



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

Διπλωματική Εργασία

**Βελτιστοποίηση της Αξιοπιστίας του
Σχεδιασμού Φωτοβολταϊκών
Συστημάτων που Ενσωματώνονται σε
Κτήρια**

Τριανταφύλλου Ιωάννης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Αναπλ. Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

Χανιά 2022

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουτρούλη Ευύχιο για την άψογη συνεργασία μας, την επιμονή και τη βοήθεια του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλη την οικογένεια μου, καθώς και τους φίλους μου που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η χρήση των ΑΠΕ έχει γίνει όλο και πιο διαδεδομένη τη σημερινή εποχή και ειδικότερα η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία έχουν την δυνατότητα να ενσωματωθούν εύκολα σε πολλά μέρη. Ένα τέτοιο μέρος είναι οι κατοικίες και γενικότερα τα κτήρια, στα οποία ενσωματώνονται σαν δομικά υλικά κατασκευής. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια πολύ εύκολα για την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου, όμως έχουν το μειονέκτημα ότι η αξιοπιστία της σχεδίασής τους εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων που ενσωματώνονται στα κτήρια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PSO για τη βελτιστοποίηση και ανάλυση Monte-Carlo με σκοπό το σύστημα να «εξαρτάται» όσο το δυνατό λιγότερο από τις καιρικές συνθήκες. Η βελτιστοποίηση έγινε για συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, για συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και δεν έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και για συστήματα που είναι πλήρως αυτόνομα. Η καινοτομία της παρούσας διπλωματικής είναι ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται αντλούνται από μια στοχαστική γεννήτρια καιρού (Stochastic weather generator / SWGEN) που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει τα καιρικά φαινόμενα που επικρατούν στην περιοχή καλύτερα και να παράγει δεδομένα πιο ακριβή από ένα ΤΜΥ (τυπικό μετεωρολογικό έτος) αλλά και η ανάλυση Monte-Carlo που χρησιμοποιείται έτσι ώστε να μειωθεί η εξάρτηση από τα μετεωρολογικά δεδομένα. Σαν αξιοπιστία ορίστηκε η ενέργεια που μπορεί το σύστημα να πουλάει στο δίκτυο όταν είναι συνδεδεμένο με αυτό, ενώ για το αυτόνομο ορίστηκαν οι ώρες κατά τις οποίες το σύστημα δεν μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου. Υλοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές βελτιστοποιήσεις με χρήση SWGEN και παρατηρήθηκε ότι η αξιοπιστία του συστήματος βελτιώνεται δραστικά συγκριτικά με βελτιστοποίηση που γίνεται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα ενός ΤΜΥ.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Γενικά.....	6
1.2 Σύνοψη κεφαλαίων	7
2. ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	8
2.1 Εισαγωγικά	8
2.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα.....	8
2.2.1 Δομικά στοιχεία Φ/Β διάταξης	10
2.2.2 Προσανατολισμός και κλίση Φ/Β συστημάτων	12
2.2.3 Υλικά κατασκευής Φ/Β στοιχείων	14
2.2.4 Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων.....	16
2.3 Αποθήκευση ενέργειας – ηλεκτρικοί συσσωρευτές.....	18
2.4 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών – MPPT.....	21
2.5 Αντιστροφείς	22
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	23
3.1 Εισαγωγικά – Μοντελοποίηση	23
3.1.1 Stochastic Weather Generator.....	25
3.2 Μοντελοποίηση του Φ/Β συστήματος	28
3.2.1 Προσομοίωση Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	36
3.2.2 Προσομοίωση Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	43
3.2.3 Προσομοίωση αυτόνομου συστήματος.....	47
4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	51
4.1 Εισαγωγικά	51
4.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης PSO.....	52
4.2.1 Εισαγωγικά.....	52
4.2.2 Αλγόριθμος.....	52
4.3 Monte Carlo Simulation	54
4.3.1 Γενικά.....	54
4.4 Οι βελτιστοποιήσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία	56
4.4.1 Βελτιστοποίηση #1	56
4.4.2 Βελτιστοποίηση #2	58
4.4.3 Βελτιστοποίηση #3	60
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	63

5.1	Γενικά.....	63
5.2	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #1	65
5.2.1	Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	65
5.2.2	Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο	68
5.2.3	Αυτόνομο Σύστημα	71
5.3	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #2	72
5.3.1	Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	72
5.3.2	Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο	75
5.3.3	Αυτόνομο Σύστημα	78
5.4	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #3	80
5.4.1	Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	80
5.4.2	Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο	83
5.5	Αποτελέσματα με χρήση ΤΜΥ #1	86
5.5.1	Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο	86
5.5.2	Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο	87
5.5.3	Αυτόνομο Σύστημα	89
5.6	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	90
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	95
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	97

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τη σημερινή εποχή γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη η χρήση των ΑΠΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός αυτό έρχεται σε συνδυασμό με την έλλειψη ορυκτών πόρων που χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και του γεγονότος ότι πλέον η επιβάρυνση του περιβάλλοντος έχει φτάσει σε επικίνδυνο σημείο. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία αποτελούν μέρος της τεχνολογίας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνολογία μιας και πλέον έχουν τη δυνατότητα να ενσωματωθούν παντού και να παράγουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται έτσι ώστε να υπάρξει κάλυψη του αναγκαίου φορτίου. Τέτοια περίπτωση είναι και τα φωτοβολταϊκά που ενσωματώνονται σε κτήρια και κατοικίες σαν δομικά υλικά (κεραμιδιά, τζάμια κλπ.). Ένα όμως πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τέτοιες τεχνολογίες είναι ότι η απόδοσή τους εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, ακτινοβολία) της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι η αξιοπιστία τέτοιων συστημάτων επηρεάζεται πολύ εύκολα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να βελτιστοποιήσει την αξιοπιστία του σχεδιασμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων που ενσωματώνονται σε κτήρια. Αρχικά, να αναφερθεί ότι τέτοια συστήματα είναι συστήματα που μπορούν να συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο και έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν ενέργεια σε μπαταρίες, συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο και δεν έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν ενέργεια και πλήρως αυτόνομα συστήματα. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η αξιοπιστία τους εξετάζεται από την ικανότητά τους να πωλούν ηλεκτρική ενέργεια πίσω στο δίκτυο ικανοποιώντας βέβαια το απαιτούμενο τοπικό φορτίο, ενώ για την τρίτη περίπτωση η αξιοπιστία τους εξετάζεται στην ικανότητα του συστήματος να μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου για

όλες τις ώρες λειτουργίας. Οι βελτιστοποιήσεις που υλοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία κάνουν χρήση του αλγορίθμου PSO καθώς και της ανάλυσης Monte Carlo. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι σε βελτιστοποίηση τέτοιων συστημάτων συνήθως γινόταν χρήση δεδομένων καιρού ΤΜΥ, ενώ στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται δεδομένα που παράγει μια στοχαστική γεννήτρια καιρού SWGEN.

1.2 Σύνοψη κεφαλαίων

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αλλά και των δομικών μονάδων που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό.
- Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται η μοντελοποίηση και η προσομοίωση των συστημάτων που μελετήθηκαν καθώς και μια περιγραφή της λειτουργίας της στοχαστικής γεννήτριας καιρού (Stochastic weather generator / SWGEN).
- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και μια περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου PSO και της ανάλυσης Monte Carlo.
- Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις βελτιστοποιήσεις των συστημάτων που υλοποιήθηκαν.
- Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και κάποιες πιθανές επεκτάσεις.

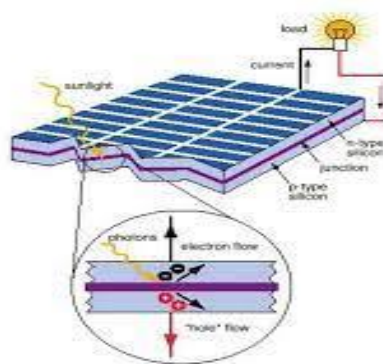
2. ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγικά

Για την σχεδίαση του Φ/Β συστήματος που ενσωματώνεται σε κτήρια χρησιμοποιούνται αρκετά μεμονωμένα μέρη-στοιχεία τα οποία όλα μαζί συνθέτουν το τελικό σύστημα. Κάθε ένα μέρος από αυτά επιτελεί την δική του 'εργασία' ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατασκευής του.

2.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από μία διάταξη από φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η λειτουργία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό είναι η διαδικασία κατά την οποία η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε χημικά στοιχεία που ανήκουν στους ημιαγωγούς και σε διατάξεις που είναι ημιαγώγιμες τεχνητά.



Σχήμα 2.1: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [1].

Την αρχική ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου την έκανε ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel, ενώ άλλοι σπουδαίοι φυσικοί που συνέβαλαν στην εξέλιξή του ήταν μεταξύ άλλων οι Adams, Day, Czochralski, Mott, Scottky, Chapin, Fuller, Pearson. Αρχικά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για διαστημικές εφαρμογές ενώ η πρώτη Φ/Β εγκατάσταση στον κόσμο έγινε από τους Ιάπωνες το 1962 πάνω σε ένα φάρο με ισχύ 242Wp [2].

Η σημαντική εξέλιξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ έχει γίνει κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Πιο συγκεκριμένα, η εξέλιξη των Φ/Β συστημάτων έχει δώσει τη δυνατότητα πλέον να χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά που ενσωματώνονται σε κτηριακές εγκαταστάσεις σαν κεραμίδια (Φ/Β κεραμίδια) ή ακόμα και σαν τζάμια (Φ/Β διάφανα πλαίσια). Αυτό συμβαίνει γιατί η φωτοβολταϊκή τεχνολογία παρέχει πλήθος πλεονεκτημάτων όπως:

- **Μηδενικό Κόστος:** Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η ηλιακή ενέργεια ενώ δε χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες.
- **Μηδενική Μόλυνση του Περιβάλλοντος:** Κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από ανακυκλώσιμα υλικά όπως είναι το γυαλί και το αλουμίνιο ενώ δεν χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, που παράγουν ρυπογόνες ουσίες στο περιβάλλον για να λειτουργήσουν.
- **Ευελιξία:** Μπορούν να επεκταθούν ανά πάσα στιγμή για να καλύψουν ενεργειακά τη νέα ζήτηση.
- **Αυτονομία:** Τοποθετούνται εύκολα σε δυσπρόσιτες περιοχές στις οποίες μπορούν να καλύπτουν όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις.
- **Εγκατάσταση:** Η εγκατάσταση τους είναι εύκολη, για αυτό το λόγο υπάρχουν μέσα στις πόλεις και στα κτήρια.

2.2.1 Δομικά στοιχεία Φ/Β διάταξης

Μία Φ/Β διάταξη αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV cells) τα οποία είναι ηλεκτρικές διατάξεις, οι οποίες με τη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Τα Φ/Β στοιχεία είναι η βασική μονάδα ενός Φ/Β συστήματος μιας και ανάλογα το υλικό κατασκευής τους (συνήθως προσμίξεις πυριτίου) ορίζουν το πόση ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική.



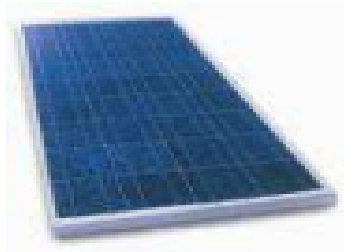
Σχήμα 2.2: Φωτοβολταϊκά στοιχεία [3].

Επειδή τα Φ/Β στοιχεία παρέχουν μικρή τάση στην έξοδο τους χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV modules) τα οποία δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα σύνολο από Φ/Β στοιχεία που είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα με κοινή έξοδο. Τα Φ/Β πλαίσια δίνονται έτοιμα από τον κατασκευαστή και αποτελούν τη βασική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Ένα Φ/Β πλαίσιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ισχύς αιχμής (P_a).
- Τάση σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}).
- Ένταση ρεύματος σε συνθήκες βραχυκύκλωσης (I_{oc}).
- Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_m).
- Ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος (I_m).
- Συντελεστής πλήρωσης (FF), που είναι ορίζεται ως $FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{oc}}$.

Τα χαρακτηριστικά αυτά δίνονται σε Standard Test Conditions (STC) οι οποίες είναι για την ακτινοβολία 1000 W/m^2 και για τη θερμοκρασία $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά Φ/Β πλαίσια, που είναι συνδεδεμένα σε μία ενιαία κατασκευή αποτελούν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array).

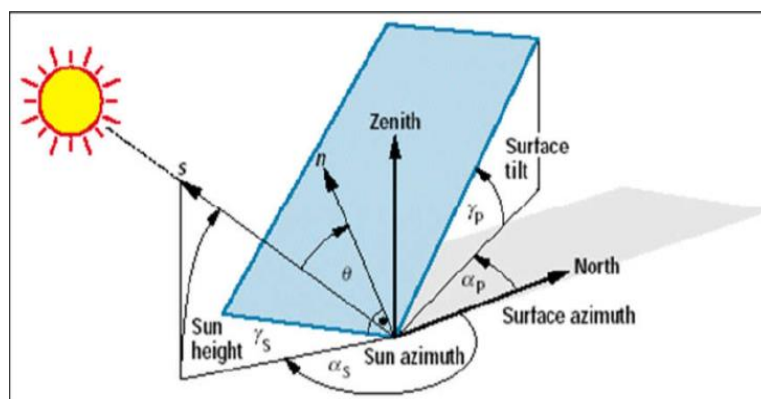


Σχήμα 2.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο [3].

Η απόδοση των Φ/Β συστημάτων εξαρτάται από την τοποθέτησή τους όσον αφορά τον προσανατολισμό και τη γωνία κλίση τους, από το υλικό κατασκευής των Φ/Β στοιχείων που το αποτελούν και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως είναι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία.

2.2.2 Προσανατολισμός και κλίση Φ/Β συστημάτων

Ο προσανατολισμός και η κλίση μιας Φ/Β εγκατάστασης έχει μεγάλο ρόλο στην συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτό συμβαίνει διότι η ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή η ενέργεια που δέχεται η Γη από τον ήλιο, είναι ένα μέγεθος το οποίο καθορίζει την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Ο υπολογισμός λοιπόν της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται και από την κλίση αλλά και από τον προσανατολισμό της Φ/Β εγκατάστασης.



Σχήμα 2.4: Γωνίες για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας [4].

Στην Ελλάδα τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν καλύτερη απόδοση όταν βρίσκονται σε νότιο προσανατολισμό. Σε μια εγκατάσταση σε ένα κτήριο εκτός από την οροφή όπου δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί η βέλτιστη κλίση, όλα τα υπόλοιπα είναι προκαθορισμένα. Η βέλτιστη κλίση είναι θεωρητικά από 25°-35°.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 2.1 με τις θεωρητικές αποδόσεις ενός Φ/Β συστήματος ανάλογα με την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο (β°) και τον προσανατολισμό της Φ/Β συστοιχίας (γ°).

Πίνακας 2.1: Θεωρητικές αποδόσεις στην Ελλάδα ενός Φ/Β συστήματος ως προς την κλίση και τον προσανατολισμό της Φ/Β συστοιχίας [3].

ΚΛΙΣΗ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΝΟΤΙΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ	ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ
0°	~90%	~90%	~90%
15°	~88%	~98%	~95%
30°	~85%	~100%	~95%
90°	~50%	~60%	~60%

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εγκατάσταση σε ένα σπίτι μπορεί να γίνει σε πολλά διαφορετικά μέρη και αυτό φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.5: Διάφοροι τρόποι εγκατάστασης Φ/Β σε κτήριο [3].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για να υπολογιστεί η συνολική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, εκτός από την κλίση και την αζιμούθια γωνία χρειάζονται και άλλες συνιστώσες όπως είναι ο συντελεστής ανάκλασης του δαπέδου, η γωνία του ηλιακού υψομέτρου (α°), το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s°) κλπ.

2.2.3 Υλικά κατασκευής Φ/Β στοιχείων

Ένα βασικό χαρακτηριστικό από το οποίο εξαρτάται η απόδοση των Φ/Β συστημάτων είναι το υλικό από το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα Φ/Β στοιχεία. Έτσι, σύμφωνα με τη υπάρχουσα τεχνολογία το Φ/Β στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια σε ποσοστό που μπορεί να φθάσει 19% ανάλογα με το υλικό κατασκευής του.

Κατά κύριο λόγο δύο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται στο εμπόριο για κατασκευή Φ/Β στοιχείων, το άμορφο και το κρυσταλλικό μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό. Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός και η θεωρητική απόδοση των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν πυρίτιο μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% σε AM1 συνθήκες. Πειραματικά, όμως, έχει αποδειχθεί ότι φθάνει μέχρι 19%. Πρακτικά, τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν απόδοση 10-12%. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται τα θεωρητικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου.

Πίνακας 2.2: Θεωρητικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου [3].

ΤΥΠΟΣ	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας	11-16%	11-19%
Επιφάνεια ανά kWp	7-9 m ²	5.5-9 m ²

Για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιούνται και άλλα χημικά στοιχεία πέρα του πυριτίου όπως είναι το θειούχο κάδμιο (CdS), το αρσενικό γάλλιο (GaAs) και το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe). Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 2.3 με τις θεωρητικές αποδόσεις ημιαγωγών για τη δημιουργία Φ/Β στοιχείων σε AM1 ακτινοβολία δηλαδή σε ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται όταν ο Ήλιος είναι κατακόρυφα πάνω από το οριζόντιο επίπεδο.

Πίνακας 2.3: Θεωρητικές αποδόσεις υλικών για τη δημιουργία Φ/Β στοιχείων [5].

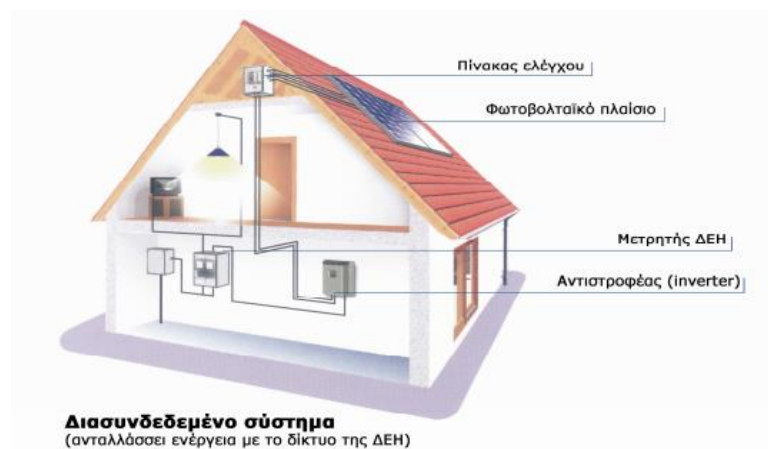
ΥΛΙΚΟ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ AM1
n-Ga _{0.3} Al _{0.7} As/p-GaAs	24%
GaAs	22%
n-AlAs/p-GaAs	18,5%
Si (μονοκρυσταλλικό)	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	16%
Au/Si ₃ N ₄ /p-Si	10%
p-Cu _x S/n-CdS	10%

2.2.4 Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες Φ/Β συστημάτων και αυτές είναι οι εξής:

- **Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο (On-grid with / without batteries):** Τα Φ/Β συστήματα τα οποία είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, σε αυτά που έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν ενέργεια και σε αυτά που δεν έχουν.

