

## Εκπαιδευτικές και ερευνητικές δραστηριότητες του εργαστηρίου «Φωτοβολταϊκό Πάρκο»



του Δρ. Φώτη Μαυροματάκη

### Το εργαστήριο «Φωτοβολταϊκό Πάρκο»

Στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι.) Κρήτης λειτουργεί από το 1992 το εργαστήριο «Φωτοβολταϊκό Πάρκο», με στόχο την ενεργό συμμετοχή και συμβολή του στον τομέα της εκπαίδευσης και της έρευνας στο πεδίο της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας και των εφαρμογών της. Οι εγκαταστάσεις του εργαστηρίου (κτίριο και φωτοβολταϊκό πεδίο) βρίσκονται στο νότιο τμήμα του ιδρύματος. Το κτίριο διαθέτει εργαστήρια (ηλεκτρονικών κατασκευών, οπτικών μετρήσεων), αίθουσα διαλέξεων



- βιβλιοθήκη, χώρους εργασίας για το επιστημονικό προσωπικό και τους σπουδαστές, χώρο μηχανολογικών κατασκευών καθώς και αποθηκευτικούς χώρους. Στο ΦΒ πεδίο είναι εγκατεστημένες ΦΒ συστοιχίες, διαφόρων τύπων, συνολικής ισχύος αιχμής ~ 7 kWp και μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 750 W. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτει μεγάλο μέρος των αναγκών του εργαστηρίου.

### Εκπαιδευτικές δραστηριότητες

Οι εκπαιδευτικές δραστηριότητες του

Εργαστηρίου περιλαμβάνουν τη διδασκαλία θεωρητικών μαθημάτων σε συνδυασμό με εργαστηριακές ασκήσεις για την κατανόηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αναλυτικότερα, ο οδηγός σπουδών των τμημάτων του ΤΕΙ Κρήτης καταγράφει τα παρακάτω μαθήματα:

- Τμ. Ηλεκτρολογίας: «Εισαγωγή στις ΑΠΕ» Β' εξάμηνο
- Τμ. Ηλεκτρολογίας: «Φωτοβολταϊκά & Αιολικά συστήματα» Ε' εξάμηνο.
- Τμ. Μηχανολογίας: «Ηλιακά συστήματα», ΣΤ' εξάμηνο.

Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα σε σπουδαστές να υλοποιήσουν την πτυχιακή τους εργασία αλλά και να δραστηριοποιηθούν σε σχετικά θέματα μέσα από την πρακτική τους άσκηση. Οι σπουδαστές του Ιδρύματος αλλά και φοιτητές από άλλα Ιδρύματα μπορούν έτσι να αποκτήσουν σημαντική εμπειρία πάνω στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

### Ερευνητικές δραστηριότητες

Το προσωπικό του Εργαστηρίου συνεργάζεται με επιστήμονες τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού (Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Πανεπιστήμιο του Oregon, Πανεπιστήμιο Κύπρου). Το μόνιμο προσωπικό του Εργαστηρίου έχει συμμετάσχει και συμμετέχει τόσο σε ερευνητικά προγράμματα (Αρχιμήδης Ι, ΙΙ) αλλά και αναπτυξιακά (Interreg). Το Εργαστήριο συμμετέχει σε δράσεις ενημέρωσης του κοινού με παρουσιάσεις σε ημερίδες, σε εκθέσεις, με άρθρα σε εφημερίδες

ενώ η ιστοσελίδα του αποτελεί πηγή πληροφόρησης σε σχέση με τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Μερικά από τα ερευνητικά ενδιαφέροντα του Εργαστηρίου καταγράφονται παρακάτω:

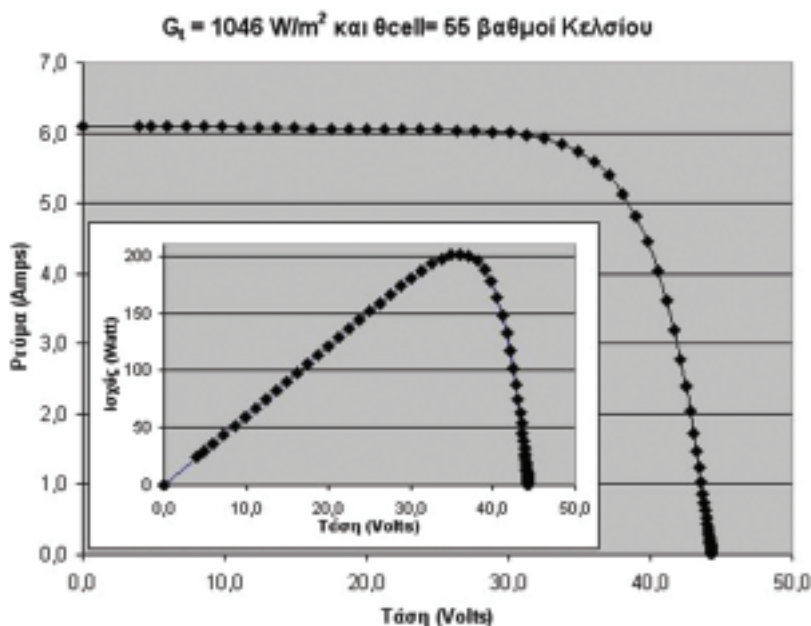
- **Ανάπτυξη καινοτομικών ηλεκτρονικών διατάξεων συνεχούς μέτρησης και καταγραφής ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ πλαισίων.**

Στο εργαστήριο έχουν αναπτυχθεί ειδικές ηλεκτρονικές συσκευές που επιτρέπουν την αυτόματη καταγραφή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ πλαισίων (Εικ. 1). Η καταγραφή μπορεί να γίνεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα (εβδομάδων, μηνών, έτους) έτσι ώστε να είναι δυνατή η μελέτη της συμπεριφοράς των πλαισίων υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι διατάξεις αυτές βελτιώνονται για να καλύψουν



**Εικ. 1:** Παρουσίαση στον Πρόεδρο της Δημοκρατίας καινοτόμων ηλεκτρονικών συσκευών καταγραφής ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ΦΒ πλαισίων που αναπτύχθηκαν από το Εργαστήριο.

νέους τύπους πλαισίων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η ανάλυση των δεδομένων μας δίνει χρήσιμα στοιχεία για τη



**Σχήμα 1:** Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης ενός ΦΒ πλαισίου με θερμοκρασία κυψελίδας  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ . Η πυκνότητα ισχύος στο επίπεδο του πλαισίου ξεπερνά κατά 4,6% την αντίστοιχη στις πρότυπες συνθήκες ( $1000 \text{ W/m}^2$ ). Το ένθετο γράφημα απεικονίζει τη μεταβολή της ισχύος με την τάση και φαίνεται ότι η παραγόμενη ισχύς ξεπερνά τα  $200 \text{ W}$  (ονομαστική ισχύς  $215 \text{ W}$ ).

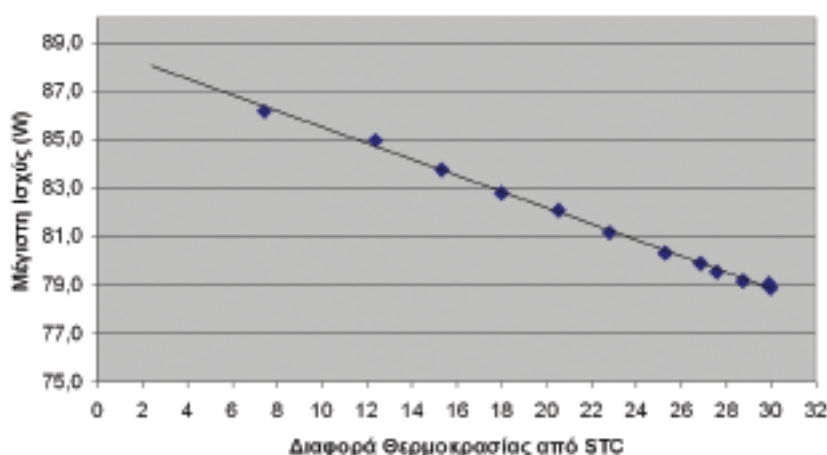
μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, της τάσης ανοικτού κυκλώματος, της μέγιστης ισχύος σε σχέση με τη θερμοκρασία, την πυκνότητα ισχύος, το ηλιακό φάσμα κ.ά.

