

Ι. Ε. Φραγκιαδάκης

Φωτοβολταϊκά Συστήματα



3η Έκδοση

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 960-456-007-7

© Copyright, 2004, 2009, Ιωάννης Φραγκιαδάκης, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Πρώτη έκδοση 2004

Δεύτερη έκδοση 2006

Τρίτη έκδοση 2009

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**

Βιβλιοπωλείο

www.ziti.gr

Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαίας

Τ.Θ. 4171 • Περαία Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 23920.72.222 (3 γραμ.) - Fax: 23920.72.229

e-mail: info@ziti.gr

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 2310.203.720, Fax 2310.211.305

e-mail: sales@ziti.gr

Πρόλογος

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού (ΦΒ) φαινομένου έγινε το 1839, από τον πειραματικό Φυσικό Edmund Becquerel, σε ηλεκτρολυτικά υγρά. Πέρασαν περισσότερο 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 ιδιαίτερος 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 περυσότερη 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 συμβά-

λουν 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 ηλεκτροπαραγωγό 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 (Η/Ζ), 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 μέρος 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 εγκardίως 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.

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
III. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	5
IV. Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας και διεθνώς	13

1ο Κεφάλαιο

Η Ηλιακή ακτινοβολία

1.1	Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	19
1.1.1	Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	19
1.1.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	25
1.1.2.1	Χαρακτηριστικά μεγέθη της ΗΜ ακτινοβολίας	21
1.1.2.2	Φωτομετρικά μεγέθη	33
1.2	Η ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης	35
1.2.1	Ο ήλιος	35
1.2.2	Η ακτινοβολία του ήλιου	35
1.2.3	Η ηλιακή σταθερά	36
1.2.4	Στοιχεία ατμοσφαιρικής Φυσικής	37
1.2.4.1	Τα κύρια αέρια της ατμόσφαιρας και η σημασία τους	39
1.2.4.2	Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας	41
1.2.4.3	Η επίδραση της ατμόσφαιρας της γης στη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας	43
1.2.5	Ολική, απευθείας, διάχυτη και διάχυτα ανακλώμενη ακτινοβολία. Ορολογία	50
1.3	Όργανα μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας και της φασματικής της κατανομής	58
1.4	Η κίνηση της γης γύρω απ' τον ήλιο. Οι συντεταγμένες της θέσης του ήλιου σε σύστημα παρατηρητή	62
1.4.1	Χρόνος ανατολής – δύσης ηλίου. Διάρκεια ημερήσιου τόξου	67
1.5	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο	69
1.6	Ηλιοφάνεια	71
1.7	Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος	72

1.8	Εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας	73
1.8.1	Δυνατότητα αξιοποίησης της ΦΒ ενέργειας	75
1.9	Προσανατολισμός του συλλέκτη	77
1.9.1	Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη	77
1.9.2	Προσανατολισμός συλλέκτη ως προς τον αληθή Νότο	80
1.9.2.1	Προσδιορισμός του αληθούς Νότου	80
1.9.2.2	Ο αληθής ηλιακός χρόνος και η Εξίσωση του Χρόνου	80
1.9.2.3	Προσδιορισμός του αληθούς Νότου με βάση τον επίσημο ή πολιτικό χρόνο του τόπου	83
1.9.3	Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμός τους	85
1.9.3.1	Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης. Γωνία κλίσης για βέλτιστη ενεργειακή απολαβή συλλέκτη	85
1.9.3.2	Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης του συλλέκτη	88
1.9.3.3	Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από ένα ή δύο άξονες	89
1.10	ΦΒ συλλέκτες ειδικής διαμόρφωσης	92
1.10.1	ΦΒ πλαίσια συγκεντρωτικού τύπου	92
1.10.2	Επίπεδα ΦΒ πλαίσια με ανακλαστήρες	95
1.11	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών ΦΒ συγκροτήματος	95
	Ερωτήσεις και προβλήματα	103

2ο Κεφάλαιο

Στοιχεία από τη Φυσική Στερεάς Κατάστασης.

Η επαφή ημιαγωγών τύπου p και n

2.1	Η έννοια της διάχυσης	109
2.2	Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή της επαφής δύο σωμάτων	112
2.2.1	Ο ρόλος του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου	114
2.3	Ημιαγωγοί. Επαφή p-n ημιαγωγών	115
2.3.1	Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών	115
2.3.2	Διάκριση των υλικών με κριτήριο την αγωγιμότητά τους, σύμφωνα με τη θεωρία ζωνών	120
2.3.3	Στατιστική Fermi σε μέταλλα και ημιαγωγούς	121
2.3.3.1	Μέταλλα	122
2.3.3.2	Ενδογενής ημιαγωγός	124
2.3.3.3	Οι συγκεντρώσεις των φορέων στον ενδογενή ημιαγωγό	125

2.3.4	Ημιαγωγοί πρόσμειξης	127
2.3.5	Επαφή ημιαγωγών p-n	130
2.3.5.1	Η στάθμη Fermi στην επαφή p-n	134
2.3.5.2	Τάξη μεγέθους ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου	135
2.4	Ηλεκτρική συμπεριφορά της επαφής p-n	135
2.4.1	Εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικής τάσης στην πραγματική επαφή p-n	135
2.4.2	Φορείς πλειονότητας και μειονότητας	137
2.4.3	Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης μιας επαφής p-n	141
2.4.4	Τάση διάσπασης επαφής	144
	Ερωτήσεις και προβλήματα	145

3ο Κεφάλαιο

Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

3.1	Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από την ύλη	151
3.1.1	Φωτοαγωγιμότητα	155
3.1.2	Εύχρηστη μορφή της σχέσης E-λ	156
3.2	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	157
3.2.1	Οι βασικές προϋποθέσεις δημιουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου	157
3.2.2	Λεπτομέρειες εσωτερικών διεργασιών. Το ηλεκτρικό πεδίο επαφής και ο ρόλος του	157
3.2.3	Τα ηλεκτρικά ρεύματα στο εσωτερικό ενός ΦΒ στοιχείου	160
3.2.4	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	161
3.2.5	Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενου ΦΒ στοιχείου	163
3.2.6	Χαρακτηριστική καμπύλη I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου	165
3.2.7	Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος	166
3.2.8	Καμπύλη φόρτου	167
3.2.9	Το ΦΒ φαινόμενο περιληπτικά	168
3.3	Η τεχνολογία του ΦΒ στοιχείου	169
3.3.1	Τεχνικές δημιουργίας των επαφών p-n ΦΒ στοιχείων	169
3.3.2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου	173
3.3.2.1	Φωτοβολταϊκά στοιχεία άλλων υλικών, λεπτών επιστρώσεων	175
3.3.2.2	Οργανικά Φωτοβολταϊκά στοιχεία	176
3.3.3	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ΦΒ στοιχείου. Αντιανακλαστική επίστρωση	178
3.4	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	180
3.4.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου	180
3.4.2	Η καμπύλη I-V ενός ΦΒ στοιχείου	182
3.4.3	Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων. Η έννοια της ισχύος αιχμής	183