Σε αυτά τα συστήματα γενικά η ενέργεια που παράγεται τροφοδοτεί το ηλεκτρικό φορτίο και αν υπάρχει περίσσεια ενέργειας αυτή διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο έναντι μιας τιμής στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μπαταρίες. Στην περίπτωση που υπάρχουν μπαταρίες το σύστημα πρώτα φορτίζει τις μπαταρίες και αν υπάρχει από εκεί περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας τότε αυτή πωλείται στο δίκτυο.



Σχήμα 2.6: Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο [3].

➤ **Αυτόνομο Φ/Β Σύστημα (Off-grid):** Είναι το σύστημα το οποίο μπορεί να λειτουργεί αυτοδύναμα για να τροφοδοτήσει το απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο, χωρίς να συνδέεται με το δίκτυο διανομής ενέργειας από το οποίο θα μπορούσε να αντλεί συμπληρωματική ενέργεια αν χρειαζόταν. Τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα περιλαμβάνουν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) ώστε κατά τη διάρκεια ανυπαρξίας ηλιακής ακτινοβολίας να τροφοδοτούνται από τις μπαταρίες. Στις περιπτώσεις που υπάρχει περίσσεια ενέργειας, φορτίζονται οι μπαταρίες αν έχει μειωθεί η χωρητικότητά τους.

Τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα είναι αρκετά διαδεδομένα σε περιοχές που είναι δύσκολη η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο (π.χ. φάρoi, εξοχικά σπίτια, μετεωρολογικοί σταθμοί κλπ.).



Σχήμα 2.7: Αυτόνομο σύστημα [5].



Σχήμα 2.8: Αυτόνομο Φ/Β σύστημα [3].

- **Υβριδικό Φ/Β Σύστημα:** Είναι ένα Φ/Β σύστημα το οποίο συνδυάζεται με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ενέργειας, π.χ. ανεμογεννήτριες.

2.3 Αποθήκευση ενέργειας – ηλεκτρικοί συσσωρευτές

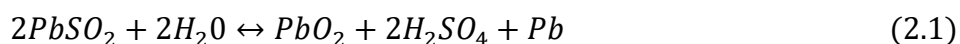
Η ανάγκη για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα Φ/Β συστήματα είναι μεγάλη έτσι ώστε το σύστημα να θεωρείται αξιόπιστο. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του συστήματος είναι πιθανοτικά μεγέθη και μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των χρόνων. Είναι αντιληπτό ότι και σε περιόδους μη-επαρκούς ηλιοφάνειας το Φ/Β σύστημα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση του φορτίου έτσι ώστε να θεωρείται αξιόπιστο. Αυτό ισχύει και για τα αυτόνομα συστήματα όσο και για τα συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Για αυτό το σκοπό στα Φ/Β συστήματα συνδέονται ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς μπαταρίες που αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας που παράγεται.

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις. Τέτοιες είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, το χαμηλό κόστος συντήρησης και αγοράς και η υψηλή αποδοτικότητα. Στο εμπόριο υπάρχουν διάφορων τύπων μπαταρίες όπως είναι Lead acid, Nickel Iron, Zinc Chlorine redox flow, Sodium sulphur και Lithium ion. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται διάφορα χαρακτηριστικά αυτών των τύπων μπαταριών.

Πίνακας 2.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων μπαταριών [6].

Παράμετροι Μπαταρίας	Lead Acid	Nickel Iron	Zinc Chlorine redox flow	Sodium sulphur	Lithium ion
Ονομαστική Τάση (V)	2	1.4	2.12	1.7	3.7
Βαρυμετρική Πυκνότητα (Wh/kg)	30-50	30-55	25	150-240	110-160
Ογκομετρική Πυκνότητα (Wh/L)	100	60-110	-	150-250	245-430
Απόδοση (%)	70-80	65-85	75-86	85-90	95-98
Κύκλος ζωής Μπαταρίας	200-300	3000-4000	1500	2500	3000
Αυτό – εκφόρτιση (%/μήνα)	5	20-40	-	-	2-10

Έχει παρατηρηθεί ότι οικονομικότερες για τη χρήση σε Φ/Β συστήματα είναι οι μόλυβδου οξέος μπαταρίες (Lead Acid). Η λειτουργία τους βασίζεται σε μια αμφίδρομη χημική διαδικασία:



Το φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει μια μπαταρία, δηλαδή η χωρητικότητά της, δίνεται από τον τύπο:

$$C = I * t \quad (2.2)$$

όπου:

- C: η χωρητικότητα σε Ah.
- I: η ένταση του ρεύματος σε A.
- t: ο χρόνος σε h.

Επίσης, η ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης δίνεται από τον τύπο:

$$E = C * V \quad (2.3)$$

όπου:

- E: η ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης σε Wh.
- V: η ονομαστική τάση σε V.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται με την πάροδο των χρόνων και όταν μειωθεί κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης θεωρείται μη-λειτουργική.

2.4 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών – MPPT

Τα Φ/Β συστήματα για να έχουν αυξημένη απόδοση και καλή λειτουργία υποβοηθούνται από ειδικές διατάξεις, ηλεκτρονικά ισχύος, οι οποίες επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η Φ/Β γεννήτρια. Ένα από αυτά είναι οι ρυθμιστές φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας (Charge controllers), οι οποίοι είναι διατάξεις που παρέχουν σταθερή τάση στον συσσωρευτή μιας και η τάση εξόδου της Φ/Β συστοιχίας μεταβάλλεται με τις καιρικές συνθήκες.

Οι ρυθμιστές φόρτισης της μπαταρίας προστατεύουν στην ουσία τις μπαταρίες καθώς:

- παρακολουθούν την θερμοκρασία τους ώστε να μην υπερθερμανθούν.
- ορίζουν τον ρυθμό με τον οποίο φορτίζονται και εκφορτίζονται οι μπαταρίες.
- στις περιπτώσεις που αυτό-εκφορτίζονται οι μπαταρίες ξεκινούν αυτόματα τη διαδικασία φόρτισης τους.

Οι ρυθμιστές φόρτισης που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σήμερα είναι οι ρυθμιστές Διαμόρφωσης Παλμικού Εύρους (PWM) και οι ρυθμιστές ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

Οι ρυθμιστές MPPT είναι μετατροπείς DC/DC που έχουν ως σκοπό κάθε στιγμή το σύστημα να αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Στην ουσία ο ρυθμιστής φόρτισης MPPT διατηρεί το σημείο λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας έτσι ώστε αυτό να είναι το εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος της, καθώς μεταβάλλονται η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

2.5 Αντιστροφείς

Ένα Φ/Β σύστημα δίνει στην έξοδο του συνεχές ρεύμα (DC) σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές στην Ελλάδα που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Για τη μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο χρησιμοποιούνται οι DC/AC αντιστροφείς που επιτελούν ακριβώς αυτή τη διαδικασία.



Σχήμα 2.9: Αντιστροφείς DC/AC [3].

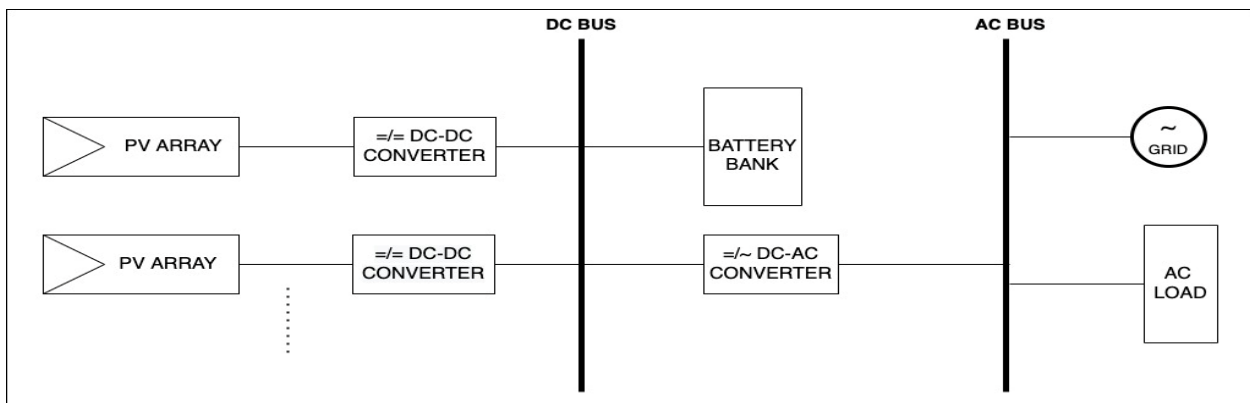
Ένας ιδανικός αντιστροφέας (inverter) μετατρέπει το συνεχές σε ημιτονοειδές με σταθερό πλάτος, σταθερή συχνότητα και χωρίς απώλειες.

Αυτό που χαρακτηρίζει έναν μετατροπέα DC/AC είναι ο βαθμός απόδοσης μετατροπής ισχύος (η_i). Ο βαθμός απόδοσης όταν λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ του ο αντιστροφέας φτάνει μέχρι και 95%, ενώ σε διαφορετική περίπτωση είναι μειωμένος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε ότι είναι ίσος με 90%.

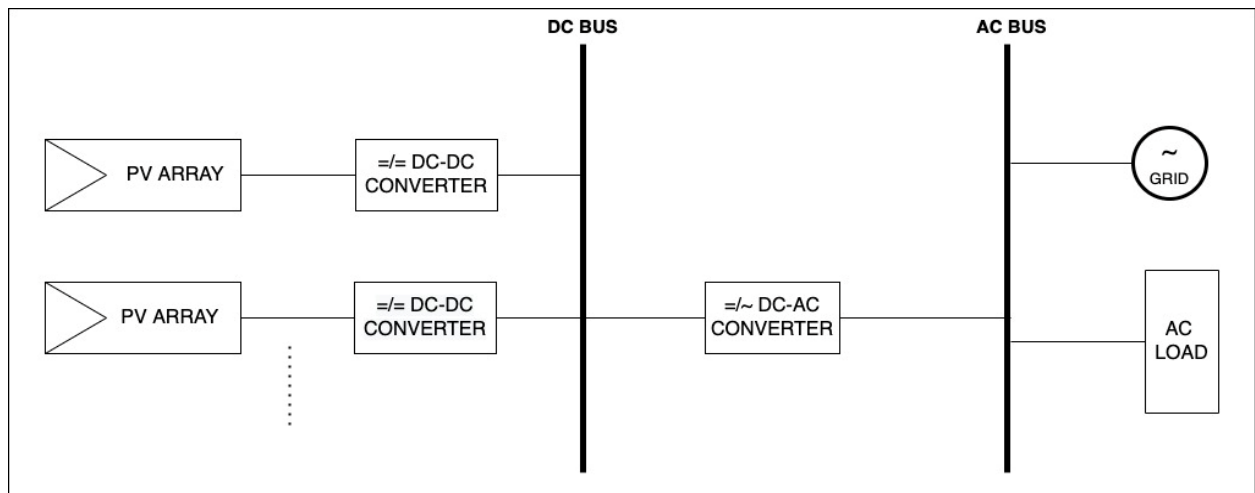
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

3.1 Εισαγωγικά – Μοντελοποίηση

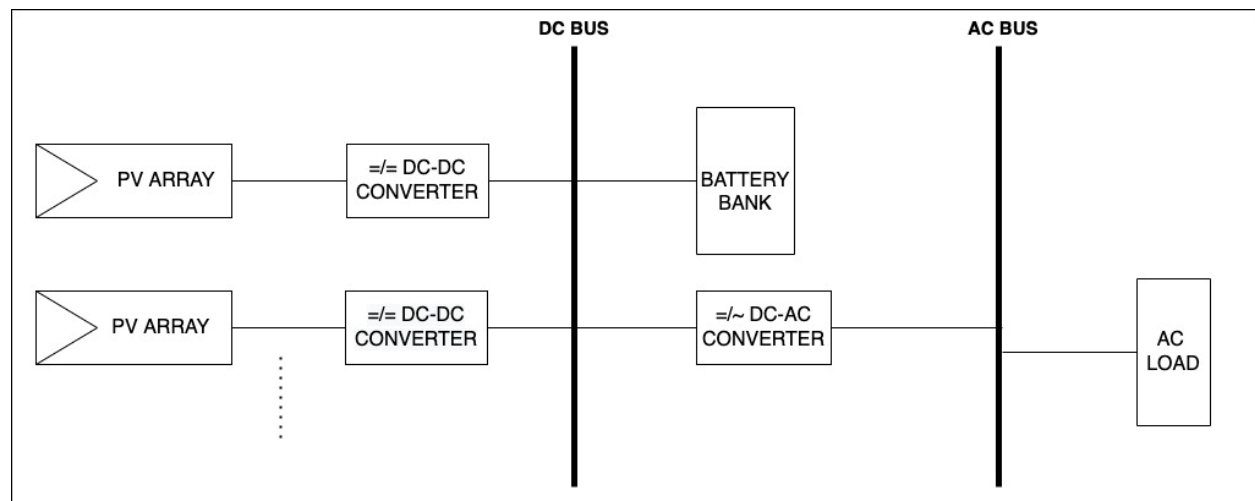
Η τεχνολογία των Φ/Β συστημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργειακή κάλυψη μιας ολόκληρης κατοικίας είτε αυτή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο (on-grid), με ή χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, είτε είναι αυτόνομη (off-grid) δηλαδή δεν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο. Η δομή τους φαίνεται ξεκάθαρα στα Σχήματα 3.1-3.3.



Σχήμα 3.1: Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το δίκτυο.



Σχήμα 3.2: Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το δίκτυο.



Σχήμα 3.3: Αυτόνομο Σύστημα.

Τα Φ/Β συστήματα είναι ευάλωτα στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών καθώς εξαρτώνται τόσο από τη θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή εγκατάστασης όσο και από την ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται. Για αυτό το λόγο πρέπει να βρεθεί τρόπος ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία τους. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση μιας Στοχαστικής Γεννήτριας Καιρού (Stochastic Weather Generator / SWGEN).

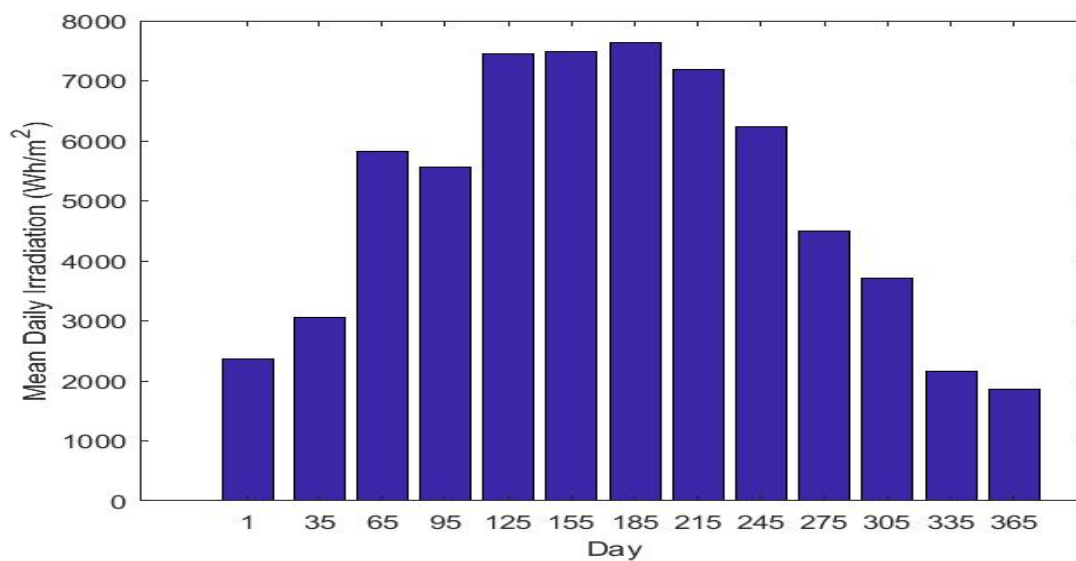
3.1.1 Stochastic Weather Generator

Τη σημερινή εποχή οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας εισέρχονται όλο και περισσότερο στην ζωή των ανθρώπων μιας και με αυτόν τον τρόπο μειώνεται τόσο η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα όσο και το κόστος που υπάρχει για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η αξιοπιστία όμως στα συστήματα αυτά είναι ευαίσθητη στις καιρικές συνθήκες καθώς μπορεί να παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές από ώρα σε ώρα. Οι μεταβολές αυτές έχουν επίπτωση στο σχεδιασμό του συστήματος και στο πόσα Φ/Β πάνελ, μπαταρίες και inverters θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του. Επομένως, για να λειτουργήσει σωστά και αξιόπιστα ένα Φ/Β σύστημα πρέπει να γίνει χρήση των κατάλληλων μετεωρολογικών δεδομένων κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του.