- **Μελέτες αποδοτικότητας φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφόρων τύπων και κατασκευαστών σε πραγματικές συνθήκες.** Η μακροπρόθεσμη μελέτη ΦΒ πλαισίων, όπως ήδη αναφέρθηκε, μας δίνει χρήσιμα στοιχεία για τη συμπεριφορά τους. Όμως πέραν αυτών των δεδομένων, είναι εφικτή και η καταγραφή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους υπό συγκεκριμένες συνθήκες που θα οδηγήσουν στον καθορισμό των βασικών χαρακτηριστικών στις πρότυπες συνθήκες. Έτσι θα είναι εφικτή η σύγκριση με τα δεδομένα του κατασκευαστή τα οποία προκύπτουν από εξομοιωτή του ήλιου και όχι από μετρήσεις σε φυσικές συνθήκες (Σχ. 1 & 2).
- **Ανάπτυξη καινοτομικών συστημάτων βελτίωσης αποδοτικότητας ΦΒ πλαισίων (Ηλιοτρόπια) καθώς και ηλιοστατικής διάταξης για μετρήσεις απόδοσης**

## ΦΒ στοιχείων κάτω από ισχυρό ηλιακό φωτισμό.

Η παραγόμενη φωτοβολταϊκή ενέργεια συνδέεται άμεσα με την ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Για πλαίσια δεδομένης απόδοσης, η αύξηση της παραγωγής είναι εφικτή με τη χρήση ηλιοτροπιών (solar trackers). Στο εργαστήριο έχει αναπτυχθεί ένα καινοτομικό ηλιοτρόπιο για το οποίο έχει αποδοθεί πατέντα από τον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας. Χρησιμοποιεί έναν άξονα κίνησης αλλά η κίνηση προσομοιάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την κίνηση ενός συστήματος δύο αξόνων. Τα πλεονεκτήματα του αποτελούν η σταθερότητα της κατασκευής και η χρήση ενός κινητήρα.

Ηλιοστατική διάταξη που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο επιτρέπει την οδήγηση της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας σε εργαστηριακό χώρο για πειράματα με φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Η δέσμη μπορεί να ενισχυθεί με τη βοήθεια ειδικών οπτικών μέσων ώστε να μελετήσουμε φαινόμενα υπό ισχυρό



**Σχήμα 2:** Μετρήσεις ενός ΦΒ πλαισίου σε φυσικές συνθήκες στο εργαστήριο «Φωτοβολταϊκό Πάρκο».

Η τυπική θερμοκρασία ενός πλαισίου μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τους 50 βαθμούς Κελσίου.

ηλιακό φως (ενίσχυση μέχρι και 200 φορές).

- **Ανάπτυξη βάσης δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικών δεδομένων.**

Ο μετεωρολογικός σταθμός του εργαστηρίου καταγράφει την ολική και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία περιβάλλοντος, την ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα ανέμου σε δύο ύψη και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα δεδομένα αυτά μας επιτρέπουν τη μακροπρόθεσμη μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και τον υπολογισμό χρήσιμων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε μελέτες φωτοβολταϊκών συστημάτων.

