

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ηλιακή ενέργεια

**Ηλιακή ενέργεια: Φωτοβολταϊκά συστήματα, διαστασιολόγηση και
βασικοί υπολογισμοί, οικονομική ανάλυση**

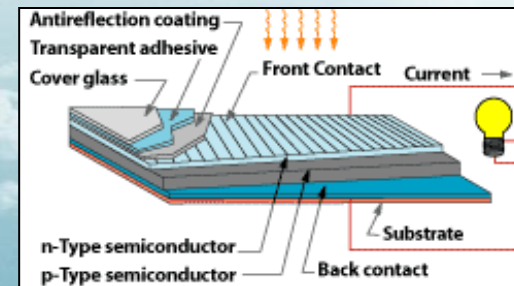
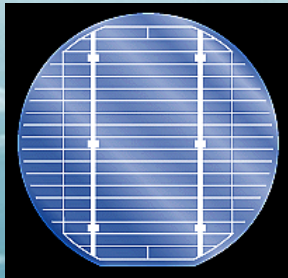
Τεχνολογίες Φ/Β στοιχείων

Οι εμπορικές τεχνολογίες των Φ/Β στοιχείων σήμερα είναι αυτές του:

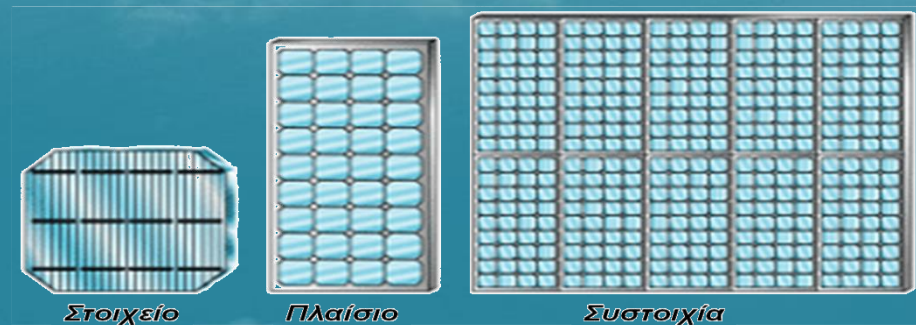
- ✓ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) με μέγιστες αποδόσεις εμπορικών εφαρμογών 12 – 16 %
- ✓ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (p-Si) με μέγιστες αποδόσεις εμπορικών εφαρμογών 10 – 12 %
- ✓ του άμορφου πυριτίου (a-Si) με μέγιστες αποδόσεις εμπορικών εφαρμογών 5 – 7 %

ενώ οι τεχνολογίες ημιαγωγών CuInSe_2 , CdTe και GaAs βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό στάδιο.

Τα **Φ/Β στοιχεία** αποτελούνται από δίσκους πυριτίου, οι οποίοι βρίσκονται σφραγισμένοι σε πλαστική ύλη για προστασία από τις καιρικές συνθήκες. Η μπροστινή όψη προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί.

