για το κόστος της παραγόμενης ενέργειας και του χρόνου έντοκης αποπληρωμής του έργου.

* Στις επόμενες ηλεκτρονικές διευθύνσεις θα βρείτε εξαιρετικά χρήσιμες οδηγίες για τη μελέτη και εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων. α) tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ). β) http://www.cres.gr/kape/pdf/odigos_pv_systimaton.pdf. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

5.1 Χαρακτηριστικά, κατηγορίες και σύνθεση των ΦΒ συστημάτων

5.1.1 Χαρακτηριστικά των ΦΒ συστημάτων

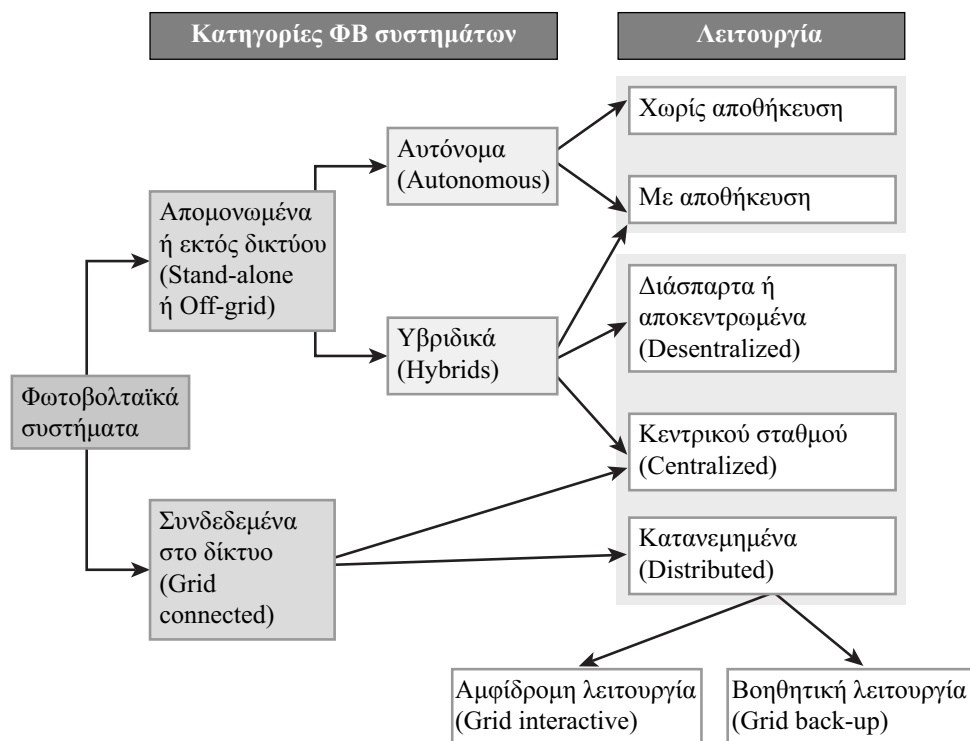
Τα ΦΒ συστήματα διακρίνονται έναντι των άλλων πηγών Α.Π.Ε. με βάση τα επόμενα χαρακτηριστικά τους, σε συντομία:

Θετικά	Αρνητικά
<ul style="list-style-type: none"> ➤ άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή ή μεγάλη ισχύ ➤ δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης του συστήματος ➤ μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους ➤ αθόρυβη λειτουργία ➤ ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης ➤ μεγάλη αξιοπιστία ➤ μεγάλη διάρκεια ζωής ➤ αποδεκτή αισθητική παρουσία 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Υψηλό οικονομικό κόστος

5.1.2 Κατηγορίες και σύνθεση ΦΒ συστημάτων

Τα ΦΒ στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως καταναλωτικών προϊόντων, όπως είναι οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά σώματα κήπου κ.α., έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδοσία νησιών ή πρότυπων μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων, συνδεδεμένων ή όχι στο δίκτυο.

Όπου εδώ αναφέρεται ο όρος δίκτυο, εννοείται το εθνικό (ή διακρατικό, πλέον) ή τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές. Τα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Σχήμα 5.1): τα *απομονωμένα (Stand-alone) ή εκτός δικτύου (Off grid) συστήματα* (Σχήματα 5.2 α, β, γ) και τα *συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid connected, σχήμα 5.2 δ)*. Τα απομονωμένα ΦΒ συστήματα διακρίνονται επίσης σε *αυτόνομα* και *υβριδικά*. Το κριτήριο για τον προσδιορισμό της σύνθεσης του καταλληλότερου ΦΒ συστήματος στις κατηγορίες αυτές, προκύπτει με βάση την απαίτηση για πλήρη ή μερική κάλυψη (αυτονομία) των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής, από το ΦΒ σύστημα, μηνιαίως ή ετησίως.