3.4.4	Εξάρτηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας	184
3.4.5	Παράγων πλήρωσης ΦΒ στοιχείου	185
3.4.6	Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου	186
3.4.6.1	Εξάρτηση της ισχύος αιχμής και της απόδοσης του ΦΒ στοιχείου από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας	188
3.4.6.2	Θεωρητικό όριο της απόδοσης των ΦΒ στοιχείων	189
3.4.6.3	Αναλυτικός προσδιορισμός του ιδανικού ορίου απόδοσης των ΦΒ στοιχείων	190
3.4.7	Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ΦΒ στοιχείου	196
3.4.8	ΦΒ στοιχεία ειδικής σχεδίασης, βελτιωμένης απόδοσης	200
3.5	Μείωση κόστους των ΦΒ στοιχείων με την εξέλιξη της τεχνολογίας	201
3.6	Τρόποι σύνδεσης ΦΒ στοιχείων	202
3.7	Το Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	204
3.7.1	Κατασκευαστικά στοιχεία	204
3.7.2	Η ονομαστική ισχύς ενός ΦΒ πλαισίου. Συνθήκες κανονικής λειτουργίας	208
3.8	Απόδοση του ΦΒ πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν	209
3.8.1	Συντελεστής απόδοσης του ΦΒ πλαισίου	209
3.8.1.1	Αναλυτική παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν το συντελεστή απόδοσης	212
3.8.2	Κατανομή θερμοκρασίας σε ΦΒ πλαίσιο	218
3.8.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ πλαισίου. Εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία κυψελίδας του ΦΒ πλαισίου	219
3.8.4	Πειραματικά αποτελέσματα για την εξάρτηση της μέγιστης ισχύος ΦΒ πλαισίου από τη θερμοκρασία	221
3.8.5	Σημείο λειτουργίας του ΦΒ πλαισίου κάτω από διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας	223
3.9	Προβλήματα σκίασης ή βλάβης ενός ΦΒ στοιχείου του πλαισίου. Διατάξεις προστασίας της λειτουργίας των ΦΒ πλαισίων	224
3.10	Επιμερισμός του κόστους κατασκευής του ΦΒ πλαισίου	226
3.11	Το ΦΒ σύστημα	227
3.11.1	Συντελεστής απόδοσης ΦΒ συστοιχίας	228
3.11.2	Βασική μορφή ενός ΦΒ συστήματος	232
	Ερωτήσεις και προβλήματα	235

4ο Κεφάλαιο

Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και διαχείριση ισχύος σε ΦΒ συστήματα

4.1	Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές	243
4.1.1	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή	243
4.1.2	Συσσωρευτής Μολύβδου - Θεικού οξέος (Pb/H ₂ SO ₄)	245
4.1.3	Χρόνος ζωής συσσωρευτή	249
4.1.4	Προσδιορισμός της κατάστασης φόρτισης συσσωρευτή (State Of Charge, SOC)	250
4.1.5	Εξάρτηση της χωρητικότητας συσσωρευτή από τους κύκλους λειτουργίας του με δεδομένο βάθος εκφόρτισης	252
4.1.6	Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή	253
4.1.6.1	Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Πάγωμα του ηλεκτρολύτη	254
4.1.7	Αναγωγή της πυκνότητας του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία αναφοράς	255
4.1.8	Ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή	255
4.1.9	Αυτοεκφόρτιση συσσωρευτή	256
4.1.10	Απόδοση ενέργειας και φορτίου	256
4.1.11	Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή	257
4.1.12	Καμπύλη φόρτου σε ΦΒ σύστημα με και χωρίς συσσωρευτές	257
4.2	Τα ηλεκτρονικά των φωτοβολταϊκών	261
4.2.1	Ο ελεγκτής φόρτισης συσσωρευτή	261
4.2.2	Μετατροπείς (converters) DC-DC, DC-AC και AC-DC	264
	Ερωτήσεις και προβλήματα	270

5ο Κεφάλαιο

Φωτοβολταϊκά συστήματα

5.1	Χαρακτηριστικά, κατηγορίες και σύνθεση των ΦΒ συστημάτων	273
5.1.1	Χαρακτηριστικά των ΦΒ συστημάτων	273
5.1.2	Κατηγορίες και σύνθεση ΦΒ συστημάτων	273
5.2	Αυτόνομα ΦΒ συστήματα	277
5.2.1	Ροή ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία στην κατανάλωση	277
5.2.2	Μελέτη - σχεδιασμός αυτόνομου ΦΒ συστήματος	279
5.2.3	Καθορισμός των υποσυστημάτων ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος. Κάλυψη των ημερησίων ενεργειακών απαιτήσεων της εφαρμογής	279
5.2.3.1	Συσχέτιση παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σ' ένα ΦΒ σύστημα	280
5.2.3.2	Ημερήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	281
5.2.3.3	Ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια φορτίων κατανάλωσης	281
5.2.3.4	Ενεργειακό ισοζύγιο ημερησίως παραγόμενης-καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας	281

5.2.3.5	Συντελεστές απωλειών μεταφοράς ενέργειας	283
5.2.3.6	Συντελεστές απόδοσης ΦΒ συστοιχίας - ΦΒ συστήματος	285
5.2.3.7	Λόγος επίδοσης ΦΒ συστοιχίας - ΦΒ συστήματος	285
5.2.3.8	Αποδοτικότητα ΦΒ συστοιχίας - Συντ/στης χρησιμοποίησης	287
5.2.4	Στιγμιαίες και μέσες τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών της ηλιακής ακτινοβολίας και της αποδιδόμενης μέγιστης ισχύος ΦΒ ενέργειας	290
5.2.5	Συσχέτιση της ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχίας με την παραγόμενη απ' αυτήν ηλεκτρική ισχύ	292
5.2.6	Συσχέτιση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με την ιδανική δυνατότητα μιας ΦΒ συστοιχίας	293
5.2.6.1	Εμπειρική σχέση προσδιορισμού του λόγου επίδοσης PR_T	295
5.2.7	Ισοδύναμοι χρόνοι ηλιοφάνειας και αποδοτικότητας ΦΒ συστοιχίας	299
5.2.8	Υπολογισμός της ισχύος αιχμής της ΦΒ συστοιχίας	301
5.2.8.1	Φωτοβολταϊκό δυναμικό ενός τόπου	302
5.2.9	Υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας της συστοιχίας συσσωρευτών ενός αυτόνομου ΦΒ συστήματος	305
5.2.9.1	Εκτίμηση των οριακών τιμών του βάθους εκφόρτισης συσσωρευτή	307
5.3	Καθορισμός της ΦΒ συστοιχίας	309
5.3.1	Σχεδιασμός - Κριτήρια	309
5.3.2	Οικονομικά στοιχεία	314
5.4	Προσδιορισμός αυτόνομου ΦΒ συστήματος με απαίτηση αυτονομίας ορισμένων ημερών	317
5.4.1	Ισχύς αιχμής ΦΒ συστοιχίας για κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων, η συννεφιασμένων ημερών αυτονομίας	318
5.4.2	Χωρητικότητα συσσωρευτή με βάση την αυτονομία του ΦΒ συστήματος για η συννεφιασμένες ημέρες	320
5.4.3	Κόστος ενέργειας αυτόνομου ΦΒ συστήματος σε σχέση με τις ημέρες αυτονομίας	321
5.4.4	Ενεργειακή αποδοτικότητα ΦΒ πλαισίων διαφορετικής τεχνολογίας	326
5.5	Παραδείγματα υπολογισμού αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση την αυτονομία του συσσωρευτή	330
	Ερωτήσεις και προβλήματα	351