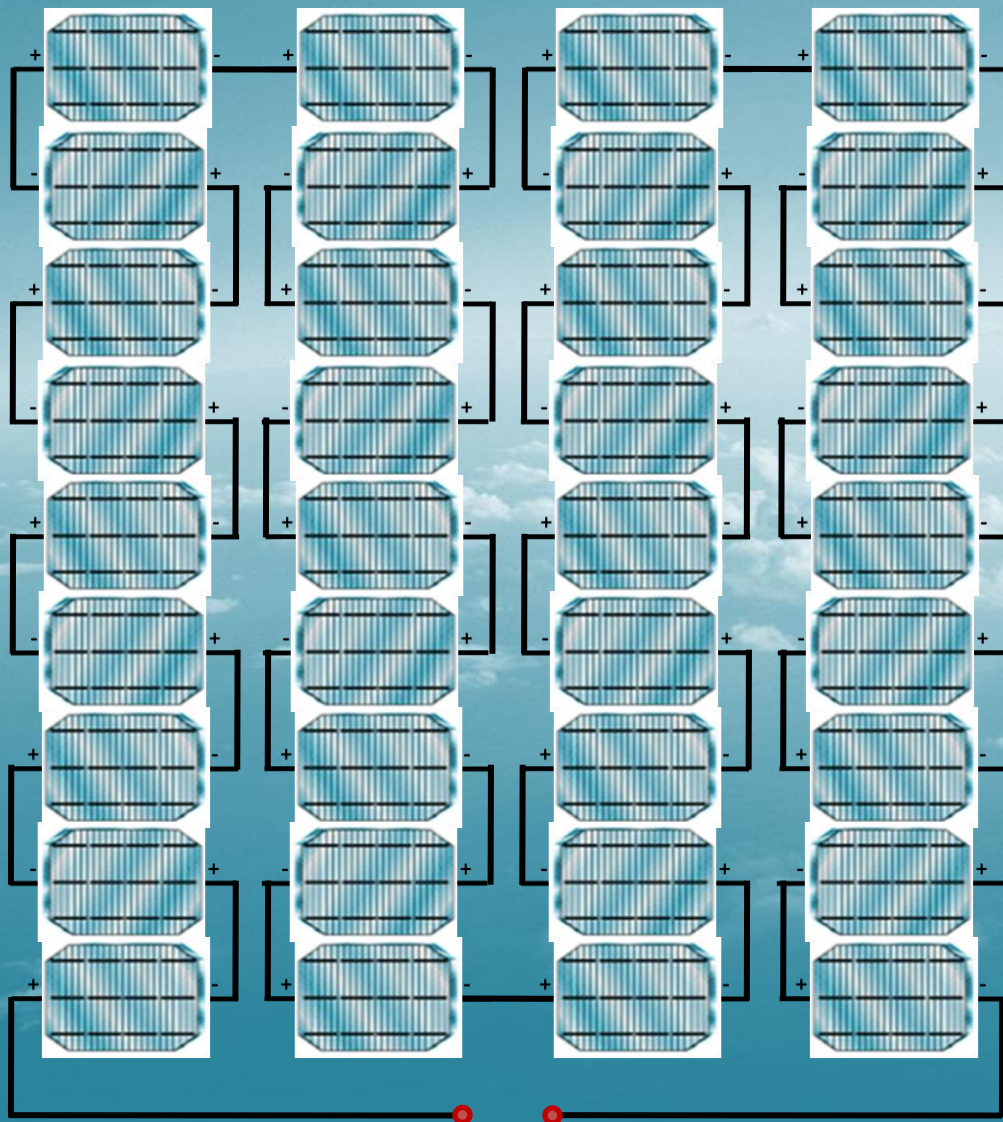


Ένα **φωτοβολταϊκό πλαίσιο** είναι μία διάταξη που συνήθως περιλαμβάνει **36 Φ/Β στοιχεία** συνδεδεμένα σε σειρά.



Συνδεσμολογία Φ/Β στοιχείων

Φ/Β στοιχεία ενός πλαισίου συνδεδεμένα σε σειρά:



Ο θετικός πόλος του κάθε Φ/Β στοιχείου συνδέεται με τον αρνητικό του επόμενου στοιχείου, μέσα στο πλαίσιο. Αντίστοιχα, στη σε σειρά σύνδεση Φ/Β πλαισίων ή συστοιχιών, ο θετικός πόλος του κάθε πλαισίου ή συστοιχίας συνδέεται με τον αρνητικό του επόμενου πλαισίου ή της επόμενης συστοιχίας

$$V_{\text{MPPπλαισίου}} = 36 \times V_{\text{MPPστοιχείου}} \approx 36 \times 1 \approx 36 \text{ Volt}$$
$$I_{\text{MPPπλαισίου}} = I_{\text{MPPστοιχείου}} \approx 3 \text{ Ampere}$$