- **Μελέτες κατανομής και φασματικής ανάλυσης της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας τόσο στο ορατό-υπερύθρο όσο και στο υπεριώδες τμήμα του ηλιακού φάσματος. Μοντέλα υπολογισμού της σε διάφορα κεκλιμένα επίπεδα.**

Η καταγραφή του ηλιακού φάσματος είναι απαραίτητη για να διαπιστώσουμε αποκλίσεις από το ηλιακό φάσμα σε αέρια μάζα 1,5 που αποτελεί και το φάσμα αναφοράς στις μετρήσεις των κατασκευαστών ΦΒ πλαισίων. Επίσης, με τη βοήθεια μοντέλου μπορούμε να έχουμε μια πολύ καλή εικόνα για τη συμπεριφορά της υπεριώδους ακτινοβο-

λίας με το χρόνο και την εκτίμηση των επιπτώσεων της στη χλωρίδα και πανίδα ενός τόπου.

### Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα ΦΒ στοιχεία-συστήματα αποτελούν αντιπροσωπευτικό παράδειγμα πηγής ενέργειας καθαρής, και φιλικής προς το περιβάλλον, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε αυτόνομα από το δίκτυο, είτε σε συνεργασία με αυτό. Οι ΦΒ διατάξεις παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον, την κοινωνία, τον καταναλωτή, τις αγορές ενέργειας και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Τέλος, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατίθενται και με τη μορφή δομικών υλικών, αποδεκτής αρχιτεκτονικής αισθητικής, σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών και σχημάτων (Σχ. 3).

Τα πλεονεκτήματα των ΦΒ συστημάτων συτίθενται στα εξής :

- Δε ρυπαίνουν
- Αξιόπιστη λειτουργία για πολλά έτη (>30)
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M)
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη
- Τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να συνδυαστούν με ευκολία σε μικρά ή μεγάλα συστήματα
- Μπορούν να τοποθετηθούν παντού, όπου ηλιάζει



**Σχήμα 3:** Το ηλιακό τόξο στο Gifu της Ιαπωνίας. Η κατασκευή αποτελείται από ΦΒ πλαίσια και καλύπτει συνολικό μήκος 315 μέτρων με μέγιστο ύψος 37 μέτρα.

- Ενσωματώνονται στο περιβάλλον χωρίς επίδραση στη λειτουργικότητα ή την αισθητική του χώρου
- Μπορούν να καλύψουν ενεργειακές απαιτήσεις σε δασικές ή σε δυσπρόσιτες περιοχές (πυροπροστασία δασών, ηλεκτροδότηση κτηνοτροφικών μονάδων, αναμεταδότες τηλεπικοινωνιών)
- Ηλεκτροδότηση θαλάσσιων εφαρμογών (φάρoi, μαρίνες, σκάφη,...)
- Μέγιστη παραγωγή κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης του δικτύου
- Συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος δικτύου, στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και στην αύξηση της αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.

#### Μειονεκτήματα ΦΒ συστημάτων

- Υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης παρά το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική μείωση τα τελευταία χρόνια
- Χαμηλή πυκνότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (kW/m<sup>2</sup> εγκατάστασης)

	Χρόνος απόσβεσης (έτη)	Τυπική Απόδοση (%)
Άμορφο Si	< 1,5	6
Πολικρυσταλλικό	< 2	13
Κρυσταλλικό	< 2,5	14
Απλό Ηλιόθερμο	0,4-2,0	70

Από τους σημαντικότερους παράγοντες που ενδιαφέρουν τόσο τον απλό πολίτη, τον επενδυτή αλλά και αυτούς που καθορίζουν πολιτικές είναι και ο χρόνος στον οποίο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει ενέργεια ίση με αυτή που δαπανήθηκε για να κατασκευασθεί.