6ο Κεφάλαιο

ΦΒ Υβριδικά Συστήματα

6.1	Αιολική ενέργεια	357
-----	------------------------	-----

6.1.1	Η ταχύτητα του ανέμου	357
6.1.1.1	Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος πάνω από το έδαφος	365
6.1.1.2	Επίδραση μεμονωμένων εμποδίων στη ροή του ανέμου	365
6.1.2	Ισχύς κινητικής ενέργειας ανέμου	366
6.1.3	Ανεμογεννήτριες	367
6.1.3.1	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια	367
6.1.4	Αιολικά συστήματα	369
6.1.5	Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική	369
6.1.6	Μεθοδολογία καθορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ	374
6.1.6.1	Συντελεστής χρησιμοποίησης ισχύος ανεμογεννήτριας	375
6.1.6.2	Διαδοχικά βήματα προσδιορισμού της ονομαστικής ισχύος ΑΓ. Περίπτωση πλήρους κάλυψης φορτίου	381
6.1.6.3	Αιολικό υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους	383
6.2	ΦΒ υβριδικά συστήματα	383
6.2.1	Βασικά στοιχεία ΦΒ υβριδικού συστήματος	385
6.2.2	Στατιστικός υπολογισμός των συντελεστών $CF_{\Phi B}$ και $CF_{ΑΓ}$, με βάση τα ηλιακά και ανεμολογικά δεδομένα του τόπου εγκατάστασης	389
6.2.3	Αναλυτική παρουσίαση των βασικών μεθοδολογιών υπολογισμού ενός ΦΒ υβριδικού συστήματος	389
6.2.3.1	ΦΒ υβριδικό σύστημα με ΑΓ και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας	392
6.2.3.2	ΦΒ υβριδικό σύστημα, ΑΓ και συσσωρευτής σε συνεργασία με συμβατική ενεργειακή πηγή. Μέθοδος ελαχιστοποίησης κόστους κύκλου ζωής του ΦΒ υβριδικού συστήματος	396
	Ερωτήσεις και προβλήματα	407

Παραρτήματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αναγωγή τιμών πυκνότητας ισχύος και ενεργειακής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας, από οριζόντιο σε κεκλιμένο επίπεδο	415
--	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Θερμικό πρότυπο ΦΒ πλαισίου	427
-----------------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Τεχνικά στοιχεία ΦΒ συστημάτων	434
--------------------------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Χάρτες κατανομής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας, βέλτιστης γωνίας κλίσης ΦΒ συστοιχιών και ενεργειακής αποδοτικότητας ηλιοτροπικών ΦΒ συστημάτων	439
--	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα 445

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Ορολογία Φωτοβολταϊκής τεχνολογίας 452

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 461

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΟΡΩΝ 462

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 επεμβάσεών 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 περισσοτέρων.

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. Ο στόχος να μειωθούν οι εκπομπές ρυπογόνων αερίων μέχρι το 2012, κατά 5,2%, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, δεν φαίνεται, με τα σημερινά δεδομένα, εφικτός.

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 καυσίμων 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 συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σ' αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι δευτέρες, 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).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

Το κάρβουνο

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 διείσδυση 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 CO_2 , 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.

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 καθακής 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 τρόπο για τα ολοένα και πιο πιθανά πυρηνικά ατυχήματα. Από τα πιο σημαντικά, εκείνο στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβανίας (ΗΠΑ), τον Απρίλιο του 1979 και εκείνο στο Τσέρνομπιλ της Ρωσίας, τον Απρίλιο του 1986, τρομοκράτησαν όλο τον κόσμο, ο οποίος συνειδητοποίησε με φρίκη την ανικανότητά του να αντιμετωπίσει ένα ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα τον απειλεί με αφανισμό.

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 6,5% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης και το 17% της παγκοσμίως παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγόμενη παγκοσμίως ηλεκτρική ισχύς σε πυρηνικά εργοστάσια ανέρχεται σε ~370 GW (2006). Στην Ευρώπη ξεπερνά τα 158,4 GW, με τη Γαλλία στα 63,5 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.

III. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση 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 υδροστρόβιλους, που



Σχήμα Ε1. Το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο του Λάδωνα, στην Αρκαδία.

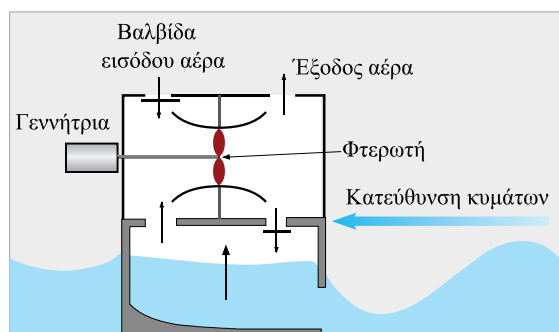
με τη σειρά τους θέτουν σε κίνηση ηλεκτρογεννήτριες. Η δημιουργία τεχνητών λιμνών με φράγματα έχει περιορισμένη εφαρμογή λόγω των απαιτούμενων ειδικών εδαφικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η κατασκευή ενός φράγματος, παρότι η περιοχή καλύπτει τα τεχνικά κριτήρια, μπορεί να προκαλέσει σημαντική οικολογική καταστροφή και ενδεχομένως μετακίνηση πληθυσμού, λόγω της κατάκλισης με νερό εκτεταμένων εύφορων και με ιδιαίτερη φυσική ομορφιά περιοχών. Η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

Ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκών κινήσεων και θαλασσίων ρευμάτων

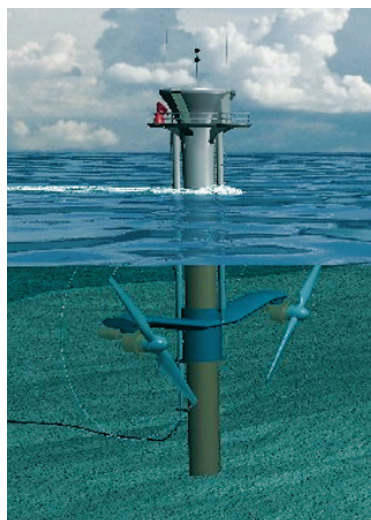
Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή τις παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, όπου το ύψος των κυμάτων και η διάρκεια κυματισμού καθώς και η ταχύτητα των θαλασσίων ρευμάτων επιτρέπουν την ενεργειακή αξιοποίησή τους. Στη Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής 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 E2α, 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 E2β).



