



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΣΕ ΚΤΗΡΙΑ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

ΓΛΥΚΥΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά, Σεπτέμβριος 2019

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών (ΗΜΜΥ) του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για τη βοήθεια του. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στην οικογένεια μου για τη συνεχή τους στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο θεωρείται μια από τις πλέον καινοτόμες και ευρέως διαδομένες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, παρουσιάζοντας μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης. Τα τελευταία χρόνια, εκτός από τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δομικά υλικά σε ένα κτήριο. Τέτοιου είδους πλαίσια είναι τα διάφανα φωτοβολταϊκά και τα φωτοβολταϊκά κεραμίδια. Στις εφαρμογές σε κτήρια, τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να εγκατασταθούν στην επίπεδη οροφή μέσω μιας πρόσθετης κατασκευής, η οποία χρησιμοποιείται σαν βάση στήριξης όμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σε συστήματα που εγκαθίστανται επί εδάφους. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να ενσωματωθούν αρχιτεκτονικά στο κτήριο. Στις εφαρμογές αυτές τα φωτοβολταϊκά συστήματα εγκαθίστανται σε κτήρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ συγχρόνως χρησιμοποιούνται και σαν δομικά υλικά. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά κεραμίδια μπορούν να ενσωματωθούν σε μια οροφή αντικαθιστώντας τα κανονικά κεραμίδια και τα διάφανα φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διαφανή δομικά στοιχεία αντικαθιστώντας γυάλινες ή άλλες διαφανείς επιφάνειες.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση κόστους σε τέτοιου είδους κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια, βρίσκοντας τον κατάλληλο συνδυασμό διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης της διαχείρισης ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, προγραμματίζοντας χρονικά τις ηλεκτρικές συσκευές με μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Ο αλγόριθμος της παρούσας εργασίας έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει και να βελτιστοποιήσει: α) σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, β) σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και γ) πλήρως αυτόνομο σύστημα χωρίς διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ελαχιστοποίηση κόστους και η βελτιστοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος έχει υλοποιηθεί με τη χρήση του αλγόριθμου Particle Swarm Optimization (PSO). Η καινοτομία σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνικές σχεδίασης στη παρούσα εργασία είναι η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού διαστασιολόγησης βρίσκοντας παράλληλα τη βέλτιστη ώρα έναρξης λειτουργίας των συσκευών με μεγάλη κατανάλωση με τη χρήση του αλγορίθμου PSO. Αυτός ο συνδυασμός βελτιστοποίησης μπορεί να προσφέρει μέχρι και 10% περισσότερη εξοικονόμηση από ότι οι υπάρχουσες τεχνικές βελτιστοποίησης.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	9
2.1 Εισαγωγή.....	9
2.2 Ηλιακή ακτινοβολία.....	12
2.1.1 Εισαγωγή.....	12
2.1.2 Βέλτιστη κλίση και προσανατολισμός Φ/Β πλαισίων.....	12
2.1.3 Σύσταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια	13
2.1.4 Μέθοδος υπολογισμού έντασης ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.....	15
2.3 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις.....	20
2.3.1 Εισαγωγή.....	20
2.3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	21
2.4 Μπαταρίες, ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών και μετατροπείς DC/AC.....	29
2.4.1 Μπαταρίες.....	29
2.4.2 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών.....	30
2.4.3 Μετατροπείς DC/AC.....	32
3. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ	
 ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ.....	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας Φ/Β συστήματος.....	36
3.2.1 Σύστημα διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο με μπαταρίες.....	38
3.2.2 Σύστημα διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μπαταρίες.....	45
3.2.3 Αυτόνομο σύστημα.....	50
3.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης κόστους Φ/β συστήματος	54
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	64

4.1 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.....	68
4.1.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης.....	68
4.1.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης.....	71
4.1.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.....	74
4.1.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση.....	77
4.2 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου συστήματος χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.....	79
4.2.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης.....	79
4.2.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης.....	82
4.2.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.....	84
4.2.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση.....	87
4.3 Αποτέλεσμα πλήρους αυτόνομου συστήματος.....	89
4.3.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης.....	89
4.3.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης.....	92
4.3.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.....	94
4.3.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση.....	97
4.4 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα	98
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	101
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ανάγκη της ανθρωπότητας για ηλεκτρική ενέργεια είναι συνεχώς αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια. Ένας από τους σημαντικότερους στόχους της τεχνολογίας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον. Λόγω της συρρίκνωσης των συμβατικών πόρων, όπως το πετρέλαιο και γενικότερα των ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με την επιβάρυνση του περιβάλλοντος που προκαλούν, καθιστά επιτακτική ανάγκη την εξεύρεση νέων ενεργειακών πηγών όπως είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ένα τμήμα της τεχνολογίας των ΑΠΕ είναι η φωτοβολταϊκή (Φ/Β) τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για τη παραγωγή ηλεκτρικής. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως, μηδενική ρύπανση του περιβάλλοντος, αθόρυβη λειτουργία, ελάχιστη συντήρηση, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της Φ/Β τεχνολογίας είναι ότι μπορεί να εγκατασταθεί σχεδόν οπουδήποτε, με δυνατότητα επέκτασης, ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε συστήματος. Με τη ραγδαία και συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας και την παραγωγή νέων τύπων Φ/Β πλαισίων από τη βιομηχανία,

όπως κεραμίδια και διάφανα Φ/Β, είναι πλέον δυνατόν τα Φ/Β να αποτελέσουν δομικά υλικά για την κατασκευή ενός κτηρίου.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα Φ/Β πλαίσια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, να αποθηκευτεί τοπικά ή να διοχετευτεί στο ήδη υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη και ταυτόχρονα η βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα Φ/Β για τρία διαφορετικά μοντέλα συστήματος. Τα τρία αυτά μοντέλα που μελετήθηκαν είναι σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, διασυνδεδεμένο σύστημα χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και πλήρως αυτόνομο σύστημα. Στο πλαίσιο της εργασίας, αναπτύχθηκε αλγόριθμος, ο οποίος προσομοιώνει τη λειτουργία και υπολογίζει το τελικό συνολικό κόστος του συστήματος. Τα δεδομένα εισόδου που λαμβάνονται υπόψη είναι: τα γεωγραφικά στοιχεία της τοποθεσίας, τα μετεωρολογικά δεδομένα και οι επιφάνειες του κτηρίου στις οποίες υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης Φ/Β πλαισίων. Για την ελαχιστοποίηση κόστους του συνδυασμού διαστασιολόγησης των Φ/Β πλαισίων και την εύρεση της βέλτιστης ώρας λειτουργίας των μεγάλων σε κατανάλωση συσκευών, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO). Για κάθε ένα από τα τρία συστήματα έγιναν δοκιμές και συγκρίσεις αποτελεσμάτων με τα ακόλουθα σενάρια βελτιστοποίησης:

1. Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και διαχείρισης ελεγχόμενου φορτίου
2. Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης
3. Βελτιστοποίηση μόνο ώρας έναρξης λειτουργίας ελεγχόμενου φορτίου
4. Προσομοίωση συστήματος χωρίς οποιαδήποτε βελτιστοποίηση.

Ο χρονοπρογραμματισμός του φορτίου, η εύρεση δηλαδή της βέλτιστης ώρας έναρξης λειτουργίας των μεγάλων σε κατανάλωση συσκευών, είναι η καινοτομία της παρούσας εργασίας. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των τεσσάρων διαφορετικών σεναρίων ο χρονοπρογραμματισμός του φορτίου σε συνδυασμό με τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του Φ/Β συστήματος μπορεί να προσφέρει μέχρι και 10% περισσότερη εξοικονόμηση από ότι η βέλτιστη διαστασιολόγηση Φ/Β συστήματος από μόνη της.

1.2 Σύνοψη κεφαλαίων

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

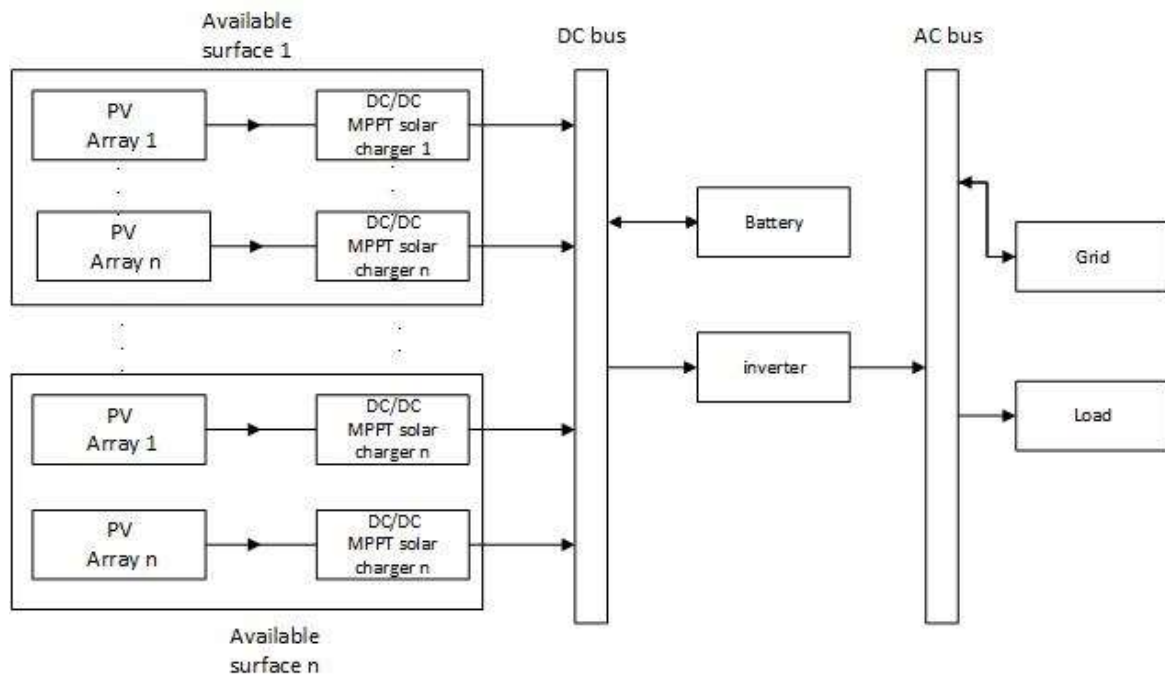
- Το 2^ο κεφάλαιο αναφέρεται στη Φ/Β τεχνολογία. Αρχικά, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας και η μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Ακολούθως, παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού της παραγόμενης ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου υπό συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, περιγράφονται οι δομικές μονάδες των Φ/Β συστημάτων όπως οι μπαταρίες, οι ρυθμιστές τάσης και οι μετατροπείς ισχύος.
- Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι προσομοίωσης και βελτιστοποίησης των διαφορετικών σεναρίων που έχουν μελετηθεί.
- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από όλα τα σενάρια που έχουν μελετηθεί.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

2.

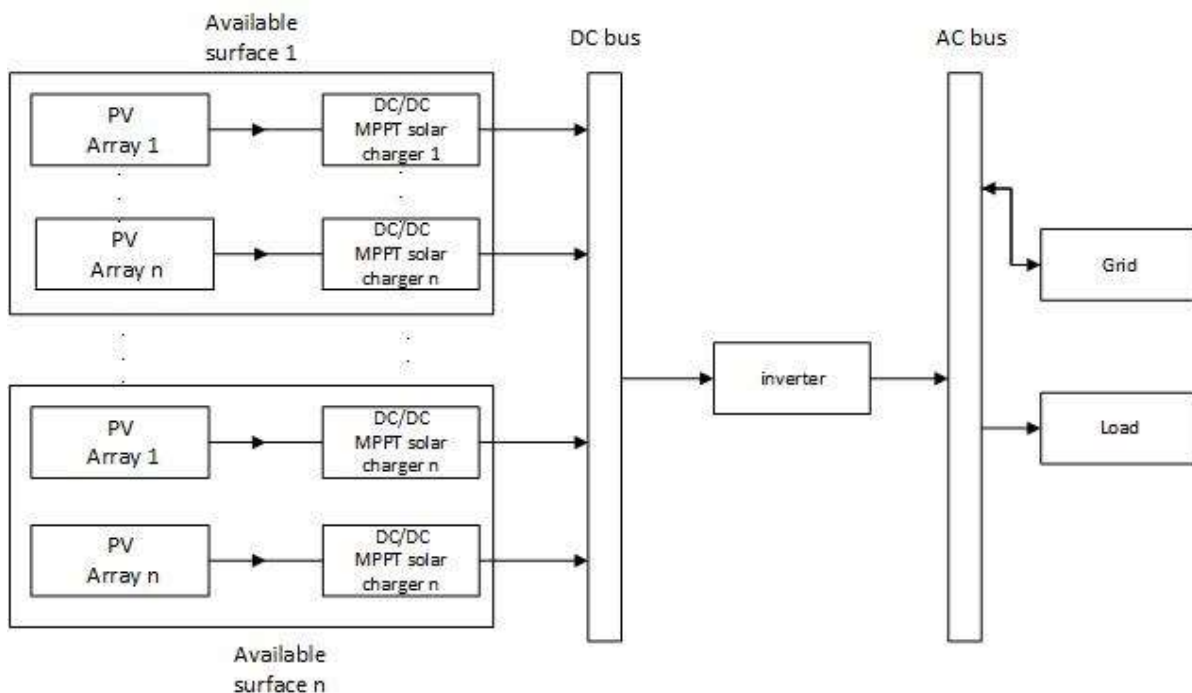
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή

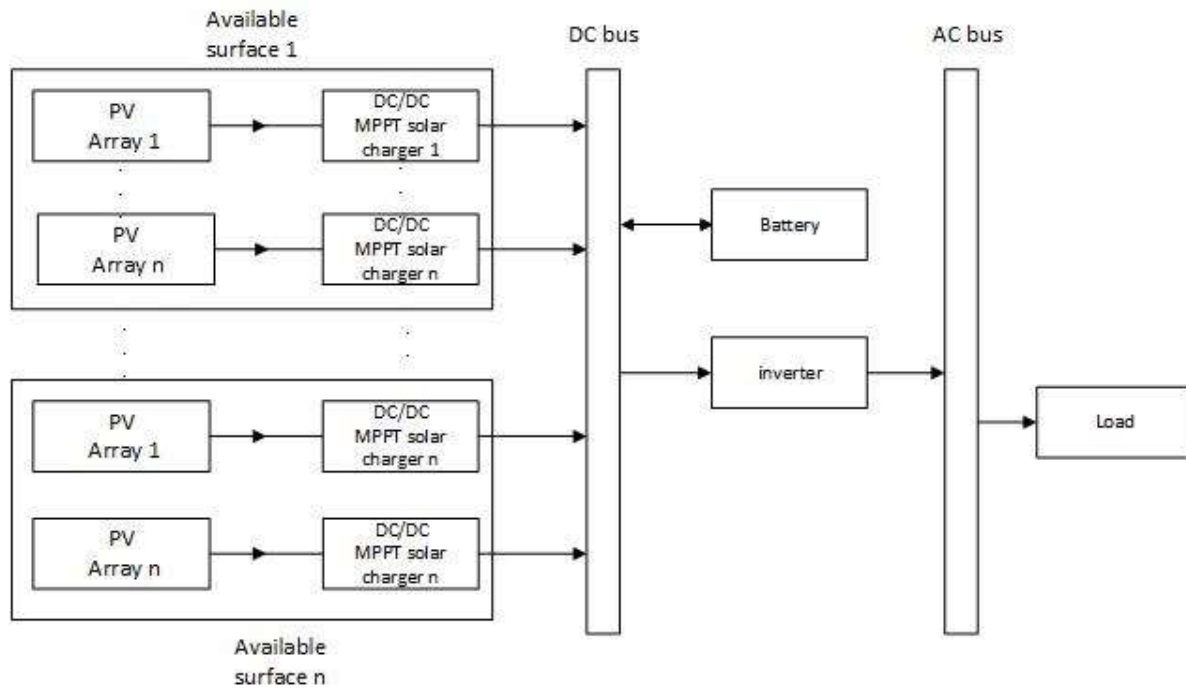
Στη παρούσα εργασία μελετούνται τρία είδη Φ/Β συστημάτων: (α) σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, (β) χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και (γ) πλήρως αυτόνομο Φ/Β σύστημα. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα των τριών αυτών Φ/Β συστημάτων. Στα Σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3 παρουσιάζονται τα γενικά διαγράμματα λειτουργίας και τα επιμέρους υποσυστήματα κάθε Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 2.1 Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα 2.2 Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα 2.3 Πλήρως αυτόνομο Φ/Β σύστημα.

Οι διαθέσιμες επιφάνειες χαρακτηρίζονται από το εμβαδόν, τη γωνία κλίσης και την αζιμούθια γωνία τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά λαμβάνονται ως είσοδοι στον αλγόριθμο. Το εμβαδόν της κάθε επιφάνειας είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό του μέγιστου πλήθους Φ/Β πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτή. Η γωνία κλίσης και η αζιμούθια γωνία είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για να μπορέσει έτσι να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3 η κάθε διαθέσιμη επιφάνεια χωρίζεται σε συστοιχίες Φ/Β πλαισίων ανάλογα με το πόσοι φορτιστές χρειάζονται για κάθε επιφάνεια (συνδέεται ένας φορτιστής ανά συστοιχία).

Κάθε συστοιχία με τη σειρά της απαρτίζεται από ένα αριθμό Φ/Β πλαισίων τοποθετημένα σε σειρά και ένα αριθμό τοποθετημένα παράλληλα, ανάλογα από την τάση εισόδου του εκάστοτε φορτιστή. Η τάση εξόδου του εκάστοτε φορτιστή και η τάση εισόδου της εκάστοτε μπαταρίας προσδιορίζουν το μέγεθος της συστοιχίας των μπαταριών, δηλαδή πόσες θα τοποθετηθούν παράλληλα και πόσες σε σειρά.

2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία

2.2.1 Εισαγωγή

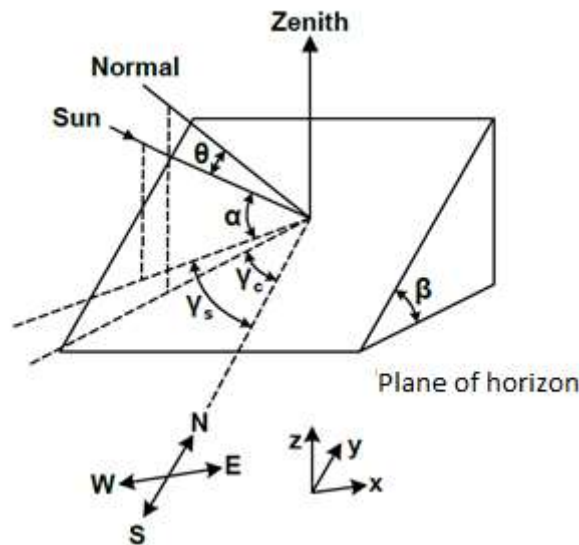
Με τον όρο ηλιακή ακτινοβολία ή ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον Ήλιο. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που πέφτει κάθετα στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας ανά μονάδα χρόνου και όταν η Γη βρίσκεται στη μέση απόσταση από τον Ήλιο λέγεται ηλιακή σταθερά (G_{sc}) και είναι ίση με 1367 W/m^2 . Σχετικά με τη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας το 99% αυτής είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως. Εκτός όμως από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ο Ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Ο ηλιακός άνεμος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος, δηλαδή περίπου το 45% της ηλιακής ακτινοβολίας ανήκει στο ορατό φάσμα (400 έως 700 nm), το 46% στο υπέρυθρο (>700 nm) και το υπόλοιπο 9% στο υπεριώδες (<400 nm).

Για τη μελέτη και τη αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ένα μέγεθος με μεγάλη σημασία. Ο υπολογισμός του μεγέθους αυτού γίνεται μέσω του προσδιορισμού της προσπίπτουσας σε μια επιφάνεια ακτινοβολίας συνυπολογίζοντας την κλίση και τον προσανατολισμό αυτής καθώς και το χρόνο και τόπο μελέτης.

2.2.2 Βέλτιστη κλίση και προσανατολισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Πριν από την εγκατάσταση οποιουδήποτε Φ/Β συστήματος είναι πολύ σημαντικό να επιλεγεί η βέλτιστη γωνία κλίσης και ο κατάλληλος προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4 ο προσανατολισμός περιγράφεται από την αζιμούθια γωνία γ_c (°) και η γωνία κλίσης από τη γωνία β (°).



Σχήμα 2.4 Γωνίες σχετικές με την ηλιακή ακτινοβολία.

Η κλίση β του συλλέκτη είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και τον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 90° (για $\beta=90^\circ$ ο συλλέκτης είναι κάθετος στο οριζόντιο επίπεδο). Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη γ_c είναι η γωνία που σχηματίζεται επάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Μπορεί να πάρει τιμές από -180° μέχρι $+180^\circ$. Η γωνία 0° αντιστοιχεί σε νότιο προσανατολισμό, $+90^\circ$ δυτικό, -90° ανατολικό και τέλος η γωνία $+180^\circ$ συμπίπτει με τη γωνία -180° και αντιστοιχεί σε βόρειο προσανατολισμό.

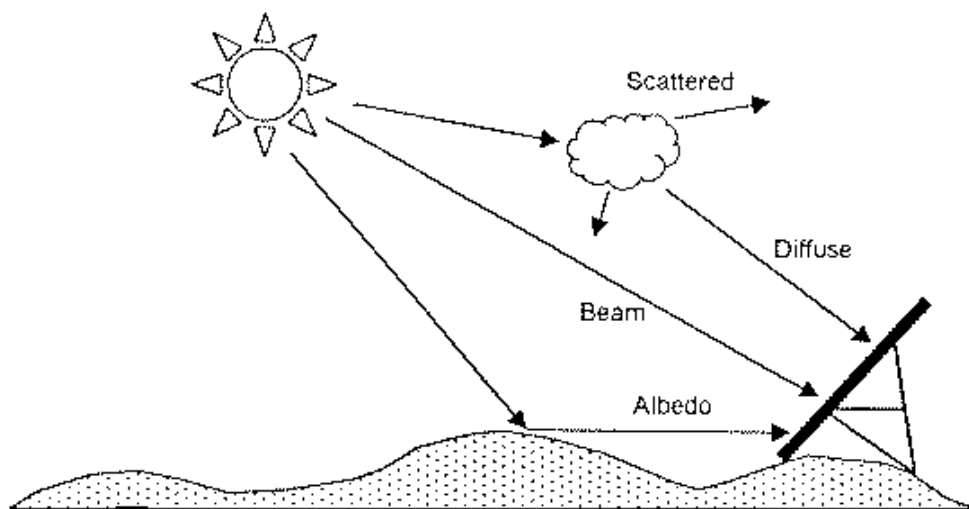
Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της γωνίας κλίσης και του προσανατολισμού είναι η τοποθεσία που γίνεται η εγκατάσταση του Φ/Β συστήματος. Γενικά, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι περίπου 5 με 10 μοίρες μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Τέλος, για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 0° .

2.2.3 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Η σύσταση του ατμοσφαιρικού στρώματος της Γης επηρεάζει άμεσα την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γήινη επιφάνεια. Παράγοντες όπως το όζον ή το οξυγόνο απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλοι παράγοντες όπως οι νεφώσεις την

αντανακλούν. Επίσης παράγοντες όπως η σκόνη ή τα σωματίδια νερού οδηγούν στη διασπορά της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάσει στο έδαφος, ένα τμήμα της θα απορροφηθεί, ενώ το υπόλοιπο θα ανακλαστεί. Το σύνολο των πιο πάνω επιδράσεων αποσυνθέτει την ηλιακή ακτινοβολία σε τρεις συνιστώσες όπως φαίνεται στο (Σχήμα 2.5):

- Την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (solar beam ή direct irradiation) που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο.
- Τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (diffuse irradiation) που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο.
- Την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία (albedo irradiation) που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής, η τιμή της εξαρτάται από τη μορφή και το είδος του εδάφους της περιοχής και χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή ανάκλασης (ρ).



Σχήμα 2.5 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.

2.2.4 Μέθοδος υπολογισμού έντασης προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Στο σύστημα της παρούσας εργασίας τοποθετούνται Φ/Β πλαίσια σε διάφορες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού ανάλογα με τις διαθέσιμες επιφάνειες του εκάστοτε κτιρίου. Οι περισσότερες επιφάνειες του κτιρίου έχουν προκαθορισμένη κλίση και προσανατολισμό. Επιφάνειες όμως όπως η οροφή ενός κτιρίου δίνουν τη δυνατότητα να επιλεχθεί η βέλτιστη γωνία κλίσης και προσανατολισμού. Επομένως, είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε κλίση των Φ/Β πλαισίων αφού οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας που συνήθως είναι διαθέσιμες αφορούν το οριζόντιο επίπεδο.

Εκτός από την αζιμούθια γωνία γ_c και τη γωνία κλίσης β , στο Σχήμα 2.4 φαίνονται όλες οι γωνίες που εμπλέκονται στον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο: α (°) είναι η γωνία ηλιακού υψομέτρου (solar altitude angle), θ (°) η γωνία μεταξύ της ηλιακής ακτίνας και της κανονικής προς την επιφάνεια του συλλέκτη (angle between solar ray and the normal to the collector surface) και γ_s (°) το ηλιακό αζιμούθιο (solar azimuth angle).

Η οριζόντια ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης, \overline{G} , η οποία είναι είσοδος στο προτεινόμενο αλγόριθμο βελτιστοποίησης, είναι ίση με το άθροισμα της άμεσης, \overline{B} , και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, \overline{D} , στο οριζόντιο επίπεδο [1]:

$$\overline{B} = \overline{G} - \overline{D} \quad (2.1)$$

$$\overline{D} = f_d \cdot \overline{G} \quad (2.2)$$

$$R_b = \frac{\max(0, \cos \theta)}{\cos \theta_z} \quad (2.3)$$

$$f = \sqrt{\frac{\overline{B}}{\overline{G}}} \quad (2.4)$$

$$A_i = \frac{\overline{B}}{\overline{G}_0} \quad (2.5)$$

όπου με G_0 συμβολίζεται η μέση οριζόντια ακτινοβολία εκτός Γης.