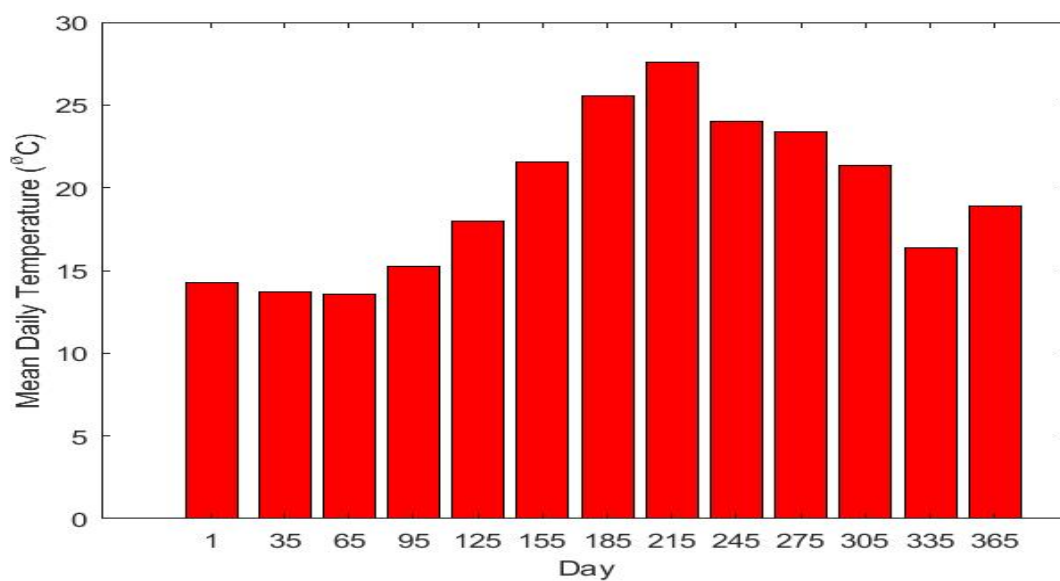
Τα Φ/Β συστήματα που ενσωματώνονται σε κτήρια χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο μετεωρολογικά δεδομένα ενός Τυπικού Μετεωρολογικού Έτους (ΤΜΥ). Ένα τυπικό μετεωρολογικό έτος είναι μια συνένωση δεδομένων για κάθε ώρα ενός έτους για μια δεδομένη γεωγραφική τοποθεσία. Τα δεδομένα αυτά επιλέγονται από ωριαία δεδομένα μιας μεγαλύτερης χρονικής περιόδου (συνήθως δέκα έτη). Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται οι μήνες από τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο που αντιπροσωπεύουν καλύτερα τις μέσες συνθήκες. Για παράδειγμα, για ένα ΤΜΥ που αναπτύσσεται από ένα σύνολο δεδομένων για τα έτη 2006-2016 θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει δεδομένα από το 2008 για τον Ιανουάριο, από το 2011 για το Φεβρουάριο κλπ. Ένα όμως σημαντικό μειονέκτημα του ΤΜΥ είναι ότι δεν αναπαράγει τις πραγματικές διακυμάνσεις που μπορεί να υπάρχουν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του Φ/Β συστήματος όσον αφορά τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία, κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του μήνα.

Εκτός του τυπικού μετεωρολογικού έτους έχουν χρησιμοποιηθεί και Στοχαστικές Γεννήτριες Καιρού (SWGGEN) που δίνουν την δυνατότητα για εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με το κλίμα με την προσομοίωση μεγάλων ακολουθιών καιρικών συνθηκών [7]. Οι προσομοιωμένες καιρικές ακολουθίες που περιέχουν (πχ. η βροχόπτωση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου κλπ.), χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε περίπλοκα περιβαλλοντολογικά και οικολογικά μοντέλα. Ιστορικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα που βοηθούν την γεωργία και την πρόβλεψη καιρού για την

καλύτερη παραγωγή. Αυτές οι στοχαστικές γεννήτριες καιρού χωρίζονται σε παραμετρικά και μη-παραμετρικά μοντέλα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που παράγει η Στοχαστική Γεννήτρια Καιρού που έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο της εργασίας [7], η οποία έχει τα πλεονεκτήματα των παραμετρικών και των μη-παραμετρικών μοντέλων προκειμένου να δημιουργηθούν ρεαλιστικές ωριαίες χρονοσειρές. Η χρησιμοποιούμενη SWGEN δεν θα μπορούσε να μοντελοποιήσει όλα τα δεδομένα για τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία σε ωριαία κλίμακα βασισμένη σε ένα πλήρως παραμετρικό μοντέλο καθώς δεν θα μπορούσε να μοντελοποιήσει τις διακυμάνσεις που θα υπήρχαν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Έτσι, βασίζεται σε ένα παραμετρικό μοντέλο Markov Switching AutoRegressive (MSAR) για τη μοντελοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων σε ημερήσιο επίπεδο. Το παραμετρικό μοντέλο κάνει χρήση του Expectation-Maximization (EM) αλγορίθμου. Ο EM αλγόριθμος είναι ένας αλγόριθμος που βρίσκει τη μέγιστη πιθανοφάνεια (μέγιστη εκτίμηση δεδομένων από ένα σύνολο δεδομένων και στατιστικών μοντέλων). Πιο συγκεκριμένα, το παραμετρικό μοντέλο κάνει χρήση του EM αλγορίθμου με σκοπό να βρει τη μέγιστη πιθανοφάνεια για τα δεδομένα καιρού της περιοχής εγκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη και τις καιρικές συνθήκες της περιοχής δηλαδή κάποια καιρικά φαινόμενα που συμβαίνουν στην περιοχή εγκατάστασης. Υστέρα, χρησιμοποιεί ένα μη-παραμετρικό μοντέλο που βασίζεται στον αλγόριθμο K-Nearest Neighbors (K-NN) για την προσομοίωση των καιρικών συνθηκών σε ωριαία κλίμακα. Στο μη-παραμετρικό μοντέλο δεδομένων των καιρικών συνθηκών για μια χρονική στιγμή $t-1$, ένας από τους «K γείτονες» με παρόμοιες καιρικές συνθήκες δειγματοληπτούνται στη βάση με τα δεδομένα και η επόμενη χρονική στιγμή t έχει τις κατάλληλες προσομοιωμένες καιρικές συνθήκες. Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 φαίνονται παραδείγματα του πως κυμαίνεται η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία και θερμοκρασία, βασισμένες στις ωριαίες τιμές μιας πιθανής χρονοσειράς μετεωρολογικών δεδομένων που παράγονται από τη SWGEN που χρησιμοποιήθηκε, για την περιοχή εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα τιμών μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας που παράγεται από τη SWGEN που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα τιμών μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας που παράγονται από τη SWGEN που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

3.2 Μοντελοποίηση του Φ/B συστήματος

Η μοντελοποίηση του Φ/B συστήματος που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη. Αρχικά, υπολογίζονται πόσα Φ/B πλαίσια θα χρειαστούν στην εγκατάσταση, βάση του εμβαδού των επιφανειών του κτηρίου αλλά και των επιφανειών των Φ/B πλαισίων. Τα Φ/B που χρησιμοποιούνται είναι συμβατικά, διαφανή Φ/B πλαίσια για τις διαφανείς επιφάνειες του κτηρίου (πχ. τζάμια) και Φ/B κεραμίδια που θα εγκατασταθούν στην οροφή του κτηρίου. Έπειτα, βάση των χαρακτηριστικών των εκάστοτε Φ/B πλαισίων, των γωνιών εγκατάστασης, του προσανατολισμού και της ακτινοβολίας που δίνει η Στοχαστική Γεννήτρια Καιρού υπολογίζεται η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Με βάση την ολική ακτινοβολία που έχει υπολογιστεί για κάθε επιφάνεια στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική παραγόμενη ενέργεια για κάθε Φ/B πλαίσιο με τη βοήθεια των τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που δίνει η SWGEN.

Αφού γίνει ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας, υπολογίζονται βάση των χαρακτηριστικών των Φ/B, πόσοι ρυθμιστές τάσης με MPPT θα χρησιμοποιηθούν για κάθε είδος Φ/B πλαισίου (διάφανα, συμβατικά, τύπου κεραμιδιού) και πόσα Φ/B πλαίσια θα αποτελούν μια συστοιχία. Η Φ/B συστοιχία κάθε είδους χωρίζεται σε N_s Φ/B πλαίσια που συνδέονται σε σειρά και σε N_p κλάδους που συνδέονται παράλληλα. Ανάλογα τώρα με τη ονομαστική τάση εξόδου και την ονομαστική ισχύ των Φ/B στοιχείων και των χαρακτηριστικών των ρυθμιστών τάσης υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των ρυθμιστών τάσης, τα Φ/B πλαίσια που θα είναι συνδεδεμένα σε σειρά και οι κλάδοι που συνδέονται παράλληλα. Αν η τάση ενός Φ/B πλαισίου στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mpp}) είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τάση εισόδου ($V_{min,in}$) και μικρότερη από την μέγιστη τάση εισόδου ($V_{max,in}$) του ρυθμιστή φόρτισης τότε ένα Φ/B πλαίσιο θα είναι σε σειρά και τα υπόλοιπα θα είναι παράλληλοι κλάδοι Φ/B πλαισίων. Αν η V_{mpp} είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση εισόδου ($V_{max,in}$) του ρυθμιστή φόρτισης τότε το Φ/B σύστημα δεν λειτουργεί, ενώ αν η V_{mpp} είναι μικρότερη από την ελάχιστη τάση εισόδου ($V_{min,in}$) τότε τα Φ/B πλαίσια που συνδέονται σε σειρά υπολογίζονται ως εξής:

$$N_s = floor \left(\frac{V_{max,in}}{V_{mpp}} \right) \quad (3.1)$$

Άρα ο αριθμός κλάδων Φ/Β πλαισίων που θα συνδεθούν παράλληλα είναι:

$$N_p = \text{floor} \left(\frac{N_{\Phi B}}{N_s} \right) \quad (3.2)$$

όπου:

- $N_{\Phi B}$: ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων του εκάστοτε είδους που δίνει ως είσοδο ο αλγόριθμος για κάθε επιφάνεια.

Ενώ ο τελικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων του εκάστοτε είδους στη συστοιχία υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{pv} = N_s * N_p \quad (3.3)$$

Αν η συνολική ισχύ που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια κάθε είδους είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του ρυθμιστή φόρτισης τότε ένας ρυθμιστής δεν αρκεί οπότε η συστοιχία χωρίζεται σε μικρότερες συστοιχίες. Ο αριθμός ρυθμιστών που χρειάζονται υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{ch} = \text{ceil} \left(\frac{P_{pv,nom} * N_{pv}}{P_{ch}} \right) \quad (3.4)$$

όπου:

- N_{ch} : ο αριθμός των ρυθμιστών φόρτισης τύπου MPPT που χρησιμοποιούνται
- $P_{pv,nom}$: η ονομαστική ισχύς του εκάστοτε Φ/Β πλαισίου που χρησιμοποιείται.
- P_{ch} : η ονομαστική ισχύς του ρυθμιστή φόρτισης τύπου MPPT.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων κάθε είδους που τοποθετούνται ανά συστοιχία:

$$N_{t,ch} = \text{floor} \left(\frac{N_{\Phi B}}{N_{ch}} \right) \quad (3.5)$$

όπου:

- $N_{t,ch}$: συνολικός αριθμός Φ/Β πλαισίων κάθε είδους ανά συστοιχία.

Ο αριθμός κλάδων Φ/Β πλαισίων που θα συνδεθούν παράλληλα σε κάθε συστοιχία υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{p,ch} = \text{floor}\left(\frac{N_{t,ch}}{N_s}\right) \quad (3.6)$$

όπου:

- $N_{p,ch}$: ο αριθμός παράλληλων κλάδων Φ/Β πλαισίων σε κάθε συστοιχία.
- N_s : ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που συνδέονται σε σειρά σε κάθε κλάδο της συστοιχίας.

Έτσι, ο τελικός αριθμός Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται από κάθε είδος υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$N_{total} = N_{ch} * N_{p,ch} * N_s \quad (3.7)$$

όπου:

- N_s : ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που συνδέονται σε σειρά σε κάθε κλάδο της συστοιχίας.
- N_{ch} : ο συνολικός αριθμός των ρυθμιστών τάσης τύπου MPPT που χρησιμοποιούνται για κάθε είδος Φ/Β πλαισίου.

Η τελική ισχύς που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια κάθε είδους (διάφανα, Φ/Β οροφής, συμβατικά) ανά ώρα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{pv} = N_{total} * P_{mpp} \quad (3.8)$$

όπου:

- P_{mpp} : η ωριαία παραγόμενη ισχύς MPP από κάθε Φ/Β πλαίσιο κάθε είδους.

Επίσης, γίνεται και ο υπολογισμός των συνολικών αντιστροφών DC/AC που θα χρειαστούν. Ο συνολικός αριθμός τους εξαρτάται από το φορτίο το οποίο τροφοδοτεί το Φ/Β σύστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, προκύπτει ότι:

$$N_{tot,inv} = ceil \left(\frac{Max(load)}{P_{nom,inv} * n_i} \right) \quad (3.9)$$

όπου:

- $Max(load)$: το μέγιστο ημερήσιο τοπικό φορτίο.
- $load$: το ημερήσιο ωριαίο φορτίο σε W.
- $P_{nom,inv}$: η ονομαστική DC ισχύς του αντιστροφέα.
- n_i : ο βαθμός απόδοσης μετατροπής ισχύος του αντιστροφέα.

Στην μοντελοποίηση του συστήματος υπολογίζονται και ο αναγκαίος αριθμός μπαταριών που χρειάζεται το σύστημα εκτός και αν δεν διαθέτει (συνδεδεμένο στο δίκτυο χωρίς μπαταρίες). Ο απαιτούμενος αριθμός τους εξαρτάται και από την ονομαστική τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης. Έτσι έχουμε:

$$n_{b,s} = ceil \left(\frac{V_{out,ch}}{V_{bn}} \right) \quad (3.10)$$

όπου :

- $n_{b,s}$: αριθμός μπαταριών σε σειρά.
- $V_{out,ch}$: η ονομαστική τάση εξόδου του ρυθμιστή φόρτισης των μπαταριών.
- V_{bn} : ονομαστική τάση μπαταρίας.

Και επίσης:

$$n_{b,p} = \text{ceil} \left(\frac{N_b}{n_{b,s}} \right) \quad (3.11)$$

όπου:

- $n_{b,p}$: αριθμός κλάδων μπαταριών που συνδέονται παράλληλα.
- N_b : ο συνολικός αριθμός μπαταριών που διαθέτει το Φ/Β σύστημα και ο οποίος προκύπτει κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Ο υπολογισμός της συνολικής χωρητικότητας των μπαταριών πραγματοποιείται ως εξής:

$$C_{tot} = n_{b,p} * C_n \quad (3.12)$$

όπου:

- C_{tot} : η συνολική χωρητικότητα σε Ah.
- C_n : η ονομαστική χωρητικότητα κάθε μπαταρίας.

Στο τέλος του βασικού σταδίου προσομοίωσης γίνεται ο συνολικός υπολογισμός της ισχύος που παράγεται από το Φ/Β σύστημα για όλη τη χρονική περίοδο που το εξετάζουμε, ενώ επίσης υπολογίζεται και η υπολειπόμενη ισχύς για κάθε ώρα ύστερα από την κατανάλωση του φορτίου.

Η συνολική ισχύς που παράγεται από όλα τα Φ/Β πλαίσια κάθε είδους που χρησιμοποιούνται, υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{pv} = \sum^{N_{roof}} P_{pv,roof} + \sum^{N_{transp}} P_{pv,transp} + \sum^{N_{conv}} P_{pv,conv} \quad (3.13)$$

όπου:

- $P_{pv,roof}$: η ισχύς που παράγουν τα Φ/Β κεραμίδια.
- $P_{pv,transp}$: η ισχύς που παράγουν τα συμβατικά Φ/Β πλαίσια.
- $P_{pv,conv}$: η ισχύς που παράγουν τα διάφανα Φ/Β πλαίσια.
- N_{roof} : ο συνολικός αριθμός Φ/Β πλαισίων που τοποθετούνται στην οροφή.
- N_{transp} : ο συνολικός αριθμός διαφανών Φ/Β πλαισίων.
- N_{conv} : ο συνολικός αριθμός συμβατικών Φ/Β πλαισίων.

Επίσης, υπολογίζεται και η ισχύς μετά τη χρήση ρυθμιστών τάσης:

$$P_{pv,ch} = n_s * P_{pv} \quad (3.14)$$

όπου:

- n_s : ο βαθμός απόδοσης των ρυθμιστών φόρτισης μπαταριών.

Υπολογίζεται, επίσης, η ισχύς που παράγεται για κάθε ώρα για τα υπόλοιπα χρόνια λειτουργίας του συστήματος αφού τα Φ/Β πλαίσια χάνουν απόδοση μετά το πρώτο έτος λειτουργίας τους. Η απόδοση τους πέφτει ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο έχουν κατασκευαστεί. Παρακάτω φαίνεται το παράδειγμα υπολογισμού για τα συμβατικά Φ/Β πλαίσια μετά τις πρώτες 8760 ώρες (πρώτο έτος) λειτουργίας του συστήματος.

$$P_{pv,conv}(t) = P_{pv,conv}(t) * (1 - r_{disc}) \quad (3.15)$$

όπου:

- r_{disc} : ετήσια ποσοστιαία πτώση παραγωγής ισχύος των Φ/Β πλαισίων.

Στο τέλος, υπολογίζεται και η διαφορά ισχύος στην είσοδο του αντιστροφέα και της ισχύος στην έξοδο των ρυθμιστών τάσης:

$$P_{bb} = P_{ld} - P_{pv,ch} \quad (3.16)$$

όπου:

- P_{ld} : η ισχύς στην είσοδο του αντιστροφέα.

Το P_{bb} εκφράζει την ισχύ μετά την κατανάλωση του φορτίου και δείχνει αν περισσεύει ενέργεια έπειτα από την κατανάλωση ή αν χρειάζονται οι μπαταρίες για την κάλυψη του φορτίου ή αγορά ενέργειας από το δίκτυο.

Η ισχύς στην είσοδο του αντιστροφέα υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{ld} = \frac{P_{load}}{n_i} \quad (3.17)$$

όπου:

- n_i : είναι ο συντελεστής απόδοσης του μετατροπέα DC/AC.
- P_{load} : η ωριαία κατανάλωση του φορτίου.