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



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



β. Σχηματική παράσταση υποθαλάσσιας ηλεκτρογεννήτριας.

Σχήμα E2. Διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων (α και γ), της παλιρροϊκής κίνησης και των θαλασσίων ρευμάτων (β).

Η μεγάλη πυκνότητα του νερού σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα, καθιστά τις υποθαλάσσιες ηλεκτρογεννήτριες αποδοτικές, παρότι η ταχύτητα των θαλάσσιων 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 E2β). Μια άλλη ενδιαφέρουσα ιδέα που μελετάται, αφορά στην αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων σε ειδικές κατασκευές, στις οποίες ενσωματώνεται ανεμογεννήτρια και μέρος των οποίων είναι βυθισμένο στη θάλασσα (Σχήμα E2γ). Κατά τον κυματισμό, ο 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 ($>150^{\circ}\text{C}$), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεωθερμικό δυναμικό που αφορά αποκλειστικά σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανερχόταν παγκοσμίως, το 2003, σε 10 GW. Στη χώρα μας, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως σε θερμοκηπιακές μονάδες, σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας και σε νησιά του Βορειοανατολικού και Κεντρικού Αιγαίου.



Σχήμα E3. Γεωθερμική γεώτρηση στη Ν. Κεσσάνη (Ν. Ξάνθης).

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 εγκαταστημένη¹ ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών από 7,6 GW, το 1997, έφτασε τα 120,8 GW το 2008. Στην Ευρώπη, η αντίστοιχη ισχύς είναι κοντά στα 66,0 GW. Στον πίνακα Ε1 αναφέρονται οι χώρες με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ανεμογεννητριών.



Σχήμα Ε4. 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 συνολική εγκαταστημένη^{2α} ισχύς βρίσκεται στα 985 MW (2008), με στόχο τα 3,3 GW μέχρι το 2010. 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^{2β} (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 ηλεκτρικής 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.

1. Global Wind Energy Council (GWEC), 2008.

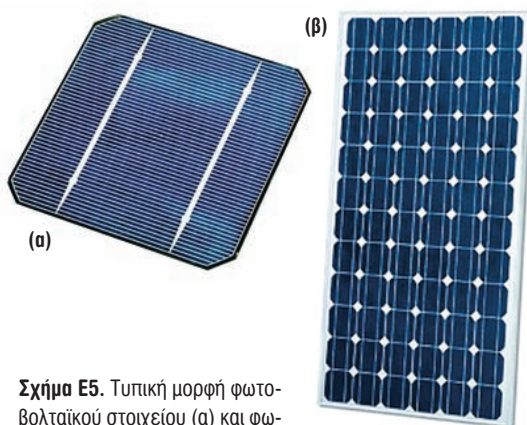
2. α. International Energy Agency (I.E.A.), Annual Report 2007 – Renewables 2007, Global Status Report – EUROBSERV'ER, Photovoltaic Energy Barometer 2008. β. Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), 2008.

Πίνακας Ε1. Εγκατεστημένη ισχύς Αιολικών και Φωτοβολταϊκών συστημάτων σε διάφορες χώρες και παγκοσμίως.

Χώρα		Εγκατεστημένη ισχύς (2008)	
		Αιολικά (GW)	Φωτοβολταϊκά (MW _p)
Ευρώπη	Γερμανία	23,9	5.351,0
	Ισπανία	16,8	3.404,8
	Δανία	3,3	3,2
	Ιταλία	3,7	317,5
	Ολλανδία	2,2	54,9
	Ηνωμένο Βασίλειο (UK)	3,2	21,6
	Ελλάς	~1,0	18,5
	Ευρώπη	66,0	9.533,3
Άλλες χώρες	Ινδία	9,6	112,0
	Ιαπωνία	1,9	2.170,0
	Κίνα	12,2	200,0
	ΗΠΑ	25,2	1.173,0
	Παγκοσμίως	120,8	15.200,0

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,



Σχήμα Ε5. Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου (α) και φωτοβολταϊκού πλαισίου (β).

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.

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 (φωτόρευμα), 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 περί τα 4-5 €/W_p (peak Watt, η έννοια αυτή ορίζεται στην § 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 μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύ-κρυσταλλικό. 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.

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 Πυριτίου 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 200 W_p .

Η ΦΒ ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα

Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ συστημάτων, από 313,5 MW_p το 1991, έφτασε τα 15,2 GW_p , στο τέλος του 2008 (Πίνακας Ε1 και σχήμα Ε7). Απ' αυτά,

περίπου 9,5 GW_p αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, ~1,2 GW_p στις ΗΠΑ και ~2,2 GW_p στην Ιαπωνία. Όπως προκύπτει από το σχήμα Ε1, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά τη χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε στο 54% το 2008. Με βάση αυ-



Σχήμα Ε6. Φωτοβολταϊκό Πάρκο, 6,3 MW_p, στη Βαυαρία, Γερμανία.

τούς τους ετήσιους ρυθμούς διείσδυσης των ΦΒ συστημάτων στο ενεργειακό δυναμικό, η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς τους αναμένεται το 2010, να ξεπεράσει τα 30 GW_p (με την επιφύλαξη των πιθανών επιπτώσεων της οικονομικής κρίσης του 2009). Μεγάλοι ΦΒ σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στις ΗΠΑ (Hesperia, 1 MW, 1982 – Tuscon, 2,4 MW_p, 2002) και στην Ευρώπη (Ισπανία, 1 MW_p, 1994 – Ιταλία, Vasto, 1MW_p, Serre, 3,3 MW_p, 1994 – Γερμανία, Büstadt 5 MW_p, Bavaria 6,3 MW_p, Pooking 10 MW_p, Waldpolenz 40 MW_p – Πορτογαλία, Septra 11 MW_p – Ισπανία, Beneixama 20 MW_p, Puertollano 47 MW_p, Olmedilla 60 MW_p).

Στην Ελλάδα, η εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, με στοιχεία του 2008 (Πίνακας Ε1), ανερχόταν σε 18,5 MW_p, με στόχο τα 700 MW_p στο τέλος του 2010 (Εκκρεμούν αιτήσεις αδειοδότησης για ~3700 MW_p). Στο νησιωτικό χώρο υπάρχει σχέδιο εγκατάστασης 200 MW_p, εκ των οποίων 52,5 MW_p στην Κρήτη⁴. 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 Γάδο (30 kW_p) καθώς και ΦΒ αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά. Μικρής ισχύος ΦΒ συστήματα⁵ βρίσκουν εφαρμογή σε φάρους αυτόνομης λειτουργίας.