Τέλος η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, $G(d_n, t, \gamma_c, \beta)$, σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β ($^\circ$) και αζιμούθια γωνία γ_c ($^\circ$) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$G(d_n, t, \gamma_c, \beta) = (\bar{B} + A_i \cdot \bar{D}) \cdot R_b + (1 - A_i) \cdot \bar{D} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + \bar{G} \cdot \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.6)$$

όπου:

ρ ο συντελεστής ανάκλασης,

d_n ο αριθμός της ημέρας κατά τη διάρκεια του έτους,

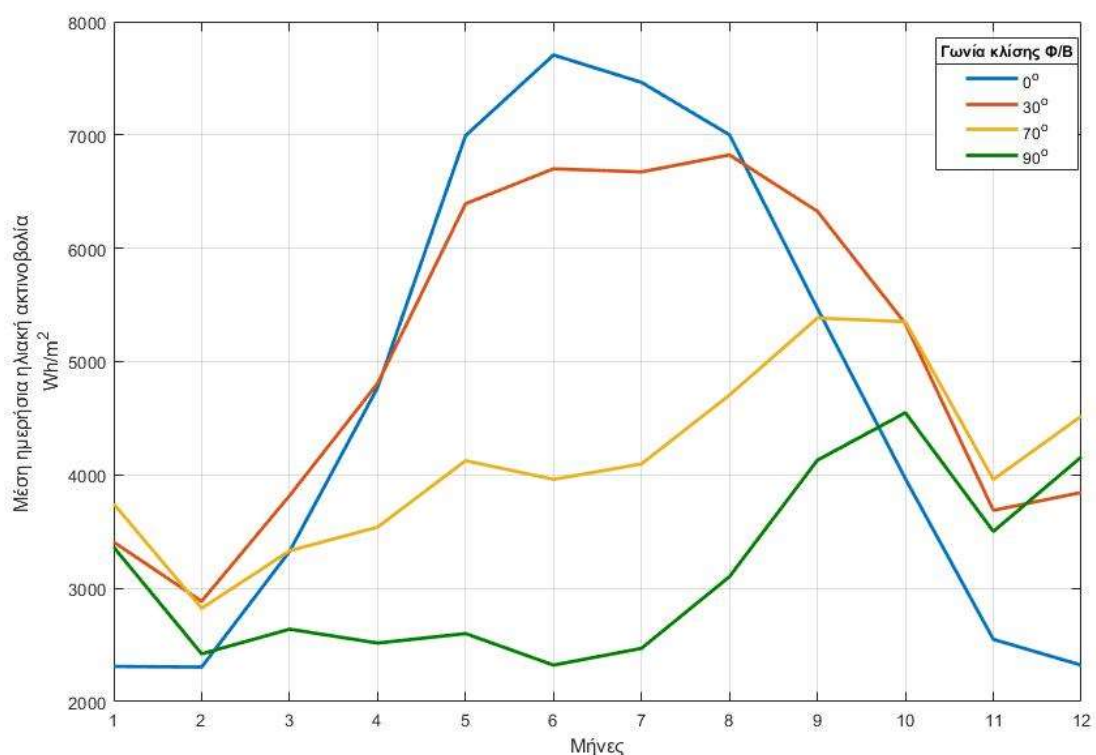
t ο αριθμός της ώρας κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στο μοντέλο αυτό, πρέπει η ωριαία γωνία στην αρχή του χρονικού βήματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ωριαία γωνία της ανατολής του ηλίου και, αντίστοιχα, η ωριαία γωνία στο τέλος του χρονικού βήματος πρέπει να είναι μικρότερη από την ωριαία γωνία δύσης του ηλίου. Επομένως, πρέπει να ισχύει ότι η ωριαία γωνία στην αρχή και στο τέλος του χρονικού βήματος να είναι τέτοιες ώστε $\omega_1 > \omega_{sr}$ και $\omega_2 < \omega_{ss}$. Αν δεν ισχύει το παραπάνω, η ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία, $G(d_n, t, \gamma_c, \beta)$, είναι ίση με μηδέν.

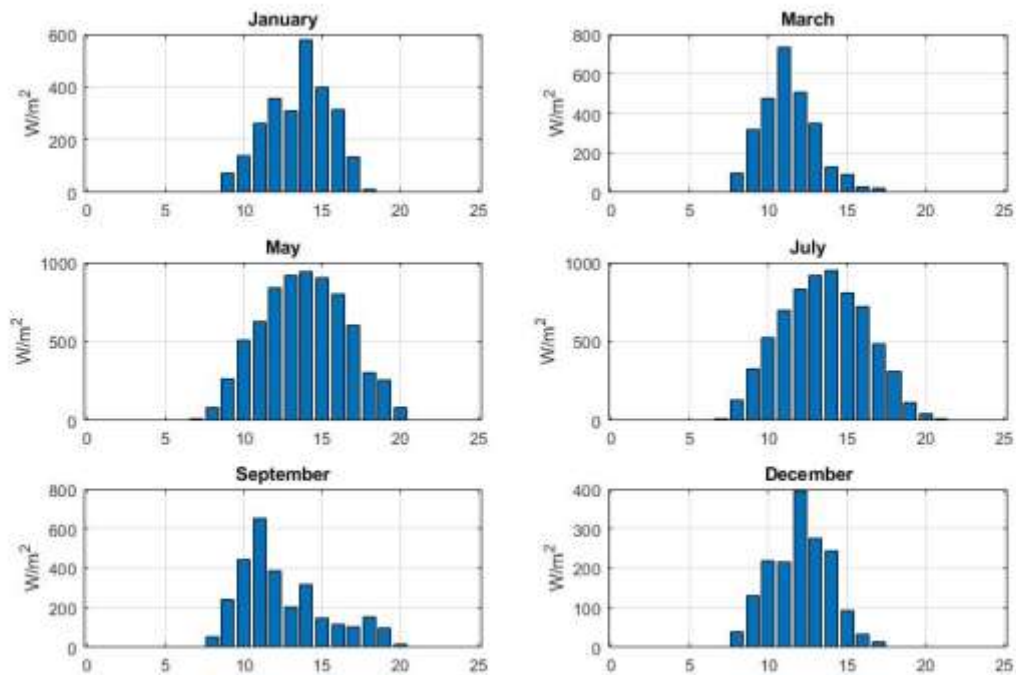
Στον Πίνακα 2.1 δίνονται οι τυπικές τιμές για τον συντελεστή ανάκλασης, ρ , για διάφορα είδη εδάφους. Αν δεν είναι γνωστός είναι κοινό να λαμβάνεται ίσος με 0,2.

Πίνακας 2.1 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορα εδάφη	
Έδαφος	Συντελεστής ανάκλασης ρ
Ξηρό – γυμνό έδαφος	0,2
Έδαφος με χορτάρι	0,3
Έρημος	0,4
Χιόνι	0,5-0,8

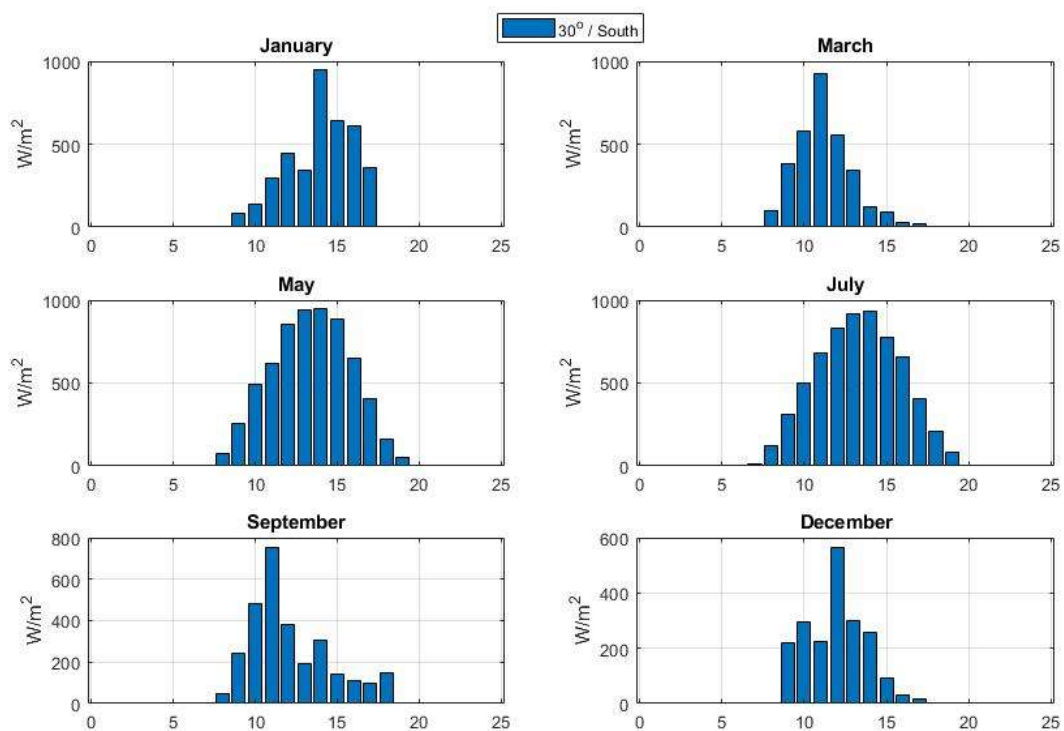
Παρακάτω ακολουθούν διαγράμματα τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορους συνδυασμούς κλίσης και προσανατολισμού. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε οριζόντιο επίπεδο και σε επίπεδα κλίσης 30° , 70° , 90° . Στα Σχήματα 2.7 μέχρι 2.11 παρουσιάζονται οι ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού, για μια μέρα από τους μήνες Ιανουάριο, Μάρτιο, Μάιο, Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο. Οι υπολογισμοί για τα πιο κάτω διαγράμματα έγιναν για την περιοχή των Χανιών με γεωγραφικό πλάτος 35.51° , γεωγραφικό μήκος 24.01° και συντελεστή ανάκλασης ίσο με 0.2.



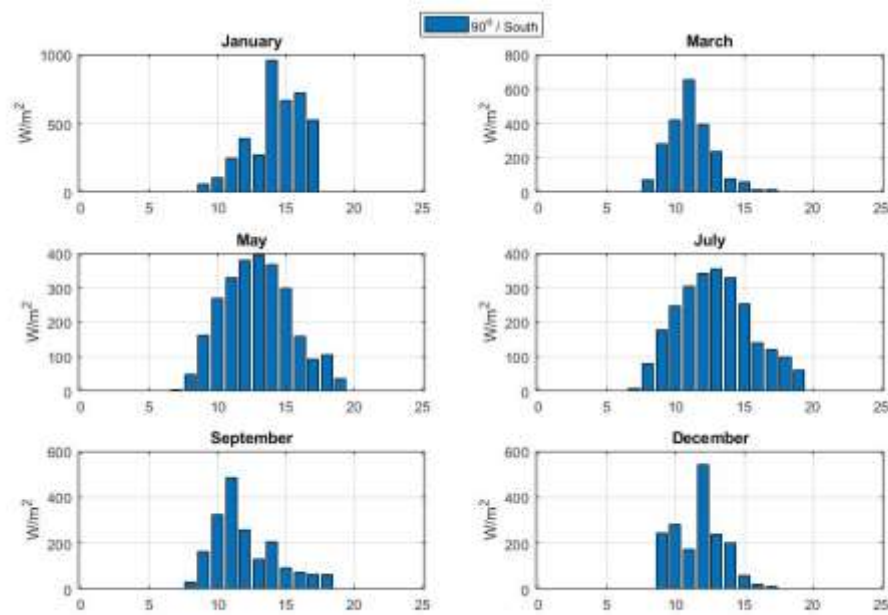
Σχήμα 2.6 Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα με νότιο προσανατολισμό σε διάφορες γωνίες κλίσης.



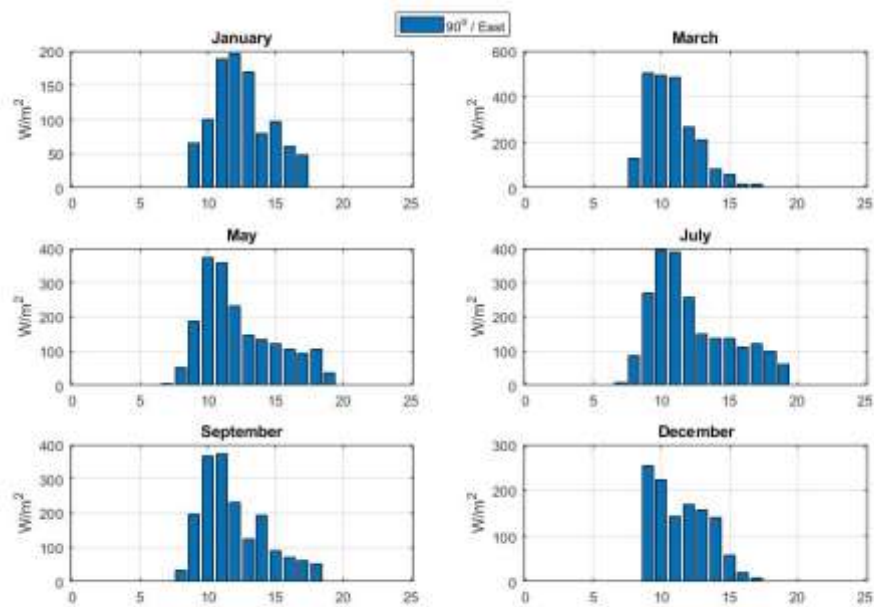
Σχήμα 2.7 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε οριζόντιο επίπεδο.



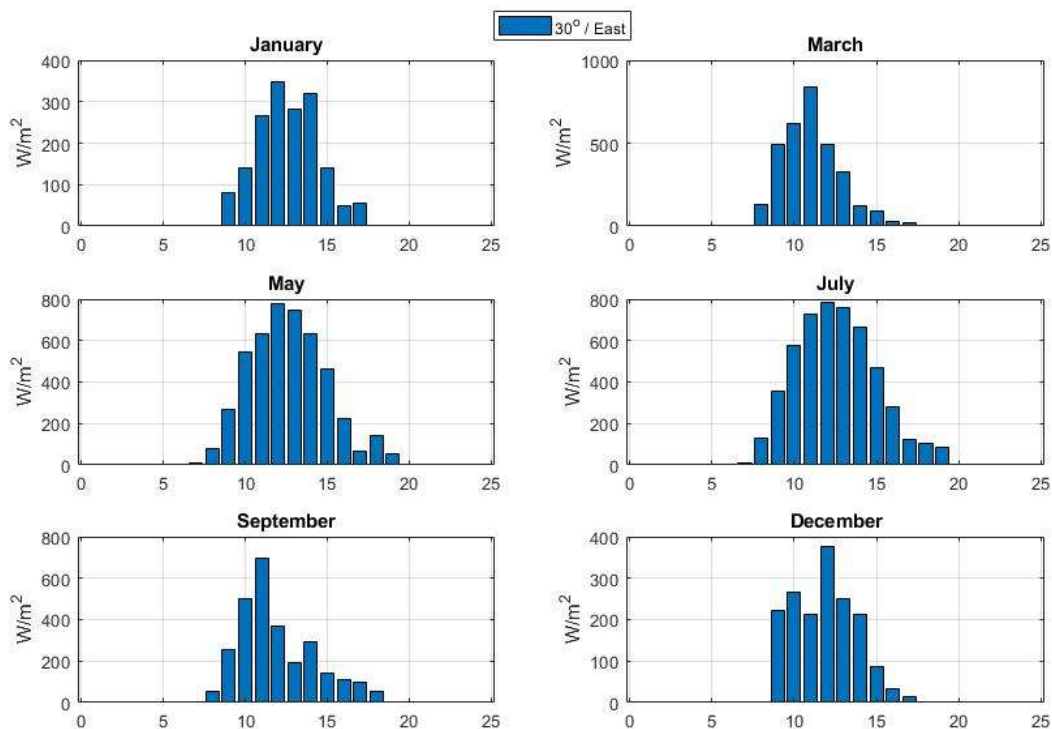
Σχήμα 2.8 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε επιφάνεια με κλίση 30° και νότιο προσανατολισμό (αζιμούθιο $= 0^\circ$).



Σχήμα 2.9 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε επιφάνεια με κλίση 90° και νότιο προσανατολισμό (αζιμούθιο= 0°).



Σχήμα 2.10 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε επιφάνεια με κλίση 90° και ανατολικό προσανατολισμό (αζιμούθιο= -90°).



Σχήμα 2.11 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα σε επιφάνεια με κλίση 30° και ανατολικό προσανατολισμό (αζιμούθιο = -90°).

2.3 Φωτοβολταϊκές Διατάξεις

2.3.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρομαγνητική ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η μετατροπή αυτή είναι ένα φυσικό φαινόμενο γνωστό ως φωτοβολταϊκή μετατροπή. Το Φ/Β στοιχείο είναι μία διάταξη δύο ημιαγωγών σε επαφή, η οποία όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα της συνεχή ηλεκτρική τάση. Στα Φ/Β στοιχεία, τα δύο ημιαγωγικά στρώματα σε επαφή αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό (π.χ πυρίτιο), αλλά με τις κατάλληλες προσμίξεις μετάλλων το ένα στρώμα είναι ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p.

2.3.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η σημαντική εξέλιξη της τεχνολογίας στο τομέα των ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα των Φ/Β πλαισίων δίνει τη δυνατότητα χρήσης τους και ως δομικά υλικά σε κτήρια πέραν από τη παραγωγή ενέργειας. Τέτοιου είδους πλαίσια είναι τα Φ/Β κεραμίδια και τα διάφανα Φ/Β πλαίσια. Τα Φ/Β κεραμίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν την οροφή ενός κτηρίου και τα διάφανα Φ/Β πλαίσια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν γυάλινες ή άλλες διάφανες επιφάνειες σε ένα κτήριο.

Παραδείγματα τέτοιου είδους κτηρίων φαίνονται στα Σχήματα 2.12 και 2.13.



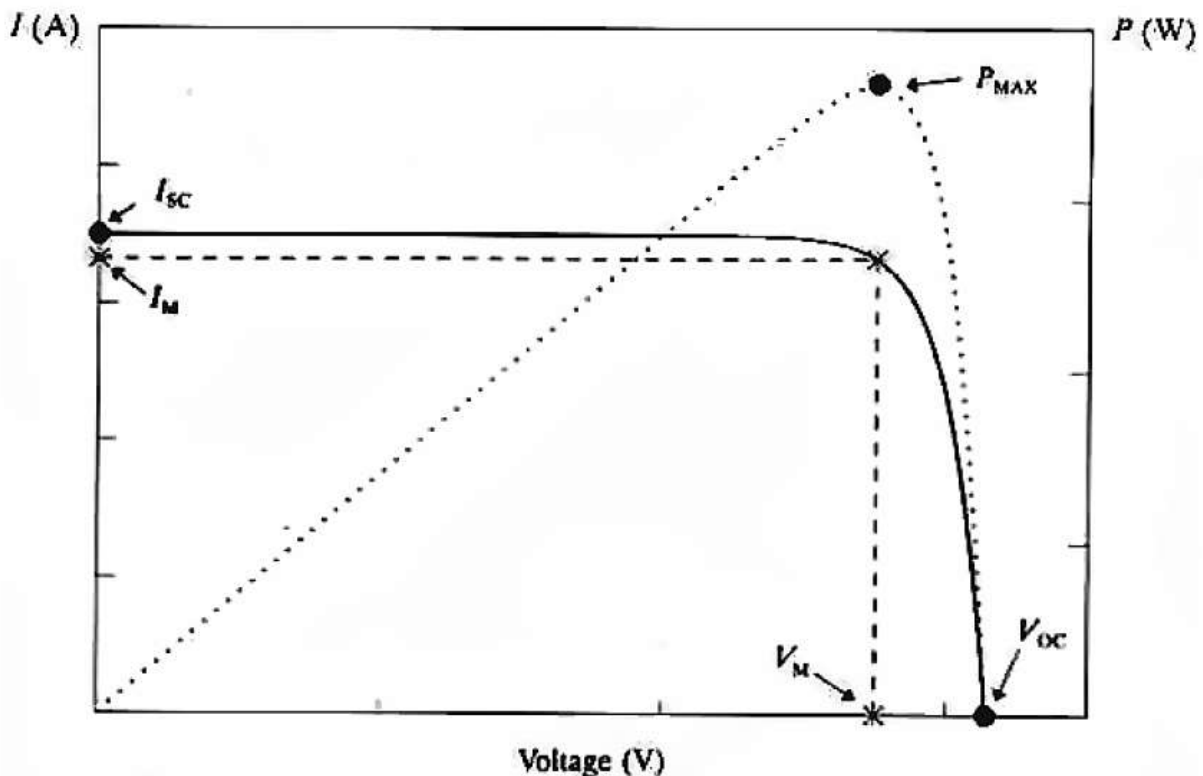
Σχήμα 2.12 Κτίριο Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.



Σχήμα 2.13 Σπίτι με Φ/Β κεραμίδια.

Επειδή τα Φ/Β στοιχεία δίνουν στην έξοδο τους μικρή τάση, οι κατασκευαστές παρέχουν Φ/Β στοιχεία σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται Φ/Β πλαίσια και περιλαμβάνουν κάποιο αριθμό Φ/Β στοιχείων, συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα. Τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία ενός Φ/Β συστήματος.

Ας θεωρήσουμε ένα Φ/Β πλαίσιο που αποτελείται από N_p ομάδες Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένες μεταξύ τους παράλληλα και κάθε τέτοια ομάδα αποτελείται από N_s Φ/Β στοιχεία σε σειρά. Ο αριθμός των Φ/Β στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, αντίστοιχα, δίνεται από τον κατασκευαστή του Φ/Β πλαισίου. Επίσης οι κατασκευαστές παρέχουν τουλάχιστον τα παρακάτω μεγέθη μαζί με τα πλαίσια: ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{scm} , τάση ανοικτοκύκλωσης, V_{ocm} , και μέγιστη ισχύς, P_{maxm} . Οι τιμές αυτές έχουν μετρηθεί σε κανονικές συνθήκες (STC), δηλαδή ακτινοβολία 1000 W/m^2 , Air Mass (AM) 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων (T_{stc}) 25°C . Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης φαίνεται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 Χαρακτηριστικές I-V και P-V Φ/Β στοιχείου.

Στο Σχήμα 2.14 η καμπύλη με συνεχή γραμμή απεικονίζει τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης και η καμπύλη με τη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει τη χαρακτηριστική ισχύος-τάσης. Όπως παρατηρείται υπάρχει ένα σημείο (V_m , I_m) στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος (maximum power point, MPP). Με I_{sc} συμβολίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης και με V_{oc} η τάση ανοικτοκύκλωσης.

Στη παρούσα εργασία είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου για συνθήκες διαφορετικές από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Πιο συγκεκριμένα είναι Βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

επιθυμητό να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου του πλαισίου σε ορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος πρέπει πρώτα να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων υπό συνθήκες STC:

$$P_{\max c} = \frac{P_{\max m}}{N_s \cdot N_p} \quad (2.7)$$

$$V_{occ} = \frac{V_{ocm}}{N_s} \quad (2.8)$$

$$I_{sc} = \frac{I_{scm}}{N_p} \quad (2.9)$$

όπου $P_{\max c}$ μέγιστη ισχύς, V_{occ} τάση ανοικτοκύκλωσης και I_{sc} ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός Φ/Β στοιχείου υπό συνθήκες STC.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παράμετρος v_{oc} , ως εξής:

$$v_{oc} = \frac{V_{occ}}{V_t} \quad (2.10)$$

όπου V_t η θερμική τάση του Φ/Β στοιχείου και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_t = 0.025 \cdot \frac{273 + T_{stc}}{300} \quad (2.11)$$

Η αντίσταση σε σειρά των Φ/Β στοιχείων, R_s , δίνεται από τη σχέση :

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_0} \right) \cdot \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.12)$$

όπου FF και FF_0 συνδέονται με την εξής σχέση:

$$FF = \frac{V_{mc} \cdot I_{mc}}{V_{occ} \cdot I_{sc}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (2.13)$$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (2.14)$$

Από τη σχέση (2.13) προκύπτει ότι:

$$FF = \frac{P_{\max c}}{V_{occ} \cdot I_{sc}} \quad (2.15)$$

και

$$r_s = 1 - \frac{FF}{FF_0} \quad (2.16)$$

Οι σχέσεις που συνδέουν την τάση ανοικτοκύκλωσης με την τάση στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point MPP) του Φ/Β στοιχείου και το ρεύμα βραχυκύκλωσης με το ρεύμα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) του Φ/Β στοιχείου είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{V_{mc}}{V_{oc}} = 1 - \left(\frac{b \cdot \ln(a)}{v_{oc}} \right) - r_s \cdot (1 - a^{-b}) \quad (2.17)$$

$$\frac{I_{mc}}{I_{sc}} = (1 - a^{-b}) \quad (2.18)$$

όπου:

$$a = v_{oc} + 1 - (2 \cdot v_{oc} \cdot r_s) \quad (2.19)$$

$$b = \frac{a}{a + 1} \quad (2.20)$$

Αφού έχουν υπολογιστεί τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός Φ/Β στοιχείου υπό συνθήκες STC στη συνέχεια υπολογίζονται ξανά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου αυτή τη φορά για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας που καθορίζονται από τον σχεδιαστή του Φ/Β συστήματος.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός Φ/Β στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$I_{scw} = C_1 \cdot G \quad (2.21)$$

όπου G είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (W/m^2) και η σταθερά C_1 δίνεται από τη σχέση:

$$C_1 = \frac{I_{sc}}{1000} \quad (2.22)$$

Η θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων του πλαισίου, T_c , εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_a , σύμφωνα με τη σχέση :

$$T_c = C_2 \cdot G - T_a \quad (2.23)$$

όπου:

$$C_2 = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (2.24)$$

Η τάση ανοικτοκύκλωσης κάθε Φ/Β στοιχείου μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων με ρυθμό $\frac{dV_{oc}}{dT_c}$. Επομένως, η τάση ανοικτοκύκλωσης σε συνθήκες λειτουργίας

δίνεται από τη σχέση:

$$V_{ocw} = V_{oc} + \frac{dV_{oc}}{dT_c} \cdot (T_c - T_{stc}) \quad (2.25)$$

Επαναλαμβάνοντας τις σχέσεις (2.10), (2.19) και (2.20) υπολογίζονται εκ νέου οι τιμές των v_{oc} , a και b με ρεύμα βραχυκύκλωσης και τάση ανοικτοκύκλωσης υπό τις συνθήκες των επιθυμητών μετεωρολογικών δεδομένων λειτουργίας. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ξανά το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτοκύκλωσης στις συνθήκες των επιθυμητών μετεωρολογικών δεδομένων από τις σχέσεις 2.21 και 2.25.