Στο τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης του συστήματος υπολογίζεται το κόστος εξοπλισμού, $C_{total, equip}$, και το κόστος συντήρησης για το πρώτο έτος.

$$C_{pv} = N_{transp} * C_{transp} + N_{conv} * C_{conv} + N_{roof} * C_{roof} \quad (3.18)$$

$$C_{equip} = N_{tot, inv} * C_{inv} + N_b * C_{bat} + N_{ch, total} * C_{ch} \quad (3.19)$$

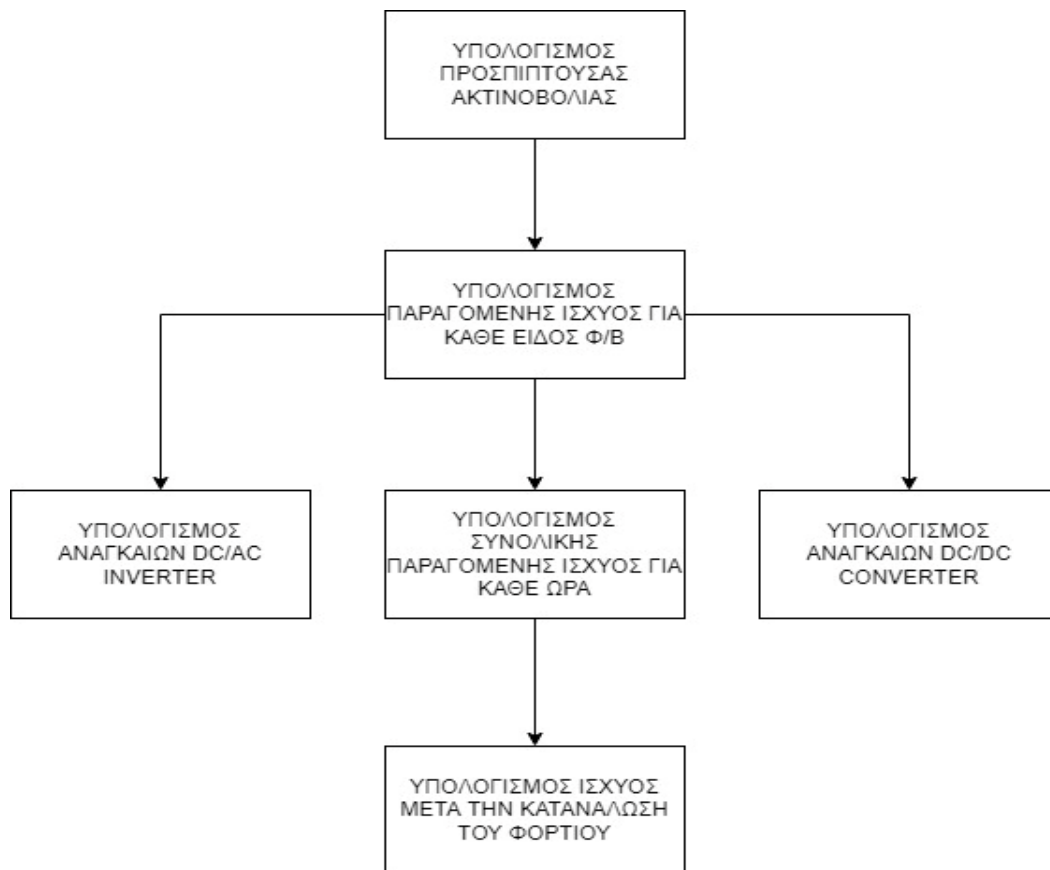
$$C_{total, equip} = C_{pv} + C_{equip} \quad (3.20)$$

$$C_{maint} = C_{total, equip} * 0.05 \quad (3.21)$$

όπου:

- C_{transp} : κόστος διάφανου Φ/Β πλαισίου.
- C_{conv} : κόστος συμβατικού Φ/Β πλαισίου.
- C_{roof} : κόστος για κάθε ένα από τα Φ/Β πλαίσια τύπου κεραμιδιού.
- C_{inv} : κόστος αντιστροφes DC/AC.
- C_{bat} : κόστος μπαταρίας.
- C_{ch} : κόστος ρυθμιστών φόρτισης μπαταριών.
- C_{maint} : συνολικό κόστος συντήρησης για το πρώτο έτος λειτουργίας.
- N_{roof} : ο συνολικός αριθμός Φ/Β πλαισίων που τοποθετούνται στην οροφή.
- N_{transp} : ο συνολικός αριθμός διάφανων Φ/Β πλαισίων.
- N_{conv} : ο συνολικός αριθμός συμβατικών Φ/Β πλαισίων.
- $N_{tot, inv}$: ο συνολικός αριθμός αντιστροφέων DC/AC.
- $N_{ch, total}$: ο συνολικός αριθμός ρυθμιστών φόρτισης μπαταριών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα.
- N_b : ο συνολικός αριθμός μπαταριών.

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μοντελοποίησης του Φ/Β συστήματος, τα βήματα της οποίας περιγράφηκαν προηγουμένως. Αρχικά, υπολογίζεται η συνολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια κάθε είδους. Υπολογίζεται ο αναγκαίος αριθμός αντιστροφέων και ρυθμιστών φόρτισης ενώ στο τέλος υπολογίζεται και η ισχύς μετά την κατανάλωση του φορτίου για κάθε ώρα λειτουργίας του Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης Φ/Β συστήματος.

3.2.1 Προσομοίωση Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος προσομοιώνει τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος για 175200 ώρες δηλαδή για 20 χρόνια και υπολογίζει την ισχύ που αποθηκεύεται ή καταναλώνεται από τις μπαταρίες, τη συνολική ενέργεια που πωλείται ή αγοράζεται από το δίκτυο, τις συνολικές ώρες κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο καθώς και το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα τα βήματα είναι τα εξής:

- Αν $P_{bb} \leq 0$ τότε το σύστημα προσπαθεί να φορτίσει τις μπαταρίες με το περίσσειμα ισχύος, αν χρειάζονται, διαφορετικά πουλάει ενέργεια στο δίκτυο.
- Αν $P_{bb} > 0$ τότε το σύστημα απορρόφα ισχύ από τις μπαταρίες με σκοπό να καλύψει τις απαιτήσεις του φορτίου. Σε περίπτωση όμως που οι μπαταρίες δεν αρκούν και η χωρητικότητα τους πέφτει κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό όριο εκφόρτισης τότε το σύστημα αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο.

Όσον αφορά τις μπαταρίες στο σύστημα ισχύουν τα εξής:

- Αν υπάρχει περίσσεια ισχύος τότε αυτή αρχικά χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών, με βαθμό απόδοσης φόρτισης 0.9. Την πρώτη ώρα λειτουργίας των μπαταριών η χωρητικότητά τους ορίζεται ίση με τη μισή της ονομαστικής χωρητικότητας.

$$C(t) = C(t-1) - \frac{n_c * P_{bb}(t)}{V_b * n_{b,s}} * \Delta t \quad (3.22)$$

όπου:

- $C(t-1)$: κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (σε Ah) την προηγούμενη ώρα λειτουργίας του συστήματος.
- n_c : βαθμός απόδοσης φόρτισης.
- V_b : ονομαστική τάση της μπαταρίας.
- $n_{b,s}$: το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά.
- Δt : χρονικό βήμα προσομοίωσης (1h).

Μετά τη φόρτιση ελέγχεται ξανά η κατάσταση της χωρητικότητας των μπαταριών και αν είναι ίση με την μέγιστη χωρητικότητα, C_{tot} , τότε αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες έχουν φορτιστεί πλήρως. Αν, όμως η νέα κατάσταση της χωρητικότητας των μπαταριών είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, C_{tot} , τότε αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίσσεια ενέργεια και αυτή θα πωληθεί στο δίκτυο. Αρχικά, ενημερώνεται ο

μετρητής που δείχνει ότι πωλήθηκε ενέργεια για αυτή την ώρα λειτουργίας και στη συνέχεια υπολογίζεται το πλεόνασμα ισχύος.

$$P_{sell}(t) = \frac{(C(t) - C_{tot}) * V_b * n_{b,s} * n_i}{\Delta t} \quad (3.23)$$

όπου:

- $C(t)$: η κατάσταση φόρτισης (σε Ah) μετά τη πλήρη φόρτιση των μπαταριών.
- C_{tot} : η συνολική χωρητικότητα.
- V_b : η ονομαστική τάση της μπαταρίας.
- n_i : ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.
- $n_{b,s}$: το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά.
- Δt : το χρονικό βήμα (1h).

Έπειτα, η κατάσταση της χωρητικότητας των μπαταριών τίθεται ίση με τη μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, C_{tot} .

- Αν δεν υπάρχει περίσσεια ισχύος τότε χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες για την κάλυψη του φορτίου. Ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης ορίζεται ίσος με 0.9, ενώ την πρώτη ώρα λειτουργίας των μπαταριών η χωρητικότητα τους ορίζεται ίση με τη μισή της ονομαστικής χωρητικότητας.

$$C(t) = C(t-1) - \frac{\frac{P_{bb}(t)}{n_d}}{V_b * n_{b,s}} * \Delta t \quad (3.24)$$

όπου:

- $C(t-1)$: κατάσταση φόρτισης (σε Ah) της μπαταρίας την προηγούμενη ώρα λειτουργίας του συστήματος.
- $P_{bb}(t)$: η ισχύς που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου.

- n_d : βαθμός απόδοσης εκφόρτισης (0.9).
- V_b : ονομαστική τάση της μπαταρίας.
- $n_{b,s}$: το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά.
- Δt : χρονικό βήμα (1h).

Μετά την εκφόρτιση ελέγχεται πάλι η κατάσταση φόρτισης (σε Ah) των μπαταριών και αν είναι μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης των μπαταριών τότε αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί και δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο και χρειάζεται επιπλέον ενέργεια από το δίκτυο. Αρχικά, ενημερώνεται ο μετρητής που δείχνει ότι δεν πωλήθηκε ενέργεια στο δίκτυο και στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς που απαιτείται ως εξής:

$$P_{buy}(t) = \frac{(C_{tot} * SOC_{min} - C(t)) * V_b * n_{b,s} * n_i}{\Delta t} \quad (3.25)$$

Επίσης, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τίθεται ίση με τη ελάχιστη επιτρεπτή, βάση του μέγιστου επιτρεπτού βάθους εκφόρτισης:

$$C(t) = C_{tot} * SOC_{min} \quad (3.26)$$

όπου:

- SOC_{min} : μέγιστο επιτρεπτό όριο εκφόρτισης.

Κάθε 365 μέρες, δηλαδή κάθε χρόνο προσομοίωσης, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που έχει πωληθεί στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που έχει αγοραστεί από το δίκτυο και η παρούσα αξία του καθαρού οικονομικού κόστους του συστήματος με βάση το κόστος συντήρησης, την ενέργεια που αγόρασε και την ενέργεια που πούλησε στο δίκτυο το αντίστοιχο έτος λειτουργίας του Φ/Β συστήματος:

$$E_{total,buy} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{buy}(t)}{1000} \quad (3.27)$$

$$E_{total,sell} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{sell}(t)}{1000} \quad (3.28)$$

$$C_{year} = (C_{maint} + C_{pbuy}) - C_{psell} \quad (3.29)$$

όπου:

- $E_{total,buy}$: η συνολική ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο.
- $E_{total,sell}$: η συνολική ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο.
- C_{year} : η παρούσα αξία του καθαρού οικονομικού κόστους ή κέρδους του συστήματος για ένα χρόνο λειτουργίας.
- C_{pbuy} : το συνολικό κόστος σε € για την ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο.
- C_{psell} : το συνολικό κέρδος σε € για την ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο.

και:

$$C_{pbuy}(y) = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{buy}(t)}{1000} * C_{buy}(y) \quad (3.30)$$

$$C_{psell}(y) = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{sell}(t)}{1000} * C_{sell}(y) \quad (3.31)$$

όπου:

- y : ο χρόνος λειτουργίας του Φ/Β συστήματος.
- C_{buy} : η τιμή αγοράς ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο σε €/kWh.
- C_{sell} : η τιμή πώλησης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο σε €/kWh.

Αν το C_{year} υπολογιστεί μικρότερο του μηδενός σημαίνει ότι συνολικά το σύστημα είχε κέρδος ενώ αν υπολογιστεί μεγαλύτερο του μηδενός τότε αυτό σημαίνει ότι το κόστος συντήρησης και το κόστος της ενέργειας που αγοράστηκε είναι μεγαλύτερο από το οικονομικό κέρδος που προέκυψε από την πώληση ενέργειας.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της kWh με την οποία πουλάει και αγοράζει το σύστημα ενέργεια δεν είναι κάθε χρόνο ίδια μιας και εξαρτάται από το επιτόκιο και τον πληθωρισμό. Παρακάτω φαίνεται ο υπολογισμός της παρούσας αξίας της τιμής αγοράς και πώλησης ενέργειας κάθε έτος:

$$C_{buy}(y) = C_{buy}(1) * \frac{(1 + g)^y}{(1 + i)^y} \quad (3.32)$$

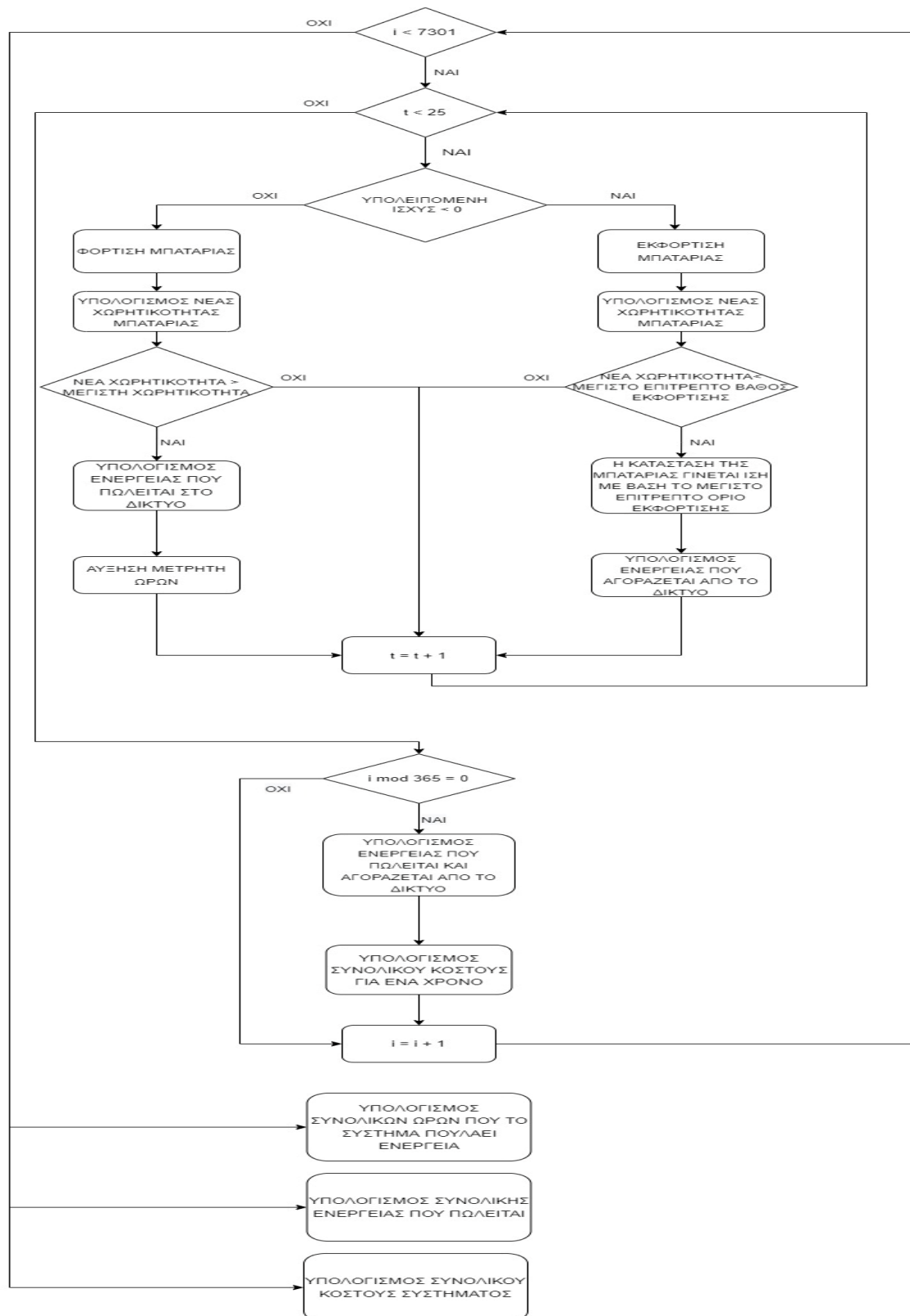
$$C_{sell}(y) = C_{sell}(1) * \frac{(1 + g)^y}{(1 + i)^y} \quad (3.33)$$

όπου:

- y : έτος λειτουργίας.
- i : επιτόκιο.
- g : πληθωρισμός.

Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης υπολογίζεται και αυτή με τον ίδιο τρόπο σύμφωνα με το επιτόκιο και τον πληθωρισμό.

Στο τέλος, αφού έχουν περάσει 7300 ημέρες λειτουργίας του Φ/Β συστήματος, δηλαδή 20 χρόνια, υπολογίζονται οι συνολικές ώρες κατά τις οποίες πωλήθηκε ενέργεια στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο καθώς και το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος, ενώ επίσης ελέγχεται και η κατάσταση φόρτισης συστοιχίας των μπαταριών. Το Φ/Β σύστημα θεωρείται μη βιώσιμο αν η χωρητικότητα των μπαταριών κατά την τελευταία ώρα λειτουργίας είναι μικρότερη από την πρώτη ώρα λειτουργίας του. Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μοντελοποίησης του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες τα βήματα του οποίου περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το δίκτυο.

3.2.2 Προσομοίωση Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος προσομοιώνει τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος για 175200 ώρες δηλαδή για 20 χρόνια και υπολογίζει την ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο, την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο όταν η ισχύς που παράγεται από το Φ/Β σύστημα δεν καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου, τις συνολικές ώρες κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο καθώς και το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα τα βήματα είναι τα εξής:

- Αν $P_{bb} < 0$ τότε το Φ/Β σύστημα καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου και έχει περίσσεια ενέργεια την οποία πουλάει στο δίκτυο.
- Αν $P_{bb} > 0$ τότε το Φ/Β σύστημα δεν παράγει αρκετή ισχύ ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις του φορτίου και έτσι το σύστημα αγοράζει από το ηλεκτρικό δίκτυο το έλλειμμα εκείνο που απαιτείται.
- Αν $P_{bb} = 0$ τότε το Φ/Β σύστημα παράγει όση ακριβώς ισχύ χρειάζεται για να καλυφθεί το φορτίο.

Όπως προαναφέρθηκε, αν ισχύει ότι $P_{bb} < 0$ τότε αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίσσεια ενέργειας και αυτή θα πωληθεί στο δίκτυο. Αρχικά, ενημερώνεται ο μετρητής που δείχνει ότι πωλήθηκε ενέργεια και στη συνέχεια υπολογίζεται το πλεόνασμα ισχύος για αυτή την ώρα λειτουργίας:

$$P_{ex}(t) = -P_{bb}(t) * n_i \quad (3.34)$$

όπου:

- $P_{bb}(t)$: η περίσσεια ισχύος.
- n_i : ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.

Στην περίπτωση που ισχύει ότι $P_{bb} > 0$ γίνεται αντιληπτό ότι χρειάζεται επιπλέον ισχύ για να καλύψει το φορτίο. Έτσι, ενημερώνεται ο μετρητής που δείχνει ότι δεν πωλείται ενέργεια και στη συνέχεια υπολογίζεται το έλλειμα ισχύος που χρειάζεται για αγορά:

$$P_{buy}(t) = P_{bb}(t) * n_i \quad (3.35)$$

όπου:

- $P_{bb}(t)$: το έλλειμα ισχύος.
- n_i : ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα.