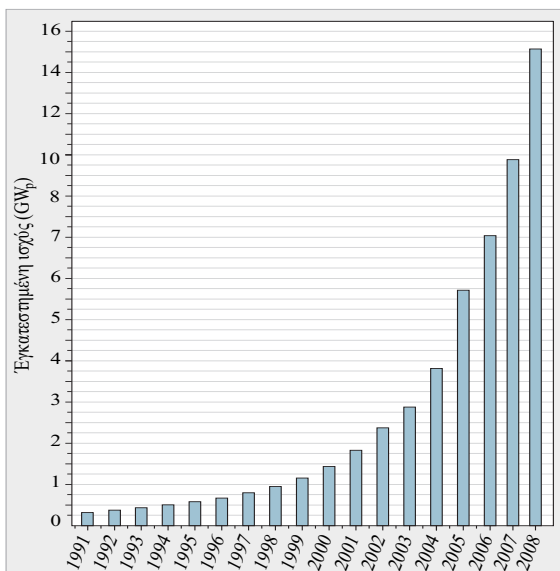
Επίσης, έχουν ήδη τεθεί σε δοκιμαστική λειτουργία ΦΒ ψυγεία πρόψυξης γάλακτος, σε κτηνοτροφικές περιοχές (Πρασές Χανίων Κρήτης, 8 kW_p). Μέχρι το

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

5. Παράρτημα Ε, Πίνακας Π7.

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, ΤΕΙ, ΙΤΕ, Κέντρο Ερευνών Δημόκριτος κ.ά. Στο ΤΕΙ Κρήτης λειτουργεί από το 1992 ένα εξειδικευμένο εργαστήριο, με το συμβολικό όνομα “Φωτοβολταϊκό Πάρκο” (Παράρτημα Ε), που δημιουργήθηκε με κοινή πρόταση του ΤΕΙ Κρήτης 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.



Σχήμα Ε7. Χρονική εξέλιξη της παγκοσμίως εγκατεστημένης ισχύος αιχμής ΦΒ συστημάτων, στο χρονικό διάστημα 1991 - 2008.

IV. Η ενεργειακή πολιτική στη χώρα μας και διεθνώς

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

Εκτός αυτών, έντονη είναι ήδη η δραστηριότητα του ιδιωτικού τομέα, σ' όλο το φάσμα των εφαρμογών των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη τους ενισχύεται από σχετικά προγράμματα της ΕΕ, η οποία επιχορηγεί όχι μόνο την έρευνα (τώρα πια σε μικρότερο βαθμό) αλλά στηρίζει, ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα, εφαρμογές μεγάλης ισχύος, σε βιομηχανικές μονάδες, ξενοδοχεία κ.α.. Σημαντικό βήμα προώ-

θησης των ΑΠΕ στη χώρα μας, μέσα στην τελευταία δεκαετία, απετέλεσε η χάραξη πιο συγκεκριμένης ενεργειακής πολιτικής και η θεσμοθέτηση νομοθετικού πλαισίου εγκατάστασης και αξιοποίησής τους.

Η ανάπτυξη των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής και της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο. Αιτία: τα συσσωρευμένα οικολογικά προβλήματα που δημιούργησε η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (Ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα). Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh πετρελαίου. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους, όπως το ότι δεν έχουν κινούμενα μέρη, είναι αθόρυβα και μπορούν να εγκατασταθούν παντού όπου δε σκιάζει, παρουσιάζουν ακόμα υψηλό κατασκευαστικό κόστος. Η διαφορά κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής κιλοβατώρας από ΑΠΕ και από πετρέλαιο μειώνεται σταδιακά, ώστε σύντομα, μέσα στην επόμενη δεκαετία, να μπορεί να προβλεφθεί μια απ' ευθείας σύγκριση κόστους ενέργειας. Ήδη το κόστος εγκατάστασής τους εμφανίζεται ανταγωνιστικό απέναντι στη συμβατική παραγωγή ενέργειας, σε περιπτώσεις μη συνδεδεμένων με το δίκτυο περιοχών (Απομονωμένοι οικισμοί, νησιά κ.α.).

Τον Ιούνιο του 2006 ψηφίστηκε ο 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 είναι 0,40-0,50 ευρώ ανάλογα με την ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και τον τόπο εγκατάστασης. Η τιμή είναι 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 νέος νόμος για τα φωτοβολταϊκά (ν. 3734/2009), όπου κυρίως τροποποιούνται άρθρα του προηγούμενου νόμου. 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, εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε κτίρια, με συμψηφισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο και της καταναλισκόμενης απ' αυτό.

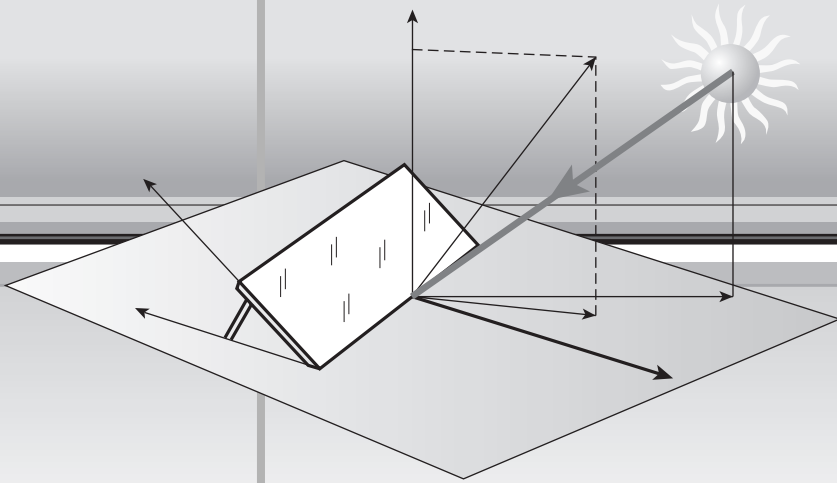
Οι προτάσεις για αδειοδότηση υποβάλλονται στη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), η οποία είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή και έχει κυρίως γνωμοδοτικές και εισηγητικές αρμοδιότητες στον τομέα της ενέργειας.