Με τις νέες τιμές των v_{oc} , a και b προκύπτει :

$$\frac{V_{mcw}}{V_{ocw}} = 1 - \left(\frac{b \cdot \ln(a)}{v_{oc}} \right) - r_s \cdot (1 - a^{-b}) \quad (2.26)$$

και

$$\frac{I_{mcw}}{I_{scw}} = (1 - a^{-b}) \quad (2.27)$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτοκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου υπό συνθήκες λειτουργίας δίνεται από τις σχέσεις:

$$I_{scg} = I_{scw} \cdot N_p \quad (2.28)$$

$$V_{ocg} = V_{ocw} \cdot N_s \quad (2.29)$$

Η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPP) του Φ/Β πλαισίου υπό συνθήκες λειτουργίας είναι :

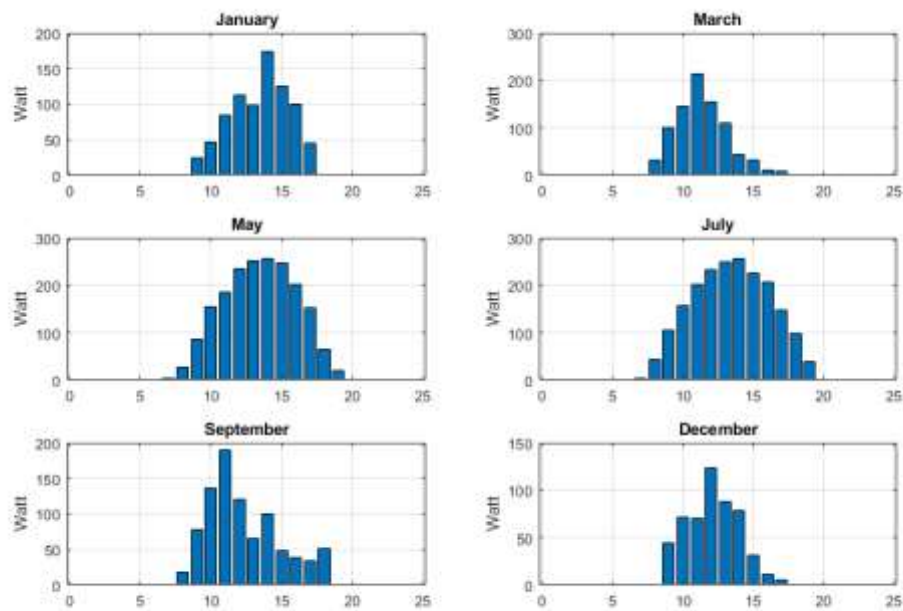
$$V_m = V_{ocg} \cdot \frac{V_{mcw}}{V_{ocw}} \quad (2.30)$$

$$I_m = I_{scg} \cdot \frac{I_{mcw}}{I_{scw}} \quad (2.31)$$

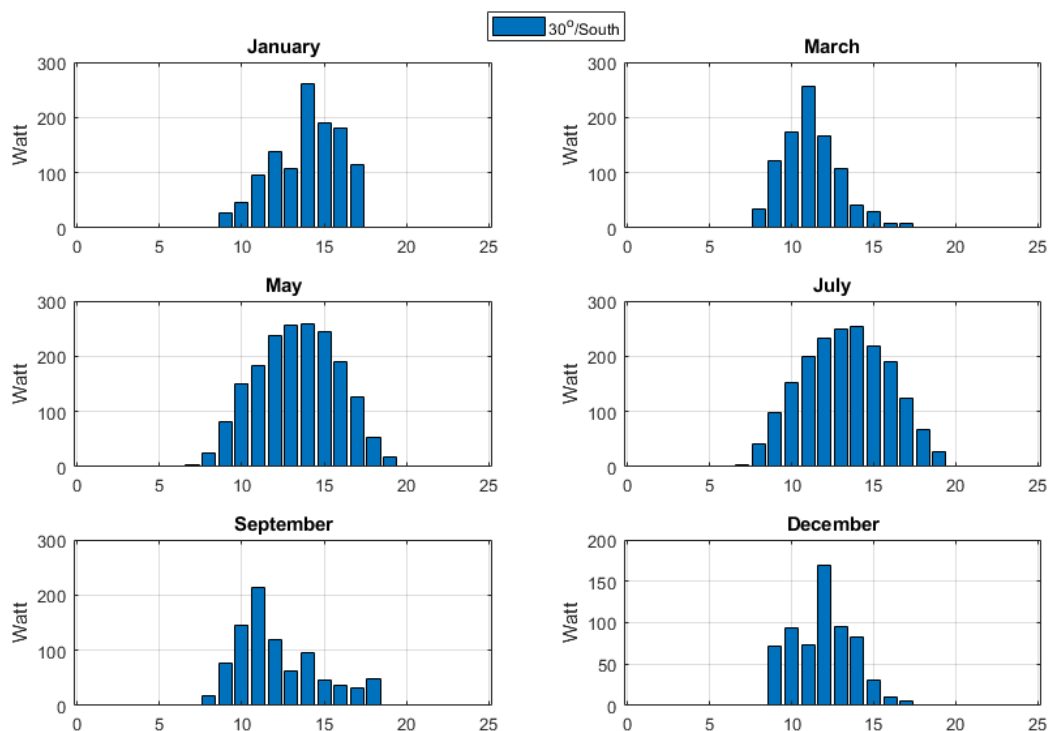
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ζητούμενη μέγιστη παραγόμενη ισχύς ενός Φ/Β πλαισίου σε συνθήκες λειτουργίας προκύπτει ως εξής:

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (2.32)$$

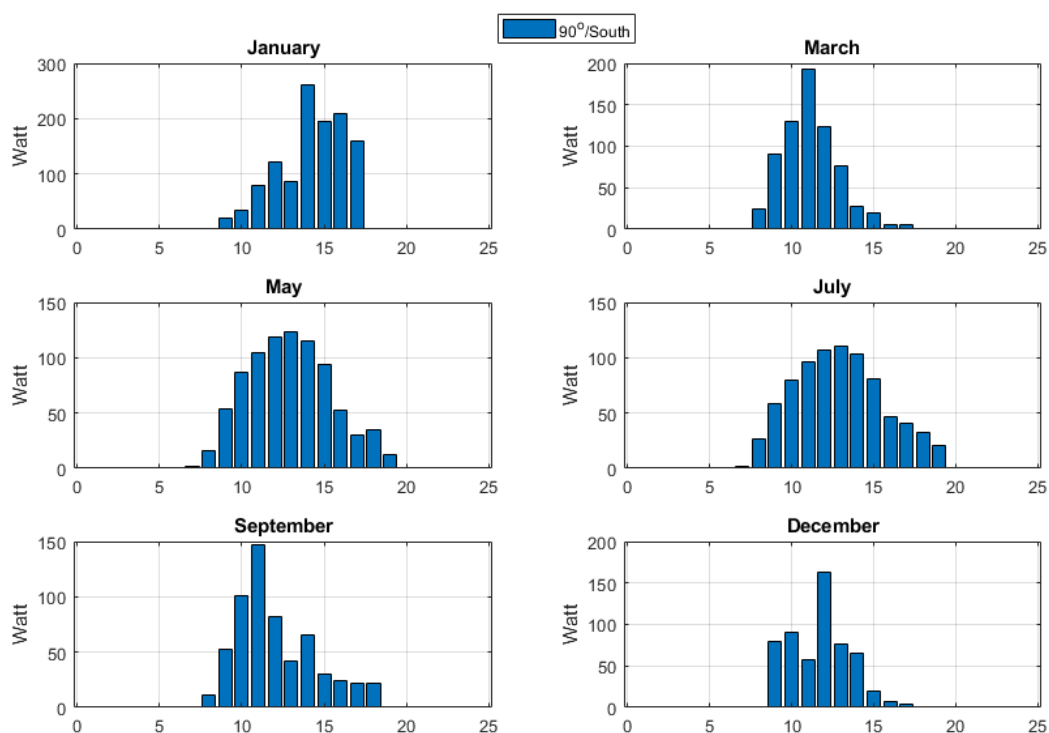
Στην προηγούμενη παράγραφο έχουν παρουσιαστεί διαγράμματα έντασης προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορες γωνίες κλίσης και προσανατολισμού μίας Φ/Β επιφάνειας. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.15 μέχρι 2.19 τα αντίστοιχα διαγράμματα παραγόμενης ισχύος από ένα Φ/Β πλαίσιο υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων. Το Φ/Β πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των πιο κάτω διαγραμμάτων έχει μέγιστη ισχύ 275 Watt σε STC.



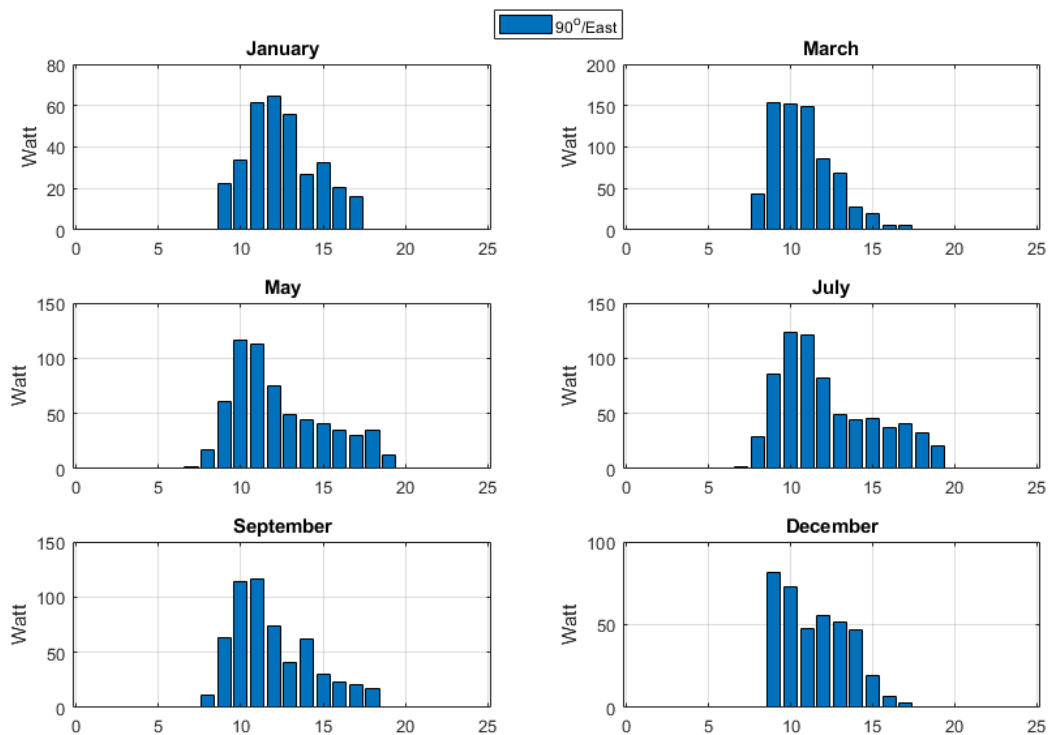
Σχήμα 2.15 Ωριαία παραγόμενη ισχύς υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων ανά μήνα για Φ/Β πλαίσιο τοποθετημένο σε οριζόντιο επίπεδο.



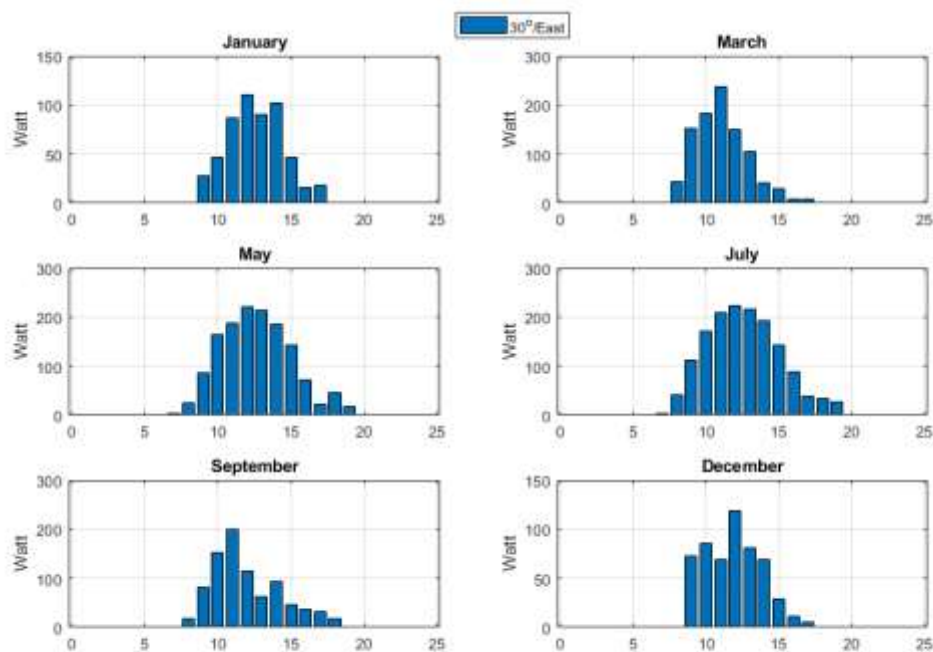
Σχήμα 2.16 Ωριαία παραγόμενη ισχύς υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων ανά μήνα για Φ/Β πλαίσιο σε κλίση 30° και νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 2.17 Ωριαία παραγόμενη ισχύς υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων ανά μήνα για Φ/Β πλαίσιο σε κλίση 90° και νότιο προσανατολισμό.



Σχήμα 2.18 Ωριαία παραγόμενη ισχύ υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων ανά μήνα για Φ/Β πλαίσιο σε κλίση 90° και ανατολικό προσανατολισμό.



Σχήμα 2.19 Ωριαία παραγόμενη ισχύ υπό διάφορες συνθήκες μετεωρολογικών δεδομένων ανά μήνα για Φ/Β πλαίσιο σε κλίση 30° και ανατολικό προσανατολισμό.

2.4 Μπαταρίες, ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών και μετατροπείς DC/AC

2.4.1 Μπαταρίες

Ένα αξιόπιστο σύστημα πρέπει να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση της ζήτησης στα χρονικά διαστήματα που δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Είναι αντιληπτό ότι τα διαστήματα αυτά είναι οι νυχτερινές ώρες, οι συννεφιασμένες μέρες και οι ώρες αιχμής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, είναι αναγκαίο να αποθηκευτεί μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της Φ/Β γεννήτριας. Η αποθήκευση της περίσσειας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα Φ/Β συστήματα γίνεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες).

Υπάρχουν διαφόρων τύπων μπαταρίες, ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους, όπως π.χ. συσσωρευτές νικελίου – καδμίου ή αργύρου – ψευδαργύρου. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι οικονομικότεροι για χρήση σε Φ/Β συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Τα ηλεκτρόδια τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου, π.χ. Pb – Sb ή Pb-Ca, βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος. Είναι δηλαδή όμοιοι με τους συνηθισμένους συσσωρευτές των αυτοκινήτων, αν και εκείνοι κατασκευάζονται από φτηνότερο κράμα μολύβδου και αυτοεκφορτίζονται με σχετικά γρήγορο ρυθμό [2].

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετريέται σε αμπερώρια (Ah), που ορίζεται ως το γινόμενο της έντασης του ρεύματος που παρέχει ο συσσωρευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση. Πιο χρήσιμο μέγεθος είναι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή, η οποία εξαρτάται όμως από την τάση που δίνει ο συσσωρευτής. Έτσι ένας συσσωρευτής χωρητικότητας π.χ. $C=100\text{ Ah}$, που δίνει μέση τάση π.χ. $V=12\text{ V}$, έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με $100\text{ Ah} \cdot 12\text{ V} = 1200\text{ Wh} = 1,2\text{ kWh}$ [3].

Σύμφωνα με την τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης υπολογίζεται το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά έτσι ώστε να συμβαδίζουν με τις προδιαγραφές λειτουργίας του ρυθμιστή φόρτισης. Στις σχέσεις (2.58) και (2.59) φαίνεται ο υπολογισμός του πλήθους μπαταριών που είναι απαραίτητο να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα αντίστοιχα:

$$N_{bs} = \text{ceil}\left(\frac{C_{Vout}}{V_{bn}}\right) \quad (2.58)$$

$$N_{bp} = \text{floor}\left(\frac{N_b}{N_{bs}}\right) \quad (2.59)$$

όπου:

N_b το πλήθος μπαταριών,

C_{Vout} η τάση εξόδου του ρυθμιστή φόρτισης και

V_{bn} η ονομαστική τάση της μπαταρίας.

Για το λόγο ότι το πλήθος των μπαταριών δεν μπορεί να μην είναι ακέραιος αριθμός και λόγω των στρογγυλοποιήσεων που έχουν γίνει για τον υπολογισμό των μπαταριών που τοποθετούνται παράλληλα και σε σειρά υπολογίζεται εκ νέου το τελικό συνολικό πλήθος μπαταριών:

$$N_{fb} = N_{bs} \cdot N_{bp} \quad (2.60)$$

Η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών σε αμπερώρια (Ah) δίνεται από τη σχέση:

$$C_{tot} = N_{bp} \cdot C_n \quad (2.61)$$

όπου C_n η ονομαστική χωρητικότητα μιας μπαταρίας.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του Φ/Β συστήματος η χωρητικότητα άλλοτε μειώνεται όταν η μπαταρία εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ στο φορτίο και άλλοτε αυξάνεται όταν η μπαταρία φορτίζεται απορροφώντας ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια. Όταν η χωρητικότητα της μπαταρίας μειωθεί κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό σημείο εκφόρτισης τότε αρχίζει να φθείρεται αν χρησιμοποιηθεί περεταίρω. Το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης παρέχεται από τον κατασκευαστή των μπαταριών.

2.4.2 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών

Οι ρυθμιστές τάσης δεν είναι τίποτα άλλο παρά ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος DC/DC. Χρησιμοποιούνται για την ορθή φόρτιση της μπαταρίας με σκοπό την προστασία της. Ειδικότερα, εμποδίζουν τη μπαταρία να υπερφορτιστεί αλλά και να εκφορτιστεί πέραν του μέγιστου επιτρεπτού βάθους εκφόρτισης. Πέραν από τον έλεγχο της ορθής φόρτισης της

μπαταρίας κάποιοι ρυθμιστές τάσης με χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να απορροφήσουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται Maximum Power Point Trackers (MPPTs). Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ρυθμιστές τάσης (charge controllers) με MPPT [3].

Από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων και του ρυθμιστή τάσης υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων που μπορεί να υποστηρίξει ένας ρυθμιστής τάσης καθώς και πόσα πλαίσια θα τοποθετηθούν σε σειρά και πόσα παράλληλα. Η τάση εισόδου του φορτιστή δίνεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή σε εύρος τιμών τάσης MPP $V_{in,min} - V_{in,max}$, όπου $V_{in,min}$ (V) είναι η ελάχιστη και $V_{in,max}$ (V) η μέγιστη MPP τάση εισόδου, αντίστοιχα.

Αν η τάση στο Maximum Power Point, V_{mpp} , ενός Φ/Β πλαισίου είναι μεγαλύτερη από $V_{in,min}$ και μικρότερη από $V_{in,max}$ τότε χρειάζεται να συνδεθεί μόνο ένα Φ/Β πλαίσιο σε σειρά και όλα τα υπόλοιπα παράλληλα. Αν όμως $V_{mpp} < V_{in,min}$ τότε θα χρειαστούν περισσότερα από ένα Φ/Β πλαίσια σε σειρά για να μπορέσει να λειτουργήσει το Φ/Β σύστημα. Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που πρέπει να συνδεθούν σε σειρά υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_s = floor\left(\frac{V_{in,max}}{V_{mpp}}\right) \quad (2.52)$$

Συνεπώς, τα Φ/Β πλαίσια που θα συνδεθούν παράλληλα είναι:

$$N_p = floor\left(\frac{N_{PV}}{N_s}\right) \quad (2.53)$$

όπου N_{PV} είναι το αρχικό πλήθος Φ/Β πλαισίων το οποίο δίνεται ως είσοδος στον αλγόριθμο για κάθε διαθέσιμη επιφάνεια. Το τελικό συνολικό πλήθος Φ/Β πλαισίων, N_{fPV} , προκύπτει από το γινόμενο του πλήθους των Φ/Β πλαισίων που υπολογίστηκε ότι χρειάζεται να συνδεθούν σε σειρά με το πλήθος αυτών που θα συνδεθούν παράλληλα:

$$N_{fPV} = N_s \cdot N_p \quad (2.54)$$

Αν $V_{mpp} < V_{in,min}$, τότε το Φ/Β σύστημα δεν μπορεί να λειτουργήσει.

Ένας ρυθμιστής τάσης δεν μπορεί να τροφοδοτήσει τις μπαταρίες με μεγαλύτερη ισχύ από την ονομαστική του. Πολύ πιθανόν ένας ρυθμιστής να μην είναι αρκετός για το τελικό πλήθος Φ/Β πλαισίων. Σε αυτή τη περίπτωση το τελικό πλήθος Φ/Β πλαισίων χωρίζεται σε μικρότερες ίδιες

συστοιχίες έτσι ώστε σε κάθε συστοιχία να αντιστοιχεί ένας ρυθμιστής. Ο συνολικός αριθμός ρυθμιστών που απαιτούνται υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{ch} = \text{ceil} \left(\frac{PV_{Pnom} \cdot N_{fPV}}{P_{ch}} \right) \quad (2.55)$$

όπου:

N_{ch} το πλήθος ρυθμιστών φόρτισης που απαιτούνται,

PV_{Pnom} η ονομαστική ισχύς κάθε Φ/Β πλαισίου και

P_{ch} η ονομαστική ισχύς του ρυθμιστή φόρτισης.

Το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν ανά Φ/Β συστοιχία δίνεται από τη σχέση:

$$N_{PVar} = \text{floor} \left(\frac{N_{PV}}{N_{ch}} \right) \quad (2.56)$$

Από αυτά, ο αριθμός όσων θα συνδεθούν παράλληλα σε κάθε συστοιχία, N_{Par} , υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{Par} = \text{floor} \left(\frac{N_{PVar}}{N_s} \right) \quad (2.57)$$

Επομένως, το τελικό συνολικό πλήθος των Φ/Β πλαισίων δίνεται από τη σχέση:

$$N_{fPV} = N_s \cdot N_{Par} \cdot N_{ch} \quad (2.58)$$

2.4.3 Μετατροπείς

Οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και έχουν χαμηλότερο κόστος από τις αντίστοιχες που λειτουργούν με συνεχές (DC). Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι το ηλεκτρικό φορτίο που τροφοδοτείται από το Φ/Β σύστημα λειτουργεί με AC τάση. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος DC/AC (αντιστροφείς, inverters) είναι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και είναι απαραίτητοι σε ένα Φ/Β σύστημα καθώς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα των Φ/Β πλαισίων και των μπαταριών σε εναλλασσόμενο για να τροφοδοτήσουν το φορτίο.

Οι μετατροπείς DC/AC χαρακτηρίζονται από τον βαθμό απόδοσης μετατροπής ισχύος, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$n_i = \frac{P_{inv}^{out}}{P_{inv}^{in}} \quad (2.63)$$

όπου:

n_i ο βαθμός απόδοσης μετατροπείας DC/AC,

P_{inv}^{out} η ισχύς εξόδου μετατροπείας DC/AC και

P_{inv}^{in} η ισχύς εισόδου μετατροπείας DC/AC.

Ο βαθμός απόδοσης ενός μετατροπείας DC/AC μπορεί να προσεγγίζει και το 95% όταν λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ του. Όταν λειτουργεί σε ισχύ διαφορετική από την ονομαστική του, τότε η απόδοσή του είναι μειωμένη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο μετατροπείας DC/AC μοντελοποιήθηκε ως ένα σύστημα που μεταφέρει ενέργεια από την είσοδο στην έξοδο του, θεωρώντας ότι χαρακτηρίζεται από ένα μέσο βαθμό απόδοσης n_i . Ο βαθμός αυτός αν δεν δίνεται από τον κατασκευαστή της εκάστοτε συσκευής, λαμβάνεται ίσος με 90%.

Ο απαιτούμενος αριθμός μετατροπέων DC/AC εξαρτάται άμεσα από το φορτίο το οποίο τροφοδοτείται από την Φ/Β εγκατάσταση και υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{inv} = \text{ceil} \left(\frac{\max(L)}{P_{inv}^{nom} \cdot n_i} \right) \quad (2.64)$$

όπου P_{inv}^{nom} η ονομαστική ισχύς του μετατροπείας DC/AC και L είναι το ημερήσιο ωριαίο προφίλ κατανάλωσης ισχύος του φορτίου σε Watt .

3.

Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

3.1 Εισαγωγή

Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών. Καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος, από το μέγεθος της πολύ χαμηλής ισχύος ευρείας χρήσεως καταναλωτικών προϊόντων, όπως είναι οι αριθμητικοί υπολογιστές, τα μικρά φωτιστικά κήπου κ.α., έως συστήματα μεγάλης ισχύος, για την τροφοδοσία νησιών ή μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων. Οι εφαρμογές αυτές διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα αυτόνομα

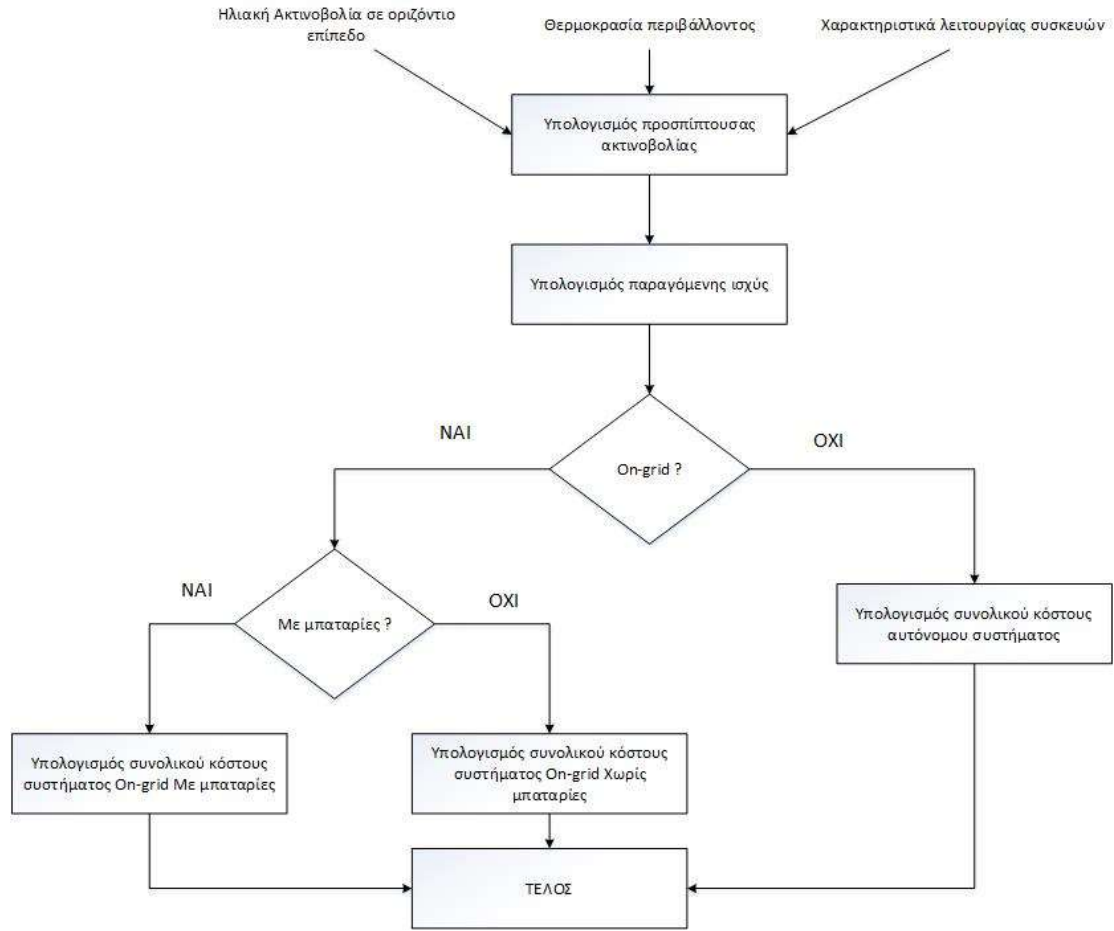
Φ/B συστήματα (stand alone / off-grid) και τα διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/B συστήματα (on-grid). Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο Φ/B συστήματα διακρίνονται με τη σειρά τους σε συστήματα με αποθήκευση ενέργειας και συστήματα χωρίς αποθήκευση ενέργειας.