Σχήμα 5.1. Κατηγορίες και λειτουργία ΦΒ συστημάτων

Α. Εκτός δικτύου ή Απομονωμένα ΦΒ συστήματα (Off-grid ή Stand alone systems)

Χαρακτηρίζονται έτσι τα ΦΒ συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Διακρίνονται σε αυτόνομα, στα οποία η ΦΒ συστοιχία αποτελεί την αποκλειστική πηγή ενέργειας και σε υβριδικά, στα οποία περιλαμβάνεται και άλλη πηγή Α.Π.Ε. ή συμβατική ηλεκτρική πηγή (π.χ. Η/Ζ).

Ι. Αυτόνομα ΦΒ συστήματα

Η απαιτούμενη, από την εφαρμογή, ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τη ΦΒ συστοιχία, χωρίς τη συμμετοχή άλλων Α.Π.Ε. ή Η/Ζ και μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Αφορούν εφαρμογές μη συνδεδεμένες στο εθνικό δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς (DC) είτε εναλλασσομένης (AC) τάσεως. Τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα

διακρίνονται σε:

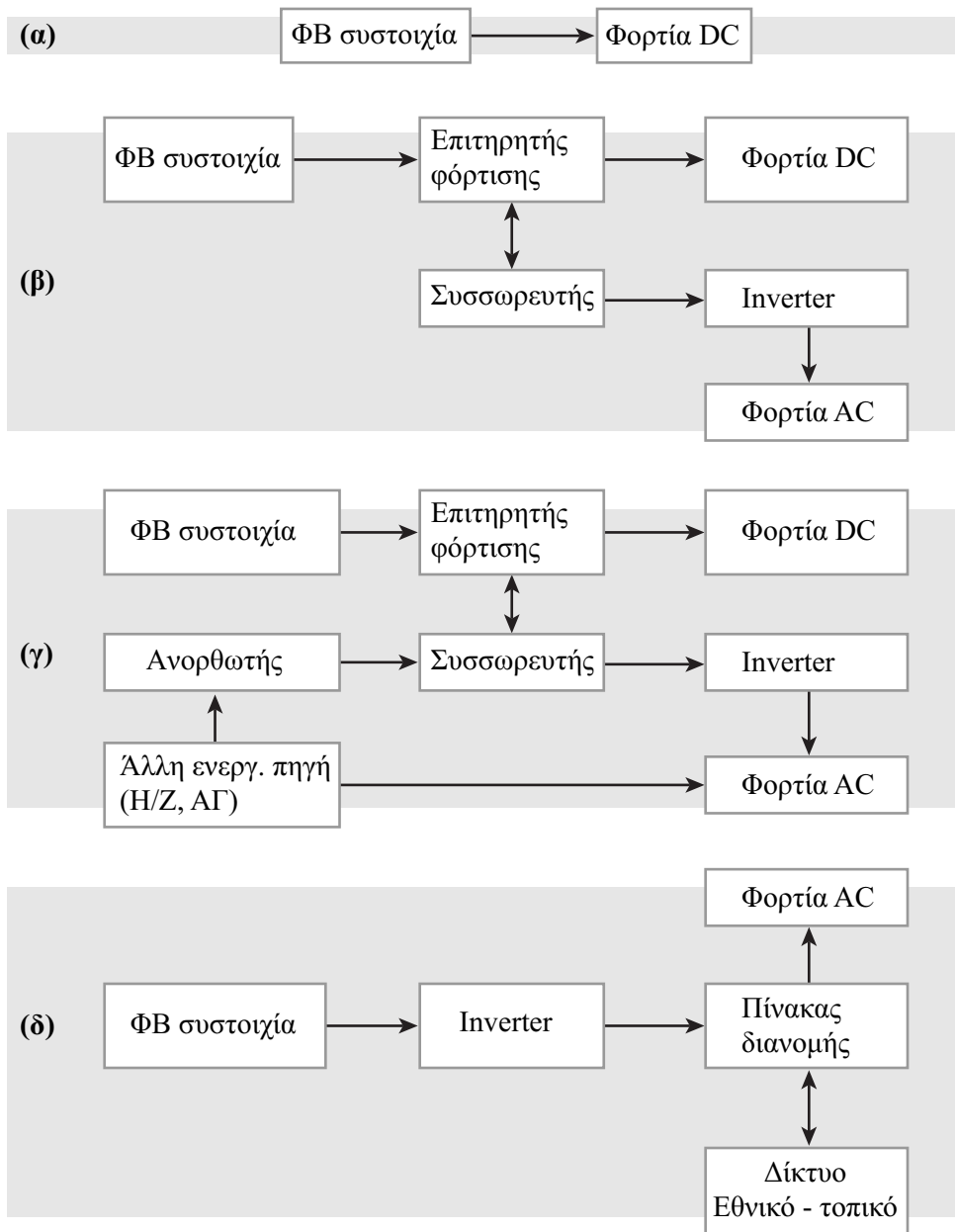
- *Αυτόνομα ΦΒ συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής (Direct-coupled PV systems), στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η ΦΒ συστοιχία, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άντληση για πότισμα καλλιεργειών που δεν απαιτούν αυστηρά τακτική λειτουργία του συστήματος.*
- *Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. αυτόνομα ΦΒ συστήματα φωτισμού οδών, αρχαιολογικών χώρων, αλυσλλίων, υποστήριξη συστημάτων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών, διατάξεων καταγραφής δεδομένων (Loggers) κ.α. Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών*