Όπως και στην περίπτωση με τις μπαταρίες έτσι και εδώ κάθε 365 μέρες, δηλαδή κάθε χρόνο προσομοίωσης, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που έχει πωληθεί στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που έχει αγοραστεί από το δίκτυο και η παρούσα αξία του καθαρού οικονομικού κόστους ή κέρδους του συστήματος με βάση το κόστος συντήρησης, την ενέργεια που αγόρασε και την ενέργεια που πούλησε στο δίκτυο το αντίστοιχο έτος λειτουργίας του Φ/Β συστήματος:

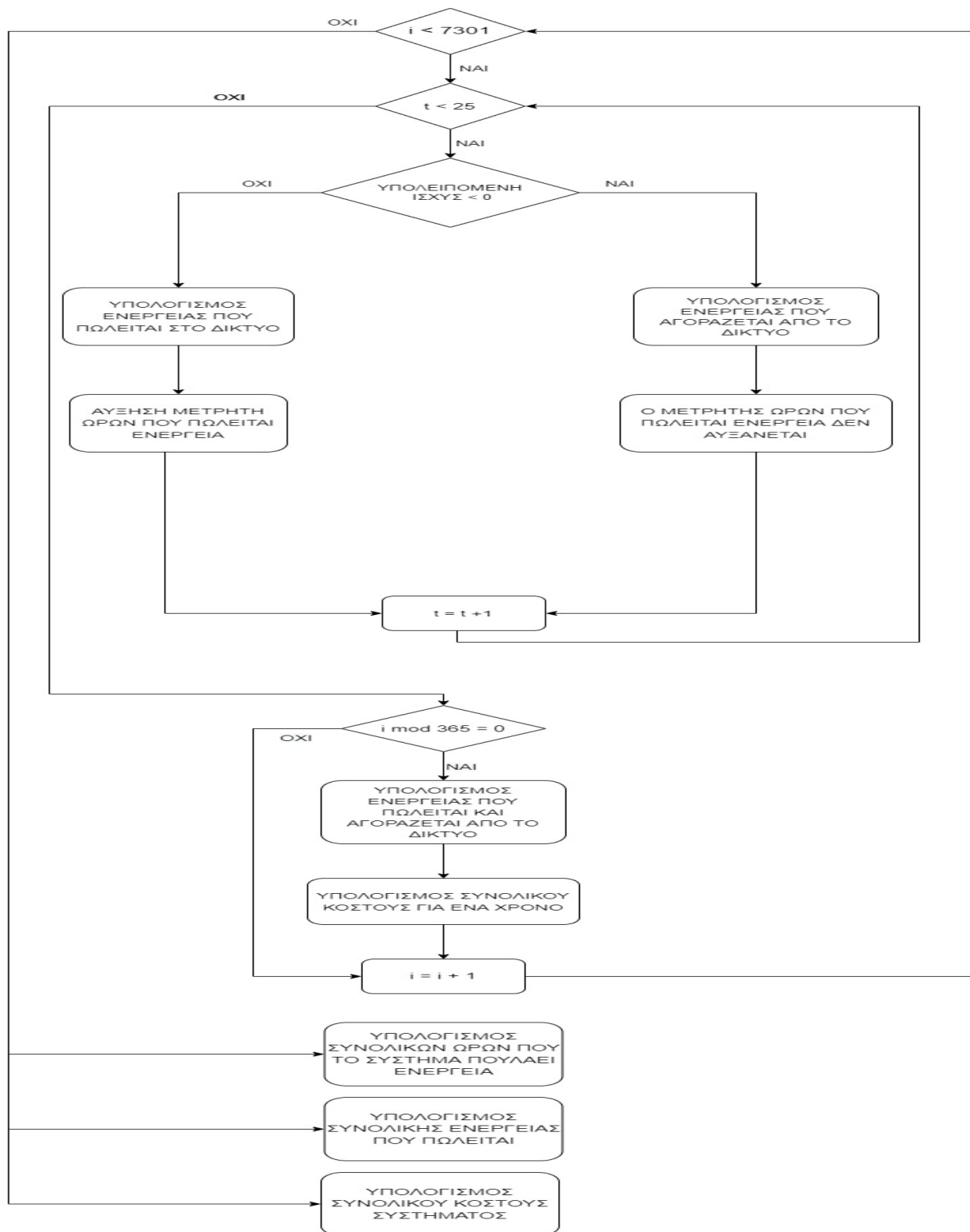
$$E_{total,buy} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{buy}(t)}{1000} \quad (3.36)$$

$$E_{total,sell} = \frac{\sum_{i=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{sell}(t)}{1000} \quad (3.37)$$

$$C_{year} = (C_{maint} + C_{pbuy}) - C_{psell} \quad (3.38)$$

Και σε αυτή την περίπτωση η τιμή της kWh που πουλάει και αγοράζει το σύστημα δεν είναι κάθε χρόνο ίδια μιας και εξαρτάται από το επιτόκιο και τον πληθωρισμό ενώ η τιμή της καθορίζεται όπως στις σχέσεις (3.29) και (3.30). Το κόστος συντήρησης εξαρτάται και αυτό από το επιτόκιο και τον πληθωρισμό.

Στο τέλος της προσομοίωσης αφού έχουν περάσει 7300 ημέρες λειτουργίας του συστήματος, υπολογίζονται οι συνολικές ώρες κατά τις οποίες πωλήθηκε ενέργεια στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο, η συνολική ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο καθώς και το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μοντελοποίησης του Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες τα βήματα του οποίου περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες συνδεδεμένο στο δίκτυο.

3.2.3 Προσομοίωση αυτόνομου συστήματος

Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος προσομοιώνει τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος για 175200 ώρες δηλαδή για 20 χρόνια και υπολογίζει την ισχύ που αποθηκεύεται ή καταναλώνεται από τις μπαταρίες καθώς και το συνολικό κόστος του Φ/Β συστήματος. Πιο συγκεκριμένα τα βήματα είναι τα εξής:

- Αν $P_{bb} \leq 0$ τότε το σύστημα προσπαθεί να φορτίσει τις μπαταρίες με το περίσσειμα ισχύος, αν χρειάζονται, διαφορετικά αν είναι πλήρως φορτισμένες τότε το περίσσειμα χάνεται.
- Αν $P_{bb} > 0$ τότε το σύστημα απορρόφα ισχύ από τις μπαταρίες με σκοπό να καλύψει τις απαιτήσεις του φορτίου. Σε περίπτωση όμως που οι μπαταρίες δεν αρκούν και η χωρητικότητά τους πέφτει κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης τότε το σύστημα δε μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις του φορτίου για τη συγκεκριμένη ώρα λειτουργίας.

Όσον αφορά τις μπαταρίες στο σύστημα ισχύουν τα εξής:

- Αν υπάρχει περίσσεια ισχύος τότε αυτή αρχικά χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών με βαθμό απόδοσης φόρτισης 0.9. Την πρώτη ώρα λειτουργίας των μπαταριών η χωρητικότητά τους ορίζεται ίση με τη μισή της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών σε Ah υπολογίζεται ως εξής:

$$C(t) = C(t-1) - \frac{n_c * P_{bb}(t)}{V_b * n_{b,s}} * \Delta t \quad (3.39)$$

όπου:

- $C(t-1)$: κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών την προηγούμενη ώρα λειτουργίας του συστήματος.
- $P_{bb}(t)$: περίσσεια ισχύος.
- n_c : βαθμός απόδοσης φόρτισης 0,9.

- V_b : ονομαστική τάση της μπαταρίας.
- $n_{b,s}$: το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά.
- Δt : χρονικό βήμα.

Έπειτα, ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών και αν είναι ίση με την μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, C_{tot} , τότε αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες έχουν φορτιστεί πλήρως. Αν, όμως η νέα κατάσταση των μπαταριών είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη χωρητικότητα των μπαταριών, C_{tot} , τότε αυτό σημαίνει ότι υπάρχει περίσσεια ισχύος η οποία θα χαθεί αφού το αυτόνομο σύστημα δε μπορεί να πουλήσει ενέργεια ενώ η κατάσταση των μπαταριών τίθεται ίση με C_{tot} .

- Αν δεν υπάρχει περίσσεια ισχύος τότε χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες για την κάλυψη του φορτίου. Ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης ορίζεται ίσος με 0.9, ενώ την πρώτη ώρα λειτουργίας των μπαταριών η χωρητικότητά τους ορίζεται ίση με τη μισή της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών σε Ah υπολογίζεται ως εξής:

$$C(t) = C(t-1) - \frac{\frac{P_{bb}(t)}{n_d}}{V_b * n_{b,s}} * \Delta t \quad (3.40)$$

όπου:

- $C(t-1)$: κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών την προηγούμενη ώρα λειτουργίας του συστήματος.
- $P_{bb}(t)$: η ισχύς που απαιτείται για την κάλυψη του φορτίου.
- n_d : ο βαθμός απόδοσης εκφόρτισης.
- V_b : η ονομαστική τάση της μπαταρίας.
- $n_{b,s}$: το πλήθος των μπαταριών που συνδέονται σε σειρά.
- Δt : το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (1h).

Έπειτα, ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών και αν είναι μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης των μπαταριών τότε αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο και η προσομοίωση τερματίζεται χωρίς επιτυχία.

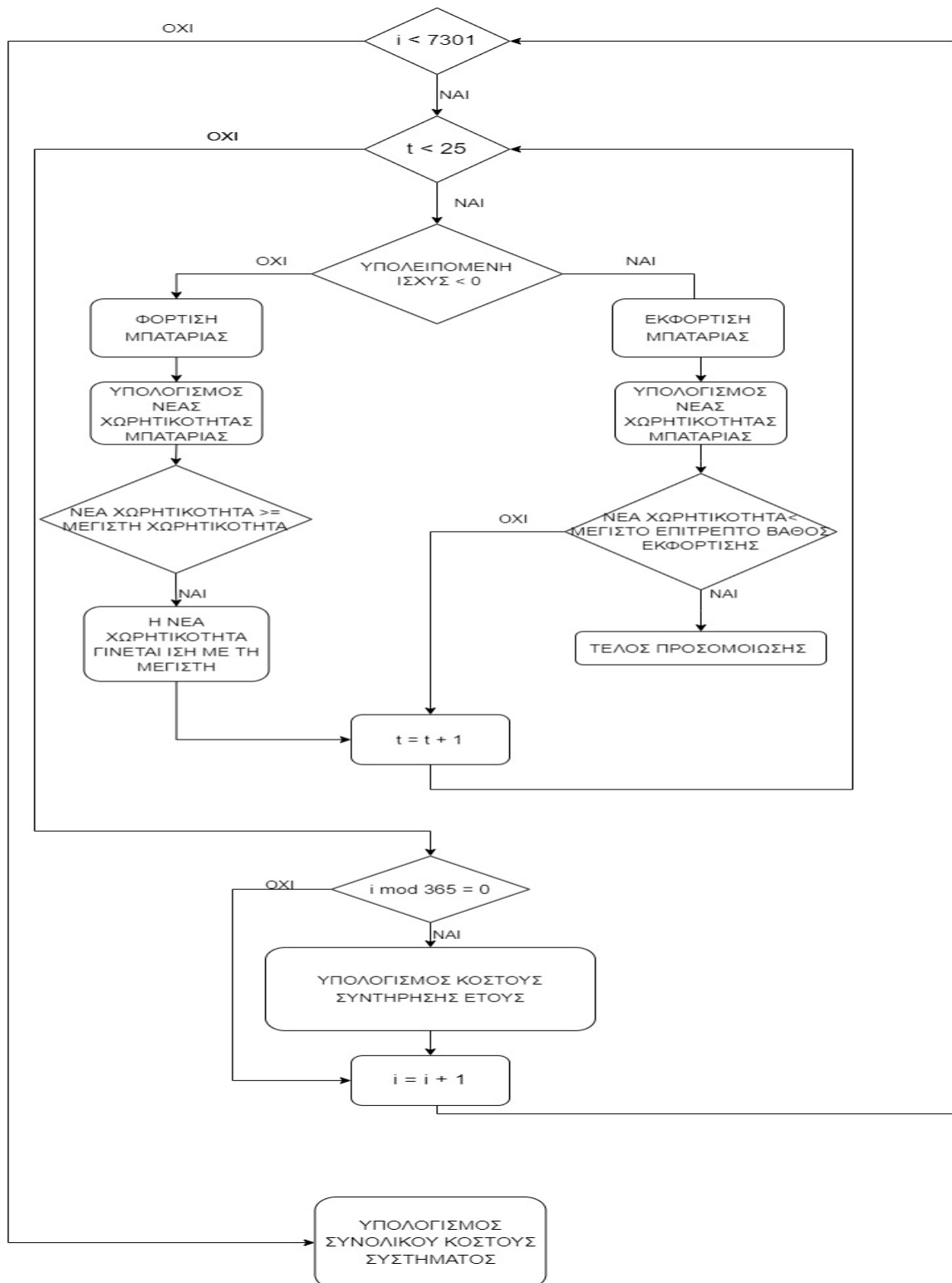
Κάθε 365 μέρες, δηλαδή κάθε χρόνο προσομοίωσης, υπολογίζεται το κόστος συντήρησης του Φ/Β συστήματος ως εξής:

$$C_{maint}(y) = C_{maint}(1) * \frac{(1+g)^y}{(1+i)^y} \quad (3.41)$$

όπου:

- y : το έτος λειτουργίας.
- i : επιτόκιο.
- g : πληθωρισμός.

Στο τέλος, αφού έχουν περάσει 7300 μέρες λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή 20 χρόνια, υπολογίζεται το συνολικό κόστος του συστήματος ενώ επίσης ελέγχεται και η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Το σύστημα θεωρείται μη-βιώσιμο αν η χωρητικότητα των μπαταριών κατά την τελευταία ώρα λειτουργίας είναι μικρότερη από την πρώτη ώρα λειτουργίας. Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μοντελοποίησης του αυτόνομου Φ/Β συστήματος τα βήματα του οποίου περιγράφονται παραπάνω.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης αυτόνομου συστήματος.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγικά

Όπως έχει αναφερθεί, η αξιοπιστία της λειτουργίας στα Φ/Β συστήματα επηρεάζεται πολύ από τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης. Το πρόβλημα που διερευνάται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας σχεδίασης Φ/Β συστημάτων που ενσωματώνονται σε κτήρια. Αξιοπιστία για τα Φ/Β συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο θεωρήθηκε η δυνατότητα του συστήματος να πουλάει όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο, ενώ για το αυτόνομο σύστημα θεωρήθηκε η ικανότητα του να μπορεί να ικανοποιεί το φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια χρησιμοποίησης του συστήματος.

Έτσι, λοιπόν, στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τη χρήση του SWGEN ανακτήθηκαν πάρα πολλά δεδομένα όσον αφορά τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία της περιοχής εγκατάστασης. Για να μειωθεί η εξάρτηση τους από αυτά τα πιθανοτικά μετεωρολογικά δεδομένα έγινε η χρήση της προσομοίωσης Monte-Carlo, ενώ για τη βελτιστοποίηση του συστήματος έγινε χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO).

4.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης PSO

4.2.1 Εισαγωγικά

Ο αλγόριθμος PSO είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που σκοπό έχει να βρει τη βέλτιστη λύση, από ένα σύνολο λύσεων, σε ένα πρόβλημα με κάποιους περιορισμούς. Εκτός από τον PSO, ένα άλλο παράδειγμα αλγόριθμου βελτιστοποίησης είναι ο γενετικός αλγόριθμος (Genetic Algorithm). Γενικά, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σκοπό έχουν να βρουν το ολικό μέγιστο ή το ολικό ελάχιστο σε μια αντικειμενική συνάρτηση η οποία εκφράζει το πρόβλημα που εξετάζεται, ικανοποιώντας τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

Η βελτιστοποίηση PSO είναι ένας αλγόριθμος βιολογικής έμπνευσης καθώς αρχικά χρησιμοποιήθηκε από κοινωνιο-βιολόγους. Προτάθηκε από τους Kennedy και Eberhart το 1995 για την αναπαράσταση κίνησης οργανισμών σε ένας σμήνος πουλιών ή σε ένα κοπάδι ψαριών.

4.2.2 Αλγόριθμος

Στον αλγόριθμο PSO υπάρχει ένα σύνολο από σωματίδια τα οποία αναζητούν τη βέλτιστη λύση, ολικό μέγιστο ή ολικό ελάχιστο, της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει οριστεί, με βάσει τους περιορισμούς των μεταβλητών που την αποτελούν. Κάθε ένα από αυτά τα σωματίδια είναι μια λύση και κάθε φορά ψάχνει για άλλη λύση βασιζόμενο στις άλλες λύσεις που έχουν «δώσει» τα γειτονικά σωματίδια αλλά και στις λύσεις που είχε βρει το ίδιο στο παρελθόν καθώς έχει τη δυνατότητα να τις συγκρατεί και να τις αξιοποιεί. Τα σωματίδια κινούνται στο χώρο και έτσι είναι λογικό αρχικά να έχουν μια τυχαία θέση και μια τυχαία ταχύτητα.

Σε κάθε επανάληψη ενημερώνεται και η θέση του σωματιδίου και η ταχύτητά του ως εξής:

- Υποθέτουμε, ότι αρχικά το σωματίδιο i στην πρώτη επανάληψη βρίσκεται στη θέση $X^i(t) = (x^i(t), y^i(t))$ και έχει ταχύτητα $V^i(t) = (v_x^i(t), v_y^i(t))$.
- Στην επόμενη επανάληψη η θέση έχει αλλάξει ως εξής:

$$X^i(t+1) = X^i(t) + V^i(t+1) \quad (4.1)$$

ενώ η ταχύτητα έχει αλλάξει ως εξής:

$$V^i(t+1) = w * V^i(t) + c_1 * r_1 * (pbest^i - X^i(t)) + c_2 * r_2 * (gbest^i - X^i(t)) \quad (4.2)$$

όπου r_1 και r_2 είναι τυχαίοι αριθμοί μεταξύ 0 και 1, οι σταθερές w , c_1 , c_2 είναι παράμετροι του αλγορίθμου PSO, το $pbest^i$ είναι η θέση του σωματιδίου που δίνει την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το σωματίδιο και το $gbest^i$ είναι η θέση που βρέθηκε από όλα τα σωματίδια του σμήνους.

Εδώ αξίζει να σημειωθούν τα πλεονεκτήματα που έχει ο αλγόριθμος PSO έναντι άλλων αλγορίθμων βελτιστοποίησης:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές.
- Η δυνατότητα να βρει γρήγορα τη λύση του προβλήματος.
- Απλή υλοποίηση.
- Αποδοτική συνεργασία των σωματιδίων που βοηθά στην εύρεση της καλύτερης λύσης σε σύντομο χρονικό διάστημα.