Η δομή των τριών προαναφερθέντων συστημάτων παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.1, 2.2 και 2.3. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης λαμβάνει ως είσοδο τα χαρακτηριστικά της κάθε διαθέσιμης επιφάνειας τα οποία είναι: εμβαδόν (mm^2), γωνία κλίσης ($^\circ$), αζιμούθια γωνία ($^\circ$) και το τύπο του Φ/B πλαισίου που μπορεί να ενσωματωθεί σε κάθε μία από αυτές. Για την επιφάνεια που αφορά την οροφή δεν λαμβάνεται η γωνία κλίσης και η αζιμούθια γωνία ορίζεται ίση με μηδέν μοίρες. Στην οροφή υπάρχει δυνατότητα ενσωμάτωσης συμβατικών Φ/B πλαισίων ή Φ/B κεραμιδιών. Σε διάφανες επιφάνειες μπορούν ενσωματωθούν διάφανα Φ/B πλαίσια και τέλος στις υπόλοιπες επιφάνειες μπορούν να ενσωματωθούν συμβατικά Φ/β πλαίσια. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης λαμβάνει επίσης ως είσοδο τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου Φ/B πλαισίου, μεταξύ αυτών και το εμβαδόν του κάθε πλαισίου σε mm^2 . Αρχικά ο αλγόριθμος προσομοίωσης υπολογίζει το μέγιστο πλήθος Φ/B που μπορούν να ενσωματωθούν σε κάθε διαθέσιμη επιφάνεια με βάσει το εμβαδόν της επιφάνειας και το εμβαδόν του εκάστοτε τύπου Φ/B πλαισίου. Ως είσοδος λαμβάνεται επίσης το ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα σε Watt. Το φορτίο διακρίνεται στις εξής κατηγορίες: το σταθερό φορτίο, δηλαδή η ώρα έναρξης της κάθε συσκευής είναι προκαθορισμένη, και το χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο, για το οποίο δίδεται η νωρίτερη και η τελευταία δυνατή ώρα έναρξης της κάθε συσκευής.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της αυτής της διπλωματικής εργασίας προσομοιώνει τη λειτουργία των τριών προαναφερθέντων κατηγοριών Φ/B συστημάτων και υπολογίζει το συνολικό κόστος του Φ/B συστήματος. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος προσομοίωσης ενσωματώνεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO). Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βρει το βέλτιστο πλήθος Φ/B πλαισίων για κάθε επιφάνεια, τη βέλτιστη γωνία κλίσης για τα Φ/B πλαίσια της οροφής, το βέλτιστο πλήθος μπαταριών και τη βέλτιστη ώρα έναρξης κάθε χρονοπρογραμματιζόμενης συσκευής για την εύρεση του οικονομικότερου συνδυασμού για όποια από τις περιπτώσεις Φ/B συστήματος είναι επιθυμητό από τον σχεδιαστή.

3.2 Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα αρχικά στάδια του αλγορίθμου προσομοίωσης και για τις τρεις περιπτώσεις Φ/Β συστημάτων, on-grid με μπαταρίες, on-grid χωρίς μπαταρίες και off-grid, είναι κοινά. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης ξεκινά λαμβάνοντας ως είσοδο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τριών τύπων Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται, καθώς και τις γωνίες κλίσης και προσανατολισμού που τοποθετούνται. Επίσης, σαν είσοδο λαμβάνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και των υπόλοιπων συσκευών (μπαταρίες, ρυθμιστές φόρτισης, μετατροπείς DC/AC) και η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 αρχικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις προσπίπτουσες ακτινοβολίες για όλους τους συνδυασμούς κλίσης και προσανατολισμού κάθε διαθέσιμης επιφάνειας. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων βάσει της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που έχει υπολογιστεί και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Τέλος, ο αλγόριθμος αποφασίζει πιο μοντέλο προσομοίωσης θα ακολουθεί για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους της εκάστοτε εγκατάστασης.



Σχήμα 3.1 Αρχικά στάδια αλγόριθμου προσομοίωσης.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι τρεις τύποι Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία, διάφανα, κεραμίδια και συμβατικά, χωρίζονται σε πολλές συστοιχίες για να μπορούν να συμβαδίζουν με τους ρυθμιστές τάσης. Το σύνολο της παραγόμενης ισχύος από αυτές τις συστοιχίες συμβολίζεται με P_{pv} . Η ισχύς μετά το ρυθμιστή τάσης συμβολίζεται με P_{re} :

$$P_{pv} = \sum N_{fpv}^{tra} P_{pv}^{tra} + \sum N_{fpv}^{con} P_{pv}^{con} + \sum N_{fpv}^{tile} P_{pv}^{tile} \quad (3.1)$$

$$P_{re} = n_s \cdot P_{pv} \quad (3.2)$$

όπου:

n_s ο συντελεστής απόδοσης του ρυθμιστή τάσης,

P_{pv}^{tra} η παραγόμενη ισχύς από διάφανα Φ/Β,

P_{pv}^{tile} η παραγόμενη ισχύς από Φ/Β κεραμίδια,

P_{pv}^{con} η παραγόμενη ισχύς από συμβατικά Φ/Β πλαίσια,

N_{fpv}^{tra} το τελικό πλήθος διάφανων Φ/Β πλαισίων,

N_{fpv}^{con} το τελικό πλήθος συμβατικών Φ/Β πλαισίων και

N_{fpv}^{tile} το τελικό πλήθος Φ/Β πλαισίων τύπου κεραμιδιού.

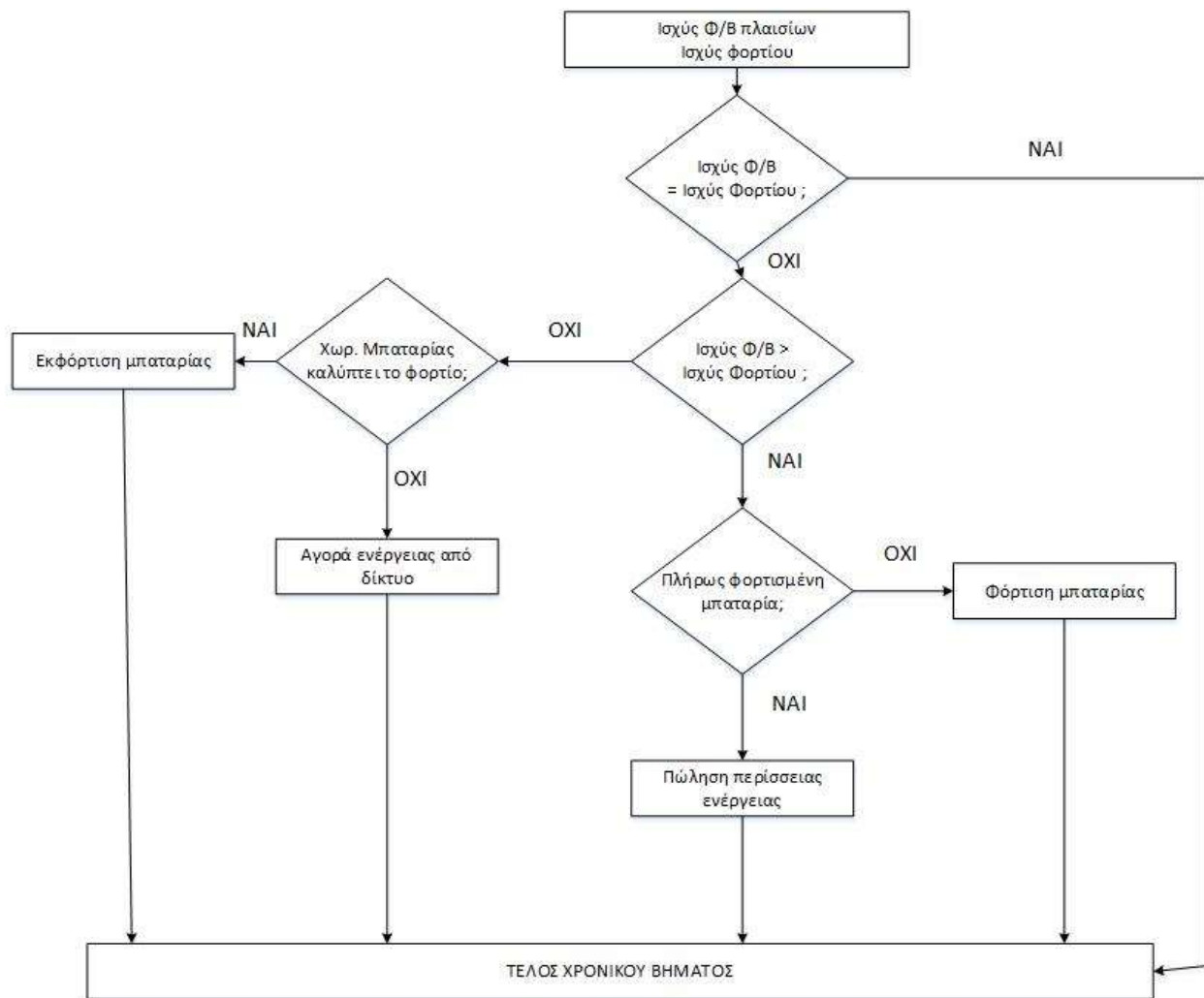
Με P_L συμβολίζουμε την ισχύ εισόδου του inverter. Για το P_L ισχύει ότι:

$$P_L = \frac{P_{load}}{n_i} \quad (3.3)$$

όπου P_{load} η κατανάλωση του φορτίου και n_i ο βαθμός απόδοσης του inverter.

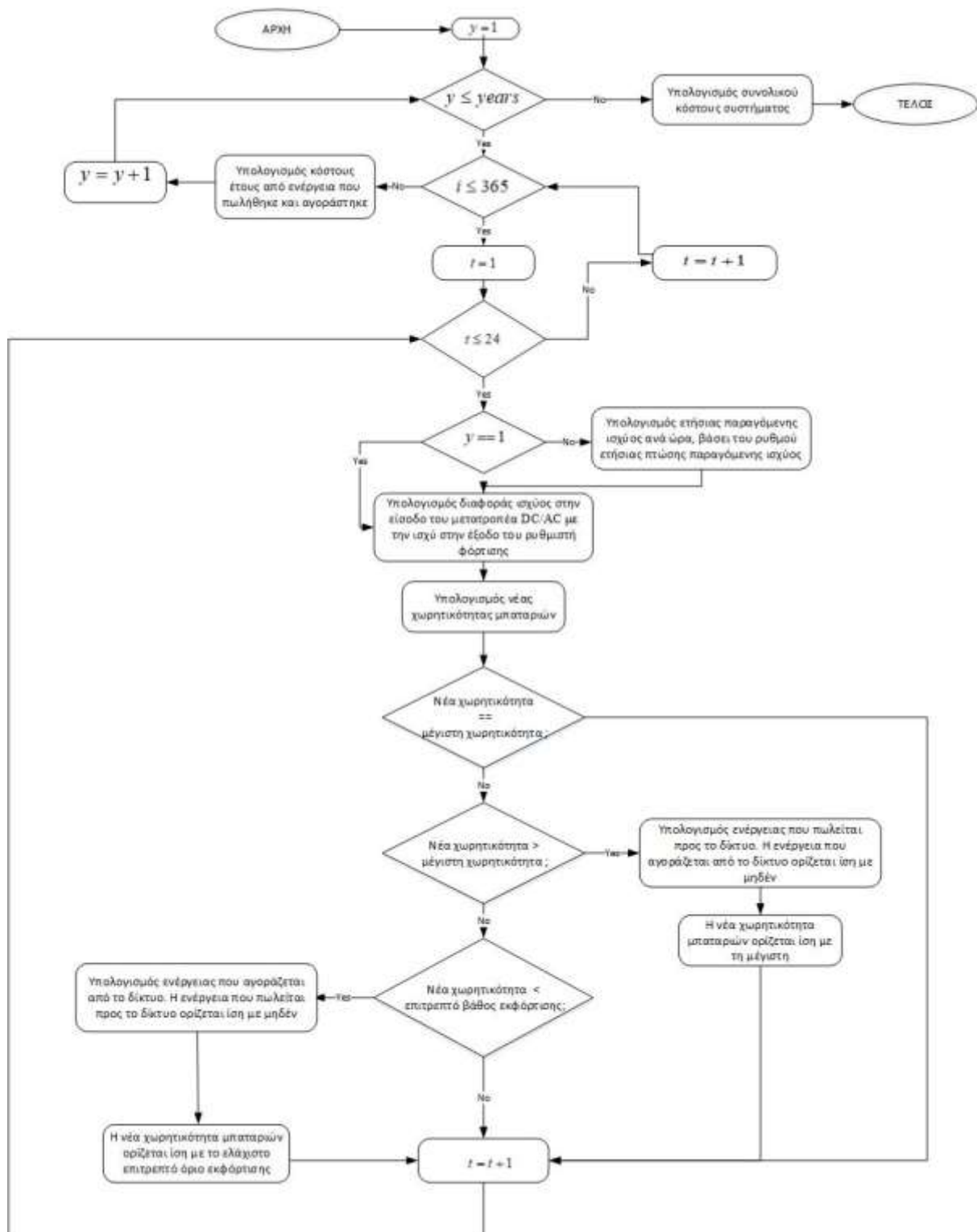
3.2.1 Σύστημα διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο με μπαταρίες

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης του διασυνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστήματος με μπαταρίες προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος όσο αφορά την ισχύ που παράγεται, αποθηκεύεται, καταναλώνεται, πωλείται προς το δίκτυο και αγοράζεται από το δίκτυο ανά ώρα. Αν κάποια ώρα της ημέρας υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας η οποία δεν μπορεί να αποθηκευτεί στις μπαταρίες τότε αυτή πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν όμως κάποια ώρα της ημέρας δεν αρκεί η παραγόμενη ενέργεια και οι μπαταρίες δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο της συγκεκριμένης ώρας τότε αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο ενέργεια για να μπορέσουν να καλυφθούν οι ανάγκες της εκάστοτε εγκατάστασης. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η διάταξη του διασυνδεδεμένου με το δίκτυο Φ/Β συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ισχύος. Στο Σχήμα 3.2, παρουσιάζεται η βασική ιδέα του αλγόριθμου προσομοίωσης σε ένα βήμα του. Το βήμα του αλγόριθμου είναι μια ώρα. Το ίδιο βήμα εκτελείται για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης (y έτη). Η διάρκεια προσομοίωσης λαμβάνεται ως δεδομένο εισόδου. Αν για παράδειγμα η διάρκεια προσομοίωσης είναι ένα έτος τότε το βήμα θα εκτελεστεί 8760 φορές, όσες δηλαδή είναι οι ώρες ενός έτους.



Σχήμα 3.2 Βασική ιδέα αλγορίθμου προσομοίωσης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες και διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Αν $P_{re} = P_L$ τότε η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μένει αναλλοίωτη και η χωρητικότητα της δε μεταβάλλεται. Αν $P_{re} > P_L$ τότε μια ποσότητα ισχύος με τιμή P_L τροφοδοτείται για κατανάλωση στο φορτίο. Το περίσσευμα ισχύος $P_{re} - P_L$ χρησιμοποιείται για την φόρτιση της μπαταρίας. Αν η μπαταρία προλάβει να φορτιστεί όση ώρα είναι διαθέσιμο αυτό το περίσσευμα, η υπόλοιπη ισχύς πωλείται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν $P_{re} < P_L$ τότε η ισχύς μετά τους ρυθμιστές φόρτισης, P_{re} , δεν επαρκεί για να καλύψει ολόκληρη τη ζήτηση του φορτίου και τροφοδοτείται για κατανάλωση. Η έλλειψη ισχύος που προκύπτει, $P_L - P_{re}$, καλύπτεται από την μπαταρία. Αν η μπαταρία φτάσει στο όριο εκφόρτισης της τότε η υπολειπόμενη ισχύς αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 3.3 Αναλυτικό διάγραμμα αλγορίθμου προσομοίωσης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες και διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος προσομοίωσης Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο και με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για y έτη λειτουργίας με χρονικό βήμα μια ώρα. Προτού ξεκινήσει ο αλγόριθμος προσομοίωσης για οποιαδήποτε από τις τρεις περιπτώσεις έχει ήδη υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς για το πρώτο έτος λειτουργίας από τα Φ/Β πλαίσια ανά ώρα $P_{pv}^i(t)$ όπου i ημέρα του έτους και t ώρα ημέρας. Οι τιμές $P_{pv}^i(t)$ ισχύουν για το πρώτο έτος λειτουργίας του συστήματος. Τα Φ/Β πλαίσια χάνουν από την απόδοση τους κάθε χρόνο κατά κάποιο ποσοστό το οποίο δίνεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Σύμφωνα με αυτό το ποσοστό, κάθε χρόνο υπολογίζεται η νέα συνολική παραγόμενη ισχύς βάσει της συνολικής παραγόμενης ισχύος κάθε τύπου Φ/Β πλαισίων, του προηγούμενου έτους, όπως φαίνεται στις πιο κάτω σχέσεις.

$$P_{pv}^{tra,i}(t) = P_{pv}^{tra,i}(t) - P_{pv}^{tra,i}(t) \cdot r_{disc}^{tra} \quad (3.4)$$

$$P_{pv}^{con,i}(t) = P_{pv}^{con,i}(t) - P_{pv}^{con,i}(t) \cdot r_{disc}^{con} \quad (3.5)$$

$$P_{pv}^{tile,i}(t) = P_{pv}^{tile,i}(t) - P_{pv}^{tile,i}(t) \cdot r_{disc}^{tile} \quad (3.6)$$

όπου:

r_{disc}^{tile} η ποσοστιαία ετήσια πτώση παραγόμενης ισχύος διάφανων Φ/Β πλαισίων,

r_{disc}^{con} η ποσοστιαία ετήσια πτώση παραγόμενης ισχύς συμβατικών Φ/Β πλαισίων και

r_{disc}^{tile} η ποσοστιαία ετήσια πτώση παραγόμενης ισχύος Φ/Β κεραμιδιών.

Στη συνέχεια από τη σχέση (3.1) υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ισχύς του Φ/Β συστήματος για το συγκεκριμένο έτος.

Η διαφορά της ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα DC/AC, $P_L = \frac{P_{load}}{n_i}$, με την ισχύ στην έξοδο

του ρυθμιστή φόρτισης, $P_{re} = n_s \cdot P_{pv}$, συμβολίζεται με P_b :

$$P_b^i(t) = \frac{P_{load}^i(t)}{n_i} - P_{re}^i(t) \quad (3.7)$$

Αν υπολογιστεί τιμή $P_b^i(t)$ μικρότερη του μηδενός, αυτό σημαίνει ότι η ισχύς μετά τους ρυθμιστές φόρτισης μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου και υπάρχει περίσσειμα

ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσης φόρτισης, n_c , είναι ίσος με 0.9. Διαφορετικά, αν η τιμή του $P_b^i(t)$ υπολογιστεί μεγαλύτερη του μηδενός, τότε αυτό σημαίνει ότι η ισχύς μετά τους ρυθμιστές φόρτισης είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται από το φορτίο και η ισχύς που υπολείπεται θα αντληθεί από τις μπαταρίες. Ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης είναι ίσος με 0.9. Η αρχική κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών λαμβάνεται ίση με το 50% της ονομαστικής της χωρητικότητας.

Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών υπολογίζεται από τη σχέση (3.8) για φόρτιση και (3.9) για εκφόρτιση:

$$C^i(t) = C^i(t-1) - \frac{n_c \cdot P_b^i(t)}{V_{bn} \cdot n_{bs}} \cdot \Delta t \quad (3.8)$$

$$C^i(t) = C^i(t-1) - \frac{P_b^i(t)}{V_{bn} \cdot n_{bs} \cdot n_d} \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

όπου:

n_d ο βαθμός απόδοσης κατά την εκφόρτιση των μπαταριών,

n_c ο βαθμός απόδοσης κατά τη φόρτιση των μπαταριών,

V_{bn} η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας,

n_{bs} το πλήθος μπαταριών που συνδέονται σε σειρά στη συστοιχία μπαταριών και

Δt το χρονικό βήμα προσομοίωσης, ίσο με 1h.

Αν η νέα κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών, $C^i(t)$, ισούται με τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, C_{tot} , τότε σημαίνει ότι οι μπαταρίες έχουν φτάσει σε πλήρη φόρτιση χωρίς να υπάρχει κάποιο περίσσειμα ή έλλειμμα ενέργειας και ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα.

Αν όμως η νέα κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών υπολογιστεί μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, $C^i(t) > C_{tot}$, τότε σημαίνει ότι οι μπαταρίες έχουν φτάσει σε πλήρη φόρτιση και υπάρχει περίσσειμα ενέργειας το οποίο θα πωληθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αφού υπολογιστεί η ισχύς που διατίθεται προς πώληση τη συγκεκριμένη ώρα, $P_{ex}^i(t)$, η νέα

κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών ορίζεται ίση με την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών, $C^i(t) = C_{tot}$, και η ισχύς που αγοράζεται τη συγκεκριμένη ώρα, $P_{buy}^i(t)$, τίθεται ίση με μηδέν. Όταν υπολογιστούν οι πιο πάνω τιμές, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα. Στη σχέση (3.10) φαίνεται ο υπολογισμός της ισχύος που διατίθεται στο ηλεκτρικό δίκτυο προς πώληση:

$$P_{ex}^i(t) = \frac{(C^i(t) - C_{tot}) \cdot V_{bn} \cdot n_{bs} \cdot n_i}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Διαφορετικά, αν η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών υπολογιστεί μικρότερη από το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης της, τότε αυτό σημαίνει ότι ούτε η παραγόμενη ισχύς ούτε η χωρητικότητα των μπαταριών δεν επαρκούσαν για την κάλυψη του φορτίου τη συγκεκριμένη ώρα οπότε είναι αναγκαίο να αγοραστεί ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ισχύς η οποία χρειάζεται να αγοραστεί από το δίκτυο υπολογίζεται από τη σχέση (3.11). Όταν υπολογιστεί η ισχύς που αγοράζεται, τότε η νέα κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών ορίζεται στο ελάχιστο βάθος εκφόρτισης της, όπως φαίνεται στη σχέση (3.12), και η ισχύς που πωλείται προς το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ίση με μηδέν τη συγκεκριμένη ώρα. Όταν υπολογιστούν οι πιο πάνω τιμές ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο χρονικό βήμα.

$$P_{buy}^i(t) = \frac{(C_{tot} \cdot SOC_{min} - C^i(t)) \cdot V_{bn} \cdot n_{bs} \cdot n_i}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$$C^i(h) = C_{tot} \cdot SOC_{min} \quad (3.12)$$

Στο τέλος προσομοίωσης κάθε έτους συνοψίζεται η ενέργεια που αγοράστηκε και πωλήθηκε από και προς το δίκτυο. Στη σχέσεις (3.13) και (3.14) φαίνεται ο υπολογισμός κόστους ενέργειας που πωλήθηκε προς το δίκτυο και αγοράστηκε από το δίκτυο, αντίστοιχα, σε Ευρώ:

$$CP_{buy}^{tot} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} P_{buy}^i(t)}{1000} \right) \cdot C_{buy}(y) \quad (3.13)$$

$$CP_{sell}^{tot} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} P_{sell}^i(t)}{1000} \right) \cdot C_{sell}(y) \quad (3.14)$$

όπου $C_{buy}(y)$ και $C_{sell}(y)$ οι τιμές αγοράς και πώλησης μιας κιλοβατώρας αντίστοιχα. Κάθε χρόνο οι τιμές αυτές αλλάζουν βάσει του πληθωρισμού (inflation rate) και του επιτοκίου (interest rate) όπως φαίνεται στις σχέσεις (3.15) και (3.16):

$$C_{buy}(y) = C_{buy}(1) \cdot \frac{(1+g)^y}{(1+i)^y} \quad (3.15)$$

$$C_{sell}(y) = C_{sell}(1) \cdot \frac{(1+g)^y}{(1+i)^y} \quad (3.16)$$

όπου g ο πληθωρισμός και i το επιτόκιο.

Η τιμή πώλησης και αγοράς για το πρώτο έτος λειτουργίας λαμβάνονται ως είσοδοι του αλγορίθμου που καθορίζονται από τον σχεδιαστή.