II. Υβριδικά ΦΒ συστήματα (Hybrid PV systems)

Στα υβριδικά ΦΒ συστήματα, στα οποία θα αναφερθούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6, η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από το συνδυασμό ΦΒ συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή, Α.Π.Ε. (π.χ. ανεμογεννήτρια, ΑΓ) ή πηγές συμβατικών καυσίμων (ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, H/Z). Ο προσδιορισμός των συνιστωσών Α.Π.Ε. προκύπτει με ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, με κριτήριο το βαθμό συμμετοχής του H/Z στη διασφάλιση της κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων στο σύστημα προβλέπεται αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (αυτονομία αποθηκευμένης ενέργειας).

B. ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid-connected systems)

Τα συστήματα αυτά συνδέονται απ' ευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το ΦΒ σύστημα, μια τεράστια “δεξαμενή” ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης. Συνεπώς, στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται σε αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, ως κατανεμημένα (Distributed) συστήματα και σε εκείνα που συνιστούν κεντρικούς ΦΒ σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο (Centralized systems). Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο ΦΒ συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των εγκατεστημένων ΦΒ συστημάτων παγκοσμίως (IEA, Photovoltaic Barometer). Τα τελευταία χρόνια



Σχήμα 5.2. Βασικά είδη ΦΒ συστημάτων. **(α)** Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με συστοιχία συνδεδεμένη απευθείας στο φορτίο (DC). **(β)** Αυτόνομο ΦΒ σύστημα με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία φορτίων συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσεως. **(γ)** Αυτόνομο ΦΒ υβριδικό σύστημα. **(δ)** ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο.

υπάρχει θεαματική αύξηση των ΦΒ συστημάτων κεντρικού σταθμού. Τα καταναεμμένα ΦΒ συστήματα, όμως, εξακολουθούν να αποτελούν την κύρια συνιστώσα των συνδεδεμένων στο δίκτυο ΦΒ συστημάτων, σε ποσοστό ~80% (Report IEA-PVPS 2010). Στην κατηγορία των κεντρικών ΦΒ συστημάτων ανήκουν και τα μεγάλα ΦΒ συγκροτήματα¹⁵², των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται κατ' ευθείας στο δίκτυο.

Τα καταναεμμένα ΦΒ συστήματα, διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας (Grid back-up) και σε εκείνα που λειτουργούν σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο, διοχετεύοντας την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια σ' αυτό (Grid interactive). Στην πρώτη περίπτωση το ΦΒ σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει κατά μέσο όρο τις μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Το δίκτυο καλύπτει έκτακτη ενεργειακή ζήτηση ή καταστάσεις αστοχίας του ΦΒ συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, το βασικότερο κριτήριο αφορά στην επιλογή εκείνης της ΦΒ συστοιχίας η οποία καλύπτει, κατά μέσο όρο, τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στις χρονικές περιόδους που το ΦΒ σύστημα υστερεί στην κάλυψη των καταναλώσεων της εφαρμογής, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, μέσα στο έτος, η συνολική ενέργεια από το δίκτυο στην εφαρμογή, προβλέπεται να είναι ίση με τη συνολική ενέργεια από το ΦΒ σύστημα στο δίκτυο. Αν η επιδίωξή μας είναι το ετήσιο οικονομικό ισοζύγιο μεταξύ παραγωγού και ΔΕΗ, κατά τη σχεδίαση του συστήματος λαμβάνεται υπ' όψη η διαφοροποίηση των τιμολογίων παραγωγής και κατανάλωσης.