Τεχνολογίες Φ/Β στοιχείων

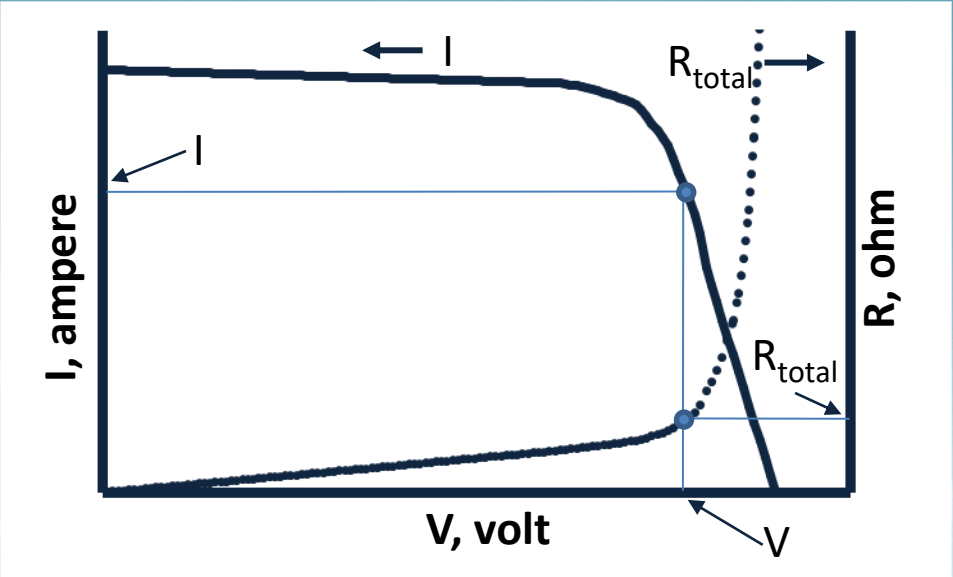
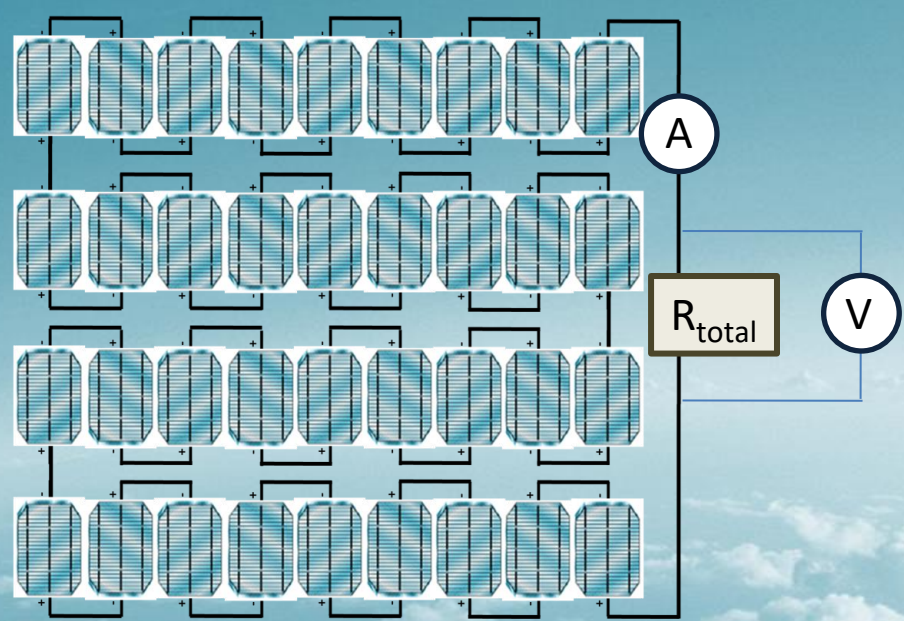
Τα τυπικά δεδομένα για εμπορικά Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου δίνονται στον Πίνακα 1, όπου τα ηλεκτρικά μεγέθη ισχύουν σε πρότυπες συνθήκες ($AM = 1,5$, $T_c = 25\text{ }^{\circ}C$ και $I = 1.000\text{ W/m}^2$).

Πίνακας 1 Τυπικά λειτουργικά και γεωμετρικά μεγέθη εμπορικών Φ/Β πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου

διαστάσεις	644 x 1.282	mm
πάχος	35	mm
βάρος	8,5	kg
ονομαστική MPP	100	Wp
V_{MPP}	34,5	Volt
I_{MPP}	2,9	Ampere
V_{OC}	42,5	Volt
I_{SC}	3,2	Ampere

Ένα συγκρότημα Φ/Β συστοιχιών, συνδεδεμένων σε σειρά, παράλληλα ή μεικτά, ανάλογα με την επιθυμητή τάση και ένταση στους τελικούς ακροδέκτες του, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό πάρκο** ή **φωτοβολταϊκός σταθμός**.