#### Πρόσφατες μελέτες οδηγούν στα παρακάτω στοιχεία

Είναι ξεκάθαρο ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο θα παράγει ενέργεια για πολλά χρόνια χωρίς επιβάρυνση για το περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη ως ελάχιστη διάρκεια ζωής τα 30 έτη. Πρόσφατες μετρήσεις πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου που έχουν εγκατασταθεί στη Σουδία το 1981 έδειξαν μείωση μικρότερη από 0,5% ανά έτος και ελάχιστα προβλήματα στην κατασκευή των πλαισίων (μια κυψελίδα σε σύνολο 660 κυψελίδων που ισοδυναμούν με 20 πλαίσια). Λαμβάνοντας υπόψη τις βελτιώσεις στην τεχνολογία σήμερα, περιμένουμε ο χρόνος ζωής τους να αυξηθεί περαιτέρω. Ακόμα και σε επίπεδο ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος ο χρόνος απόσβεσης για τη νότια Ευρώπη δεν ξεπερνά τα 3,5 έτη, γεγονός που αναδεικνύει το φιλικό προς το περιβάλλον χαρακτήρα της ΦΒ ενέργειας. Η προοπτική είναι οι παραπάνω χρόνοι να μειωθούν στο μισό στο μέλλον.

#### Οικονομικά στοιχεία και θεσμικό πλαίσιο

Η κύρια επιβάρυνση στο τελικό κόστος εγκατάστασης ΦΒ συστήματος συνδεδεμένων στο δίκτυο οφείλεται στη ΦΒ συστοιχία. Στα αυτόνομα ΦΒ συστήματα το κόστος αυτό αυξάνεται περαιτέρω λόγω των συσσωρευτών. Ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης, λαμβάνοντας υπ' όψη το ποσοστό επιδότησης αρχικής επένδυσης, στην περίπτωση των επιχειρήσεων, 30%-50%, εξαρτώμενο

από την περιοχή εγκατάστασης και την προτεινόμενη σήμερα τιμή ΦΒ kWh παραγωγού (0,40-0,50 €), έχει μειωθεί πλέον σε 4-5 έτη για ΦΒ συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο και 8-10 για αυτόνομα ΦΒ συστήματα. Το κόστος ηλεκτρικής ΦΒ ενέργειας, με τις προηγούμενες προϋποθέσεις, μειώνεται κάτω των 0,4 €/kWh για παραγωγή συνδε-



δεμένο στο δίκτυο και περίπου στα 0,7 – 0,9 €/kWh, για αυτόνομα ΦΒ συστήματα. Το 2009 με το νόμο 3734 και την έκδοση της ΚΥΑ 1079/2009 τέθηκαν οι κανόνες και οι προϋποθέσεις για την αδειοδότηση των ΑΠΕ. Με τον πρόσφατα ψηφισθέντα νόμο για την επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ 3851/2010, αυξήθηκαν τα επιτρεπτά όρια εγκατεστημένης ισχύος ανά αιτούμενη άδεια και παράλληλα απλοποιήθηκαν και επιταχύνθηκαν οι διαδικασίες αδειοδότησης των συστημάτων ΑΠΕ. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εκδηλώνεται για την περίπτωση εγκατάστασης ΦΒ σε κτίρια (ΦΒ σε στέγες και προσόψεις κτιρίων) και σε μικρές επιχειρήσεις, έως 10 kWp. Επιτρέπεται επίσης, σε συγκεκριμένα πλαίσια, η εγκατάσταση σταθμών ΑΠΕ και ιδιαίτερα φωτοβολταϊκών, σε αγροτεμάχια που χαρακτηρίζονται ως γη υψηλής παραγωγικότητας.

### Προοπτική

Σύμφωνα με το ευρωβαρόμετρο η εγκατεστημένη ισχύς στην ευρωπαϊκή ένωση ανέρχεται σε 16 GW για το 2009 (περίπου 10 GW το 2008). Η Γερμανία παραμένει η χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων (εγκατάσταση 1,8 GW το 2008 και 3,8 GW το 2009), ενώ σε παγκόσμιο επίπεδο το 2008 η παραγωγή φωτοβολταϊκών κυψελίδων ανήλθε σε 7,9 GW ενώ το 2009 ανήλθε σε 12 GW.