5.2 Αυτόνομα ΦΒ συστήματα

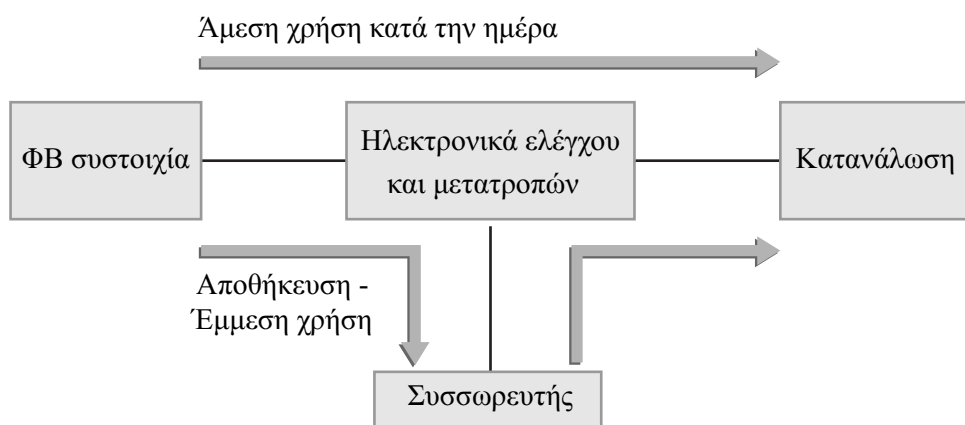
5.2.1 Ροή ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στην κατανάλωση

Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη ΦΒ συστοιχία, μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

- είτε χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών της εφαρμογής, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια, ως καταναλώσεις ή φορτία (*άμεση χρήση*),
- είτε αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των περιόδων συννεφιάς (*έμμεση χρήση*).

152. Μεγάλα ΦΒ συστήματα: Εισαγωγή, Η ΦΒ ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα.

Οι περιπτώσεις αυτές αποτυπώνονται παραστατικά στο σχήμα 5.3. Επίσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είτε αξιοποιείται ως έχει, δηλαδή, ως ενέργεια συνεχούς ρεύματος, είτε μετατρέπεται σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω διάταξης που ονομάζεται inverter. Πάντως, στις περισσότερες περιπτώσεις ενδείκνυται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος της ΦΒ συστοιχίας σε εναλλασσόμενο, δεδομένης της ευρείας χρήσης των συσκευών με τροφοδοσία 220 Vac.



Σχήμα 5.3. Διάγραμμα ροής της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας και τα βασικά τμήματα ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Στην πιο απλή μορφή του, η ΦΒ συστοιχία συνδέεται απευθείας στην κατανάλωση, χωρίς ηλεκτρονικά και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε κάθε περίπτωση, η μετατροπή της ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, στην είσοδο του ΦΒ συστήματος, σε ηλεκτρική και η μεταφορά της στο χώρο τελικής αξιοποίησής της, συνοδεύεται από απώλειες. Μέρος της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια των συσκευών, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των καλωδίων και των ηλεκτρονικών διατάξεων του ΦΒ συστήματος, αποβαλλόμενη, τελικά, προς το περιβάλλον.

Σε κάθε χαρακτηριστικό τμήμα της γραμμής παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, προσδιορίζεται ο βαθμός αξιοποίησης της διαθέσιμης ενέργειας ή της απόδοσής του, αν αφορά σε ενεργειακή μετατροπή. Οι χρησιμοποιούμενοι συντελεστές χαρακτηρίζουν το αίτιο, που προκαλεί την απώλεια ή το τμήμα του συστήματος στο οποίο συμβαίνει. Αναλυτικότερα, καθορίζονται οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στα επόμενα τμήματα του συστήματος:

- α. στη ΦΒ συστοιχία,
- β. στη γραμμή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας,

- γ. στις ηλεκτρονικές συσκευές του ΦΒ συστήματος και
- δ. στον ηλεκτρικό συσσωρευτή, αν το σύστημα περιλαμβάνει αποθήκευση ενέργειας.

Οι συντελεστές απωλειών ενέργειας στη ΦΒ συστοιχία προσδιορίζουν την ελάττωση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σχέση με αυτή που προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες, εξαιτίας των παραγόντων που αναφέρονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.8.1.