Παρόμοια ενεργειακή πολιτική ακολουθείται τώρα και πολλά χρόνια από τα περισσότερα των αναπτυγμένων κρατών, με αποτέλεσμα την εντυπωσιακή, τα τελευταία χρόνια, αύξηση της εγκατεστημένης σ' αυτά, ισχύος αιχμής ΦΒ συστημάτων. Στα πλαίσια της πολιτικής αυτής, προωθούνται ειδικά προγράμματα εφαρμογής της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας σε μεγάλα ΦΒ πάρκα καθώς και σε συγκροτήματα κατοικιών μεγάλης κλίμακας (Πρόγραμμα 100.000 στεγών, στη Γερμανία). Παράλληλα, εξαιρετικά μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης εμφανίζει στα κράτη αυτά, ο κατασκευαστικός τομέας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, συμβάλλοντας έτσι στην ενίσχυση της εθνικής οικονομίας τους.

Παρατηρείται, λοιπόν, σήμερα, σε παγκόσμια κλίμακα, μια αυξημένη δραστηριότητα στον ευρύτερο τομέα των ΑΠΕ, που προοιωνίζει την αλματώδη ανάπτυξη και ενσωμάτωσή τους στην ενεργειακή παραγωγή, μέσα στην πρώτη εικοσαετία του νέου αιώνα. Η αύξηση της ποσοστιαίας συμμετοχής των ΑΠΕ στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή, 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 ληφθεί και ήδη εφαρμόζονται, 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 αναπαγωγή 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 emittance, 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, ει-
σάγοντας την επαναστατική, για την εποχή του, έννοια της εκπομπής της ηλε-
κτρομαγνητικής 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 θε-
ώρηση για το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη.

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

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 πρό-
τυπο 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 θερμο-
κρασία 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 μεγά-
λα μήκη κύματος) κι αριστερά του (προς τα μικρά μήκη κύματος), η ένταση μει-
ώνεται, προς το μηδέν.
- 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).

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

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 $U=h\nu$, 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:

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

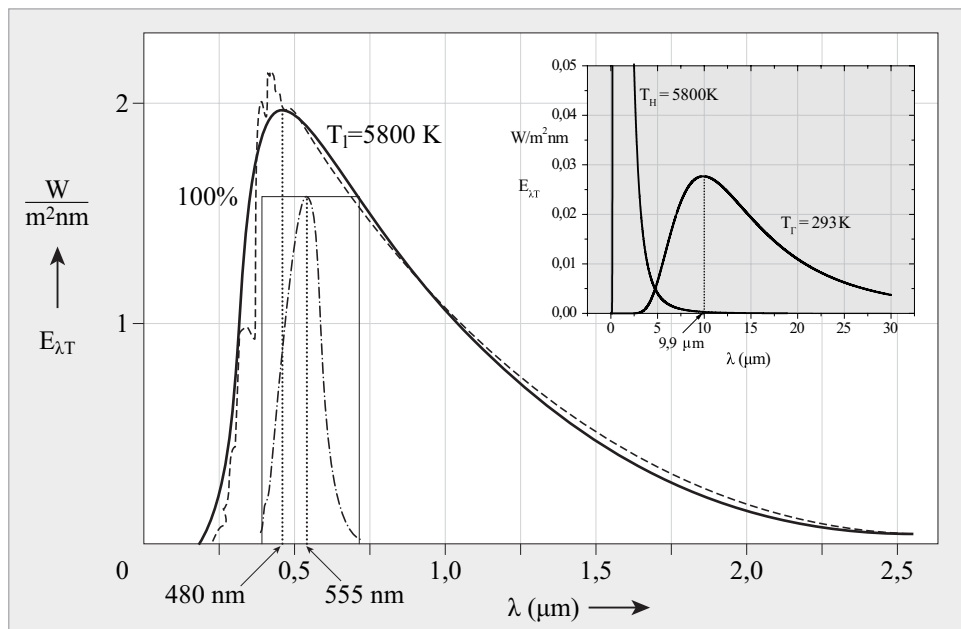
όπου $c_1 = 2\pi^2 h^3 = 3,746 \cdot 10^{-16}$ Wm², $c_2 = \frac{hc}{k_B} = 0,0144$ m·K, c η ταχύτητα του φωτός ($c=2,997925 \times 10^8$ m/s) και k_B , η σταθερά του Boltzmann ($k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

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 που αντιστοιχεί στο μέγιστο, μετατοπίζεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος, ακολουθώντας το *νόμο μετατόπισης του μεγίστου της φασματικής κατανομής* ή *νόμο του Wien* $\{\lambda_{\mu\epsilon\gamma} \cdot T = 2.897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}\}$. Η μελέτη του φάσματος της ακτινοβολίας ενός σώματος, δίδει τη δυνατότητα καθορισμού του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στο μέγιστο, $\lambda_{\mu\epsilon\gamma}$ και στη συνέχεια, με βάση το νόμο Wien, προσδιορίζεται προσεγγιστικά, η θερμοκρασία T , της επιφάνειας του σώματος, θεωρουμένου ως μέλανος σώματος.

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 καταγραφόμενο 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.

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 περισσότερο 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

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

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 $T_{\pi} = 0 \text{ K}$, 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 εκπεμποντος σώματος*. Σημειώστε ότι η πειραματική καμπύλη της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί να περιγραφεί με μια συγκεκριμένη 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. Διευγέρουσα 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

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).

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.

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.

β. Πυκνότητα ισχύος *HM* ακτινοβολίας, *E* (Irradiance, Emittance)

Το μέγεθος αυτό καθορίζεται από την συνολική και από διάφορες κατευθύνσεις, ροή ακτινοβολίας, που εκπέμπεται (Emittance=Εκπεμπόμενη ισχύς ή αφετική ικανότητα) από μια επιφάνεια ή προσπίπτει (Irradiance=Ακτινοβολήση) σε μια επιφάνεια ή διαπερνά τη μονάδα της επιφάνειας (Irradiance), ανεξάρτητα απ' τη γωνία των ακτίνων ως προς την επιφάνεια αυτή. Προσδιορίζεται από την σχέση¹²

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

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

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

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

12. 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).

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

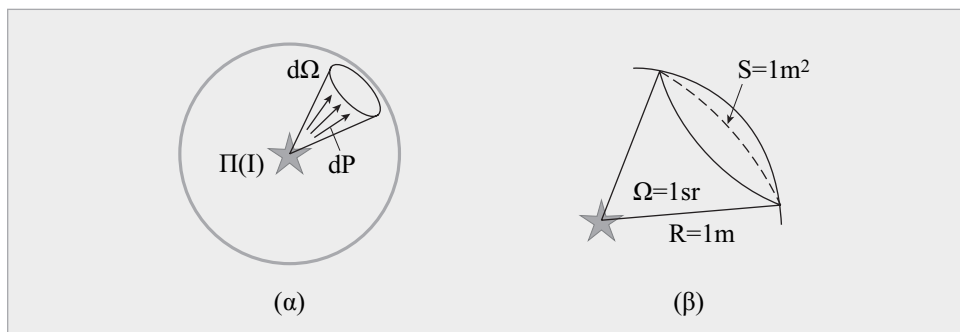
την επιφάνεια και αφορά στο πεδίο ακτινοβολίας. Ομοίως, ορίζεται η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας, περιορίζοντας ενεργειακά το φάσμα στην περιοχή του ορατού και έχει την ίδια μονάδα (1 W/m^2).