Επομένως το συνολικό καθαρό κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε και πωλήθηκε κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι:

$$C_{year}(y) = CP_{buy}^{tot} - CP_{sell}^{tot} \quad (3.17)$$

Τέλος, η παρούσα αξία του συνολικού κόστους της Φ/Β εγκατάστασης καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της (y έτη) προκύπτει ως εξής:

$$C_{tot} = C_{equip} + \sum_{y=1}^y C_{year}(y) + \sum_{y=1}^y C_{maint}(y) \quad (3.18)$$

όπου C_{equip} το συνολικό κόστος εξοπλισμού και C_{maint} το κόστος συντήρησης. Το κόστος συντήρησης για το πρώτο έτος λαμβάνεται ίσο με το 5% του συνολικού εξοπλισμού. Για τα επόμενα έτη το κόστος συντήρησης αλλάζει βάσει του πληθωρισμού και του επιτοκίου όπως υπολογίζεται για τις τιμές πώλησης και αγοράς κιλοβατώρας από τις σχέσεις (3.14) και (3.15). Με τις σχέσεις (3.19) και (3.20) υπολογίζεται το κόστος εξοπλισμού:

$$C_{equip} = C_{pv}^{tot} + N_{fb} \cdot C_b + N_{ch} \cdot C_{ch} + N_{inv} \cdot C_{inv} \quad (3.19)$$

$$C_{pv}^{tot} = N_{fpv}^{tra} \cdot C_{pv}^{tra} + N_{fpv}^{con} \cdot C_{pv}^{con} + N_{fpv}^{tile} \cdot C_{pv}^{tile} \quad (3.20)$$

όπου:

C_{pv}^{tra} το κόστος διάφανου Φ/Β πλαισίου,

C_{pv}^{con} το κόστος συμβατικού Φ/Β πλαισίου,

C_{pv}^{tile} το κόστος Φ/Β πλαισίου τύπου κεραμιδιού,

C_b το κόστος μιας μπαταρίας,

C_{ch} το κόστος φορτιστή,

C_{inv} το κόστος μετατροπέα DC/AC,

C_{pv}^{tot} το συνολικό κόστος Φ/Β πλαισίων,

N_{fb} το πλήθος μπαταριών,

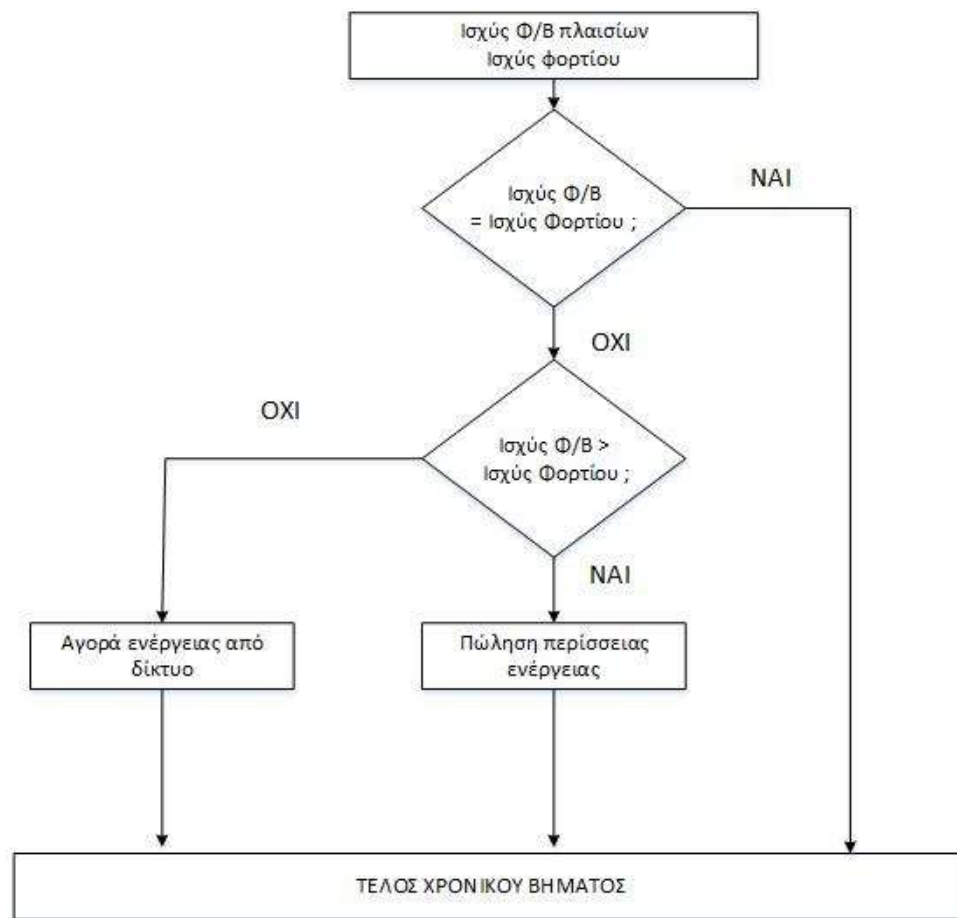
N_{ch} το πλήθος φορτιστών (ρυθμιστών τάσης) και

N_{inv} το πλήθος μετατροπέων DC/AC.

Στο τέλος της προσομοίωσης για y έτη λειτουργίας ελέγχεται η χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών την τελευταία ώρα. Αν η χωρητικότητα των μπαταριών την τελευταία ώρα είναι μικρότερη από τη χωρητικότητα τους την πρώτη ώρα προσομοίωσης, τότε αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν είναι βιώσιμο και η συγκεκριμένη λύση απορρίπτεται.

3.2.2 Σύστημα διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μπαταρίες

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστήματος προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος όσο αφορά την ισχύ που παράγεται, καταναλώνεται, πωλείται στο δίκτυο και αγοράζεται από το δίκτυο ανά ώρα. Αν κάποια ώρα της ημέρας υπάρχει περίσσεια ενέργειας τότε αυτή πωλείται κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν όμως κάποια ώρα της ημέρας η παραγόμενη ισχύς δεν αρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου τότε το έλλειμμα αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η διάταξη του διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες.



Σχήμα 3.4 Η βασική ιδέα του αλγορίθμου προσομοίωσης Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο και χωρίς μπαταρίες.

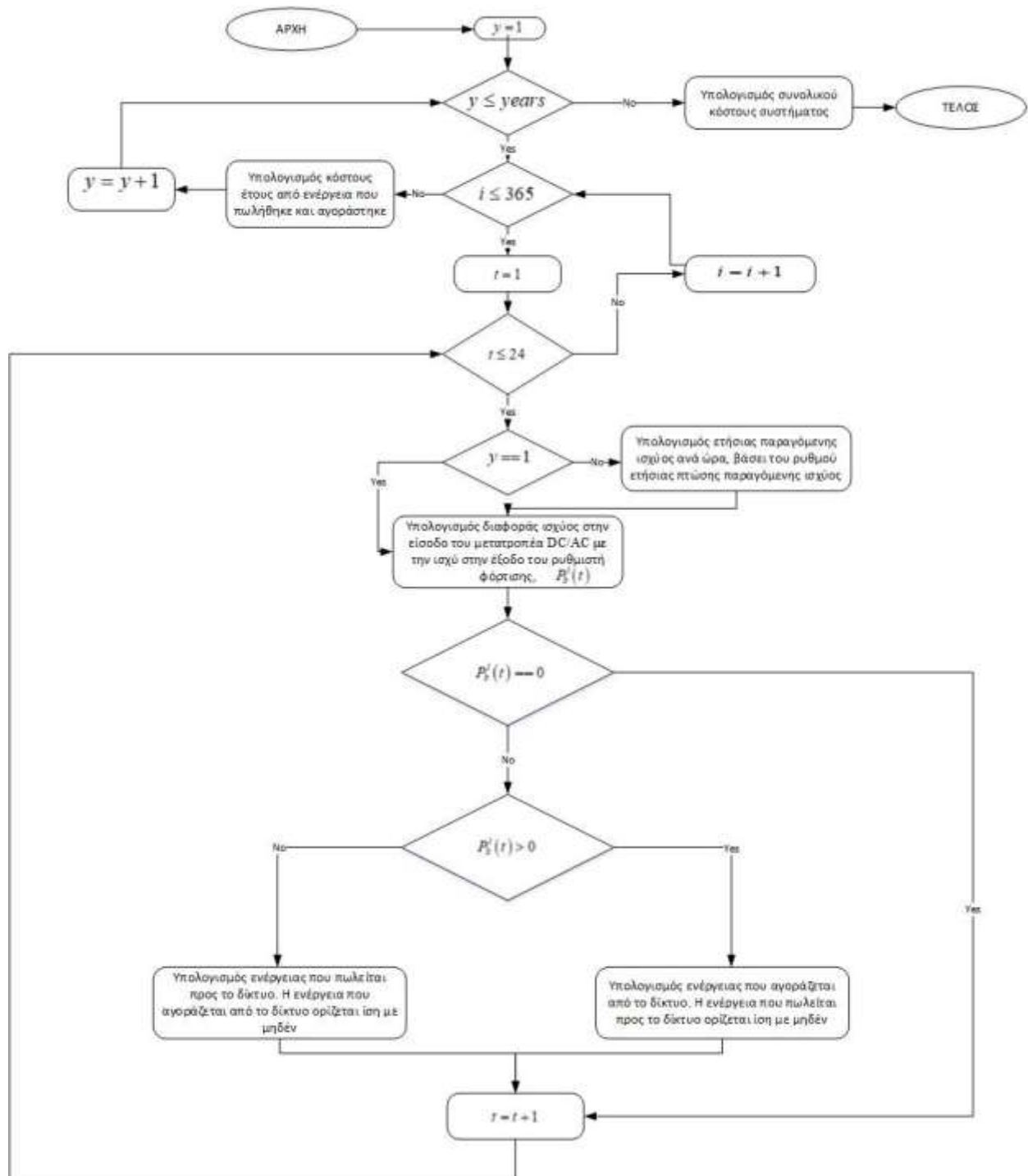
Στο Σχήμα 3.4 ο αλγόριθμος παρουσιάζεται σε ένα βήμα του. Το βήμα του αλγόριθμου είναι μια ώρα. Το ίδιο βήμα εκτελείται για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης, η οποία λαμβάνεται ως δεδομένο εισόδου. Αν για παράδειγμα η διάρκεια προσομοίωσης είναι ένα έτος τότε το βήμα θα εκτελεστεί 8760 φορές όσες δηλαδή είναι οι ώρες ενός έτους.

Αν $P_{re} = P_L$ (από σχέσεις 3.1 και 3.2) τότε δεν υπάρχει ούτε περίσσειμα, ούτε έλλειμμα ενέργειας και η παραγόμενη ισχύς μπορεί να καλύψει ακριβώς τις απαιτήσεις του φορτίου και ο αλγόριθμος προχωρεί στο επόμενο βήμα.

Αν $P_{re} > P_L$ τότε μια ποσότητα ισχύος με τιμή P_L τροφοδοτείται για κατανάλωση στο φορτίο. Σε αυτή τη περίπτωση, όλο το περίσσευμα ισχύος $P_{re} - P_L$ τροφοδοτείται προς το δίκτυο για τη πώληση του.

Αν $P_{re} < P_L$ τότε η ισχύς μετά τους ρυθμιστές φόρτισης, P_{re} , δεν επαρκεί για να καλύψει ολόκληρη τη ζήτηση του φορτίου και τροφοδοτείται για κατανάλωση από το φορτίο. Το έλλειμμα ισχύος $P_L - P_{re}$ που απαιτείται για να καλυφθούν οι ανάγκες του φορτίου αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο αναλυτικός αλγόριθμος προσομοίωσης διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες για όλα τα έτη λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5. Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο προσομοίωσης, προτού ξεκινήσει ο αλγόριθμος έχει ήδη υπολογιστεί η συνολική παραγόμενη ισχύς για το πρώτο έτος λειτουργίας από τα Φ/Β πλαίσια ανά ώρα $P_{pv}^i(t)$ όπου i ο αριθμός ημέρας του έτους και t ο αριθμός ώρας της ημέρας. Για τα επόμενα έτη λειτουργίας η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται, όπως και στο προηγούμενο μοντέλο προσομοίωσης, βάσει της ετήσιας ποσοστιαίας πτώσης παραγόμενης ισχύος των Φ/Β συστοιχιών. Ο υπολογισμός παραγόμενης ισχύος για το επόμενο έτος γίνεται από τις σχέσεις (3.1) και (3.4)-(3.6). Η διαφορά μεταξύ της ισχύς μετά τους ρυθμιστές τάσης, $P_{re}^i(t)$ και της ισχύος πριν το μετατροπέα DC/AC, $P_L^i(t)$, συμβολίζεται όπως και στο προηγούμενο μοντέλο με $P_b^i(t)$ και υπολογίζεται από τη σχέση (3.7).



Σχήμα 3.5 Αναλυτικό διάγραμμα αλγορίθμου προσομοίωσης Φ/B συστήματος διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο και χωρίς μπαταρίες.

Αν $P_b^i(t) = 0$ δεν υπάρχει περίσσειμα ισχύος για να πωληθεί στο δίκτυο ούτε απαιτείται να αγοραστεί από το δίκτυο. Οι τιμές $P_{buy}^i(t)$ και $P_{ex}^i(t)$ ορίζονται ίσες με μηδέν και ο αλγόριθμος προχωρεί στην προσομοίωση της επόμενης ώρας.

Αν $P_b^i(t) > 0$ υπάρχει έλλειμμα ισχύος και απαιτείται να αγοραστεί ορισμένη ισχύς από το δίκτυο. Υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται να αγοραστεί όπως φαίνεται στη σχέση (3.21), η ισχύς που πωλείται τη συγκεκριμένη ώρα $P_{ex}^i(t)$ ορίζεται ίση με μηδέν και ο αλγόριθμος προχωρά στην επόμενη ώρα.

$$P_{buy}^i(t) = P_b^i(t) \cdot n_i \quad (3.21)$$

Αν όμως $P_b^i(t) < 0$ η κατανάλωση του φορτίου μπορεί να καλυφθεί από τη παραγόμενη ισχύ και υπάρχει πλεόνασμα ισχύος. Αυτό το πλεόνασμα υπολογίζεται από τη σχέση (3.22) και πωλείται προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Η ισχύς που αγοράζεται τη συγκεκριμένη ώρα, $P_{buy}^i(t)$, ορίζεται ίση με μηδέν και ο αλγόριθμος προχωρά στην επόμενη ώρα.

$$P_{ex}^i(t) = -P_b^i(t) \cdot n_i \quad (3.22)$$

Στο τέλος κάθε έτους λειτουργίας του συστήματος υπολογίζεται το συνολικό κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε και πωλήθηκε από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο υπολογισμός αυτός είναι ο ίδιος όπως στο μοντέλο του on-grid συστήματος με μπαταρίες και φαίνεται από τις σχέσεις (3.11) μέχρι και (3.17).

Τέλος, η παρούσα αξία του συνολικού κόστους του Φ/Β συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{tot} = C_{equip} + \sum_{y=1}^y C_{year}(y) + \sum_{y=1}^y C_{maint}(y) \quad (3.23)$$

όπου το κόστος των συσκευών υπολογίζεται ως εξής:

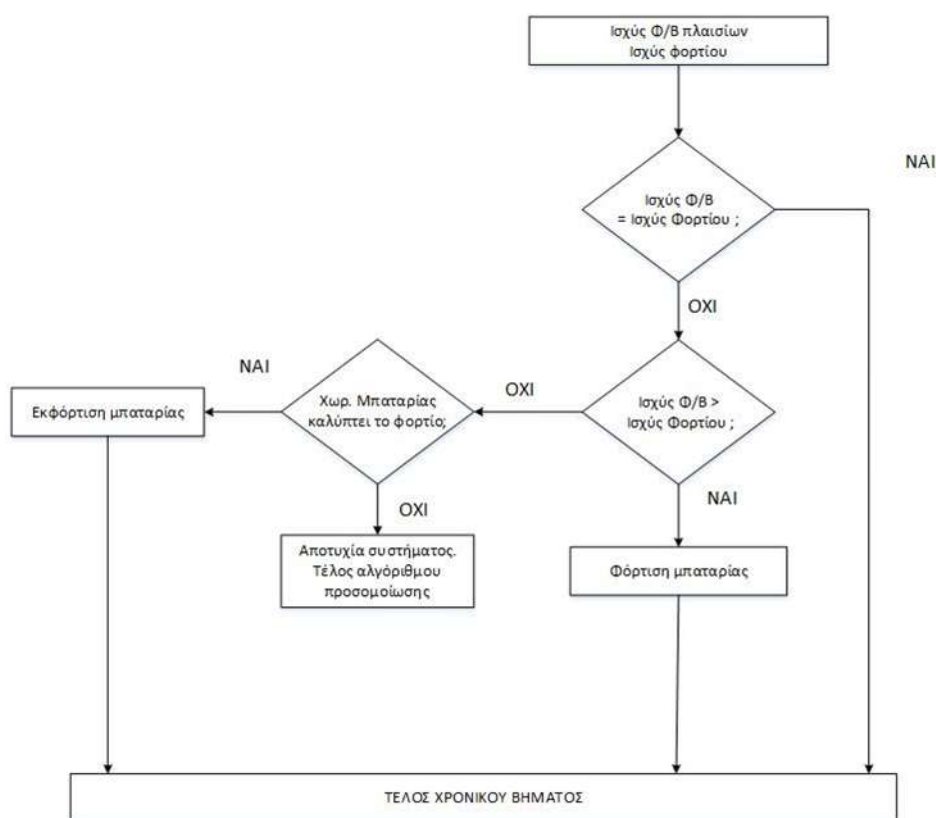
$$C_{equip} = C_{pv}^{tot} + N_{ch} \cdot C_{ch} + N_{inv} \cdot C_{inv} \quad (3.24)$$

όπου C_{pv}^{tot} είναι το συνολικό κόστος των Φ/Β πλαισίων και υπολογίζεται από τη σχέση (3.20) ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και στο μοντέλο διασυνδεδεμένου συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ισχύος.

Στη περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μπαταρίες δεν υπάρχει κανένας περιορισμός και απόρριψη λύσης.

3.2.3 Αυτόνομο Σύστημα

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομου συστήματος προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος, καθώς και την ισχύ που παράγεται, καταναλώνεται και αποθηκεύεται, ανά ώρα. Σε αυτή τη περίπτωση το Φ/Β σύστημα δεν είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επομένως, δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς ή πώλησης ισχύος από ή προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Αν κάποια ώρα της ημέρας η παραγόμενη ισχύς δεν είναι αρκετή για να καλυφθούν οι ανάγκες του φορτίου τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται και θεωρείται ότι σύστημα αποτυγχάνει. Αντιθέτως, αν κάποια ώρα της ημέρας υπάρχει περίσσειμα ισχύος τότε αυτό αποθηκεύεται στις μπαταρίες. Στη περίπτωση όμως που οι μπαταρίες έχουν ήδη φτάσει σε πλήρη φόρτιση το περίσσειμα ισχύος χάνεται. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η διάταξη του πλήρως αυτόνομου Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 3.6 Βασική ιδέα αλγορίθμου προσομοίωσης αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

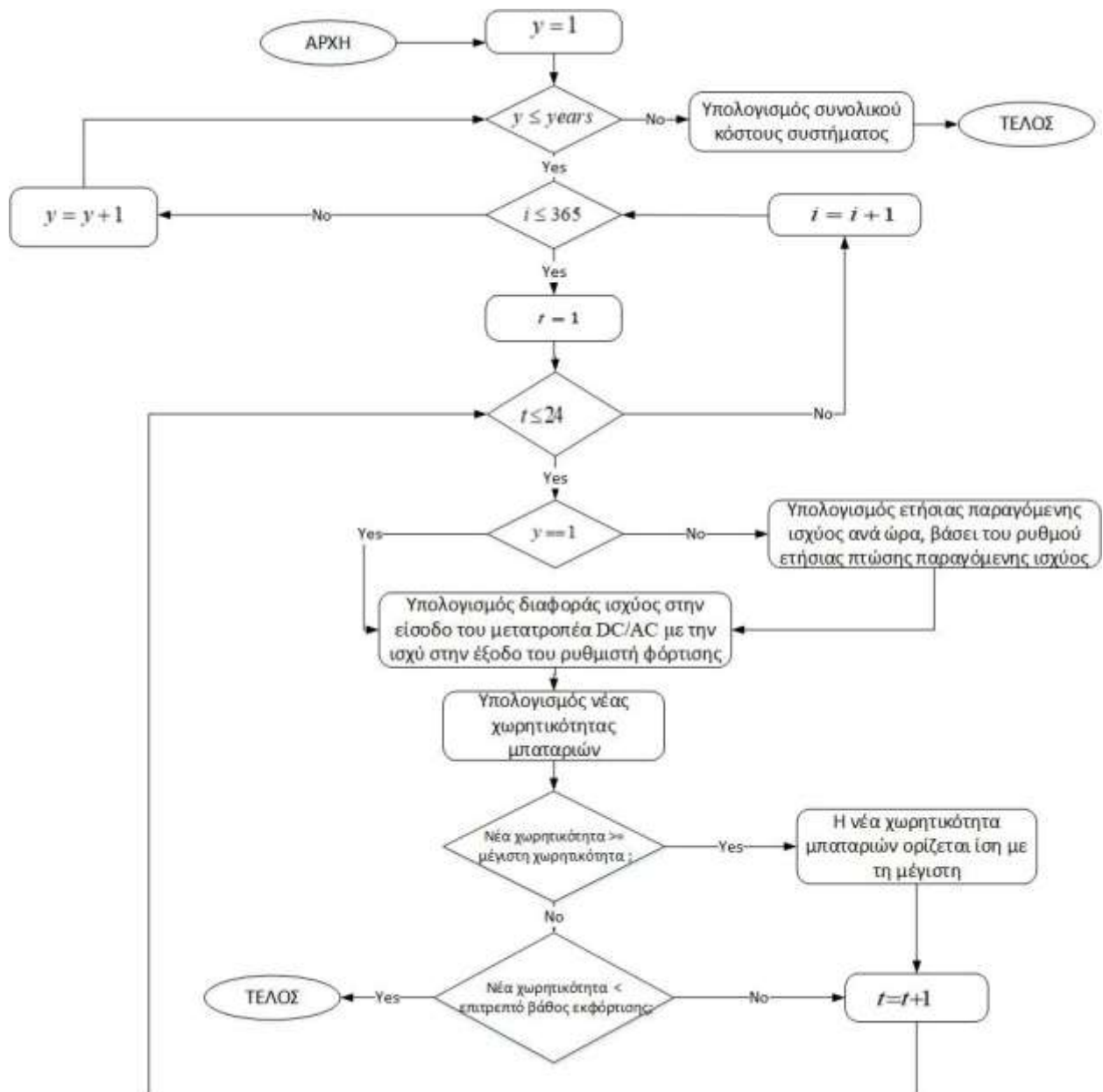
Όπως έχει προαναφερθεί και όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 προτού ο αλγόριθμος προσομοίωσης, οποιασδήποτε περίπτωσης, ξεκινήσει να υπολογίζει την κατάσταση της συστοιχίας μπαταριών ανά ώρα, υπολογίζει τη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια για το πρώτο έτος λειτουργίας ανά ώρα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ισχύς, P_{pv} , από τη σχέση (3.1) και η συνολική ισχύς μετά το ρυθμιστή τάσης, P_{re} , από τη σχέση (3.2). Από τη σχέση (3.3) υπολογίζεται η ισχύς στην είσοδο του μετατροπέα, P_L .

Η βασική ιδέα της προσομοίωσης αυτόνομου συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, βασίζεται στη σύγκριση της ισχύος μετά το ρυθμιστή τάσης (ισχύς προς κατανάλωση) και της ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα DC/AC (ισχύς που απαιτείται από το φορτίο).

Αν $P_{re} = P_L$ τότε η κατάσταση των μπαταριών μένει αναλλοίωτη και η κατάσταση φόρτισης της δε μεταβάλλεται.

Αν $P_{re} > P_L$ τότε μια ποσότητα ισχύος με τιμή P_L τροφοδοτείται προς κατανάλωση στο φορτίο. Το περίσσευμα ισχύος $P_{re} - P_L$ χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας. Αν η συστοιχία μπαταριών προλάβει να φορτιστεί όση ώρα είναι διαθέσιμο αυτό το περίσσευμα θεωρείται ότι η υπόλοιπη ισχύς χάνεται. Διαφορετικά υπολογίζεται η νέα χωρητικότητα των μπαταριών.

Αν $P_{re} < P_L$ τότε ολόκληρη η ισχύς P_{re} τροφοδοτείται για κατανάλωση από το φορτίο. Η έλλειψη ισχύος $P_L - P_{re}$ καλύπτεται από τις μπαταρίες. Αν η συστοιχία μπαταριών εκφορτιστεί (φτάσει δηλαδή το μέγιστο επιτρεπτό όριο εκφόρτισης της) όση ώρα υπάρχει έλλειψη ισχύος τότε θεωρείται ότι το σύστημα αποτυγχάνει να λειτουργήσει. Διαφορετικά υπολογίζεται η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται αναλυτικά ολόκληρος ο αλγόριθμος προσομοίωσης αυτόνομου συστήματος για y έτη λειτουργίας με χρονικό βήμα μιας ώρας. Αν ο αλγόριθμος βρίσκεται στο πρώτο έτος λειτουργίας η συνολική παραγόμενη ισχύς, $P_{pv}^i(t)$, υπολογίζεται από τη σχέση (3.1). Διαφορετικά αν $y > 1$ η συνολική παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται ξανά για ολόκληρο το έτος βάσει της ετήσιας ποσοστιαίας πτώσης παραγόμενης ισχύος που δίνεται από τον κατασκευαστή του Φ/Β πλαισίου. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε τύπου Φ/Β πλαισίου, για $y > 1$ φαίνεται από τις σχέσεις (3.4)-(3.6) και η συνολική παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση (3.1). Όταν υπολογιστεί η συνολική παραγόμενη ισχύς, υπολογίζεται η ισχύς μετά το ρυθμιστή φόρτισης $P_{re}^i(t)$, για τη συγκεκριμένη ώρα, t , και ημέρα, i . Ακολούθως υπολογίζεται η ισχύς $P_b^i(t)$ από τη σχέση (3.7).



Σχήμα 3.7 Αναλυτικό διάγραμμα αλγορίθμου προσομοίωσης λειτουργίας αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

Αν η $P_b^i(t)$ υπολογιστεί μικρότερη του μηδενός, τότε η ισχύς μετά το ρυθμιστή φόρτισης μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου και υπάρχει περίσσειμα ενέργειας με το οποίο φορτίζονται οι μπαταρίες. Στην περίπτωση αυτή ο βαθμός απόδοσης φόρτισης, n_c , είναι ίσος με 0.9. Διαφορετικά, αν το $P_b^i(t)$ υπολογιστεί μεγαλύτερο του μηδενός τότε η ισχύς μετά το ρυθμιστή φόρτισης είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται από το φορτίο και η ισχύς που

υπολείπεται θα αντληθεί από τις μπαταρίες. Στην περίπτωση αυτή, ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης, n_d , είναι ίσος με 0.9 Η αρχική χωρητικότητα της μπαταρίας λαμβάνεται ίση με το 50% της συνολικής της χωρητικότητας.

Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, η νέα κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται από τη σχέση (3.21) για φόρτιση και (3.22) για εκφόρτιση:

$$C^i(t) = C^i(t-1) - \frac{n_c \cdot P_b^i(t)}{V_{bn} \cdot n_{bs}} \cdot \Delta_t \quad (3.21)$$

$$C^i(t) = C^i(t-1) - \frac{P_b^i(t)}{V_{bn} \cdot n_{bs} \cdot n_d} \cdot \Delta_t \quad (3.22)$$

Αν η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, $C^i(t)$, υπολογιστεί μεγαλύτερη ή ίση με την ονομαστική χωρητικότητα της, τότε η νέα χωρητικότητα γίνεται ίση με την ονομαστική χωρητικότητα της συστοιχίας μπαταριών και ο αλγόριθμος προχωρεί στο επόμενο χρονικό βήμα, δηλαδή στην επόμενη ώρα.

Διαφορετικά, αν η νέα κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών υπολογίστηκε μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης της τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται ανεπιτυχώς.

Στη περίπτωση του αυτόνομου Φ/Β συστήματος, επειδή δεν πωλείται ή αγοράζεται ισχύς προς ή από το ηλεκτρικό δίκτυο το συνολικό κόστος επηρεάζεται μόνο από το κόστος εξοπλισμού και το κόστος συντήρησης ανά έτος. Επομένως, η παρούσα αξία του συνολικού κόστους υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{tot} = C_{equip} + \sum_{y=1}^y C_{maint}(y) \quad (3.23)$$

όπου C_{equip} το συνολικό κόστος εξοπλισμού, το οποίο υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.19) και (3.20) και C_{maint} κόστος συντήρησης. Το κόστος συντήρησης για το πρώτο έτος λαμβάνεται ίσο με το 5% του συνολικού εξοπλισμού. Για τα επόμενα έτη το κόστος συντήρησης αλλάζει βάσει του πληθωρισμού και επιτοκίου όπως στις τιμές πώλησης και αγοράς κιλοβατώρας στις σχέσεις (3.15) και (3.16).

3.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης κόστους φωτοβολταϊκού συστήματος

Σε ένα κτήριο με ενσωματωμένα Φ/Β συστήματα υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διατάξεις για την τοποθέτηση Φ/Β πλαισίων και περιφερειακών ηλεκτρονικών συσκευών (ρυθμιστές φόρτισης, μετατροπείς DC/AC) των οποίων η εγκατάσταση είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ως προς το συνολικό κόστος και την παραγόμενη ισχύ του Φ/Β συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Στη παρούσα εργασία για την εύρεση της βέλτιστης λύσης/συνδυασμού χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO).

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO εισήχθη από τους James Kennedy και Russell Eberhart το 1995 ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπολογιστικής νοημοσύνης που αναπτύχθηκε ενώ παρατηρούσαν τη συμπεριφορά που παρουσίαζε ένα σμήνος πτηνών, και τελειοποιήθηκε από τους Kennedy και Eberhart το 2001 [4]-[6].

Στον αλγόριθμο PSO παρατηρείται ένα σύνολο σωματιδίων (particles) τα οποία αναζητούν τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που τους έχει δοθεί. Το κάθε ένα από αυτά τα σωματίδια αποτελεί και αυτόνομη λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης αλλά με βάσει τα ερεθίσματα που δέχεται από τα γειτονικά του σωματίδια ή ακόμα και από την ίδια του την εμπειρία επιλέγει τον τρόπο με τον οποίο θα μπορεί να κινηθεί στο χώρο. Αυτό που τον ξεχωρίζει από τους υπόλοιπους αλγόριθμους βελτιστοποίησης είναι η ικανότητα του να θυμάται και να συγκρατεί λύσεις που έχει βρει στο παρελθόν (κάθε σωματίδιο αποθηκεύει κάθε φορά τη βέλτιστη προσωπική λύση) και να τις αξιοποιεί.

Κάθε ένα από τα σωματίδια διαθέτει μια τυχαία αρχική θέση και μια τυχαία ταχύτητα. Έτσι αντίστοιχα η θέση του αυτή αποτελεί μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και έχει μια τιμή που ορίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση. Το σωματίδιο κινείται μέσα στο πολυδιάστατο χώρο που έχει οριστεί και αποθηκεύει κάθε φορά τη βέλτιστη λύση.

Η ταχύτητα που κινείται το εκάστοτε σωματίδιο στη κάθε επανάληψη είναι ένα άθροισμα τριών παραγόντων:

- της προηγούμενης του ταχύτητας,

- μιας συνιστώσας της προηγούμενης του ταχύτητας που το οδηγεί στην αναζήτηση της νέας καλύτερης τοποθεσίας που μπορεί να πετύχει σε σχέση με την προηγούμενη καλύτερη λύση που είχε πετύχει (ατομικό βέλτιστο, pbest) και
- μιας συνιστώσας της ταχύτητας για τη νέα του θέση η οποία βασίζεται στην ανατροφοδότηση που λαμβάνει από τα γειτονικά του σωματίδια και την καλύτερη λύση που είχαν βρει αυτά (καθολικό βέλτιστο, gbest).

Τα πλεονεκτήματα του αλγορίθμου PSO είναι:

- η ικανότητα του να αποθηκεύει τις καλύτερες θέσεις σωματιδίων, τόσο τα ατομικά βέλτιστα όσο και τα ολικά. Αυτό κάνει τη σύγκλιση πιο γρήγορη καθώς κατευθύνει τα σωματίδια προς τις περιοχές που είναι πιθανότερο να είναι κατάλληλες για τη βελτιστοποίηση,
- η απλότητα υλοποίησης του, καθώς χρησιμοποιεί βασικές και απλές εξισώσεις για τις παραμέτρους του,
- έχει τη δυνατότητα να συγκλίνει γρήγορα στη βέλτιστη λύση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός Φ/Β συστήματος και ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός του φορτίου με σκοπό τη πλήρη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του εκάστοτε κτηρίου με το ελάχιστο οικονομικό κόστος. Η διαστασιολόγηση αφορά το πλήθος των Φ/Β πλαισίων ανά διαθέσιμη επιφάνια και τύπο Φ/Β πλαισίου (διάφανα, κεραμίδια, συμβατικά), το πλήθος των μπαταριών, το πλήθος ρυθμιστών φόρτισης και η βέλτιστη γωνία κλίσης των Φ/Β πλαισίων της οροφής του κτηρίου. Το φορτίο του συστήματος διακρίνεται σε δύο υποκατηγορίες, το σταθερό φορτίο και το ελεγχόμενο (χρονοπρογραμματιζόμενο). Το σταθερό φορτίο δίνεται ως είσοδος στο σύστημα, σε μορφή txt αρχείου, με προκαθορισμένη κατανάλωση ισχύος σε Watt ανά ώρα για μια ημέρα (24 ώρες) όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1. Το χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο δίνεται και αυτό ως είσοδος σε μορφή txt αρχείου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, με τη διαφορά ότι υπάρχει η δυνατότητα να επιλεγεί από τον αλγόριθμο PSO πια είναι η βέλτιστη ώρα λειτουργίας για κάθε συσκευή. Για κάθε συνδυασμό διαστασιολόγησης και χρονοπρογραμματισμού προκύπτει μια λύση που αντιστοιχεί στο συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Όπως έχει προαναφερθεί το κόστος αποτελείται από δύο ή τρεις παράγοντες

ανάλογα με τον τύπο του Φ/Β συστήματος που τίθεται προς βελτιστοποίηση. Αν μελετάται η περίπτωση του αυτόνομου Φ/Β συστήματος τότε το κόστος αποτελείται από το κόστος αγοράς και το κόστος συντήρησης των στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Αν όμως μελετάται μία από τις περιπτώσεις διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο συστήματος τότε στη συνάρτηση κόστους συμπεριλαμβάνεται ακόμα μια παράμετρος πέραν από το κόστος αγοράς και συντήρησης. Η παράμετρος αυτή είναι το συνολικό κόστος της ισχύος που αγοράστηκε και πωλήθηκε από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο.

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος PSO είναι απαραίτητο να διαβαστούν όλες οι είσοδοι – παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεση του, καθώς και να γίνουν κάποιοι απαραίτητοι υπολογισμοί αρχικοποίησης τους. Αρχικά, για κάθε μεταβλητή βελτιστοποίησης ορίζεται η μέγιστη δυνατή τιμή της. Για παράδειγμα η μέγιστη τιμή πλήθους Φ/Β πλαισίων για κάθε διαθέσιμη επιφάνεια υπολογίζεται διαιρώντας το εμβαδόν της εκάστοτε επιφάνειας με το εμβαδόν του εκάστοτε Φ/Β πλαισίου που αντιστοιχεί σε αυτή. Το μέγιστο πλήθος μπαταριών έχει οριστεί ως 100 μπαταρίες και η μέγιστη γωνία κλίσης των Φ/Β πλαισίων της οροφής ορίστηκε ίση 90° . Ως μέγιστη τιμή για τις χρονοπρογραμματιζόμενες συσκευές ορίστηκε η τελευταία δυνατή ώρα έναρξης τους η οποία φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Για κάθε μεταβλητή βελτιστοποίησης αντιστοιχεί μια τιμή, η οποία παίρνει τιμές από μηδέν έως ένα, ενός διανύσματος \mathbf{X} . Ο αριθμός τιμών που περιέχει το \mathbf{X} είναι ίσος με το πλήθος των μεταβλητών βελτιστοποίησης. Το διάνυσμα αυτό παίρνει μια αρχική ποσοστιαία τιμή από τον αλγόριθμο PSO. Πολλαπλασιάζοντας την ποσοστιαία αυτή τιμή με τη μέγιστη τιμή κάθε μεταβλητής βελτιστοποίησης προκύπτουν οι πραγματικές τιμές με τις οποίες εκτελείται κάθε φορά ο αλγόριθμος προσομοίωσης επιστρέφοντας το συνολικό κόστος σε Ευρώ του συγκεκριμένου συνδυασμού. Κάθε συνδυασμός τιμών του διανύσματος \mathbf{X} είναι μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης εκτελείται με διαφορετικούς συνδυασμούς του διανύσματος \mathbf{X} κάθε φορά μέχρι να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός.

Πίνακας 3.1 Σταθερό φορτίο	
Ωρα ημέρας (h)	Κατανάλωση ισχύος (W)
1	250
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	400
8	100
9	800
10	500
11	600
12	250
13	700
14	1200
15	1200
16	1200
17	1200
18	500
19	1000
20	700
21	1000
22	800
23	500
24	250
Σύνολο ημερήσιας κατανάλωσης	13150

Πίνακας 3.2 Χρονοπρογραμματιζόμενο φορτίο			
Νωρίτερη ώρα έναρξης	Τελευταία δυνατή ώρα έναρξης	Διάρκεια (h)	Κατανάλωση (W)
12:00	20:00	1	800
12:00	20:00	1	800
12:00	20:00	0.5	1200
12:00	20:00	2	600
12:00	20:00	2	700

Στον Πίνακα 3.2 φαίνεται το διάστημα λειτουργίας και η κατανάλωση της κάθε χρονοπρογραμματιζόμενης συσκευής. Σε κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή αντιστοιχεί μια μεταβλητή βελτιστοποίησης από την οποία κρίνεται ποια είναι η βέλτιστη ώρα λειτουργίας της κάθε μιας. Η αρχικοποίηση των χρονοπρογραμματιζόμενων συσκευών από την αντικειμενική συνάρτηση φαίνεται από τη σχέση (3.24):

$$ST_i = \text{round}(X_i \cdot (LST_i - EST_i)) + EST_i \quad (3.24)$$

όπου:

ST_i η ώρα εκκίνησης συσκευής i ,

EST_i η νωρίτερη ώρα έναρξης και

LST_i η τελευταία δυνατή ώρα έναρξης.

Τύπος Φ/Β πλαisiού	P_m (W)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	V_{mp} STC (V)	I_{mp} STC (A)	Φ/Β στοιχεία σε σειρά	Φ/Β strings παράλληλα	Επιφάνεια (mm ²)	Κόστος (€)	NOCT (°C)
S79 Sol_300 tile	300	39.4	9.97	31.2	9.63	60	1	1731264	280	49
AS-6M30 transparent	275	37.8	9.2	31	8.88	6	10	1626880	160	45
LG335N1C- A5	335	41.0	10.4 9	34.1	9.83	6	10	1712976	240	45

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαisiών. Αυτά είναι η ισχύς στο MPP, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοικτοκύκλωσης, η τάση στο MPP, το ρεύμα στο MPP, ο αριθμός στοιχείων που περιλαμβάνει σε σειρά και παράλληλα, το εμβαδόν του πλαisiού, το κόστος και η θερμοκρασία NOCT.

Πίνακας 3.4 Διαθέσιμες επιφάνειες			
Εμβαδόν (mm ²)	Αζιμούθιο (°)	Τύπος Φ/Β	Γωνία κλίσης (°)
60000000	0	0	-
20000000	0	1	90
20000000	0	2	90
8000000	90	1	90
23000000	90	2	90
20000000	-90	1	90
31000000	-90	2	90

Στον Πίνακα 3.4 δίνεται ένα παράδειγμα των χαρακτηριστικών της κάθε διαθέσιμης επιφάνειας ενός κτηρίου για τοποθέτηση Φ/Β πλαisiών. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το εμβαδόν, ο προσανατολισμός και η γωνία κλίσης της κάθε επιφάνειας, καθώς και ο τύπος Φ/Β πλαisiού για τη συγκεκριμένη επιφάνεια. Με 0 συμβολίζονται τα Φ/Β κεραμίδια, με 1 τα διάφανα και με 2 τα συμβατικά Φ/Β πλαίσια. Η επιφάνεια στην οποία δεν δίνεται γωνία κλίσης θεωρείται ότι είναι η επιφάνεια της οροφής. Η βέλτιστη κλίση για την επιφάνεια της οροφής θα υπολογιστεί από τον

αλγόριθμο PSO. Οι παράμετροι διαστασιολόγησης προς βελτιστοποίηση για το παράδειγμα του Πίνακα 3.4 είναι οκτώ, μια για κάθε επιφάνεια (πλήθος Φ/Β πλαισίων που μπορεί να τοποθετηθεί σε κάθε μια από αυτές) και η γωνία κλίσης για τα Φ/Β πλαίσια της οροφής. Όπως έχει προαναφερθεί, κάθε μια από τις παραμέτρους βελτιστοποίησης αντιστοιχεί σε μια τιμή του διανύσματος \mathbf{X} .

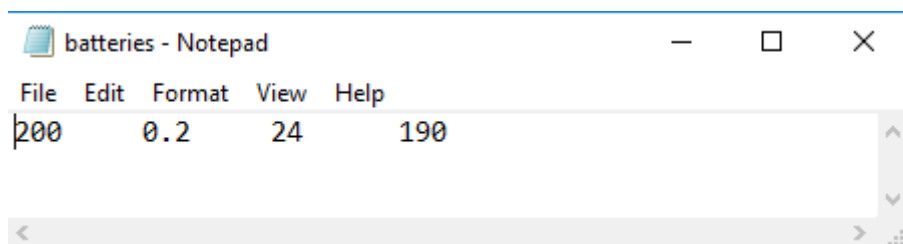
Από το εμβαδόν των Φ/Β πλαισίων και το εμβαδόν της κάθε επιφάνειας υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός Φ/Β που μπορεί να τοποθετηθεί σε καθεμία από αυτές. Βάσει του μέγιστου αριθμού Φ/Β πλαισίων που μπορεί να τοποθετηθεί στην εκάστοτε επιφάνεια και της τιμής του διανύσματος \mathbf{X} που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη επιφάνεια γίνεται η αρχικοποίηση από την αντικειμενική συνάρτηση.

Για παράδειγμα ο μέγιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων της οροφής είναι ίσος με :

$$A_{\max}^{\text{roof}} = \text{floor}\left(\frac{60000000}{1731264}\right) = 34 \quad (3.25)$$

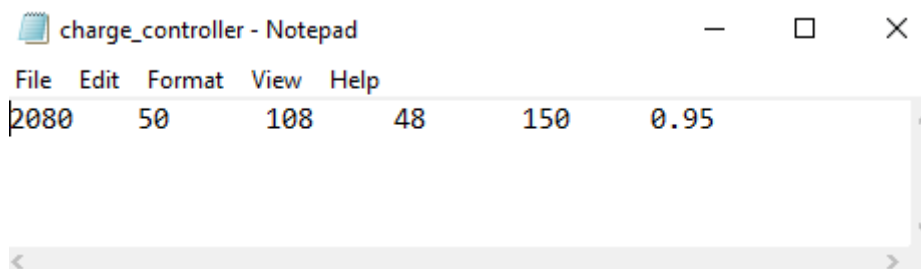
Αν υποθέσουμε ότι η τιμή του \mathbf{X} που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη επιφάνεια είναι ίση με 0.7 τότε ο αριθμός Φ/Β πλαισίων της οροφής για τη συγκεκριμένη λύση είναι:

$$N_{\text{roof}} = \text{round}(34 \cdot 0.7) = \text{round}(23.8) = 24 \quad (3.26)$$



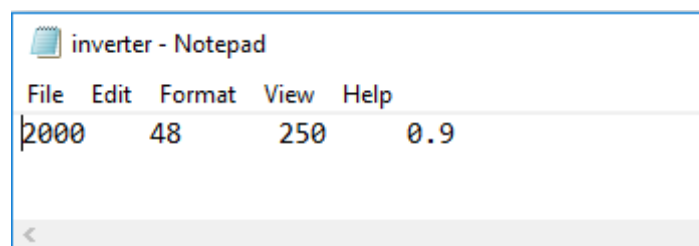
Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται ένα παράδειγμα των χαρακτηριστικών μιας μπαταρίας όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτά είναι η ονομαστική χωρητικότητα (Ah), το ελάχιστο επιτρεπτό ποσοστό φόρτισης, η ονομαστική τάση (V) και το κόστος (€).



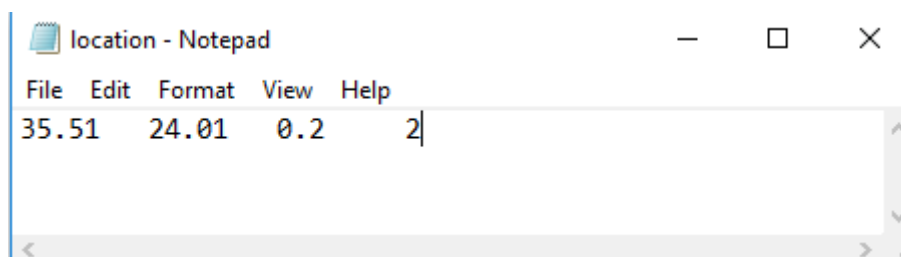
Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικά ρυθμιστή φόρτισης.

Τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης φαίνονται στο Σχήμα 3.9 και είναι η ονομαστική ισχύς (Watt), η ελάχιστη τάση MPP εισόδου (V), η μέγιστη τάση MPP εισόδου (V), η ονομαστική τάση εξόδου (V), το κόστος (€) και ο συνολικός βαθμός απόδοσης, οποίος ορίζεται από το γινόμενο της απόδοσης μετατροπής ισχύος και της απόδοσης της λειτουργίας MPPT του ρυθμιστή φόρτισης.



Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστικά μετατροπέα DC/AC.

Στο Σχήμα 3.10 φαίνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργία του μετατροπέα DC/AC όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτά είναι η ονομαστική ισχύς (Watt), η ονομαστική τάση εισόδου (V), το κόστος (€) και ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC.



Σχήμα 3.11 Χαρακτηριστικά περιοχής.

Στο Σχήμα 3.11 φαίνονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία βρίσκεται το κτήριο όπου γίνεται η εγκατάσταση όπως δίνονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτά είναι το γεωγραφικό πλάτος ($^{\circ}$), το γεωγραφικό μήκος ($^{\circ}$), ο συντελεστής ανάκλασης εδάφους και η ζώνη ώρας GMT.



Σχήμα 3.12 Γενικές παράμετροι.

Στο Σχήμα 3.12 φαίνονται ορισμένες γενικές παράμετροι που παρέχονται ως είσοδος στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, όπως τα έτη λειτουργίας του συστήματος, ο πληθωρισμός και το επιτόκιο και η παράμετρος η οποία δείχνει αν η βελτιστοποίηση θα γίνει για αυτόνομο σύστημα (0), για διασυνδεδεμένο στο δίκτυο σύστημα με μπαταρίες (1) και για διασυνδεδεμένο στο δίκτυο σύστημα χωρίς μπαταρίες (2).

Ο αλγόριθμος PSO στη παρούσα εργασία έχει υλοποιηθεί με τη χρήση της συνάρτησης “particleswarm” της πλατφόρμας Matlab, όπως φαίνεται πιο κάτω:

[x,fval]=particleswarm(objfcn,nvar,lb,ub,options)

όπου nvar είναι το πλήθος των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου. Για το παράδειγμα των δεδομένων εισόδου που αναλύθηκαν πιο πάνω, το nvar θα είναι ίσο με δεκατρία, επτά παράμετροι για τις διαθέσιμες επιφάνειες, πέντε για τις χρονοπρογραμματιζόμενες συσκευές και μια για το πλήθος των μπαταριών. Τα lb (lower bounds) και ub (upper bounds) είναι διανύσματα για το κάτω και πάνω όριο των

παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Αυτά τα διάνυσματα έχουν μέγεθος ίσο με $nvar$ και έχουν οριστεί ίσα με μηδέν το κάτω όριο και ένα το πάνω. Το \mathbf{X} είναι και αυτό ένα διάνυσμα με μέγεθος ίσο με το $nvar$ και κάθε του τιμή μπορεί να πάρει τιμή από μηδέν μέχρι ένα. Κάθε τιμή του x αντιστοιχεί σε μια παράμετρο προς βελτιστοποίηση και ολόκληρο το διάνυσμα του x αντιπροσωπεύει μια λύση. Η συνάρτηση “Objfcn” είναι η αντικειμενική συνάρτηση την οποία καλείται να βελτιστοποιήσει ο αλγόριθμος και δεν είναι άλλη από την συνάρτηση κόστους. Η τιμή $fval$ είναι η τελική τιμή συνολικού κόστους κάθε λύσης που επιστρέφεται από την συνάρτηση κόστους. Τέλος, από την παράμετρο “options” ρυθμίζονται το πλήθος των σωματιδίων και ο αριθμός επαναλήψεων που θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος PSO.

Συνοπτικά, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει ως όρισμα το διάνυσμα x και αρχικοποιεί τις παραμέτρους όπως φαίνεται στις σχέσεις (3.24), (3.25) και (3.26). Στη συνέχεια προσομοιώνει τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος όπως έχει αναλυθεί στις παραγράφους 3.2.1 , 3.2.2 και 3.2.3 ανάλογα με το μοντέλο που ζητήθηκε να βελτιστοποιηθεί και επιστρέφει το συνολικό κόστος. Ακολούθως η συνάρτηση κόστους καλείται επανειλημμένα με διαφορετικό x κάθε φορά μέχρι ο αλγόριθμος PSO να συγκλίνει και να ελαχιστοποιηθεί η τιμή του συνολικού κόστους του Φ/Β συστήματος.

4.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου που προέκυψαν για διάφορα σενάρια διαστασιολόγησης.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και ο αλγόριθμος προσομοίωσης που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εκτελέστηκαν για τις τρεις διαφορετικές διατάξεις του συνολικού Φ/Β συστήματος οι οποίες είναι:

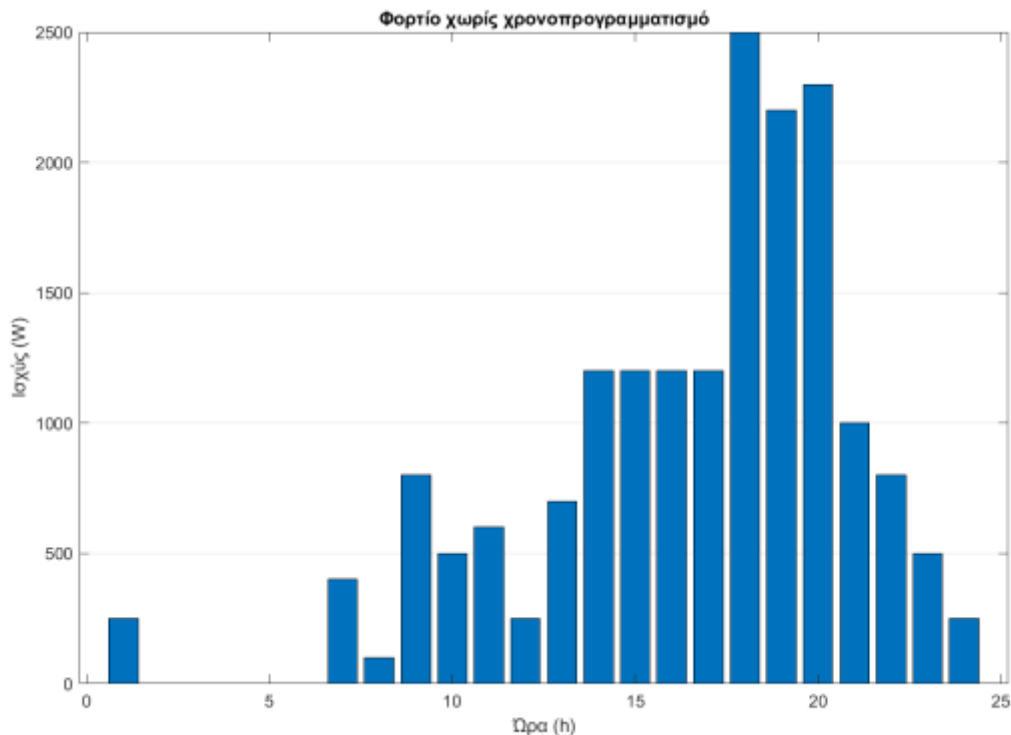
- Πλήρως αυτόνομο σύστημα (χωρίς διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο),
- Διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και
- Διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Για κάθε μια από τις πιο πάνω διατάξεις υλοποιήθηκαν τα εξής σενάρια βελτιστοποίησης:

- Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης,

- Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης,
- Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και
- Καμία βελτιστοποίηση.