5.2.2 Μελέτη – σχεδιασμός αυτόνομου ΦΒ συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό, προτείνεται ένας γενικός τρόπος μελέτης ενός ΦΒ συστήματος. Αρχικά, δίδεται, αναλυτικά, η μελέτη ενός ΦΒ συστήματος και η μεθοδολογία υπολογισμού των χαρακτηριστικών του, με βάση το μοντέλο των συνεχών αίθριων ημερών. Η ανάλυση αυτή αφορά στη μαθηματική περιγραφή της ενεργειακής ροής, από τη ΦΒ συστοιχία μέχρι την έξοδο του ΦΒ συστήματος, με εφαρμογή των βασικών αρχών της Φυσικής. Στόχος είναι η παραγωγή σχέσεων με τις οποίες προσδιορίζονται τα μεγέθη και τα κύρια χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων του αυτόνομου ΦΒ συστήματος, δηλαδή,

- της ΦΒ συστοιχίας,
- της γραμμής μεταφοράς,
- των ηλεκτρονικών ισχύος και
- του ηλεκτρικού συσσωρευτή, αν απαιτείται

Στη συνέχεια, στην παράγραφο 5.4, εξετάζεται η γενικότερη περίπτωση προσδιορισμού του ΦΒ συστήματος, που καλύπτει ενεργειακά τη λειτουργία της εφαρμογής και σε περιόδους μη ηλιοφανών ημερών (υπολογισμός του ΦΒ συστήματος με βάση ορισμένες ημέρες αυτονομίας). Γενικά, η μελέτη ενός ΦΒ συστήματος περιλαμβάνει τρεις κύριες εργασίες.

- 1: Καταγραφή και επεξεργασία στοιχείων λειτουργίας της εφαρμογής (Load profile).
- 2: Υπολογισμό του μεγέθους των επιμέρους τμημάτων του ΦΒ συστήματος, με πρόβλεψη ημερών αυτονομίας συστήματος.
- 3: Λεπτομερή περιγραφή της εγκατάστασης και οικονομική ανάλυση.

5.2.3 Καθορισμός των υποσυστημάτων ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής.

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η ροή της ενέργειας, από τη θέση παραγωγής της μέχρι την κατανάλωση και εξάγονται οι βασικές σχέσεις υπολογισμού του μεγέ-

θους της ΦΒ συστοιχίας, με βάση τη διατήρηση της ενέργειας. Η μελέτη αφορά στην περίπτωση κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της εφαρμογής, με την προϋπόθεση συνεχών αίθριων ημερών.

5.2.3.1 Συσχέτιση παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα ΦΒ σύστημα

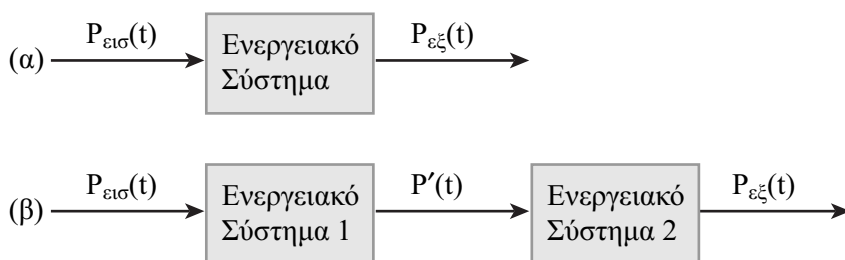
I. Μέσος συντελεστής απόδοσης

Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα μετατροπής ενέργειας, στο οποίο η ενέργεια εισέρχεται με ρυθμό $P_{\text{εισ}}$ και εξέρχεται με ρυθμό $P_{\text{εξ}}$ (Σχήμα 5.4α). Ο μέσος συντελεστής απόδοσης, $\bar{\eta}$, μέσα στη χρονική περίοδο T (ημέρα, μήνας, έτος), ορίζεται από τη σχέση

$$\bar{\eta} = \frac{E_{\text{εξ}}}{E_{\text{εισ}}} = \frac{\int_T P_{\text{εξ}}(t) dt}{\int_T P_{\text{εισ}}(t) dt} \neq \frac{P_{\text{εξ}}(t)}{P_{\text{εισ}}(t)} \quad (1\alpha)$$

όπου $E_{\text{εισ}}$, $E_{\text{εξ}}$ οι ενέργειες εισόδου-εξόδου στο σύστημα, ίσες με τα αντίστοιχα έργα εισόδου ($W_{\text{εισ}}$) και εξόδου ($W_{\text{εξ}}$).

Το τελευταίο κλάσμα αποτελεί το στιγμιαίο συντελεστή απόδοσης του συστήματος κάποια χρονική στιγμή t (εννοείται ότι μεταξύ εισόδου-εξόδου του συστήματος, δεν παρεμβάλλεται διάταξη αποθήκευσης ενέργειας) και γενικά, δεν συμπίπτει με το μέσο συντελεστή.



Σχήμα 5.4. (α) Ενεργειακή μετατροπή σε ένα σύστημα, (β) Ενεργειακή μετατροπή στην περίπτωση δύο συστημάτων.