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 .

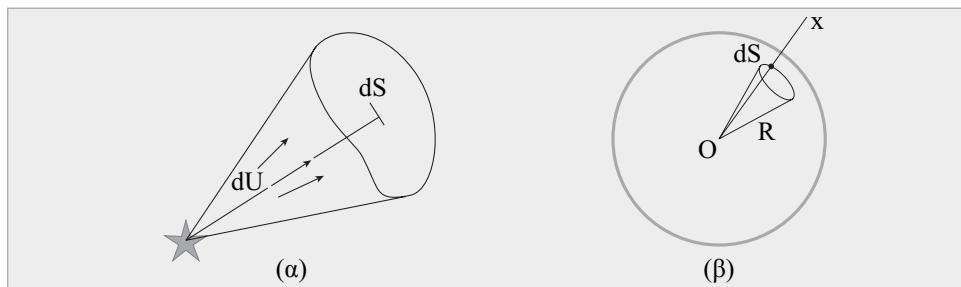


Σχήμα 1.2. (α) Ορισμός της φωτοβολίας I , της πηγής Π , προς ορισμένη κατεύθυνση **(β)** Ορισμός της στερεάς γωνίας.

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 (Σχήμα 1.3 (β)). 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 ($1 \text{ sr} = 1 \text{ steradian} = 1 \text{ στερακτίνιο}$. 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 . Ολόκληρη η σφαίρα αντιστοιχεί σε στερεά γωνία $4\pi \text{ sr}$.

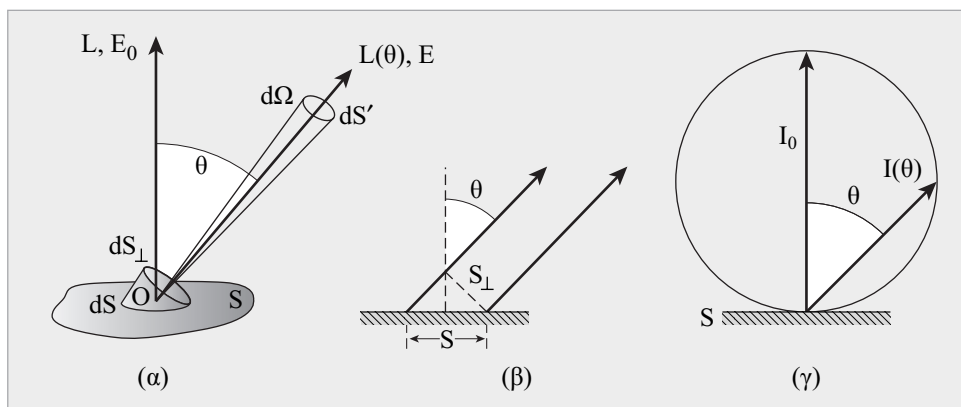


Σχήμα 1.3. (α) Ορισμός της ισχύος της ακτινοβολίας. **(β)** Ορισμός της στερεάς γωνίας.

ε. Γωνιακή αφετική ικανότητα, L (Radiance)

Το μέγεθος αυτό αφορά είτε την εκπομπή ακτινοβολίας από επιφάνεια είτε τη διάδοση 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,

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



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 .

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.

όπου dS_{\perp} (φαινομένη επιφάνεια), η προβολή της στοιχειώδους επιφάνειας της πηγής dS , σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης ή μέτρησης της διαδιδόμενης ροής και θ η γωνία της κατεύθυνσης παρατήρησης και της κάθετου 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, που ικανοποιεί το νόμο του Lambert, αυτή ακολουθεί μεταβολή συνημιτόνου. Δηλαδή, ο νόμος του Lambert για την πυκνότητα ισχύος γράφεται:

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

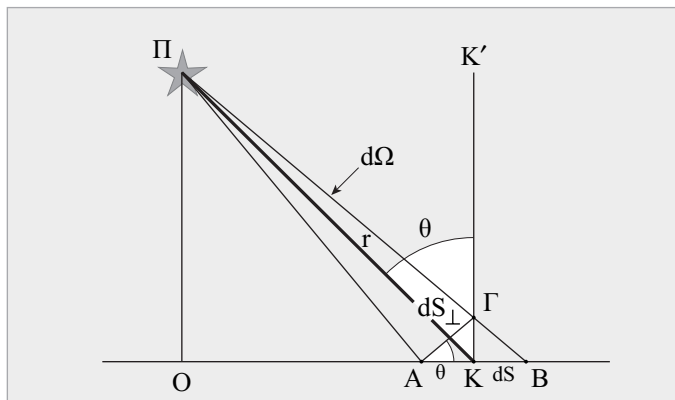
όπου θ η γωνία πρόσπτωσης ή εκπομπής της δέσμης, ως προς την κάθετη στην επιφάνεια της πηγής

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

15. Η ισχύς του νόμου του Lambert για μια εκτεταμένη φωτεινή πηγή, όπως π.χ. ο ήλιος, δίδει εξήγηση για την ομοιόμορφη 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' ό,τι 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.

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: $d\Omega = dS_{\perp}/r^2 = dS \cdot \sin\theta/r^2$, 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 AG).



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 δίνει ως αποτέλεσμα τη σχέση Lambert: $E(r, \theta) = E_0(r, 0) \sin\theta$.

Για την πυκνότητα ισχύος πάνω στην επιφάνεια προκύπτει

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

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

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

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

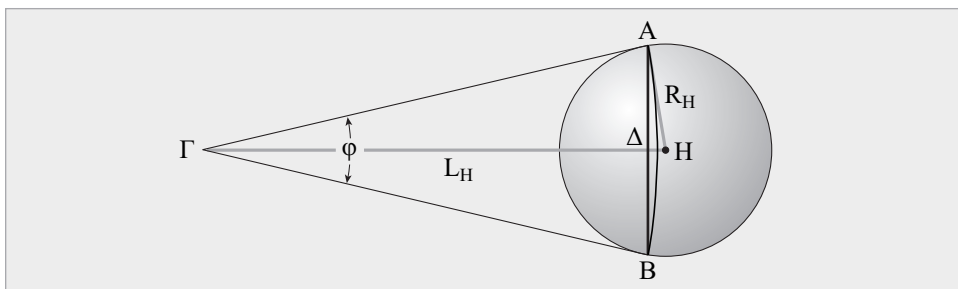
3) Συνδυάζοντας τις σχέσεις (13α) και (14), προκύπτει η γενικότερη σχέση.

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

Η σχέση (15) δίνει 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 $\Gamma H = L_H = 150.000.000$ km και η ακτίνα του $R_H = 700.000$ km. Να υπολογιστούν η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στο δίσκο του ήλιου και η φαινομένη διάμετός του.