Για τη περίπτωση βελτιστοποίησης μόνο διαστασιολόγησης, το φορτίο που λαμβάνεται υπόψη είναι μόνο σταθερό και η παρούσα αξία της ενέργειας που καταναλώνεται σε Ευρώ παραμένει η ίδια με τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Η ώρα έναρξης των χρονοπρογραμματιζόμενων συσκευών ορίστηκε βάσει της κατανάλωσης ενός μέσου σπιτιού. Το ωριαίο ημερήσιο προφίλ φορτίου για αυτή τη περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Για την περίπτωση βελτιστοποίησης μόνο του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου η διαστασιολόγηση των Φ/Β πλαϊσίων είναι προκαθορισμένη. Τοποθετήθηκε ο μέγιστος δυνατός αριθμός Φ/Β κεραμιδιών στην επιφάνεια της οροφής με κλίση 30° και αζιμούθιο 0° . Τοποθετήθηκαν επίσης μια συστοιχία, διάφανων Φ/Β και μια συστοιχία συμβατικών Φ/Β στις επιφάνειες με ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό με γωνία κλίσης 90° , έτσι ώστε οι επιφάνειες αυτές να μην μείνουν ανεκμετάλλευτες. Για το διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες επιλέχθηκε συστοιχία μπαταριών με έξι μπαταρίες, δύο σε σειρά και τρεις παράλληλα, έτσι ώστε να μπορεί να προσφερθεί αυτονομία σε περίπτωση πολύωρης βλάβης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στη περίπτωση του πλήρως αυτόνομου Φ/Β συστήματος επιλέχθηκε συστοιχία μπαταριών με είκοσι μπαταρίες, δύο σε σειρά και δέκα παράλληλα, έτσι ώστε να μπορεί να προσφέρει αυτονομία δύο ημερών σε περίπτωση καθόλου ηλιοφάνειας. Τέλος, για τη περίπτωση καμίας βελτιστοποίησης υπολογίστηκε το συνολικό κόστος του Φ/Β συστήματος χωρίς χρονοπρογραμματισμό φορτίου με τη διαστασιολόγηση που μόλις αναφέρθηκε.

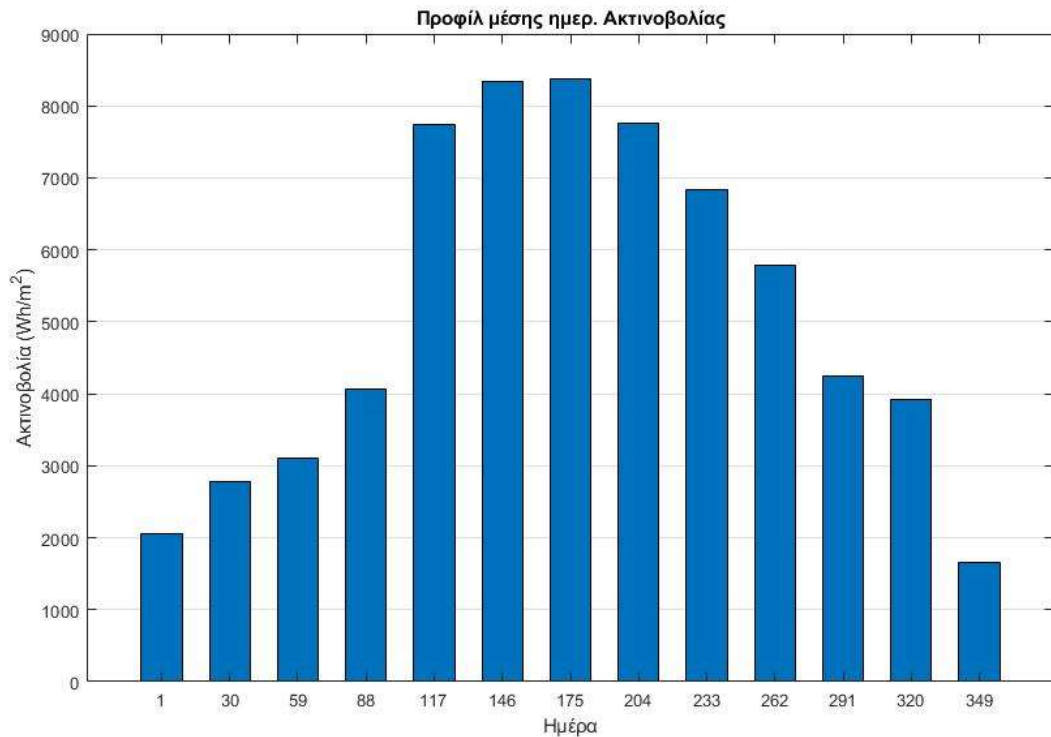


Σχήμα 4.1 Ωριαίο ημερήσιο προφίλ φορτίου χωρίς χρονοπρογραμματισμό.

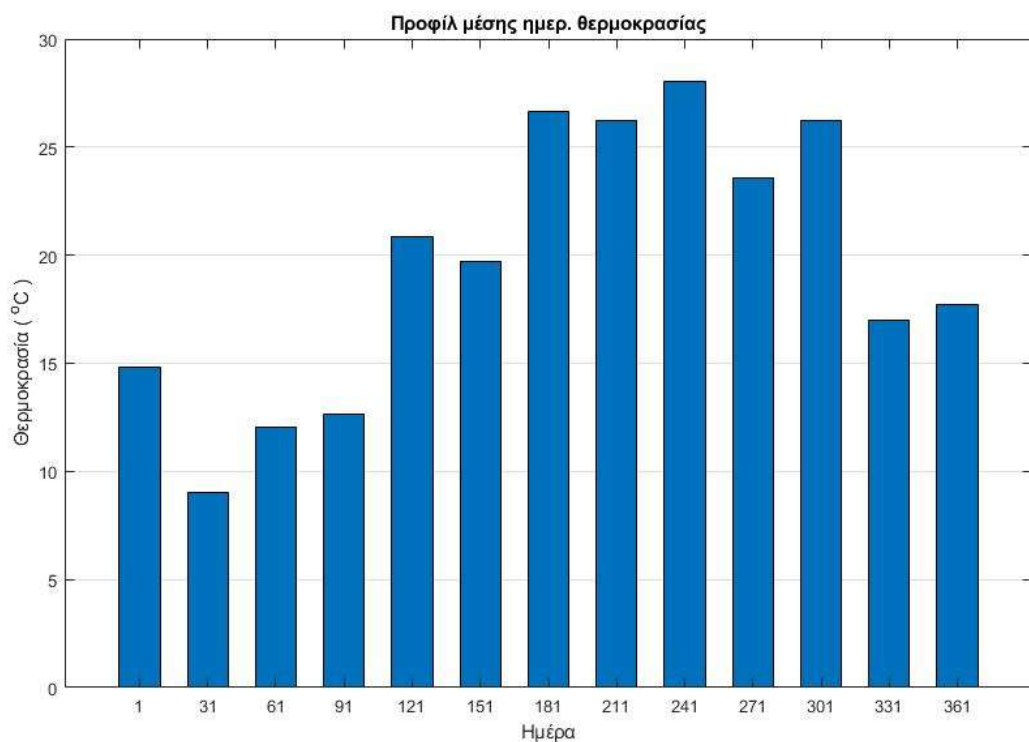
Για όλες τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος PSO εκτελέστηκε με αριθμό σωματιδίων ίσο με 4 φορές το πλήθος παραμέτρων βελτιστοποίησης, $swarmsize = n \cdot var \cdot 4$ και 200 επαναλήψεις.

Στο Σχήμα 4.2 και στο Σχήμα 4.3, φαίνονται οι μέσες ημερήσιες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αντίστοιχα, βασισμένες στα αρχεία με τις ωριαίες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι για κτήριο στη πόλη των Χανίων με γεωγραφικό πλάτος 35.51° και γεωγραφικό μήκος 24.01° και με συντελεστή ανάκλασης εδάφους ίσο με 0.2.



Σχήμα 4.2 Προφίλ μέσης ημερήσιας συνολικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.3 Προφίλ μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας.

4.1 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας

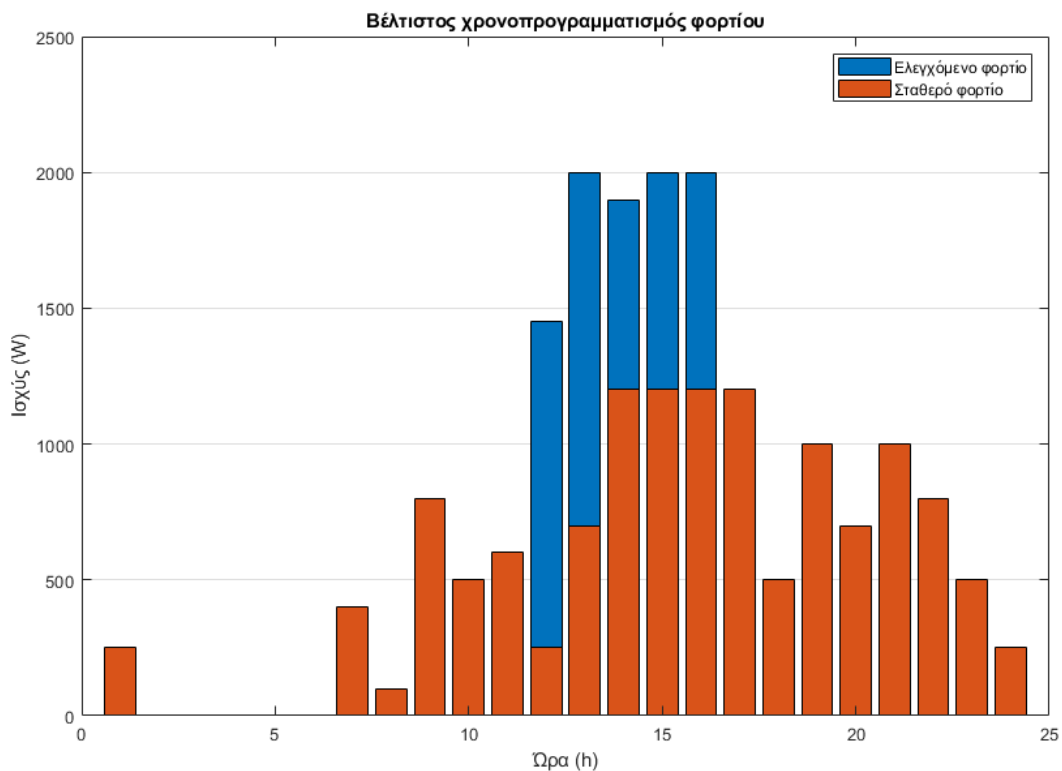
4.1.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης

Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βρει το βέλτιστο πλήθος και διάταξη των Φ/Β πλαισίων κάθε διαθέσιμης επιφάνειας του Πίνακα 3.4 όπως και το βέλτιστο πλήθος μπαταριών σε συνδυασμό με τη βέλτιστη ώρα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενου φορτίου του Πίνακα 3.2 για 30 έτη λειτουργίας. Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, σταθερού και χρονοπρογραμματιζόμενου (όπως φαίνονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2) για αυτά τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 30886.36 € με τιμή αγοράς κιλοβατώρας 0.16 €, συνυπολογίζοντας πάντα τον πληθωρισμό και το επιτόκιο.

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η βέλτιστη διάταξη των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια καθώς και το πλήθος των συσκευών που είναι απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Όπως έχει προαναφερθεί, η βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων συνήθως θεωρείται ίση με 5-10° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Η κλίση που επιλέχτηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ίση με 27 °, βρίσκεται δηλαδή στα αναμενόμενα πλαίσια. Επειδή η τάση εξόδου του φορτιστή είναι ίση με 48V και η ονομαστική τάση της μπαταρίας είναι ίση με 24V απαιτούνται τουλάχιστον 2 μπαταρίες σε σειρά. Για το λόγο ότι καμία ώρα της ημέρας το φορτίο δεν ξεπερνά την ονομαστική ισχύ του inverter (2000W) απαιτείται μόνο ένας για την ορθή λειτουργία ολόκληρου του Φ/Β συστήματος. Στον Πίνακα 4.2 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η βέλτιστη ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που υπολογίστηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα βέλτιστης διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	27	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	3	1	3 x 1
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 1
Conventional	90	90	12	2	3 x 2
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	4	-	2 x 2
Inverters	-	-	1	-	-

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ελεγχόμενου φορτίου, διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	15:00	16:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	16:00	17:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	12:00	12:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	12:00	14:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	13:00	15:00	700	1400



Σχήμα 4.4 Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα.

Στο Σχήμα 4.4 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.3 Συνολικό βέλτιστο κόστος εξοπλισμού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	15	160	2400
Conventional	18	240	4320
Batteries	4	190	760
Inverters	1	250	250
Charge controllers	11	150	1650
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			17780

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού το οποίο ανέρχεται στις 17780 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 27082.36 €. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ίσο με -35754.42 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως, το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (3.18) ίσο με 9107.94 €.

Συγκρίνοντας την παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με το συνολικό κόστος του βελτιστοποιημένου Φ/Β συστήματος, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 70%.

4.1.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης

Στο σενάριο αυτό ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει μόνο τη διαστασιολόγηση των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια του Πίνακα 3.4 και το βέλτιστο πλήθος μπαταριών και ρυθμιστών τάσης. Έχει χρησιμοποιηθεί το σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η

Βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με το προηγούμενο σενάριο οπότε και το ενεργειακό κόστος χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €.

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης μόνο διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	27	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	3	1	3 x 1
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 2
Conventional	90	90	12	2	3 x 2
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	6	-	2 x 3
Inverters	-	-	2	-	-

Η βέλτιστη διαστασιολόγηση Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο PSO φαίνεται στον Πίνακα 4.4. Όπως φαίνεται στο φορτίο του Σχήματος 4.1 κάποιες ώρες της ημέρας η ισχύς που απαιτείται από το φορτίο είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα DC/AC, επομένως απαιτούνται 2 μετατροπείς DC/AC για να την τροφοδοτήσει της παραγόμενης ισχύος στο φορτίο.

Πίνακας 4.5 Συνολικό κόστος εξοπλισμού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	15	160	2400
Conventional	18	240	4320
Batteries	6	190	1140
Inverters	2	250	500
Charge controllers	11	150	1650
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			18410

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού το οποίο ανέρχεται στις 18410 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 28041.96€. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το δίκτυο είναι ίσο με -35100 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση 3.18 ίσο με 11351.96 €.

Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με το συνολικό κόστος του βελτιστοποιημένου Φ/Β συστήματος χωρίς χρονοπρογραμματισμό φορτίου, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 63%.

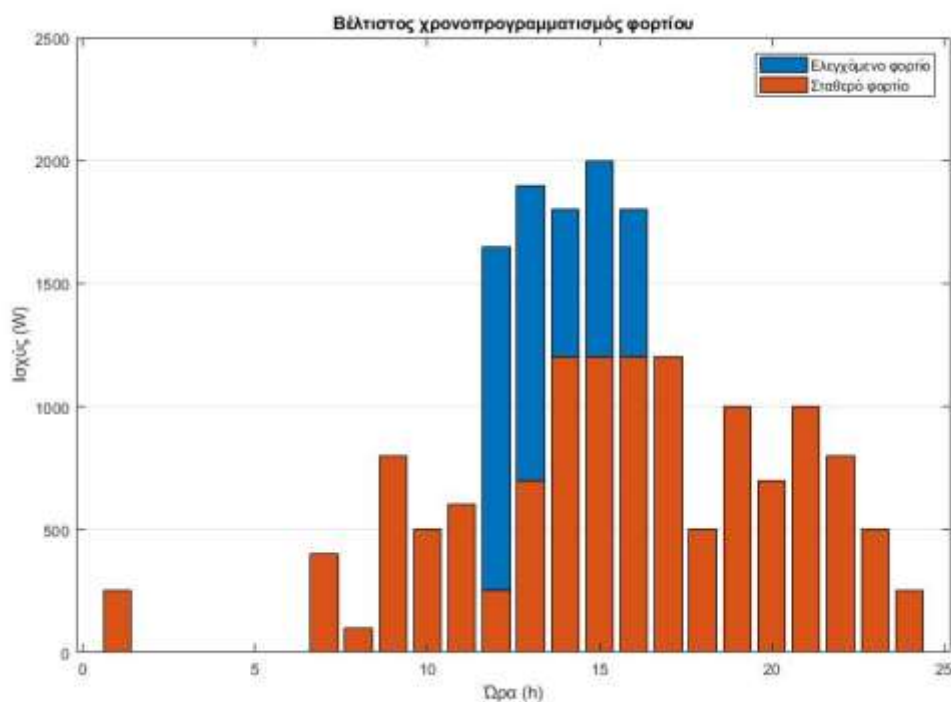
4.1.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου

Στο σενάριο βελτιστοποίησης μόνο του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου θεωρήθηκε κτήριο με προκαθορισμένη διάταξη Φ/Β συστήματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.6. Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση ενέργειας του συστήματος επιλέγοντας τη κατάλληλη ώρα για κάθε ελεγχόμενο φορτίο του Πίνακα 3.2 έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος για 30 έτη λειτουργίας.

Πίνακας 4.6 Διαστασιολόγηση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	6	-	2 x 3
Inverters	-	-	1	-	-

Στον Πίνακα 4.7 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που επιλέχθηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.7 Αποτέλεσμα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ελεγχόμενου φορτίου διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	12:00	13:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	15:00	16:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	16:00	16:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	13:00	15:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	12:00	14:00	700	1400



Σχήμα 4.5 Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα.

Στο Σχήμα 4.5 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.8 Συνολικό κόστος εξοπλισμού για βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου σε διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	6	190	1140
Inverters	1	250	250
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			15940

Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, σταθερού και χρονοπρογραμματιζόμενου, για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 30886.36 € με τιμή αγοράς κιλοβατώρας 0.16 €, συνυπολογίζοντας πάντα πληθωρισμό και το επιτόκιο.

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού το οποίο ανέρχεται στις 15940 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 23700,87 €. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το δίκτυο είναι ίσο με -24930.05 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.18) ίσο με 15115.48 €. Συγκρίνοντας την παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με το συνολικό κόστος του προκαθορισμένου Φ/Β συστήματος με χρονοπρογραμματισμό φορτίου, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 51%.

4.1.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση

Στο σενάριο αυτό υπολογίζεται το συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο με μπαταρίες, με προκαθορισμένη διάταξη Φ/Β πλαισίων όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.9 και με σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

Πίνακας 4.9 Προκαθορισμένη διάταξη διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	6	-	2 x 3
Inverters	-	-	2	-	-

Η συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με τα προηγούμενα σενάρια, οπότε και το ενεργειακό κόστος χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €.

Πίνακας 4.10 Συνολικό κόστος εξοπλισμού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	6	190	1140
Inverters	2	250	500
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			16190

Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.10 ανέρχεται στις 16190 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 24660.41 €. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το δίκτυο είναι ίσο με -24277.06 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.18) ίσο με 16573.42 €. Το σύστημα χωρίς οποιαδήποτε βελτιστοποίηση προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 46%.

4.2 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου συστήματος χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.

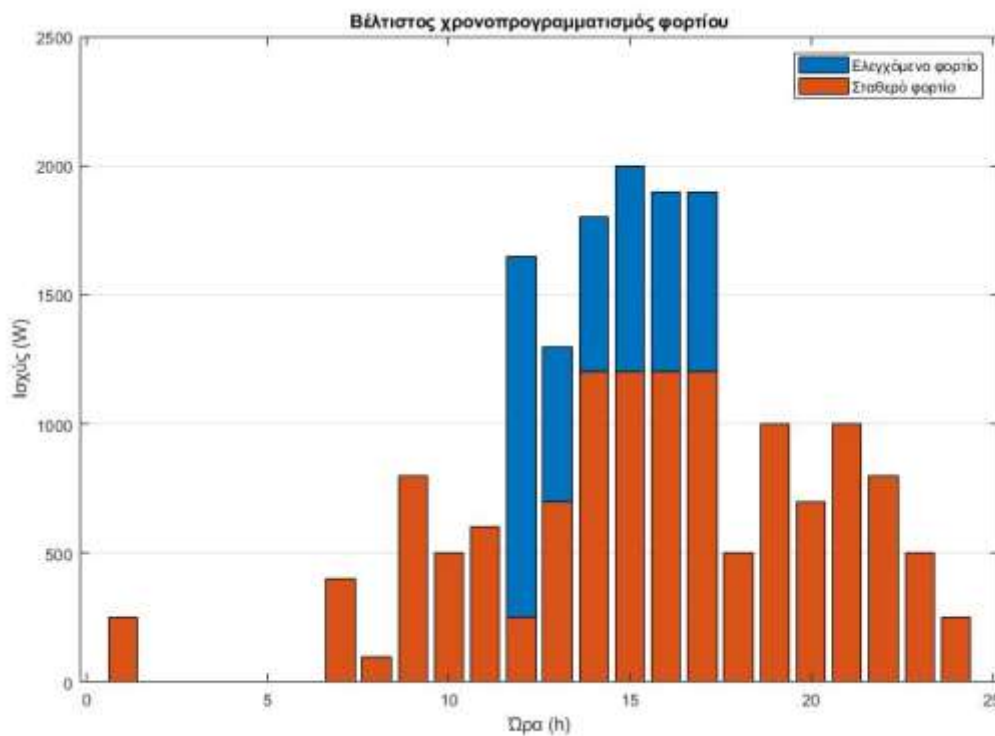
4.2.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης

Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος PSO καλείται να βρει το βέλτιστο πλήθος και διάταξη των Φ/Β πλαισίων κάθε διαθέσιμης επιφάνειας του Πίνακα 3.4 σε συνδυασμό με τη βέλτιστη ώρα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενου φορτίου του Πίνακα 3.2 για 30 έτη λειτουργίας. Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, σταθερού και χρονοπρογραμματιζόμενου (όπως φαίνονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2), για αυτά τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 30886.36 € με τιμή αγοράς κιλοβατώρας 0.16 €, συνυπολογίζοντας πάντα τον πληθωρισμό και το επιτόκιο.

Στον Πίνακα 4.11 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η βέλτιστη διάταξη των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια καθώς και το πλήθος των συσκευών που είναι απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Όπως έχει προαναφερθεί, η βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων συνήθως θεωρείται ίση με 5-10° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Η κλίση που επιλέχθηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ίση με 27°, βρίσκεται δηλαδή στα αναμενόμενα πλαίσια. Για τον λόγο ότι καμία ώρα της ημέρας το φορτίο δεν ξεπερνά την ονομαστική ισχύ του inverter απαιτείται μόνο ένας για την ορθή λειτουργία ολόκληρου του Φ/Β συστήματος. Στον Πίνακα 4.2 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που επιλέχθηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.11 Αποτελέσματα βέλτιστης διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	27	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	3	1	3 x 1
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 1
Conventional	90	90	12	2	3 x 2
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	0	-	-
Inverters	-	-	1	-	-

Πίνακας 4.12 Αποτελέσματα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ελεγχόμενου φορτίου, διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	12:00	13:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	15:00	16:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	12:00	12:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	13:00	15:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	16:00	18:00	700	1400



Σχήμα 4.6 Προφίλ ημερήσιου φορτίου ανά ώρα μετά τη βελτιστοποίηση.

Στο Σχήμα 4.4 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.13 Συνολικό βέλτιστο κόστος εξοπλισμού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες

Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	15	160	2400
Conventional	18	240	4320
Batteries	0	190	0
Inverters	1	250	250
Charge controllers	11	150	1650
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			17020

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζεται αναλυτικά το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού το οποίο ανέρχεται στις 17020 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 25924.73 €. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ίσο με -36821.6 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως, το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (3.18) ίσο με 6123.14 €.

Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με το συνολικό κόστος του βελτιστοποιημένου Φ/Β συστήματος, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 80%.

4.2.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης

Στο σενάριο αυτό ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει μόνο τη διαστασιολόγηση των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια του Πίνακα 3.4 και να υπολογίσει το απαιτούμενο πλήθος ρυθμιστών τάσης. Για την υλοποίηση αυτού του σεναρίου έχει χρησιμοποιηθεί το σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. . Η συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με τα προηγούμενα σενάρια οπότε και το ενεργειακό κόστος χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €.

Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η βέλτιστη διάταξη των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια καθώς και το πλήθος των συσκευών που είναι απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Όπως έχει προαναφερθεί, η βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων συνήθως θεωρείται ίση με 5-10° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Η κλίση που επιλέχτηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ίση με 27°, βρίσκεται δηλαδή στα αναμενόμενα πλαίσια. Για το λόγο ότι καμία ώρα της ημέρας το φορτίο δεν ξεπερνά την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα DC/AC, απαιτείται μόνο ένας για την ορθή λειτουργία ολόκληρου του Φ/Β συστήματος.

Πίνακας 4.14 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης μόνο διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες

Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	27	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	3	1	3 x 1
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 1
Conventional	90	90	12	2	3 x 2
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	0	-	-
Inverters	-	-	2	-	-

Πίνακας 4.15 Βέλτιστο κόστος εξοπλισμού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες

Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	15	160	2400
Conventional	18	240	4320
Batteries	0	190	0
Inverters	2	250	500
Charge controllers	11	150	1650
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			17270

Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.15 ανέρχεται στις 17270 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως

συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 26305.52 €.

Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ίσο με -34285.99 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh.. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.18) ίσο με 9289.53 €.

Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με τη συνολικό κόστος του βελτιστοποιημένου Φ/Β συστήματος χωρίς χρονοπρογραμματισμό φορτίου, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 70%.

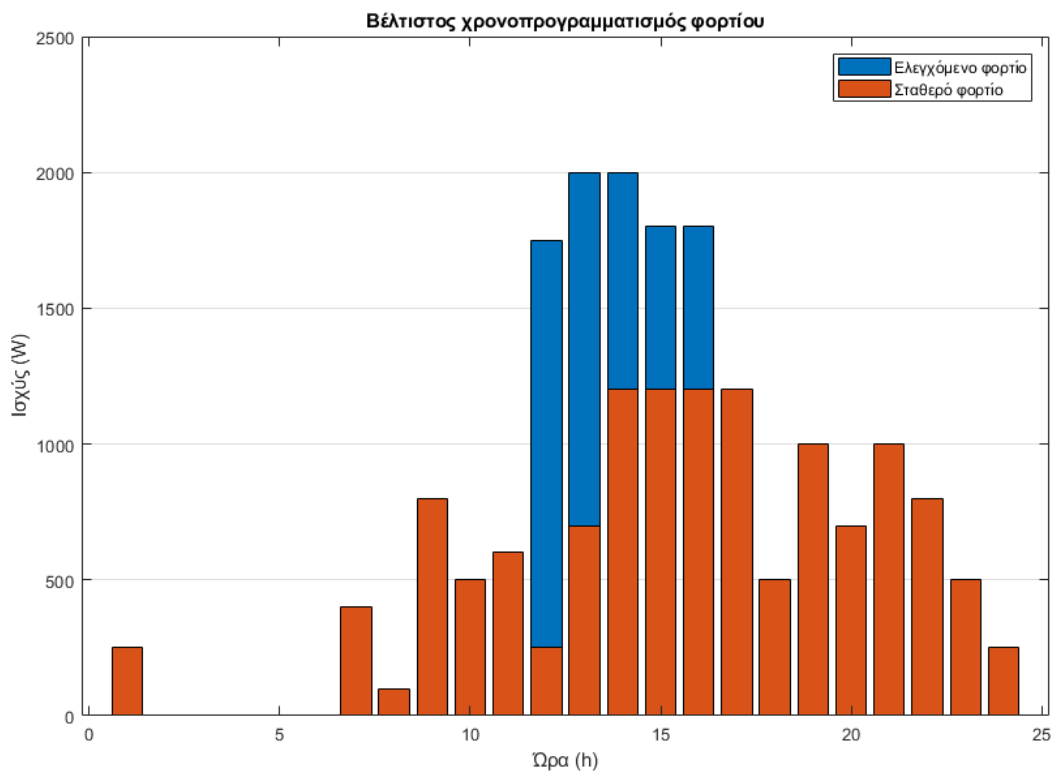
4.2.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου

Για την υλοποίηση βελτιστοποίησης μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου θεωρήθηκε κτήριο με προκαθορισμένη διάταξη Φ/Β συστήματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.16 .Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση ενέργειας του συστήματος επιλέγοντας τη κατάλληλη ώρα έναρξης κάθε ελεγχόμενου φορτίου του Πίνακα 3.2 έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος για 30 έτη λειτουργίας.