4.3 Monte Carlo Simulation

4.3.1 Γενικά

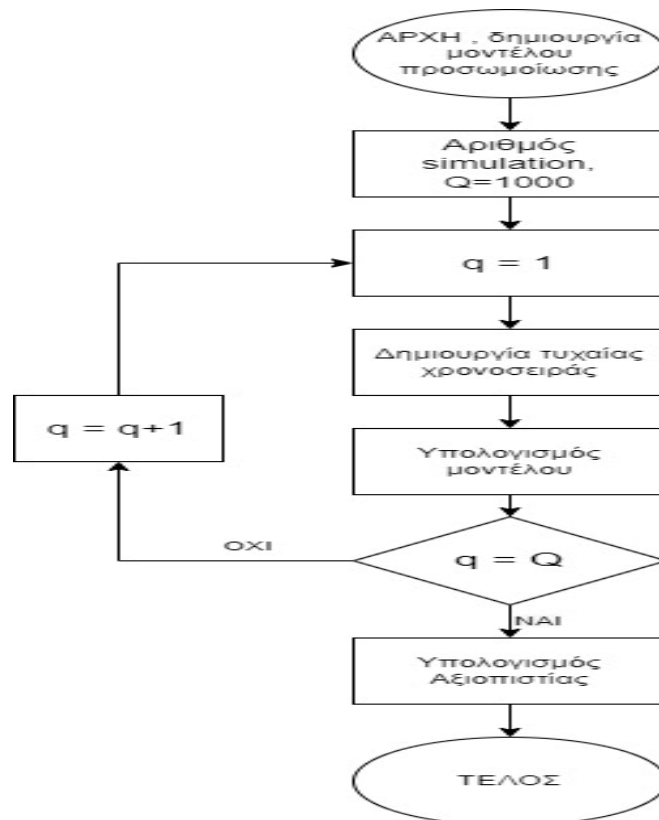
Η προσομοίωση Monte Carlo πήρε το όνομά της από την περιοχή Monte Carlo του Μονακό. Η τεχνική αναπτύχθηκε από τον Stanislaw Ulam, μαθηματικός στο επάγγελμα, ο οποίος ήθελε να προσδιορίσει την πιθανότητα νίκης στα τυχερά παιχνίδια όπως η ρουλέτα και τα ζάρια. Τελικά, σε συνεργασία με τον John Von Neumann ανέπτυξαν την προσομοίωση αυτή.

Όταν υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα κατά τη διαδικασία πραγματοποίησης μιας πρόβλεψης ή εκτίμησης αντί να γίνει η αντικατάσταση της αβέβαιης μεταβλητής, η προσομοίωση Monte Carlo μπορεί με τη χρήση πολλαπλών τιμών να μειώσει την αβεβαιότητα ως προς αυτή τη μεταβλητή. Γίνεται αντιληπτό, ότι η χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo έχει ευρεία εφαρμογών από τις επιχειρήσεις και τα χρηματοοικονομικά για την εκτίμηση του κόστους μέχρι και τις τηλεπικοινωνίες, που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση απόδοσης των δικτύων δεδομένων βοηθώντας έτσι στην βελτιστοποίηση τους. Η βάση της, λοιπόν, στηρίζεται στο ότι η πιθανότητα διαφορετικών αποτελεσμάτων δεν μπορεί να προσδιοριστεί λόγω των τυχαίων μεταβλητών. Έτσι, με τη συνεχόμενη επανάληψη για πολλές διαφορετικές τυχαίες τιμές στην ουσία εξαλείφεται αυτή η «πιθανότητα των τυχαίων μεταβλητών».

Η τεχνική που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση Monte Carlo βασίζεται στο πως ανταποκρίνεται ένα συγκεκριμένο μοντέλο σε τυχαία παραγόμενα σενάρια [8]. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τρία και είναι τα εξής:

- Τυχαία δημιουργία σεναρίων (εισροών).
- Εκτέλεση προσομοίωσης για κάθε μία από τα «N» σενάρια. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται για το συγκεκριμένο μοντέλο του συστήματος που μελετάται.
- Συγκέντρωση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αναλόγως το μοντέλο το οποίο μελετάται, τα συνήθη αποτελέσματα αφορούν τη μέση τιμή εξόδων, την ελάχιστη ή τη μέγιστη τιμή εξόδου.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι προσομοιώσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης Monte Carlo στο οποίο ακολουθούνται τα βήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αρχικά, παράγονται 1000 διαφορετικά σενάρια, δηλαδή 1000 πιθανές χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων, και στη συνέχεια γίνεται εκτέλεση της προσομοίωσης για κάθε ένα από αυτά. Στο τέλος υπολογίζεται η αξιοπιστία του Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής της προσομοίωσης Monte Carlo.

4.4 Οι βελτιστοποιήσεις που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία

4.4.1 Βελτιστοποίηση #1

Στην πρώτη περίπτωση η βελτιστοποίηση έγινε βάση του αριθμού των Φ/Β που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια, της γωνίας τοποθέτησης των Φ/Β στην οροφή και του αριθμού των μπαταριών για τα συστήματα που έχουν μπαταρίες. Ο αλγόριθμος PSO δέχεται ως είσοδο ένα διάνυσμα X το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β στην οροφή και τον αριθμό των μπαταριών για τα συστήματα που έχουν μπαταρίες και στην συνέχεια βελτιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση η οποία σε αυτή την περίπτωση ορίζεται ως το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Κατόπιν, με δεδομένα το σύνολο των τιμών X που βελτιστοποιούν το συνολικό κόστος γίνεται ανάλυση Monte Carlo με σκοπό να μειωθεί η τυχαιότητα στο σύστημα χρησιμοποιώντας 1000 πιθανές χρονοσειρές (εικοσαετίες) δεδομένων θερμοκρασίας και προσπίπτουσας ακτινοβολίας και να βρεθεί η μέση τιμή του ποσού της ενέργειας το οποίο πωλείται στο δίκτυο (σύστημα με ή χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο) και η μέση τιμή των ωρών κατά τις οποίες το σύστημα δεν καλύπτει το φορτίο (αυτόνομο σύστημα).

Για τις περιπτώσεις Φ/Β συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων και Φ/Β πλαισίων οροφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β κεραμιδιών στην οροφή, β , και τον αριθμό των μπαταριών, N_b .

Για τη περίπτωση διασυνδεδεμένου στο δίκτυο Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων και Φ/Β πλαισίων οροφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου και τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β κεραμιδιών στην οροφή, β .

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος PSO αρχικά διαβάζονται οι είσοδοι – μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης. Για κάθε μια μεταβλητή ορίζονται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές τους. Η γωνία κλίσης των Φ/Β πλαισίων που τοποθετούνται στην οροφή έχει ελάχιστη τιμή 0° ενώ το πλήθος Φ/Β πλαισίων εξαρτάται από την επιφάνεια τοποθέτησης τους. Για παράδειγμα, το μέγιστο πλήθος των Φ/Β πλαισίων που τοποθετούνται στην οροφή είναι 34. Ο μέγιστος αριθμός μπαταριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι 100. Στη συνέχεια ο αλγόριθμος PSO ψάχνει να βρει το διάνυσμα εκείνο με τις κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές αυτές, το οποίο βρίσκει τη βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση.

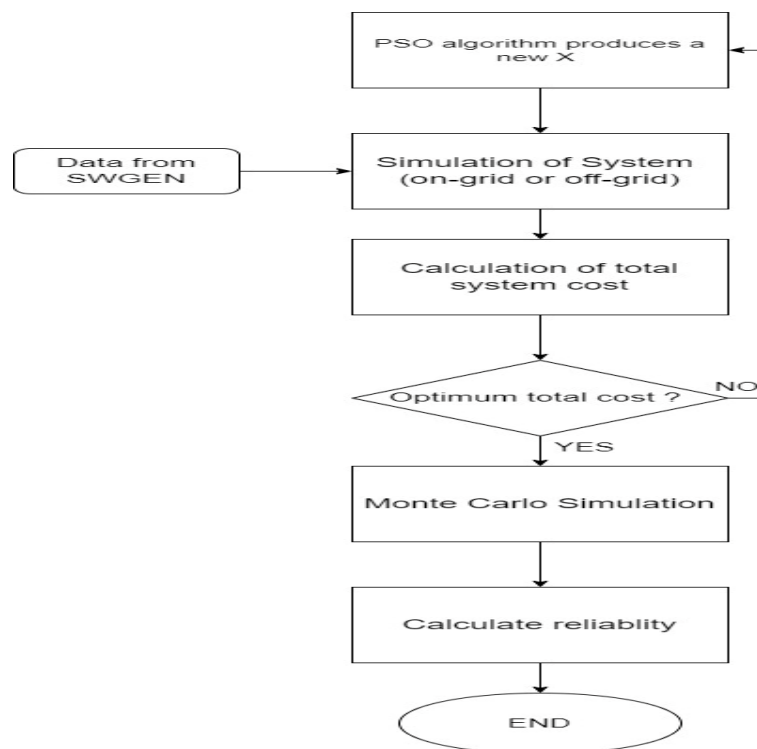
Η αντικειμενική συνάρτηση για το Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι το συνολικό καθαρό κόστος του Φ/Β συστήματος και είναι η εξής:

$$f_1(X) = \sum_{y=1}^{20} C_{year}(y) + C_{equip} \quad (4.3)$$

Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση για το αυτόνομο Φ/Β σύστημα είναι το συνολικό καθαρό κόστος του Φ/Β συστήματος και είναι η εξής:

$$f_2(X) = \sum_{y=1}^{20} C_{maint}(y) + C_{equip} \quad (4.4)$$

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #1 κατά το οποίο ο αλγόριθμος PSO επιλέγει κάθε φορά ένα διάνυσμα X με το οποίο γίνεται η προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιώντας μια πιθανή χρονοσειρά από την SWGEN μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ενώ στη συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo με σκοπό να υπολογιστεί η αξιοπιστία του Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #1.

4.4.2 Βελτιστοποίηση #2

Στην δεύτερη περίπτωση η βελτιστοποίηση έγινε πάλι βάση του αριθμού των Φ/Β που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, της γωνίας τοποθέτησης των Φ/Β στην οροφή και του αριθμού των μπαταριών για τα Φ/Β συστήματα που έχουν μπαταρίες. Ο αλγόριθμος PSO δέχεται ως είσοδο ένα διάνυσμα X το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β στην οροφή και τον αριθμό των μπαταριών για τα συστήματα που έχουν μπαταρίες και στην συνέχεια σε κάθε επανάληψη του PSO γίνεται ανάλυση Monte Carlo με 1000 διαφορετικές χρονοσειρές από δεδομένα θερμοκρασίας και προσπίπτουσας ακτινοβολίας με σκοπό να βρεθεί η ελάχιστη μέση αντικειμενική συνάρτηση η οποία και σε αυτή την περίπτωση είναι το συνολικό καθαρό κόστος συστήματος.

Για τις περιπτώσεις Φ/Β συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων και Φ/Β πλαισίων οροφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β κεραμιδιών στην οροφή, β , και το πλήθος των μπαταριών, N_b .

Για τη περίπτωση διασυνδεδεμένου στο δίκτυο Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων για κάθε επιφάνεια και Φ/Β πλαισίων οροφής και τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή, β .

Όπως και στην περίπτωση της βελτιστοποίησης #1 έτσι και εδώ ακολουθούνται τα ίδια βήματα για τον ορισμό των μέγιστων τιμών κάθε μεταβλητής. Έπειτα, ο αλγόριθμος PSO ψάχνει να βρει το διάνυσμα εκείνο με τις κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές αυτές το οποίο βρίσκει την ελάχιστη μέση αντικειμενική συνάρτηση για 1000 πιθανές χρονοσειρές.

Η αντικειμενική συνάρτηση για το Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι το συνολικό καθαρό κόστος του Φ/Β συστήματος και είναι η εξής:

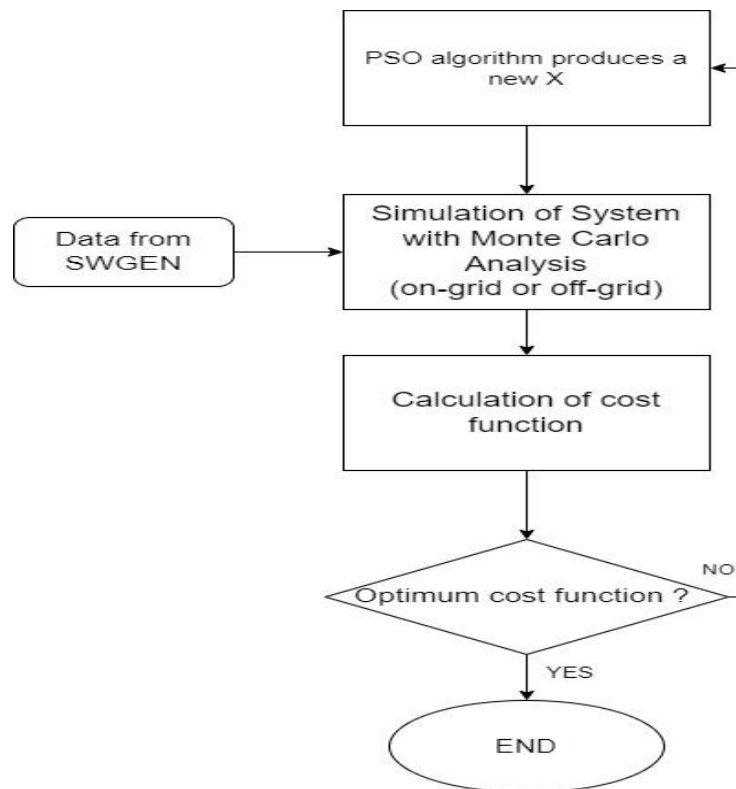
$$f_3(X) = \text{mean}\left\{\sum_{y=1}^{20} C_{\text{year}}(y) + C_{\text{equip}}\right\} \quad (4.5)$$

Επίσης, η αντικειμενική συνάρτηση για το αυτόνομο Φ/Β σύστημα είναι το συνολικό καθαρό κόστος του Φ/Β συστήματος και είναι η εξής:

$$f_4(X) = \text{mean}\left\{\sum_{y=1}^{20} C_{\text{maint}}(y) + C_{\text{equip}}\right\} \quad (4.6)$$

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #2 κατά το οποίο ο αλγόριθμος PSO επιλέγει κάθε φορά ένα διάνυσμα X με το οποίο κατά τη

διάρκεια της προσομοίωσης του συστήματος γίνεται ανάλυση Monte Carlo με σκοπό να υπολογιστεί η ελάχιστη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #2.

4.4.3 Βελτιστοποίηση #3

Στην περίπτωση αυτή, η βελτιστοποίηση έγινε βάση του αριθμού των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, του αριθμού των μπαταριών για τα συστήματα που έχουν μπαταρίες και της γωνίας τοποθέτησης στην οροφή. Ο αλγόριθμος PSO δέχεται ως είσοδο ένα διάνυσμα X το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των Φ/Β πλαισίων που

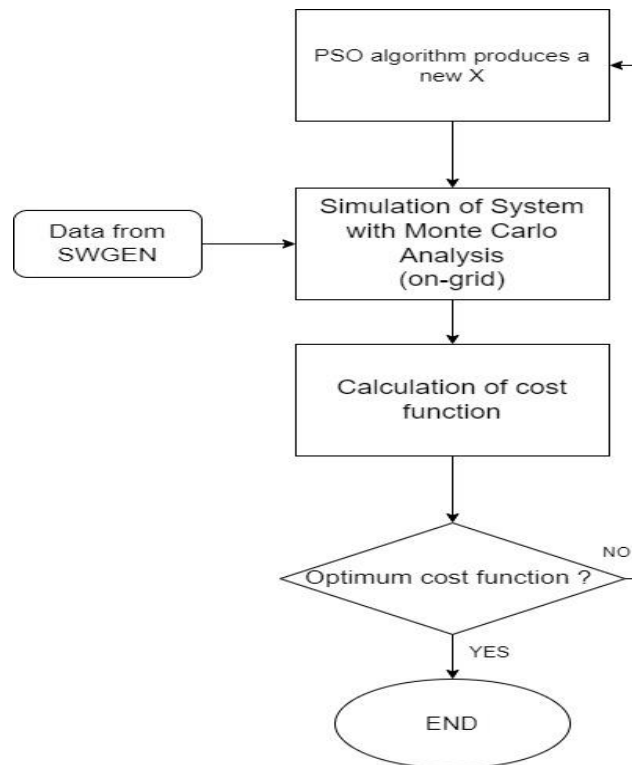
μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β στην οροφή και του αριθμού των μπαταριών για τα συστήματα που έχουν μπαταρίες. Στη συνέχεια σε κάθε επανάληψη του PSO γίνεται ανάλυση Monte Carlo με 1000 διαφορετικές χρονοσειρές από δεδομένα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας με σκοπό να βρεθεί η χειρότερη περίπτωση παραγωγής ενέργειας. Όταν βρεθεί η χειρότερη περίπτωση υπολογίζονται οι ώρες κατά τις οποίες το σύστημα έχει τη δυνατότητα να πουλάει ενέργεια στο δίκτυο, αφού έχουν προηγουμένως ικανοποιηθεί οι ανάγκες του συστήματος.

Για τη περίπτωση Φ/Β συστήματος όπου χρησιμοποιούνται μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων και Φ/Β πλαισίων οροφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου, τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή, β , και τον αριθμό των μπαταριών, N_b .

Για τη περίπτωση του Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες, το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, των οποίων τις βέλτιστες τιμές υπολογίζει ο αλγόριθμος PSO, αποτελείται από τον αριθμό των συμβατικών Φ/Β πλαισίων, διάφανων Φ/Β πλαισίων και Φ/Β πλαισίων οροφής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε επιφάνεια του κτηρίου και τη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή, β .

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις βελτιστοποιήσεων έτσι και εδώ ακολουθούνται τα ίδια βήματα για τον ορισμό των μέγιστων τιμών κάθε μεταβλητής. Έπειτα, ο αλγόριθμος PSO ψάχνει να βρει το διάνυσμα X , με τις κατάλληλες τιμές στις μεταβλητές αυτές, το οποίο για τη χειρότερη συνολική παραγωγή ενέργειας βρίσκει την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το σύνολο των ωρών που το σύστημα πουλάει ενέργεια και σκοπός του αλγόριθμου PSO είναι να μεγιστοποιήσει τις ώρες αυτές.

Στο Σχήμα 4.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #3 κατά το οποίο ο αλγόριθμος PSO επιλέγει κάθε φορά ένα διάνυσμα X , με το οποίο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του συστήματος γίνεται ανάλυση Monte Carlo μέχρι να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης #3.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι βελτιστοποιήσεις έγιναν για τρία διαφορετικά Φ/Β συστήματα τα οποία είναι:

- Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς μπαταρίες.
- Αυτόνομο Φ/Β σύστημα.

Για όλες τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος PSO εκτελέστηκε για 400 επαναλήψεις για αριθμό σωματιδίων που ήταν οχτώ φορές μεγαλύτερος από το πλήθος των παραμέτρων, ενώ η ανάλυση Monte-Carlo έγινε για 1000 πιθανές διαφορετικές εικοσαετίες δεδομένων θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Σημειώνεται επίσης ότι ο PSO συγκλίνει στην ίδια λύση και για περισσότερες επαναλήψεις.