Η ένωση Ευρωπαϊκών εταιρειών φωτοβολταϊκών εκτιμά ότι το 2020 το κόστος ενός ΦΒ συστήματος θα ανέρχεται σε 2€/Wp ενώ θα χρησιμοποιείται ακόμα λιγότερη πρώτη ύλη ανά Wp (περίπου 7,5 γραμμάρια πυριτίου ανά Wp στα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου). Το κόστος παραγωγής ΦΒ ενέργειας αναμένεται να μειωθεί κάτω των 0,11-0,22€/kWh το 2020, ενώ το 2030 αναμένεται να πέσει στα επίπεδα των 0,07-0,13 €/kWh. Οι περιοχές των τιμών εξαρτώνται από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέρ-

γειας (EREC). Οι αποδόσεις των μονοκρυσταλλικών κυψελίδων αναμένεται να φθάσουν το 22% το 2020 ενώ αναμένεται αύξηση και στην απόδοση των πολυκρυσταλλικών από 14% σε 20%. Ήδη σήμερα κυκλοφορούν στην αγορά ΦΒ πλαίσια με απόδοση που φθάνει το 19%.

Το εργαστήριο «ΦΒ Πάρκο» του ΤΕΙ Κρήτης μπορεί να διαδραματίσει ένα σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη και διάδοση της ΦΒ τεχνολογίας μέσα από εκπαιδευτικές, ερευνητικές και αναπτυξιακού χαρακτήρα δραστηριότητες. Η υλοποίηση μεγάλου αριθμού ΦΒ εγκαταστάσεων οδηγεί στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Οι απόφοιτοι μας θα έχουν τη δυνατότητα να απασχοληθούν στην κατασκευή και συντήρηση τους και να εφαρμόσουν τις γνώσεις που θα έχουν αποκτήσει μέσα από τα θεωρητικά και εργαστηριακά μαθήματα. Σε ερευνητικό επίπεδο, πλέον της ενίσχυσης των δραστηριοτήτων που προαναφέρθηκαν, το εργαστήριο θα δραστηριοποιηθεί και σε θέματα αλληλεπίδρασης των ΦΒ συστημάτων με το κεντρικό δίκτυο, σε ηλεκτρονικά ισχύος, σε έλεγχο νέων υλικών κ.ά. Τέλος, σε αναπτυξιακό επίπεδο το εργαστήριο μπορεί να σχεδιάσει και αναπτύξει εφαρμογές που σχετίζονται με τη μελέτη και αξιολόγηση ΦΒ συστημάτων σε πραγματικές συνθήκες.

## Εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Αυτόνομο ΦΒ φωτιστικό δρόμου,  
2x20 W/230 V.



Αυτόνομο φωτιστικό εξωτερικού χώρου, με λάμπα  
οικονομικού φωτισμού, 11 W/12 V.



Αυτόνομο ΦΒ φωτιστικό με καινοτομική λειτουργία  
(Περιλαμβάνει αισθητήρες ανίχνευσης κίνησης ώστε  
να λειτουργεί σε δύο επίπεδα φωτισμού (Οικονομι-  
κής λειτουργίας, σε καταστάσεις αραιής διέλευσης  
και επίπεδο πλήρους φωτισμού, σε κατάσταση συ-  
χνής διέλευσης ατόμων).



**Ηλιοστατική διάταξη.** Αποτελείται περιστρεφόμενο  
σύστημα κατόπτρων, που δημιουργεί σταθερή χω-  
ρικά δέσμη ηλιακού φωτός, μέσα στο εργαστήριο,  
στην οπτική τράπεζα. Στο βάθος διακρίνεται ο μετε-  
ωρολογικός σταθμός του εργαστηρίου.



## Εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στο Τ.Ε.Ι. Κρήτης

**Ηλιοτρόπιο δύο αξόνων.** Συνεχής ημερήσια παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου.



**Καινοτομικό Αζιμουθιακό Ηλιοτρόπιο**  
(Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας Ο.Β.Ι. 1005380/15-12-2006. και Δίπλωμα τροποποίησης 1006107/2008).



**Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της επίδρασης της σκίασης σε ΦΒ συστοιχία εξ αιτίας της παρουσίας της αμέσως νοτιότερης της, σε ΦΒ συστήματα διαδοχικών ΦΒ συστοιχιών.**



**Η ανεμογεννήτρια του εργαστηρίου, ονομαστικής ισχύος 750 W.**