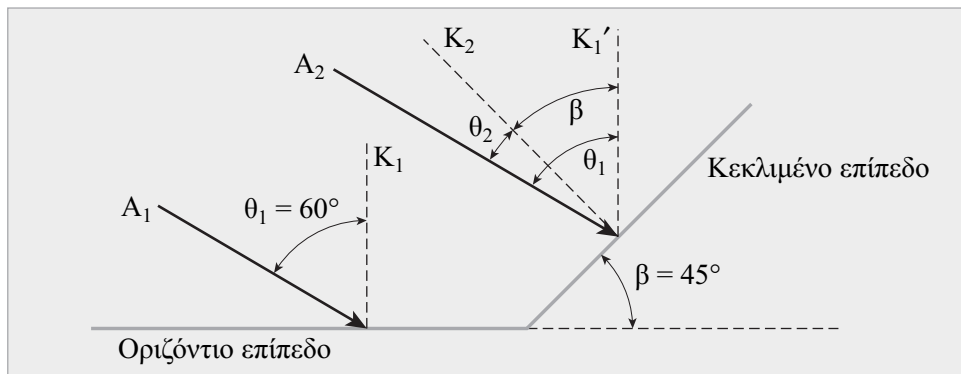
Λύση: Λαμβάνοντας υπ' όψη τη μεγάλη απόσταση μεταξύ παρατηρητή – ήλιου, η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στο φαινόμενο δίσκο του ήλιου, διαμέτρου $D_\delta = AB$ και εμβαδού S , μπορεί να υπολογιστεί, προσεγγιστικά, από τη σχέση:

$$\Omega = \frac{S_{AB}(\Gamma, \Gamma A)}{\Gamma A^2} \approx \frac{S_{AB}(\Delta, \Delta A)}{\Gamma A^2} = \frac{\pi \cdot R_H^2}{L_H^2} = \pi \cdot \left(\frac{R_H}{L_H} \right)^2 \Rightarrow \Omega = 6,84 \times 10^{-5} \text{ sr}$$

και η φαινομένη 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 ένταση δέσμης παράλληλων ακτίνων HM ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο, με γωνία πρόσπτωσης $\theta_1 = 60^\circ$, είναι $E_N = 1000 \text{ W/m}^2$. 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:

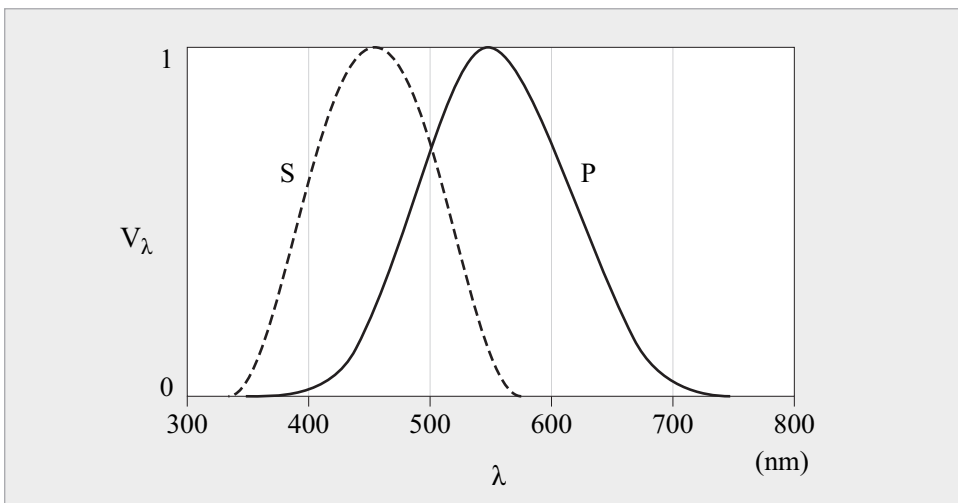
Υπολογίζουμε πρώτα τη γωνία πρόσπτωσης στο κεκλιμένο επίπεδο. Η παραλληλότητα μεταξύ των ακτίνων A_1 και A_2 καθώς και μεταξύ των κατακορύφων K_1 και K_1' οδηγεί στην ισότητα της γωνίας μεταξύ των διευθύνσεων A_2 και K_1' με τη θ_1 . Η καθετότητα των διευθύνσεων K_1 και K_2 με τις αντίστοιχες πλευρές 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:

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

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.



Σχήμα 1.6. Η καμπύλη ευαισθησίας του οφθαλμού του ανθρώπου. Η συνεχής καμπύλη P, αφορά στην όραση ημέρας (Photopic), οφειλόμενη στα κωνία ενώ η διακεκομμένη καμπύλη S, αφορά την όραση στο σκοτάδι (Scotopic), που οφείλεται στα ραβδία.

16. Η συνάρτηση $V(\lambda)$ του σχήματος 1.6, παρουσιάζει μέγιστο (κατά σύμβαση ίσο με 1), στο $\lambda=555$ nm. Το φωτομετρικό ισοδύναμο (Φ_I), αφορά στην ισοδυναμία των lumens της φωτεινής ροής μονοχρωματικής ακτινοβολίας με $\lambda=555$ nm και ισχύος ίσης με 1 Watt, δηλαδή $\Phi_I=683$ 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 $683 \cdot V(\lambda)$ lm, φωτεινής ροής.

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

Μεγέθη ΗΜ ακτινοβολίας			Μεγέθη ορατού φάσματος (Φωτομετρία)		
	Σύμβολο	Σχέση ορισμού	Μονάδα		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	$\Phi_V = \frac{dU_V}{dt}$ lm
Ποκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, Irradiance, Emittance	E	$E = \frac{dP}{dS}$	W/m ²	Ποκνότητα φωτει- νής ακτινοβολίας ή Φωτισμός, Illuminance	$E = \frac{d\Phi_V}{dS}$ Lx
Ένταση ακτινοβολίας	J	$J = \frac{dP}{dS_{\perp}}$	W/m ²	Ένταση ακτινοβολίας,	$J = \frac{d\Phi}{dS_{\perp}}$ W/m ²
Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, I Radiant Intensity	I	$I = \frac{dP}{d\Omega}$	W/sr	Φωτοβολία ή έντα- ση φωτεινής πηγής Luminous intensity	$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}$ $\frac{lm}{sr} = 1cd^{17}$
Γωνιακή αφετική ικανότητα, L Radiance	L	$L = \frac{d^2P}{dS_{\perp} \cdot d\Omega}$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	Λαμπρότητα, Luminance	$L_V = \frac{d^2\Phi_V}{dS_{\perp} \cdot d\Omega}$ $\frac{lm}{m^2 \cdot sr} = \frac{cd}{m^2}$

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 δίδει 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 cm^2 λευκόχρυσου (Pt), ευρισκόμενου στη θερμοκρασία τήξης του ($\sim 1770^\circ \text{C}$), μέσα σε στερεά γωνία 1 sr.