II. Μέσος συντελεστής απόδοσης σειράς διαδοχικών συστημάτων

Ας θεωρήσουμε για απλότητα τα συστήματα 1 και 2, του σχήματος 5.4β. Ο μέσος συντελεστής του ολικού συστήματος στην περίοδο T , προκύπτει με βάση τον γενικό ορισμό:

$$\bar{\eta} = \frac{E_{εξ}}{E_{εισ}} = \frac{\int_T P_{εξ}(t)dt}{\int_T P_{εισ}(t)dt} = \frac{\int_T P'(t)dt}{\int_T P_{εισ}(t)dt} \cdot \frac{\int_T P_{εξ}(t)dt}{\int_T P'(t)dt} = \bar{\eta}_1 \cdot \bar{\eta}_2 \quad (1\beta)$$

5.2.3.2 Ημερήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

Έστω E_{σ} η ολική ηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από τη ΦΒ συστοιχία μέσα σε μια μέρα. Στη γενική περίπτωση, θεωρούμε ότι ένα μέρος της ενέργειας αυτής, ίσο με $E_{\sigma, \alpha}$, καταναλίσκεται *άμεσα*, χωρίς να αποταμιευθεί και το υπόλοιπο, $E_{\sigma, \varepsilon}$, χρησιμοποιείται αφού προηγουμένως αποταμιευθεί σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (*έμμεσα*) (Σχήμα 5.3).

$$E_{\sigma} = E_{\sigma, \alpha} + E_{\sigma, \varepsilon} \quad (2)$$

5.2.3.3 Ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια φορτίων κατανάλωσης

Η συνολική ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια E_L , που απαιτούν τα n στοιχεία κατανάλωσης της εφαρμογής, υπολογίζεται από τη σχέση

$$E_L = \sum_{i=1}^n P_{L, i} \cdot t_i = E_{L, \alpha} + E_{L, \varepsilon} = \sum_{i=1}^{n_{\alpha}} P_{L, \alpha, i} \cdot t_{\alpha, i} + \sum_{i=1}^{n_{\varepsilon}} P_{L, \varepsilon, i} \cdot t_{\varepsilon, i} \quad (3)$$

όπου n_{α} , αφορά στο πλήθος των φορτίων, ισχύος $P_{L, \alpha, i}$ έκαστο, που τροφοδοτούνται απευθείας απ' τη ΦΒ συστοιχία και n_{ε} , το αντίστοιχο πλήθος των φορτίων, ισχύος $P_{L, \varepsilon, i}$, το καθένα, που τροφοδοτούνται απ' το συσσωρευτή. Οι χρόνοι $t_{\alpha, i}$, $t_{\varepsilon, i}$, αφορούν στα διαστήματα λειτουργίας των φορτίων, σε κάθε περίπτωση τροφοδοσίας.

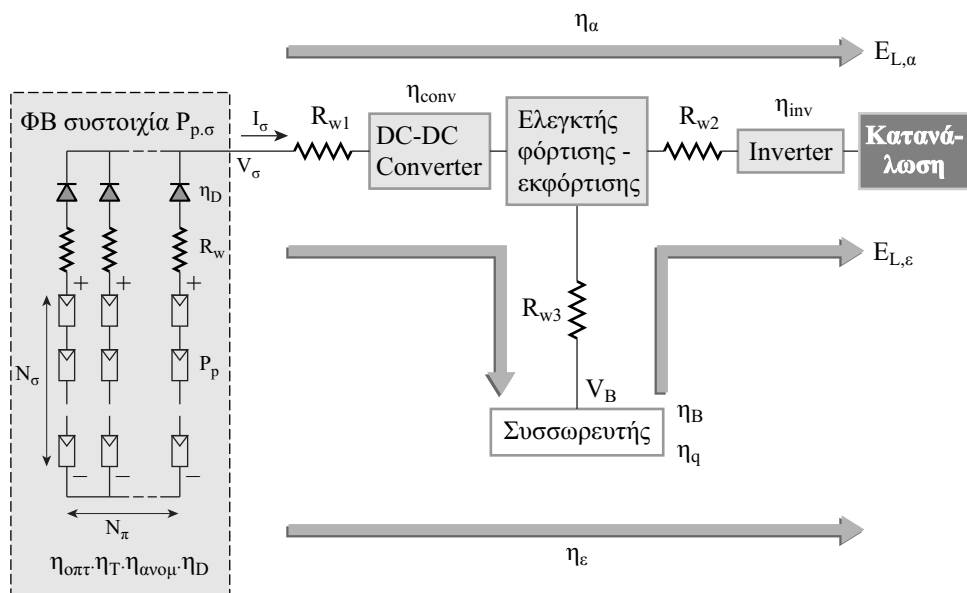
5.2.3.4 Ενεργειακό ισοζύγιο ημερησίως παραγόμενης-καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Στο σχήμα 5.5 έχουν σχεδιαστεί τα διάφορα τμήματα ενός τυπικού αυτόνομου ΦΒ συστήματος, καθώς επίσης και οι μέσοι συντελεστές ενεργειακών μετατροπών σε κάθε τμήμα του.