Έγινε επίσης και σύγκριση ανάμεσα στις περιπτώσεις βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε η SWGEN με τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις με δεδομένα ενός ΤΜΥ, ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν αφορούν τις μπαταρίες, τον αντιστροφέα, το ρυθμιστή φόρτισης και την περιοχή εγκατάστασης που φαίνονται στους Πίνακες 5.1-5.4:

Πίνακας 5.1: Γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης.

Γεωγραφικό Πλάτος	Γεωγραφικό Μήκος	Συντελεστής ανάκλασης
35.25°	26.25°	0.2

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ (Ah)	200
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	24
ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΠΙΤΡΕΠΤΟ ΟΡΙΟ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ	0.2
ΤΙΜΗ (€)	190

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (Watt)	2000
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (V)	48
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	0.9
ΤΙΜΗ (€)	250

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά ρυθμιστή φόρτισης.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (Watt)	2080
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (V)	48
ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ MPP (V)	50
ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ MPP (V)	108
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	0.95
ΤΙΜΗ (€)	150

5.2 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #1

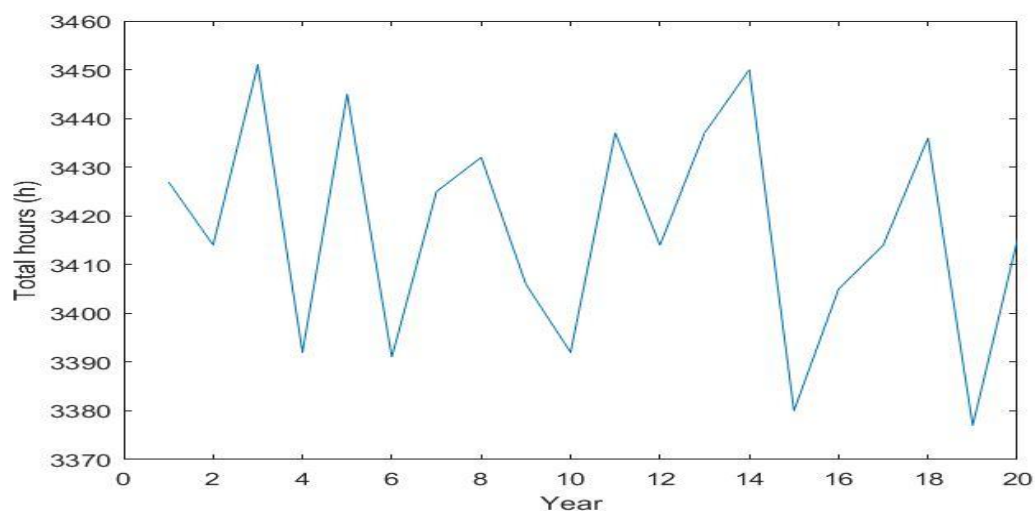
5.2.1 Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5 βρέθηκε ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 81 Φ/Β πλαίσια, 4 μπαταρίες και γωνία κλίσης 29°.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

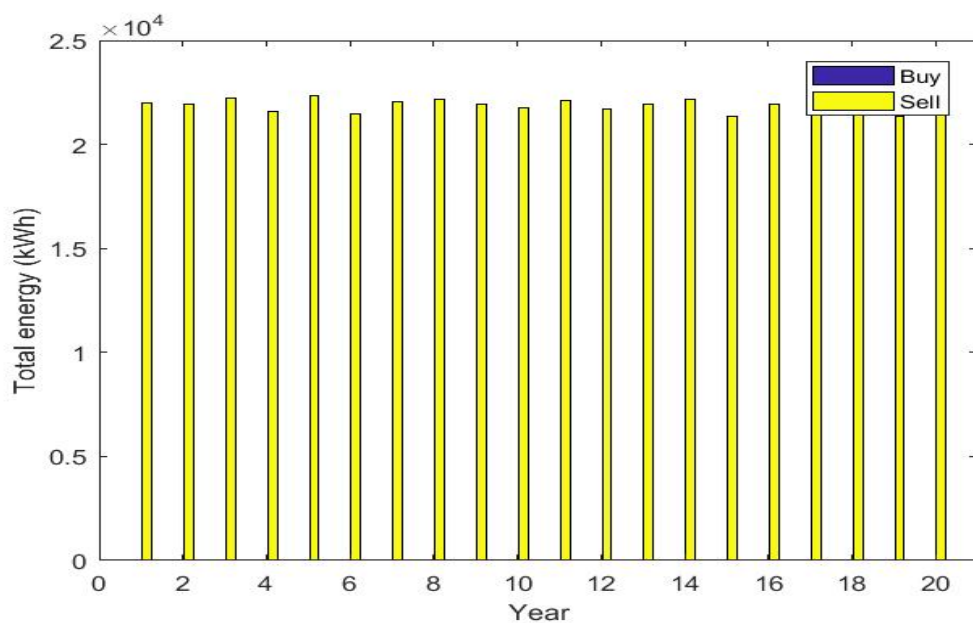
Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	29	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	3	90	90	3*1	1
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	0	0
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	4	-	-	2*2	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 4045.02€. Για το σύστημα αυτό στην συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 πιθανές χρονοσειρές και προκύπτει ότι η μέση ενέργεια που μπορεί να πουλάει το σύστημα για τα 20 χρόνια λειτουργίας του Φ/Β συστήματος είναι 259717.82 kWh.

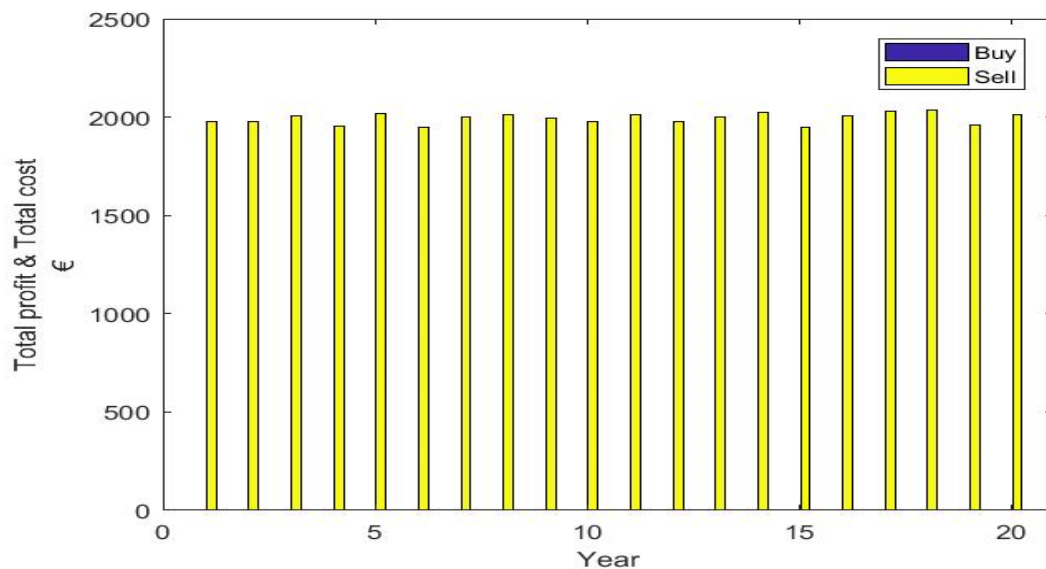


Σχήμα 5.1: Σύνολο ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας.

Παραπάνω, στο Σχήμα 5.1 φαίνονται οι συνολικές ώρες κάθε χρόνου κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο και οι οποίες κυμαίνονται από 3377 έως 3451 ώρες.



Σχήμα 5.2: Ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).



Σχήμα 5.3: Το συνολικό οικονομικό κέρδος και το κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται πόση ενέργεια αγοράστηκε και πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος για κάθε χρόνο σε kWh, ενώ στο Σχήμα 5.3 φαίνεται το οικονομικό κέρδος και το κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε. Παρατηρείται ότι η ενέργεια που αγοράστηκε είναι σχεδόν μηδαμινή γεγονός που δικαιολογείται αφού στις περιπτώσεις στις οποίες το Φ/Β σύστημα δεν ικανοποιούσε το φορτίο υπήρχαν οι μπαταρίες οι οποίες κάλυπταν το έλλειμα που υπήρχε.

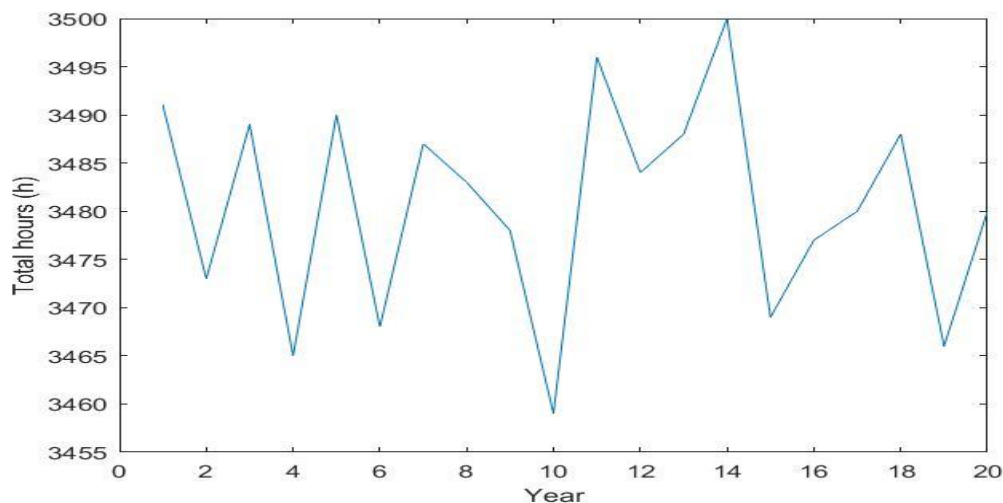
5.2.2 Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο

Ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6 βρέθηκε ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 78 Φ/Β πλαίσια και γωνία οροφής 28°.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

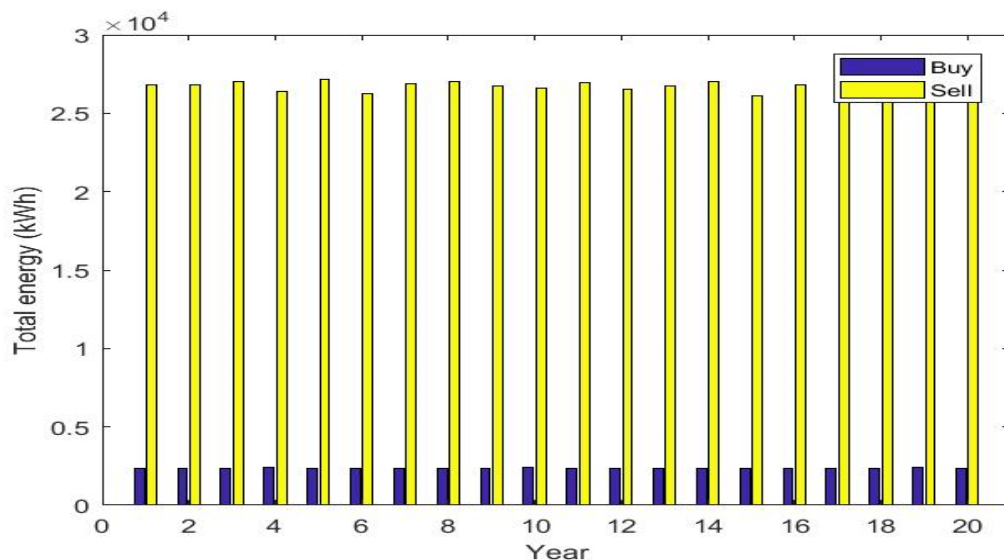
Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	28	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	-	-	-	-	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 131.47€. Για το σύστημα αυτό στην συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 διαφορετικές χρονοσειρές και προκύπτει ότι για 20 χρόνια λειτουργίας του Φ/Β συστήματος η μέση ενέργεια που μπορεί να πουλάει το σύστημα είναι 534775.06 kWh, ενώ η μέση ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι 47369.96 kWh. Φαίνεται ότι η ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι πολύ περισσότερη γεγονός που δικαιολογείται μιας και δεν υπάρχουν μπαταρίες να καλύψουν το φορτίο τις ώρες που δεν παράγεται η απαιτούμενη ενέργεια.

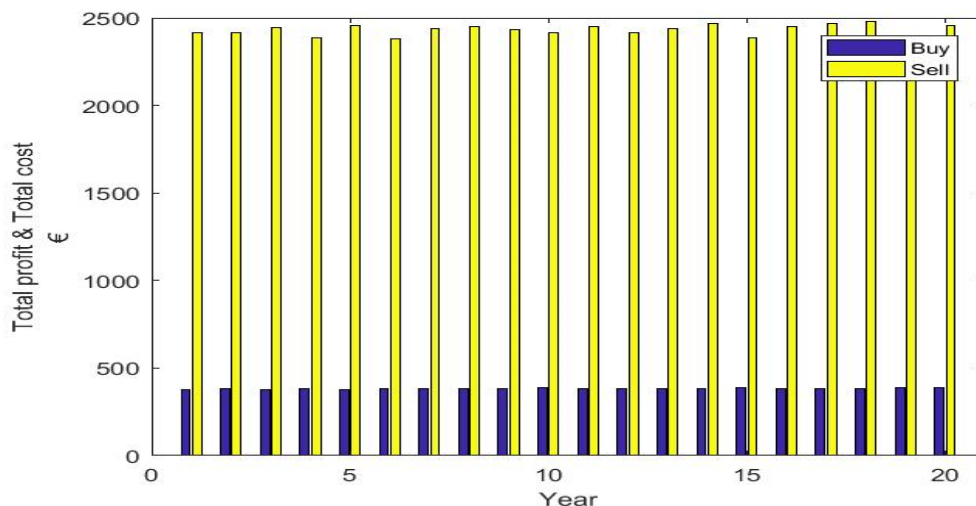


Σχήμα 5.4: Σύνολο ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας.

Στο Σχήμα 5.4 φαίνονται οι συνολικές ώρες κάθε χρόνου κατά τις οποίες το Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο πουλάει ενέργεια και οι οποίες κυμαίνονται από 3459 έως 3500 ώρες.



Σχήμα 5.5: Ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).



Σχήμα 5.6: Το συνολικό οικονομικό κέρδος και το κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται πόση ενέργεια αγοράστηκε και πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος για κάθε χρόνο σε kWh, ενώ στο Σχήμα 5.6 φαίνεται το οικονομικό κέρδος και το κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε. Παρατηρείται ότι η ενέργεια που αγοράστηκε στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μπαταρίες είναι σαφώς περισσότερη από τη περίπτωση του διασυνδεδεμένου στο δίκτυο συστήματος με μπαταρίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη μπαταριών που ικανοποιούσαν το φορτίο στις περιπτώσεις που δεν μπορούσαν τα Φ/Β πλαίσια. Συνολικά η ενέργεια που πούλησε το σύστημα είναι σαφώς περισσότερη από την περίπτωση του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες γεγονός που οφείλεται πάλι στην απουσία μπαταριών, καθώς με την περίσσεια ενέργειας δεν φορτίζονται οι μπαταρίες.

5.2.3 Αυτόνομο Σύστημα

Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων και μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος του συστήματος. Βρέθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.7 ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 30 Φ/Β πλαίσια, 18 μπαταρίες και γωνία οροφής 46°.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	12	46	0	3*2	2
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	0	90	-90	-	-
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	0	90	-90	-	-
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	18	-	-	2*9	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 22898.59€. Για το σύστημα αυτό στην συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 πιθανές χρονοσειρές και προκύπτει ότι το ποσοστό αποτυχίας είναι 0.002%. Σαν ποσοστό αποτυχίας ορίζεται το πόσες ώρες από τις 175200 ώρες λειτουργίας κατά μέσο όρο το σύστημα δεν καλύπτει το φορτίο.

5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #2

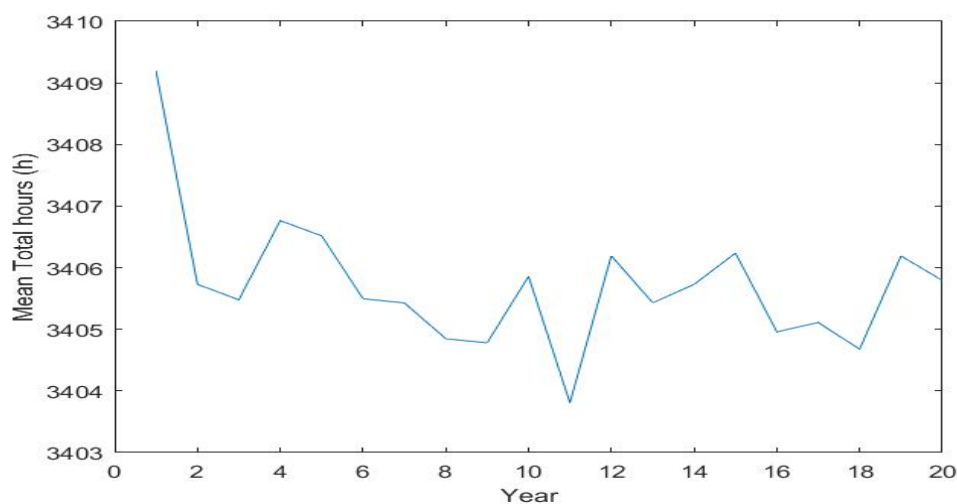
5.3.1 Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Ο αλγόριθμος σε αυτή την περίπτωση ενσωματώνει την ανάλυση Monte Carlo και έτσι για 1000 χρονοσειρές πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και βρίσκουν το μέσο ελάχιστο συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Βρέθηκε όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.8 ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 78 Φ/Β πλαίσια συνολικά, 6 μπαταρίες και γωνία οροφής 29°.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

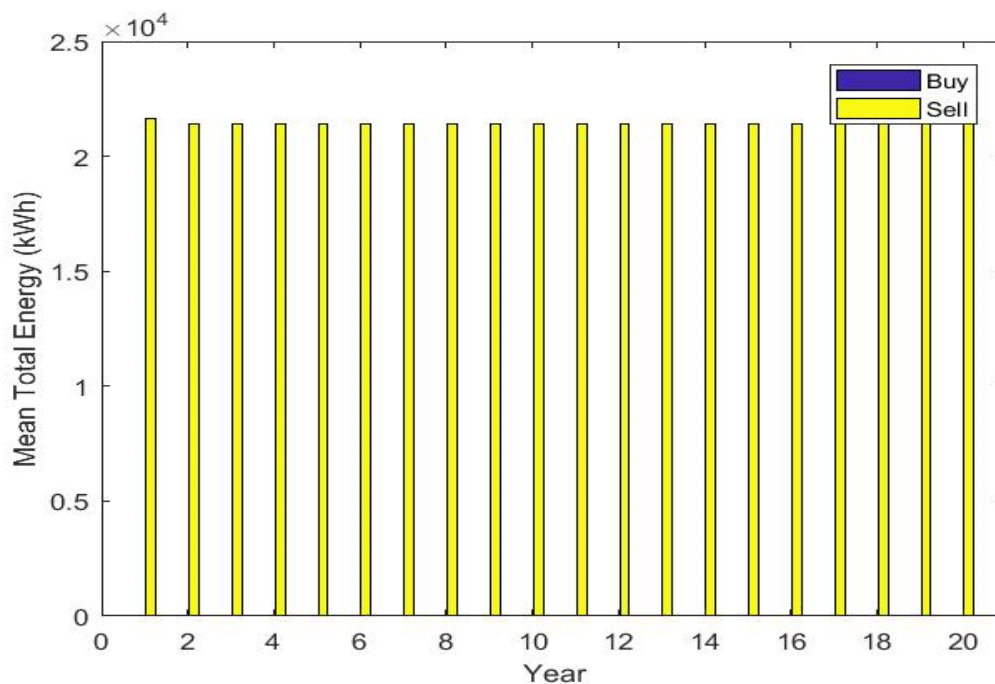
Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	29	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	6	-	-	2*3	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το μέσο συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 4423.89€. Για το σύστημα αυτό η μέση ενέργεια που πωλείται σε 20 χρόνια λειτουργίας είναι ίση με 428660.88 kWh ενώ η μέση ενέργεια που αγοράζει είναι ίση με 0.40 kWh.