Συμπεριφορά Έντασης– Τάσης (συμπεριφορά I – V) Φ/Β στοιχείων



Σχήμα 1

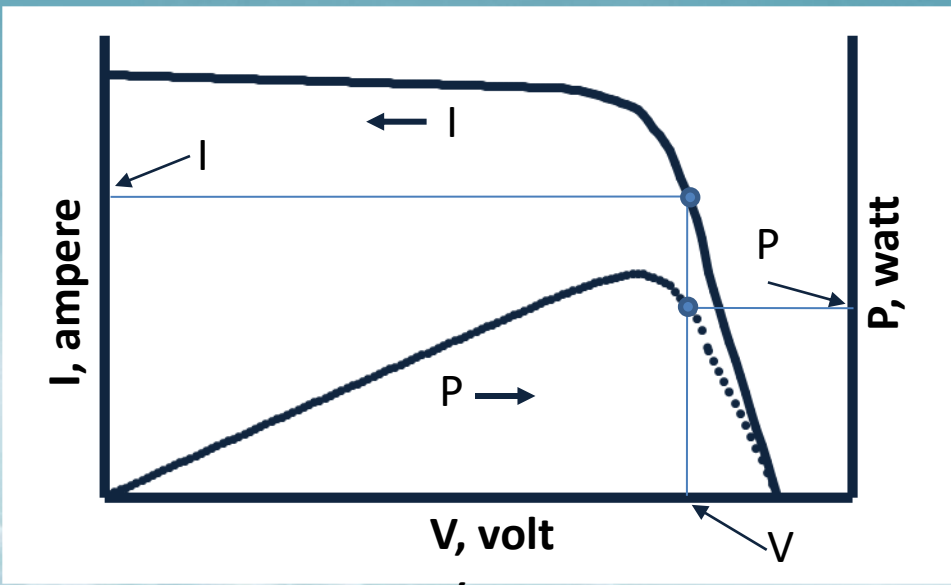
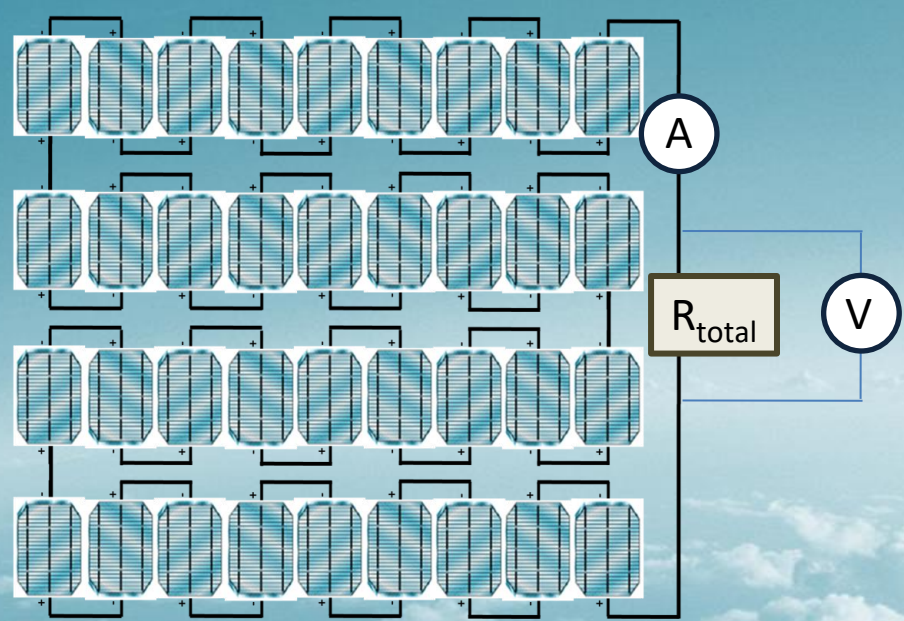
Στο Σχήμα, με συνεχή γραμμή παρουσιάζεται η μεταβολή της έντασης I (ampere) του ρεύματος που διαρρέει το παραπάνω απλοποιημένο κύκλωμα, με τη μεταβολή της συνολικής αντίστασης R (ohm) του κυκλώματος (διακεκομμένη γραμμή) και τη μεταβολή του δυναμικού (volt) στα άκρα του Φ/Β πλαισίου. Στο Σχήμα φαίνεται η θέση του βολτόμετρου και του αμπερόμετρου για τη μέτρηση του δυναμικού (της τάσης) και της έντασης του ρεύματος που παράγεται από το φ/Β πλαίσιο, ενώ τα τρία μεγέθη (τάση V, ένταση I και αντίσταση R) συνδέονται μεταξύ τους με τον Νόμο του Ohm:

$$V = I \times R_{total} \Leftrightarrow I = V / R_{total} \Leftrightarrow R_{total} = V / I \text{ [volt = ampere} \times \text{ohm, ampere = volt/ohm, ohm = volt/ampere]}$$

Κάθε σημείο της συνεχούς γραμμής I έχει συντεταγμένες I – V (έντασης – τάσης ή αλλιώς ρεύματος – δυναμικού). Σύμφωνα με τον Νόμο του Ohm, κάθε σημείο (V,R) της διακεκομμένης γραμμής R_{total} προκύπτει από το πηλίκο V/I των συντεταγμένων του αντίστοιχου σημείου (V,I) της συνεχούς καμπύλης I. Έτσι:

κάθε τιμή της αντίστασης R_{total} του φορτίου (της κατανάλωσης) που συνδέεται στο Φ/Β ορίζει μονοσήμαντα μία τιμή δυναμικού V στα άκρα του Φ/Β και μία τιμή ρεύματος I που το διαρρέει

Συμπεριφορά Έντασης– Τάσης (συμπεριφορά I – V) Φ/Β στοιχείων

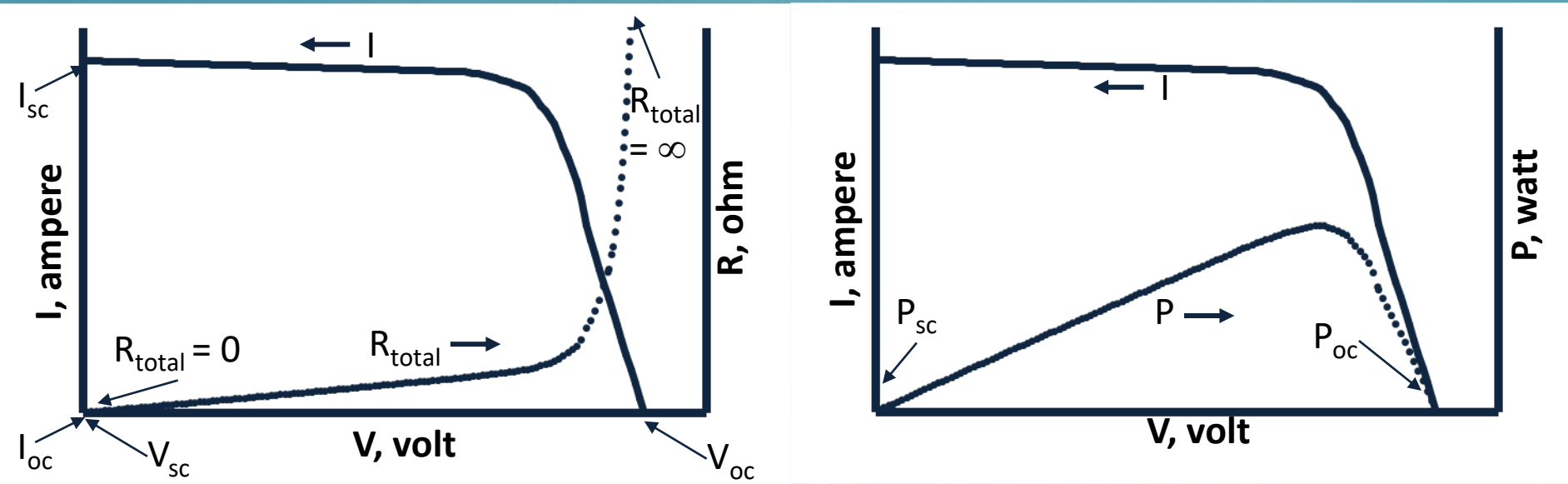


Σχήμα 2

Επιπλέον, το γινόμενο των συντεταγμένων (I,V) κάθε σημείου της συνεχούς γραμμής I – V έχει μονάδες ισχύος, σύμφωνα με τη σχέση:

ισχύς = ένταση x τάση ή $P = I \times V$ [watt = ampere x volt]

Συμπεριφορά Έντασης– Τάσης (συμπεριφορά I – V) Φ/Β στοιχείων



Από το ίδια Σχήματα φαίνεται ότι όταν $R_{total}=0$ (μηδενική αντίσταση, συνθήκες βραχυκύκλωσης, short circuit - SC), το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και το δυναμικό του Φ/Β είναι μηδέν:

$I_{max} = I_{sc} \text{ [Ampere]}$

$V_{min} = V_{sc} = 0 \text{ [Volt]}$

Όταν $R_{total} = \infty$ (άπειρη αντίσταση, συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, open circuit – OC), το ρεύμα που παράγεται από το Φ/Β μηδενίζεται και το δυναμικό στους δύο ακροδέκτες του Φ/Β λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του:

$I_{min} = I_{oc} = 0 \text{ [Ampere]}$

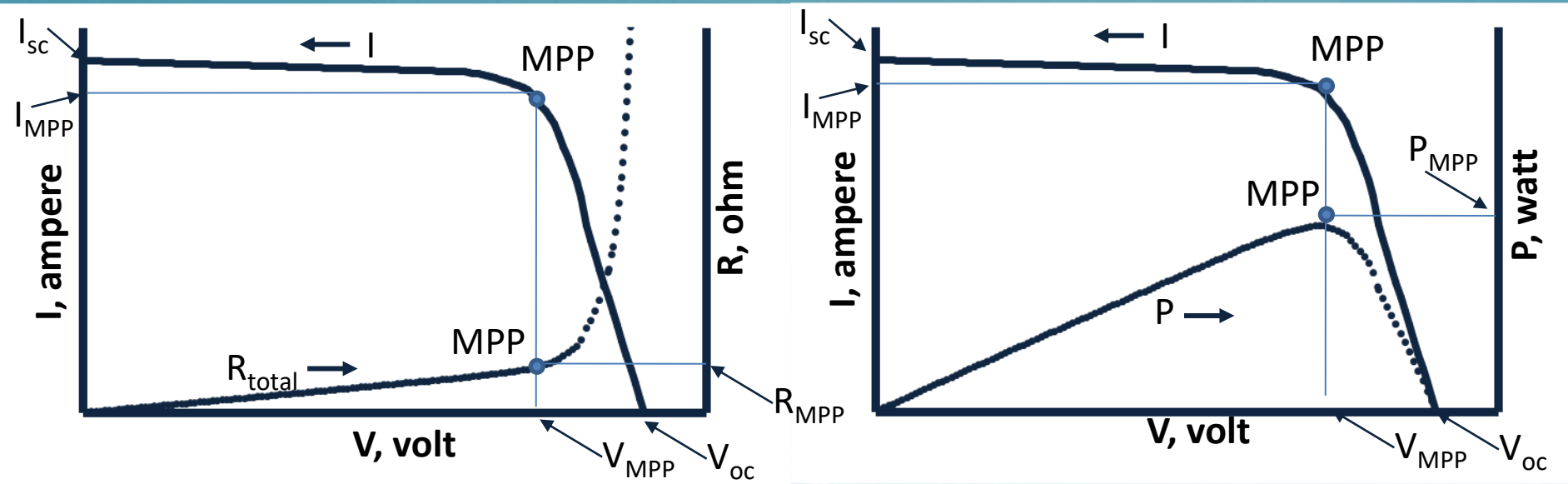
$V_{max} = V_{oc} \text{ [Volt]}$

ενώ και στις δύο περιπτώσεις ($R_{total}=0$ ή $R_{total} = \infty$) η παραγόμενη ισχύς είναι μηδέν:

$P = I_{sc} \times V_{sc} = I_{sc} \times 0 = 0$

$P = I_{oc} \times V_{oc} = 0 \times V_{oc} = 0$

Συμπεριφορά Έντασης– Τάσης (συμπεριφορά I – V) Φ/Β στοιχείων



Μεταβάλλοντας την R_{total} μεταξύ των παραπάνω ακραίων τιμών (από $R_{total} = 0$ έως $R_{total} = \infty$), λαμβάνεται η συνεχής καμπύλη ρεύματος – δυναμικού (I – V) του Φ/Β στοιχείου, από το οποίο μπορεί να εξαχθεί η διακεκομμένη καμπύλη ισχύος – δυναμικού (P – V), του δεξιού διαγράμματος.