Το ενεργειακό ισοζύγιο, μέσα από κάθε δρόμο και συνολικά, οδηγεί στις σχέσεις

$$E_{\sigma, \alpha} = \frac{E_{L, \alpha}}{\eta_{\alpha}}, \quad E_{\sigma, \varepsilon} = \frac{E_{L, \varepsilon}}{\eta_{\varepsilon}} \quad \text{και} \quad E_{\sigma} = \frac{E_{L, \alpha}}{\eta_{\alpha}} + \frac{E_{L, \varepsilon}}{\eta_{\varepsilon}} \quad (4)$$

όπου $E_{\sigma} = E_{\sigma, \alpha} + E_{\sigma, \varepsilon}$. Η E_{σ} ισούται με το άθροισμα των ενεργειών που δίδουν όλα μαζί τα N ΦΒ πλαίσια της συστοιχίας.



Σχήμα 5.5. Γραμμικό ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός τυπικού ΦΒ συστήματος. Έχουν σημειωθεί τα σύμβολα των συντελεστών, που καθορίζουν την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, τη μεταφορά της και τις αποδόσεις των συσκευών και διατάξεων που συνθέτουν το ΦΒ σύστημα. Οι σημασίες τους αναλύεται στο κείμενο.

Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, P_m , που αποδίδει ένα ΦΒ πλαίσιο, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας, εμφανίζει, σχεδόν, αναλογική (3.8.3) συμπεριφορά¹⁵³ προς την πυκνότητα ισχύος, G_r , της ηλιακής ακτινοβολίας. Προκειμένου, μάλιστα, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς να ισούται συνεχώς ή να προσεγγίζει τη μέγιστη ισχύ P_m , στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας, απαιτείται συνεχής ανίχνευση και παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT, Maximum Power Point Tracking). Χρησιμοποιείται ειδική ηλεκτρονική διάταξη, η οποία στην πιο εξελιγμένη, σήμερα, μορφή της, αξιοποιεί πληροφορίες των θερμοκρασιών του ΦΒ πλαισίου και του συσσωρευτή του συστήματος καθώς και των στιγμιαίων μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας (§3.8.5, §4.1.12). Στην περίπτωση που η ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια δεν αποταμιεύεται σε συσσωρευτές, η μη χρησιμοποίηση διάταξης MPPT, έχει ως αποτέλεσμα την αισθητά μειωμένη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της ΦΒ συστοιχίας.

153. Απόκλιση εμφανίζεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της κυψελίδας όταν αυξάνεται η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

5.2.3.5 Συντελεστές απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο μέσος συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στον καταναλωτή, ισούται το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται ημερησίως (μηνιαίως, ετησίως) στο φορτίο, στην έξοδο του ΦΒ συστήματος, διά της αντιστοίχως παραγόμενης ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία.

$$\eta_{\text{μετ}} = \frac{E_{\text{ΦΒΣ}}}{E_{\sigma}} \quad (5\alpha)$$

Για ευκολία παραλείπεται η παύλα στο συμβολισμό του μέσου συντελεστή μεταφοράς και στους σχετιζόμενους μ' αυτόν συντελεστές.

Η τιμή του καθορίζεται από το συνολικό αποτέλεσμα των ημερήσιων, μηνιαίων ή ετήσιων συντελεστών απωλειών και αποδόσεων όλων των ενδιάμεσων υποσυστημάτων. Ο μέσος συντελεστής προκύπτει ίσος με το γινόμενο των μέσων συντελεστών απωλειών και απόδοσης των αντίστοιχων τμημάτων και συσκευών,

$$\eta_{\text{μετ}} = \eta_w \cdot \eta_{\text{ΗΔ}} \cdot \eta_E \quad (5\beta)$$

όπου η_w , ο συντελεστής ενεργειακής απώλειας στις γραμμές μεταφοράς, $\eta_{\text{ΗΔ}}$, ο ολικός συντελεστής απόδοσης των ηλεκτρονικών διατάξεων (converter, inverter, ελεγκτής φόρτισης) και η_E , ο συντελεστής απόδοσης ενέργειας του συσσωρευτή, αν περιλαμβάνεται. Τυπικές τιμές του βρίσκονται στην περιοχή 0,68 έως 0,98, ανάλογα με τη σύνθεση του ΦΒ συστήματος. Στη συνέχεια αναφερόμαστε αναλυτικότερα στις εκφράσεις του, άμεσης και έμμεσης μεταφοράς ενέργειας.