Πίνακας 4.16 Διαστασιολόγηση διασυνδεδεμένο Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	0	-	-
Inverters	-	-	1	-	-

Στον Πίνακα 4.17 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που επιλέχθηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.17 Αποτέλεσμα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού φορτίου διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	14:00	15:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	12:00	13:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	13:00	13:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	15:00	17:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	12:00	14:00	700	1400



Σχήμα 4.7 Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα.

Στο Σχήμα 4.7 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.18 Συνολικό κόστος εξοπλισμού για βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου σε διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	0	190	0
Inverters	1	250	250
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			14800

Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, για τα 30 έτη λειτουργίας χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος ανέρχεται, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, στις 30886.36 € με τιμή αγοράς κιλοβατώρας 0.16 €, συνυπολογίζοντας πάντα πληθωρισμό και το επιτόκιο. .

Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.18 ανέρχεται στις 14800 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας, συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο, ανέρχεται στις 22542.34 €.

Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ίσο με -24939.9 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.18) ίσο με 12403.34 €.

Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία του ενεργειακού κόστους χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με τη συνολικό κόστος του προκαθορισμένου Φ/Β συστήματος με χρονοπρογραμματισμό φορτίου, συμπεραίνεται ότι το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 60%.

4.2.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση

Στο σενάριο αυτό υπολογίζεται το συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μπαταρίες με προκαθορισμένη διάταξη Φ/Β πλαισίων όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.19 και με σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1

Πίνακας 4.19 Προκαθορισμένη διάταξη διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	0	-	-
Inverters	-	-	2	-	-

Πίνακας 4.20 Κόστος εξοπλισμού χωρίς βελτιστοποίηση διασυνδεδεμένου Φ/β συστήματος χωρίς μπαταρίες			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	0	190	0
Inverters	2	250	500
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			15050

Η συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με τα προηγούμενα σενάρια οπότε και το ενεργειακό κόστος χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €.

Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.20 ανέρχεται στις 15050 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 22924.04 €. Το συνολικό κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό είναι ίσο με -22305.73 € (το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε είναι μεγαλύτερο από το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε) με τιμή πώλησης 0.09 €/kWh και τιμή αγοράς 0.16 €/kWh . Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.18) ίσο με 15668.31 €.

Τέλος το διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο σύστημα χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας χωρίς καμία βελτιστοποίηση προσφέρει εξοικονόμηση της τάξης του 49%.

4.3 Αποτελέσματα πλήρως αυτόνομου συστήματος.

4.3.1 Βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου και διαστασιολόγησης

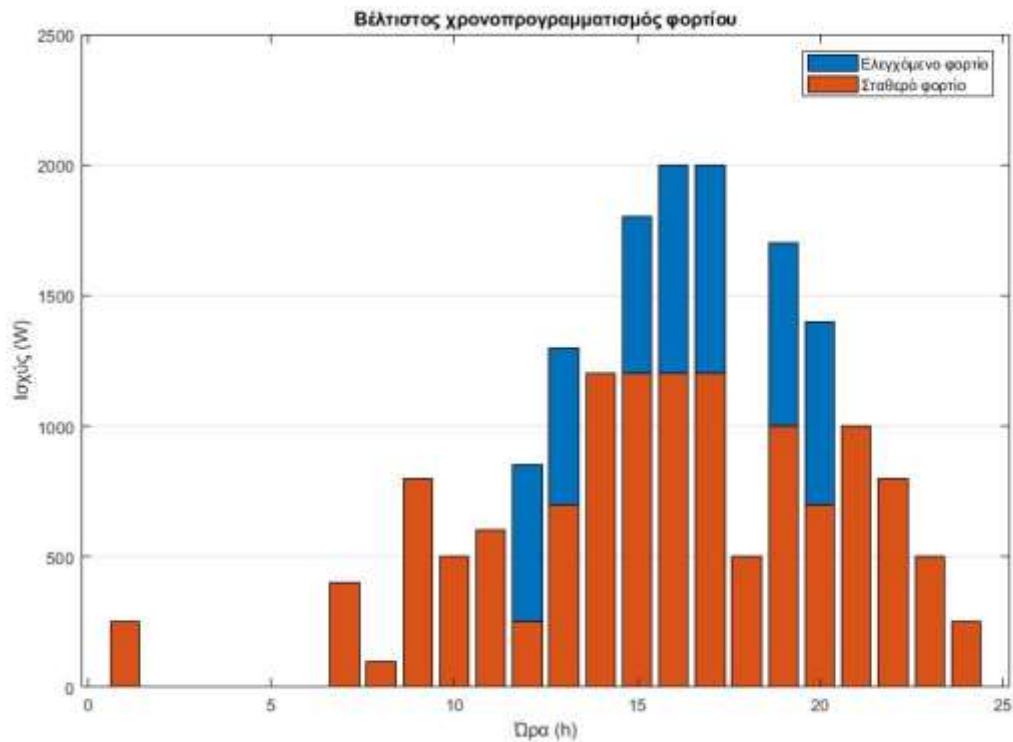
Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος PSO καλείται να βρει το βέλτιστο πλήθος και διάταξη των Φ/Β πλαισίων κάθε διαθέσιμης επιφάνειας του Πίνακα 3.4 σε συνδυασμό με τη βέλτιστη ώρα λειτουργίας κάθε ελεγχόμενου φορτίου του Πίνακα 3.2 για 30 έτη λειτουργίας. Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, σταθερού και χρονοπρογραμματιζόμενου (όπως φαίνονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2), για αυτά τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 30886.36 € με τιμή αγοράς κιλοβατώρας 0.16 €, συνυπολογίζοντας πάντα τον πληθωρισμό και το επιτόκιο.

Στον Πίνακα 4.21 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η βέλτιστη διάταξη των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια καθώς και το πλήθος των συσκευών που είναι απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Η κλίση που επιλέχτηκε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ίση με 33 °. Επειδή η τάση εξόδου του φορτιστή είναι ίση με 48V και η ονομαστική τάση της μπαταρίας είναι ίση με 24V απαιτούνται τουλάχιστον 2 μπαταρίες σε σειρά. Για τον λόγο ότι καμία ώρα της ημέρας το φορτίο δεν ξεπερνά την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα DC/AC (2000W) απαιτείται μόνο ένας για την ορθή λειτουργία ολόκληρου του Φ/Β συστήματος.

Στον Πίνακα 4.22 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που επιλέχθηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.21 Αποτελέσματα βέλτιστης διαστασιολόγησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	33	24	4	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	3	1	3 x 1
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 2
Conventional	90	90	0	0	-
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	20	-	10 x 2
Inverters	-	-	1	-	-

Πίνακας 4.22 Αποτελέσματα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ελεγχόμενου φορτίου αυτόνομου Φ/Β συστήματος				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	16:00	17:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	17:00	18:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	15:00	15:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	12:00	14:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	19:00	21:00	700	1400



Σχήμα 4.8 Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα.

Στο Σχήμα 4.8 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.23 Συνολικό βέλτιστο κόστος εξοπλισμού αυτόνομου Φ/Β συστήματος			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	24	280	6720
Transparent	15	160	2400
Conventional	6	240	1440
Batteries	20	190	3800
Inverters	1	250	250
Charge controllers	8	150	1200
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			15810

Το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.20 ανέρχεται στις 15810 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 24081.67 €. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.23) ίσο με 39891.67 €.

Τέλος, το αυτόνομο σύστημα βελτιστοποιώντας την ώρα έναρξης του ελεγχόμενου φορτίου καθώς και τη διαστασιολόγηση του συστήματος κοστίζει 29% περισσότερο από το ενεργειακό κόστος του συνολικού φορτίου σύμφωνα με τη τιμή αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο.

4.3.2 Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης

Στο σενάριο αυτό ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει μόνο τη διαστασιολόγηση των Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια του Πίνακα 3.4 και το βέλτιστο πλήθος μπαταριών και ρυθμιστών τάσης του αυτόνομου Φ/Β συστήματος. Έχει χρησιμοποιηθεί το σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με το προηγούμενο σενάριο οπότε και το ενεργειακό κόστος χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €.

Η βέλτιστη διαστασιολόγηση Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο PSO φαίνεται στον Πίνακα 4.24. Όπως φαίνεται στο φορτίο του Σχήματος 4.1 κάποιες ώρες της ημέρας η ισχύς που απαιτείται από το φορτίο είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα DC/AC, επομένως απαιτούνται 2 μετατροπείς DC/AC για να την τροφοδοτήσει της παραγόμενης ισχύος στο φορτίο.

Πίνακας 4.24 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης μόνο διαστασιολόγησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος

Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	25	24	4	3 x 2
Transparent	0	90	12	2	3 x 2
Transparent	90	90	0	0	-
Transparent	-90	90	0	0	-
Conventional	0	90	6	1	3 x 2
Conventional	90	90	3	1	3 x 1
Conventional	-90	90	0	0	-
Batteries	-	-	20	-	8 x 2
Inverters	-	-	2	-	-

Πίνακας 4.25 Βέλτιστο κόστος εξοπλισμού αυτόνομου Φ/Β συστήματος

Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	24	280	6720
Transparent	12	160	1920
Conventional	9	240	2160
Batteries	20	190	3800
Inverters	2	250	500
Charge controllers	8	150	1200
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			16300

Το συνολικό κόστος αγοράς του εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.25 ανέρχεται στις 16300 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως

συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 24828.03 €. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.23) ίσο με 41128.03 €.

Τέλος το αυτόνομο σύστημα βελτιστοποιώντας μόνο τη διαστασιολόγηση του συστήματος κοστίζει 33% περισσότερο από το ενεργειακό κόστος του συνολικού φορτίου σύμφωνα με τη τιμή αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο.

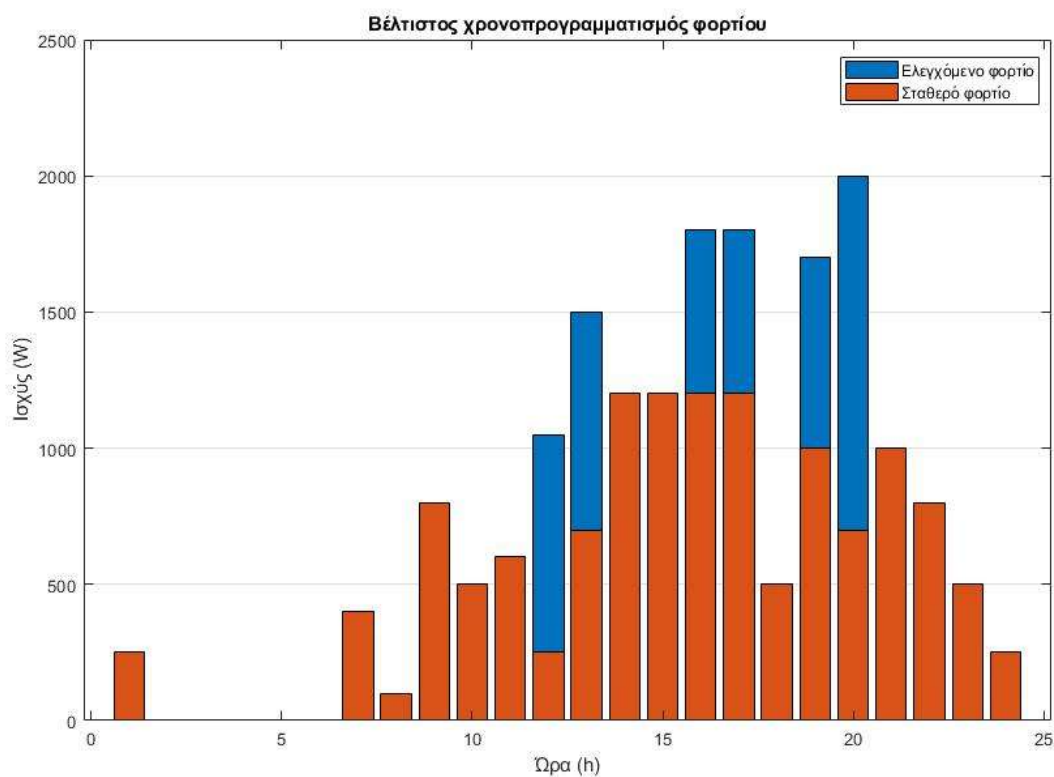
4.3.3 Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου

Στο σενάριο βελτιστοποίησης μόνο του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου θεωρήθηκε κτήριο με προκαθορισμένη διάταξη αυτόνομου Φ/Β συστήματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.26. Ο αλγόριθμος PSO καλείται να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση ενέργειας του συστήματος επιλέγοντας τη κατάλληλη ώρα έναρξης κάθε ελεγχόμενου φορτίου έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος για 30 έτη λειτουργίας.

Πίνακας 4.26 Διαστασιολόγηση αυτόνομου Φ/Β συστήματος					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	20	-	10 x 2
Inverters	-	-	1	-	-

Στον Πίνακα 4.27 φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου, δηλαδή η ώρα έναρξης και ώρα τερματισμού που επιλέχθηκε για την κάθε χρονοπρογραμματιζόμενη συσκευή από τον αλγόριθμο PSO.

Πίνακας 4.27 Αποτέλεσμα βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού ελεγχόμενου φορτίου αυτόνομου Φ/Β συστήματος σύστημα				
	Αρχή	Τέλος	Κατανάλωση (W)	Κατανάλωση (Wh)
Ελεγχόμενο φορτίο 1	13:00	14:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 2	12:00	13:00	800	800
Ελεγχόμενο φορτίο 3	20:00	20:30	1200	600
Ελεγχόμενο φορτίο 4	16:00	18:00	600	1200
Ελεγχόμενο φορτίο 5	19:00	21:00	700	1400



Σχήμα 4.9 Βελτιστοποιημένο ημερήσιο προφίλ φορτίου ανά ώρα.

Στο Σχήμα 4.9 με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται το σταθερό φορτίο και με μπλε χρώμα φαίνεται το αποτέλεσμα βελτιστοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου.

Πίνακας 4.28 Συνολικό κόστος εξοπλισμού για βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου σε αυτόνομο Φ/Β σύστημα			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	20	190	3800
Inverters	1	250	250
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			18600

Το ενεργειακό κόστος του φορτίου, χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος ανέρχεται, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, στις 30886.36 €.

Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.28 ανέρχεται στις 18600 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 28331.37 €. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.23) ίσο με 46931.37 €.

Τέλος το αυτόνομο σύστημα βελτιστοποιώντας μόνο την ώρα έναρξης του ελεγχόμενου φορτίου κοστίζει 51% περισσότερο από το ενεργειακό κόστος του συνολικού φορτίου σύμφωνα με τη τιμή αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο.

4.3.4 Φ/Β σύστημα χωρίς βελτιστοποίηση

Στο σενάριο αυτό υπολογίζεται το συνολικό κόστος πλήρως αυτόνομου Φ/Β συστήματος με προκαθορισμένη διάταξη Φ/Β πλαισίων όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.29 με σταθερό φορτίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

Πίνακας 4.29 Προκαθορισμένη διάταξη αυτόνομου Φ/Β συστήματος					
Είδος	Αζιμούθιο (°)	Γωνία κλίσης (°)	Ποσότητα	Απαιτούμενοι ρυθμιστές τάσης / Συστοιχίες	Σειρά x Παράλληλα
Roof / Tiles	0	30	30	5	3 x 2
Transparent	0	90	0	0	-
Transparent	90	90	6	1	3 x 2
Transparent	-90	90	6	1	3 x 2
Conventional	0	90	0	0	-
Conventional	90	90	6	1	3 x 2
Conventional	-90	90	6	1	3 x 2
Batteries	-	-	20	-	10 x 2
Inverters	-	-	2	-	-

Πίνακας 4.30 Κόστος εξοπλισμού χωρίς βελτιστοποίηση αυτόνομου Φ/Β συστήματος			
Είδος	Ποσότητα	Κόστος (€)	Συνολικό κόστος (€)
Tiles	30	280	8400
Transparent	12	160	1920
Conventional	12	240	2880
Batteries	20	190	3800
Inverters	2	250	500
Charge controllers	9	150	1350
Συνολικό κόστος εξοπλισμού (€)			18850

Η συνολική ημερήσια κατανάλωση σε κιλοβατώρες παραμένει η ίδια με τα προηγούμενα σενάρια οπότε και το χωρίς ενεργειακό κόστος οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος είναι το ίδιο, με παρούσα αξία 30886.36 €. Το συνολικό κόστος αγοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.20 ανέρχεται στις 18850 €. Το κόστος συντήρησης είναι ίσο με το 5% του κόστους αγοράς ετησίως συνυπολογίζοντας τον πληθωρισμό και το επιτόκιο. Το συνολικό κόστος συντήρησης για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 28712.17 €. Επομένως το συνολικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται από τη Σχέση (3.23) ίσο με 47562.17€. Τέλος το πλήρως αυτόνομο σύστημα χωρίς καμία βελτιστοποίηση κοστίζει 54% περισσότερο από το ενεργειακό κόστος του συνολικού φορτίου σύμφωνα με την τιμή αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο.

4.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια βελτιστοποίησης κάθε συστήματος. Όπως έχει προαναφερθεί τα σενάρια βελτιστοποίησης για κάθε σύστημα είναι:

- Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και χρονοπρογραμματισμού
- Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης
- Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματισμού και
- Καμία βελτιστοποίηση.

Στον Πίνακα 4.31 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης διασυνδεδεμένου συστήματος με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Όπως έχει προαναφερθεί, η παρούσα αξία της ενέργειας που καταναλώνεται χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος για τα 30 έτη λειτουργίας ανέρχεται στις 30886.36 €. Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία της ενέργειας που καταναλώνεται χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με τη παρούσα αξία του συνολικού κόστους του διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες, παρατηρείται ότι το Φ/Β σύστημα χωρίς καμία βελτιστοποίηση προσφέρει 46% μικρότερο κόστος.

Η βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μπαταρίες σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προσφέρει μέχρι και 70% μικρότερο κόστος. Η βελτιστοποίηση μόνο της διαστασιολόγησης του Φ/Β συστήματος

Βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

προσφέρει 63% μικρότερο κόστος και η βελτιστοποίηση μόνο του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προσφέρει 51% μικρότερο κόστος. Τα παραπάνω ποσοστά, r (%), υπολογίστηκαν ως εξής:

$$r = \frac{C_{en} - C_{tot}}{C_{en}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

όπου C_{en} η παρούσα αξία της ενέργειας που καταναλώνεται χωρίς οποιαδήποτε εγκατάσταση Φ/Β συστήματος και C_{tot} η παρούσα αξία του συνολικού κόστους του Φ/Β συστήματος όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.31 - 4.33.

Πίνακας 4.31 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου συστήματος με μπαταρίες				
	Κόστος εξοπλισμού (€)	Κόστος συντήρησης (€)	Κόστος αγοράς και πώλησης ενέργειας (€)	Συνολικό κόστος (€)
Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και χρονοπρογραμματισμού	17780	27082.36	-35754.42	9107.94
Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης	18410	28041.96	-35100	11351.96
Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματισμού	15940	23700.87	-24930.05	15115.48
Καμία βελτιστοποίηση	16190	24660.41	-24277.06	16573.42

Στον Πίνακα 4.32 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Συγκρίνοντας τη παρούσα αξία συνολικού κόστους με τη παρούσα αξία της ενέργειας που απαιτείται χωρίς εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με τη σχέση 5.1, προκύπτει ότι το διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες, χωρίς καμία βελτιστοποίηση προσφέρει 49% μικρότερο κόστος. Η βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προσφέρει μέχρι και 80% μικρότερο κόστος. Η βελτιστοποίηση μόνο της διαστασιολόγησης του Φ/Β συστήματος προσφέρει 70% μικρότερο κόστος και η βελτιστοποίηση μόνο του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προσφέρει 60% μικρότερο κόστος.

Πίνακας 4.32 Αποτελέσματα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες				
	Κόστος εξοπλισμού (€)	Κόστος συντήρησης (€)	Συνολικό κόστος αγοράς και πώλησης ενέργειας (€)	Συνολικό κόστος (€)
Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και χρονοπρογραμματισμού	17020	25924.73	-36821.6	6123.14
Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης	17270	26305.52	-34285.99	9289.53
Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματισμού	14800	22542.34	-24939.9	12403.34
Καμία βελτιστοποίηση	15050	22924.04	-22305.73	15668.31

Στον Πίνακα 4.33 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα τέσσερα διαφορετικά σενάρια βελτιστοποίησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος. Όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, συγκρίνοντας τη παρούσα αξία συνολικού κόστους με τη παρούσα αξία της ενέργειας που απαιτείται χωρίς εγκατάσταση Φ/Β συστήματος με τη σχέση 5.1, προκύπτει ότι το αυτόνομο Φ/Β σύστημα χωρίς καμία βελτιστοποίηση προσφέρει 54% μεγαλύτερο κόστος. Η βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος σε συνδυασμό με τη βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου προσφέρει 29% μεγαλύτερο κόστος. Η βελτιστοποίηση μόνο της διαστασιολόγησης του Φ/Β συστήματος προσφέρει 33% μεγαλύτερο κόστος και βελτιστοποίηση μόνο του ελεγχόμενου φορτίου προσφέρει 51% μεγαλύτερο κόστος.

Πίνακας 4.33 Αποτελέσματα πλήρως αυτόνομου Φ/Β συστήματος			
	Κόστος εξοπλισμού (€)	Κόστος συντήρησης (€)	Συνολικό κόστος (€)
Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και χρονοπρογραμματισμού	15810	24081.67	39891.67
Βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης	16300	24828.03	41128.03
Βελτιστοποίηση μόνο χρονοπρογραμματισμού	18600	28331.37	46931.37
Καμία βελτιστοποίηση	18850	28712.17	47562.17

5.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενσωμάτωση Φ/Β πλαισίων σε κτήρια είναι πολύ σημαντική από τη στιγμή που η ανθρωπότητα ψάχνει διεξόδους από το ενεργειακό αδιέξοδο στο οποίο ενδέχεται να οδηγηθεί στα επόμενα χρόνια.

Στη παρούσα εργασία υλοποιήθηκε αλγόριθμος βελτιστοποίησης σχεδιασμού τριών διαφορετικών τύπων Φ/Β συστημάτων που ενσωματώνονται σε κτήρια: α) διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας β) διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και γ) πλήρως αυτόνομο σύστημα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσομοιώνει τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος ως προς τη παραγόμενη ισχύ, τη κατανάλωση του φορτίου και την κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών με ωριαίο βήμα. Μετά το τέλος της προσομοίωσης, ο αλγόριθμος δίνει ως αποτέλεσμα το τελικό συνολικό κόστος του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη το κόστος εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης και το κόστος της ενέργειας που πωλήθηκε και αγοράστηκε προς και από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO) για την εύρεση του οικονομικότερου συνδυασμού διαστασιολόγησης των Φ/Β πλαισίων και διαχείρισης του χρονοπρογραμματιζόμενου φορτίου.

Οι τελικές λύσεις που προέκυψαν για τα τρία διαφορετικά συστήματα που μελετήθηκαν ικανοποιούν πλήρως το φορτίο και είναι βέλτιστες οικονομικά. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, το καλύτερο σενάριο βελτιστοποίησης, όπως ήταν αναμενόμενο, είναι η

βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης μαζί με το χρονοπρογραμματισμό του φορτίου. Ο χρονοπρογραμματισμός του φορτίου σε συνδυασμό με τη διαστασιολόγηση των συσκευών προσφέρει 10% μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με τη βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες. Στο διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με μπαταρίες η βελτιστοποίηση χρονοπρογραμματισμού και διαστασιολόγησης προσφέρει 7% μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με τη βελτιστοποίηση μόνο της διαστασιολόγησης. Στο αυτόνομο Φ/Β σύστημα δίνει 6% μικρότερο συνολικό κόστος σε σχέση με τη βελτιστοποίηση μόνο διαστασιολόγησης, στα 30 έτη λειτουργίας του Φ/Β συστήματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για τους 3 τύπους Φ/Β συστημάτων, διαπιστώθηκε ότι το διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες είναι το βέλτιστο προσφέροντας μέχρι και 80% μικρότερο συνολικό κόστος 10% μικρότερο κόστος από το διασυνδεδεμένο σύστημα με μπαταρίες. Αντιθέτως, η βέλτιστη λύση για το πλήρως αυτόνομο σύστημα κοστίζει 29% περισσότερο από το ενεργειακό κόστος του συνολικού φορτίου για 30 έτη λειτουργίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα είδη κτηρίων όπως, απλές κατοικίες, πολυκατοικίες και δημόσια κτήρια.

Μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας μπορεί να αποτελέσει η ανάπτυξη μιας γραφικής διεπαφής με την οποία ο χρήστης/σχεδιαστής θα μπορεί ευκολότερα να χρησιμοποιεί το λογισμικό βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε. Σε αυτή τη διεπαφή χρήστη θα μπορούσε να ενσωματωθεί και κατάλληλη διεπικοινωνία με βάση δεδομένων που περιλαμβάνει μετεωρολογικά δεδομένα.

6.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Eduardo Lorenzo, “Solar Electricity - Engineering of photovoltaic Systems”, Institute of Solar Energy – Polytechnic University of Madrid, 1994.
- [2] Καγκαράκη Κ. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [3] Φραγκιαδάκης Ι.Ε. “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, 2006.
- [4] Kennedy J., “The particle swarm: social adaption of knowledge”, Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 303-308, 1997.
- [5] Shi Y., Eberhart R.C., “A modified particle swarm optimizer”, Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 69-73, 1997
- [6] Kennedy J., Eberhart, R.C., Shi Y., “Swarm Intelligence”, Morgan Kaufmann. ISBN 978-1-55860-595-4, 2001.
- [7] Ποτηράκης Αντώνιος, “Ανάπτυξη λογισμικού διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.