Η καμπύλη ισχύος – δυναμικού παρουσιάζει μέγιστο το οποίο ονομάζεται Maximum Power Point (MPP) ή σημείο μέγιστο ισχύος, με συντεταγμένες:

- (V_{MPP} , I_{MPP}) όσον αφορά στην καμπύλη I – V
- (V_{MPP} , P_{MPP}) όσον αφορά στην καμπύλη P – V
- (V_{MPP} , R_{MPP}) όσον αφορά στην καμπύλη R_{total} – V

Έτσι, το Φ/Β παράγει τη μέγιστη ισχύ P_{MPP} όταν η κατανάλωση που έχει συνδεθεί στα άκρα του παρουσιάζει αντίσταση R_{MPP} και τότε η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι V_{MPP} και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει είναι I_{MPP} . Μία ειδική διάταξη που ονομάζεται **Maximum Power Point Tracker (MPPT)** και η οποία συνδέεται στα άκρα του Φ/Β εξασφαλίζει ότι το Φ/Β θα λειτουργεί κάθε στιγμή στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{MPP} , I_{MPP}). Ο MPPT ρυθμίζει την αντίσταση στα άκρα του Φ/Β ώστε αυτή να βρίσκεται πάντοτε στην τιμή R_{MPP} ανεξάρτητα από τις μεταβολές της αντίστασης της κατανάλωσης που κάθε στιγμή τροφοδοτείται από το Φ/Β.

Απόδοση Φ/Β στοιχειών

Ο ονομαστικός **βαθμός απόδοσης** $\eta_{nominal}$ ή η_n ενός Φ/Β (στοιχείου, πλαισίου ή συστοιχίας) ορίζεται ως η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς προς την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και υπολογίζεται στις πρότυπες συνθήκες με βάση τη σχέση:

$$\eta_n = \frac{I_{MPP} \times V_{mPP}}{I \times A} = \frac{P_{MPP}}{I \times A}$$

όπου I_{MPP} [ampere] η ένταση του ρεύματος στο MPP, V_{mPP} [volt] το δυναμικό στο MPP, P_{MPP} [watt] η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στο MPP, I η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [watt/m²] στις πρότυπες συνθήκες (1000 watt/m²) και A η επιφάνεια του Φ/Β [m²].

Η ονομαστική απόδοση η_n υπολογίζεται από τα στοιχεία του Φ/Β που δίνει ο κατασκευαστής και αναφέρεται σε πρότυπες συνθήκες ($I = 1000 \text{ W/m}^2$ και $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Έτσι για το πλαίσιο του Πίνακα 1, η ονομαστική απόδοση είναι:

$$\eta_n = \frac{2,9V \times 34,5A}{1000 \frac{W}{m^2} \times (0,644 \times 1,282)m^2} = \frac{100W}{1000 \frac{W}{m^2} \times 0,826m^2} = 12,1 \%$$

Η πραγματική απόδοση η , ελαττώνεται με την ελάττωση της ακτινοβολίας και την αύξηση της θερμοκρασίας του στοιχείου, βάση των συντελεστών η_i και η_T :

$$\eta_i [\%] = - 0,446 \times I^2 + 0,96 \times I + 0,48 \qquad [I \text{ σε kW/m}^2]$$

$$\eta_T [\%] = - 0,00002 \times T_{\Phi B}^2 - 0,001 \times T_{\Phi B} + 1,042 \qquad [T \text{ σε } ^\circ\text{C}]$$

και δίνεται από τη σχέση: **$\eta = \eta_n \times \eta_i \times \eta_T$**

Η θερμοκρασία του πλαισίου δίνεται, κατά προσέγγιση, από τη σχέση: $T_{\Phi B} = T_a + h_w \times I \qquad [^\circ\text{C}]$

όπου T_a η θερμοκρασία του αέρα, $h_w = 0,03 \text{ m}^2 \times ^\circ\text{C} / \text{W}$ και I η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [W/m²], ενώ η διακύμανση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας T_a στην Ελλάδα παρουσιάζεται στο Σχήμα.