Χαρακτηριστικές τιμές των συντελεστών απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Ι. Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, η_{α} (Άμεση αξιοποίηση)

Αφορά το τμήμα του ΦΒ σταθμού από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο του inverter. Καθορίζεται από

- το συντελεστή η_{conv} , απόδοσης του μετατροπέα συνεχούς σε συνεχή ηλεκτρική τάση (dc-dc converter). Συνοδεύεται, συνήθως, από διάταξη MPPT. Η απόδοση των σύγχρονων μετατροπέων κυμαίνεται μεταξύ 87% και 93%. Τυπική τιμή για τις εφαρμογές: $\eta_{\text{conv}} \approx 90\%$,
- τους συντελεστές που προσδιορίζονται με βάση τις απώλειες στις αντιστάσεις R_{w_1} , R_{w_2} και R_{w_3} , των γραμμών μεταφοράς. Θεωρούμε συνολικές απώλειες σ' όλη τη διαδρομή του ρεύματος, κατά τους δύο δρόμους τροφοδοσίας. Σε κάθε περίπτωση, οι διαστάσεις των καλωδίων επιλέγονται έτσι ώστε οι απώλειες να μην υπερβαίνουν το 2-3%. Μπορούμε, λοιπόν, να θεωρήσουμε ως τυπική τιμή του συντελεστή απωλειών Joule, σε κάθε συνολική γραμμή μεταφοράς, την $\eta_w = 0,98$,

- το συντελεστή απόδοσης του inverter, η_{inv} . Διατάξεις σύγχρονης τεχνολογίας χαρακτηρίζονται από υψηλό συντελεστή $\sim 96\%$. Η απόδοση του inverter εξαρτάται από το ποσοστό του φορτίου που καλύπτει κάθε στιγμή. Η απαίτηση από ένα inverter είναι να αποδίδει το ίδιο καλά, τόσο σε μικρό ποσοστό φορτίου, όσο και σε πλήρες φορτίο (π.χ. απόδοση 90% σε 10% του φορτίου, 96% σε 80-100% του φορτίου, § 4.2.2). Τυπική τιμή για τις εφαρμογές: $\eta_{inv}=94\%$.

Αναλυτική έκφραση για το συντελεστή η_α : $\eta_\alpha = \eta_w \cdot \eta_{conv} \cdot \eta_{inv}$

Τυπική τιμή του η_α , με (χωρίς) converter: $\eta_\alpha = 0,98 \times 0,90 \times 0,94 \approx 0,83$ (0,92)

Σε περίπτωση απευθείας τροφοδοσίας από τη ΦΒ συστοιχία, χωρίς inverter: $\eta_\alpha = 0,98$.

II. Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, η_e (Εμμεση αξιοποίηση)

Αφορά στο τμήμα του ΦΒ σταθμού, από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο του inverter, διαμέσου του συσσωρευτή. Ο συντελεστής η_e εξαρτάται από ό,τι ο η_α και επιπλέον από

- την κατανάλωση στη δίοδο απομόνωσης στον επιτηρητή φόρτισης. Τυπική τιμή: $\eta_D \approx 0,99$,
- απώλεια ενέργειας κατά τη φόρτιση και στη συνέχεια, εκφόρτιση των συσσωρευτών. Για τη συνολική φάση, φόρτισης-εκφόρτισης, εκφράζεται με το συντελεστή απόδοσης συσσωρευτού, η_E , με τυπική τιμή $\eta_E = 0,85$ (§ 4.1.10),
- την ποσοστιαία κατανάλωση στις γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον ελεγκτή φόρτισης μέχρι τον χώρο του συσσωρευτή. Τυπική τιμή, $\eta_w = 0,98$.

Ας συμβολίσουμε το γινόμενο των τριών συντελεστών με η_ϵ^* : $\eta_\epsilon^* = \eta_D \cdot \eta_w \cdot \eta_E$

Τότε η αναλυτική έκφραση για το συντελεστή η_e : $\eta_e = \eta_\alpha \cdot \eta_\epsilon^*$

Τυπική τιμή του η_ϵ^* : $\eta_\epsilon^* = 0,99 \times 0,98 \times 0,85 \approx 0,82$

Τυπική τιμή του η_e , με (χωρίς) dc-dc converter: $\eta_e = \eta_\alpha \cdot \eta_\epsilon^* \approx 0,68$ (0,76)

Σε περίπτωση μη χρησιμοποίησης dc-dc converter και inverter: $\eta_e = 0,80$.

Γενικά, ο συντελεστής ενεργειακής μεταφοράς παίρνει τιμές στο διάστημα $0,68 \leq \eta_{μετ} \leq 0,98$.