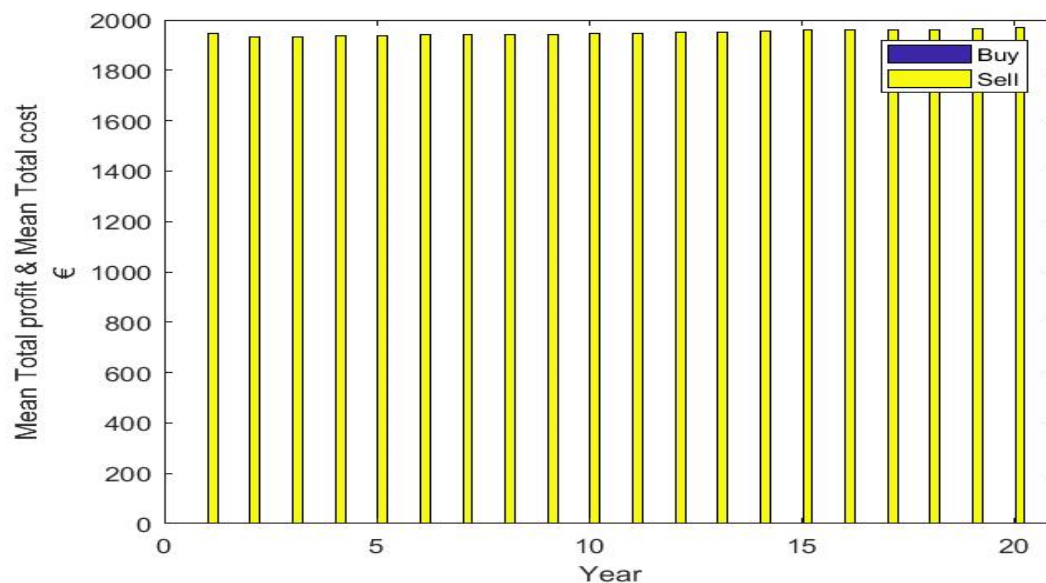


Σχήμα 5.7: Μέσος συνολικός αριθμός ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).

Παραπάνω, στο Σχήμα 5.7 φαίνεται ο μέσος συνολικός αριθμός ωρών κάθε χρόνου κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο και οι οποίες κυμαίνονται από 3403.8 έως 3409.2 ώρες.



Σχήμα 5.8: Μέση ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).



Σχήμα 5.9: Το μέσο οικονομικό κέρδος και το μέσο κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η μέση ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος για κάθε χρόνο σε kWh, ενώ στο Σχήμα 5.9 φαίνεται το μέσο οικονομικό κέρδος και το μέσο κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε. Παρατηρείται ότι η μέση ενέργεια που αγοράστηκε είναι σχεδόν μηδαμινή γεγονός που δικαιολογείται αφού στις περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα δεν ικανοποιούσε το φορτίο υπήρχαν οι μπαταρίες οι οποίες κάλυπταν το έλλειμμα που υπήρχε.

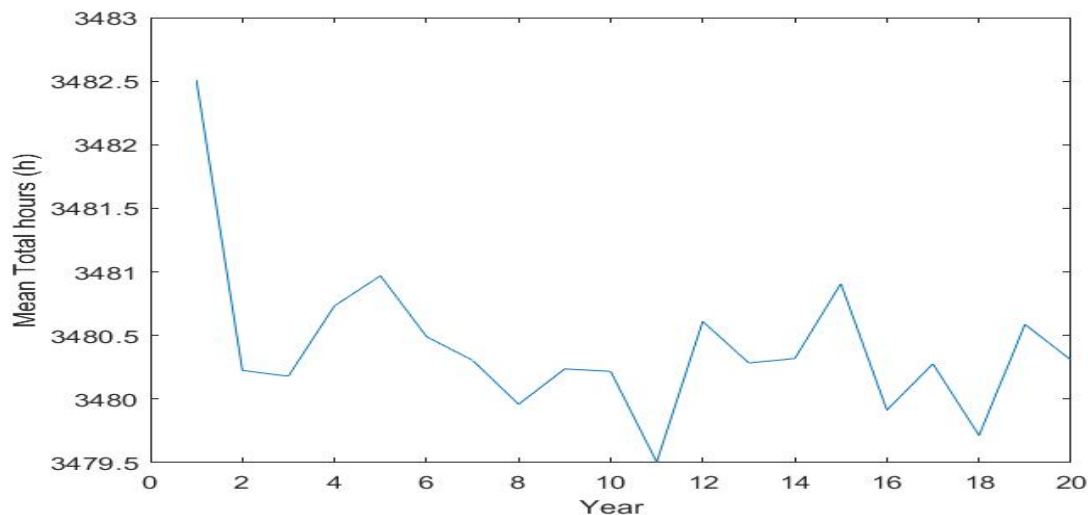
5.3.2 Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο

Και σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος ενσωματώνει την ανάλυση Monte Carlo και έτσι για 1000 χρονοσειρές πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και βρίσκουν το μέσο ελάχιστο συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Στον Πίνακα 5.9 φαίνεται ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 78 Φ/Β πλαίσια και γωνία οροφής 28°.

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

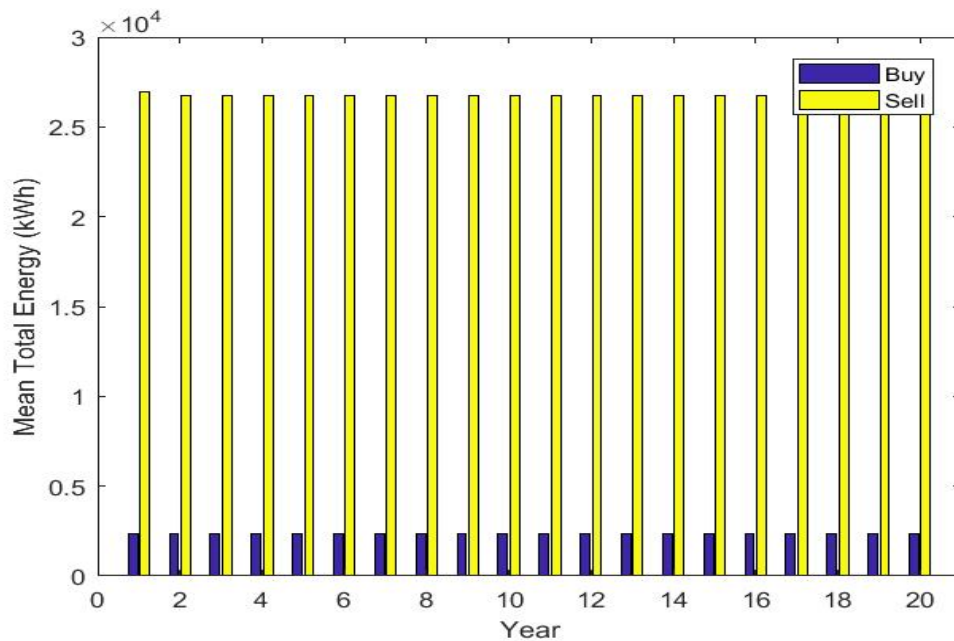
Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	28	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*1	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	-	-	-	-	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το μέσο συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 140.38€. Για το σύστημα αυτό, για 20 χρόνια λειτουργίας η μέση ενέργεια που πωλείται είναι ίση με 534775.06 kWh ενώ η μέση ενέργεια που αγοράζει είναι ίση με 47369.96 kWh. Φαίνεται ότι η ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι πολύ περισσότερη επειδή δεν υπάρχουν μπαταρίες να καλύψουν το φορτίο τις ώρες που δεν παράγεται η απαιτούμενη ενέργεια.

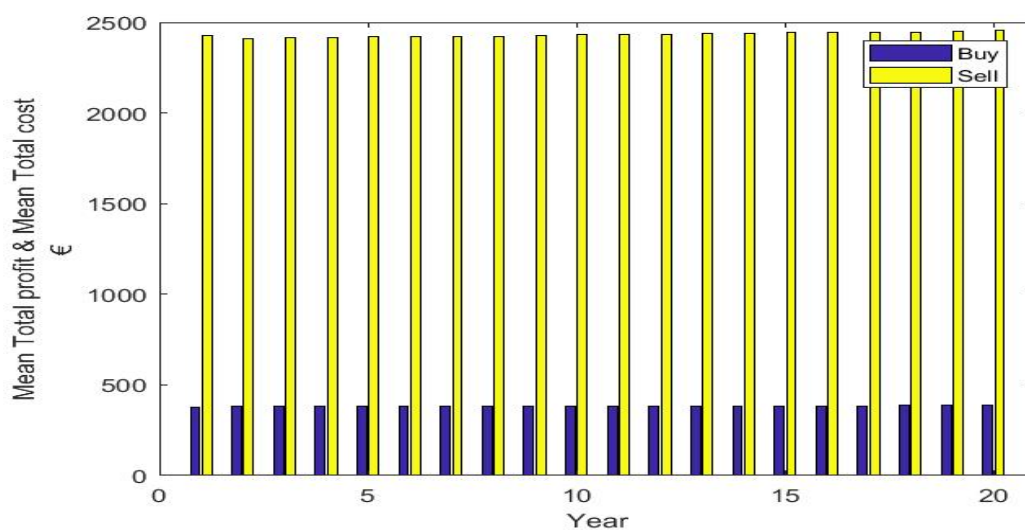


Σχήμα 5.10: Μέσος συνολικός αριθμός ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται ο μέσος συνολικός αριθμός ωρών κάθε χρόνου κατά τις οποίες το Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο πουλάει ενέργεια και οι οποίες κυμαίνονται από 3479.5 έως 3482.5 ώρες.



Σχήμα 5.11: Μέση ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).



Σχήμα 5.12: Το μέσο οικονομικό κέρδος και το μέσο κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η μέση ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος για κάθε χρόνο σε kWh, ενώ στο Σχήμα 5.12 φαίνεται το μέσο οικονομικό κέρδος και το μέσο κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε. Παρατηρείται ότι η μέση ενέργεια που αγοράστηκε στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μπαταρίες είναι σαφώς περισσότερη από την περίπτωση του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη μπαταριών που ικανοποιούσαν το φορτίο σε περιπτώσεις που δεν μπορούσαν τα Φ/Β πλαίσια. Συνολικά η μέση ενέργεια που πούλησε το σύστημα είναι σαφώς περισσότερη από την περίπτωση με τις μπαταρίες γεγονός που οφείλεται πάλι στην απουσία μπαταριών καθώς με την περίσσεια ενέργειας δεν φορτίζονται οι μπαταρίες.

5.3.3 Αυτόνομο Σύστημα

Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος ενσωματώνει την ανάλυση Monte Carlo και έτσι για 1000 πιθανές χρονοσειρές πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το μέσο συνολικό κόστος του συστήματος. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.10 το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 36 Φ/Β πλαίσια και 26 μπαταρίες και γωνία οροφής 38°.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	6	38	0	3*2	1
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	6	90	-90	3*2	1
Conventional	12	90	0	3*2	2
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	0	90	-90	-	-
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	26	-	-	2*13	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το μέσο συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 27703.48€ ενώ προκύπτει ότι το ποσοστό αποτυχίας είναι 0%. Σαν ποσοστό αποτυχίας ορίζεται το πόσες ώρες από τις 175200 ώρες λειτουργίας κατά μέσο όρο το σύστημα δεν καλύπτει το φορτίο.

5.4 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης #3

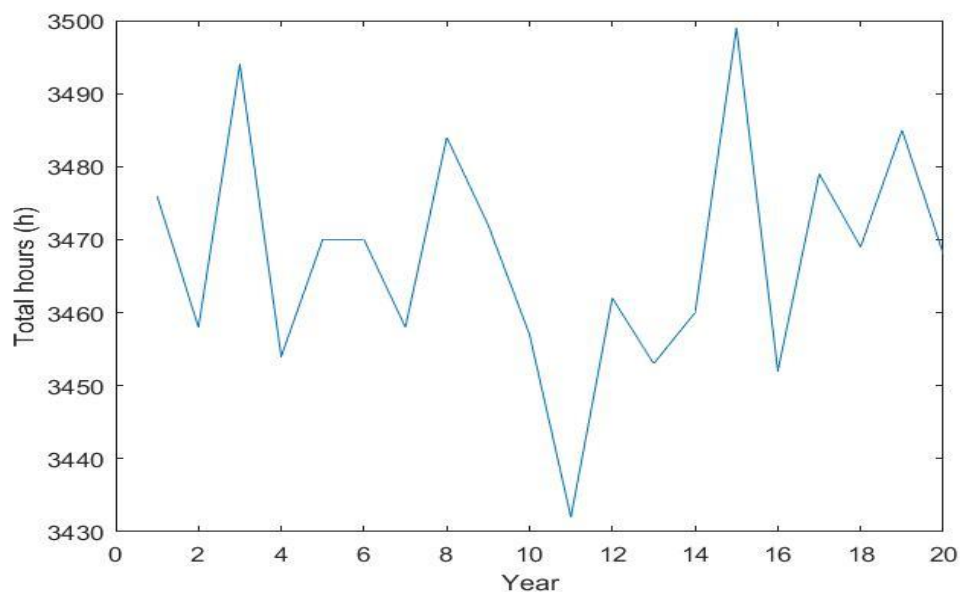
5.4.1 Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β οροφής και τον αριθμό μπαταριών τα οποία στη χειρότερη παραγωγή ενέργειας για 1000 διαφορετικές χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων να μπορούν κατά τη διάρκεια των 175200 ωρών λειτουργίας να δίνουν όσο το δυνατό περισσότερη ώρα ενέργεια στο δίκτυο. Βρέθηκε όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.11 ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 93 Φ/Β πλαίσια, 6 μπαταρίες και γωνία οροφής 38°.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

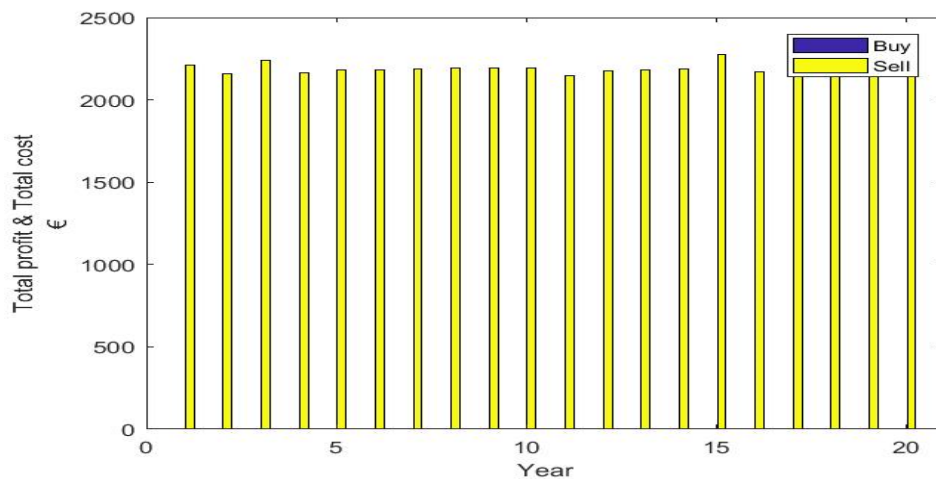
Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	38	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	3	90	90	3*1	1
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	12	90	90	3*2	2
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	6	-	-	2*3	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι οι συνολικές ώρες που το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο είναι 69352 ώρες. Το Φ/Β σύστημα συνολικά μπορεί να πουλάει 482987.80 kWh. Παρατηρείται βέβαια ότι το σύστημα αυτό λόγω των πολλών Φ/Β πλαισίων έχει μεγάλο κόστος εξοπλισμού. Το κόστος του εξοπλισμού φτάνει τα 25400€, όμως λόγω του γεγονότος ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, το σύστημα πουλάει αρκετές ώρες ενέργεια στο δίκτυο και το συνολικό καθαρό κόστος πέφτει στα 7143.28€.

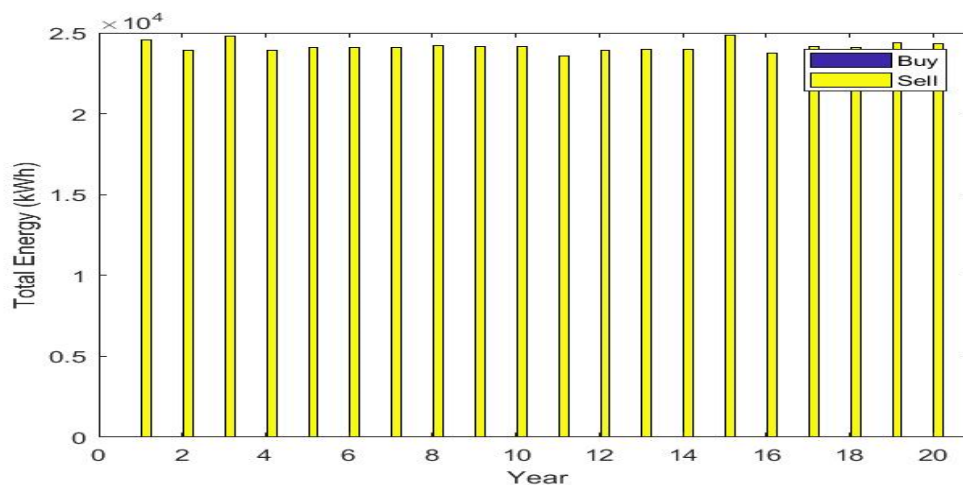


Σχήμα 5.13: Σύνολο ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας.

Στο Σχήμα 5.13 φαίνονται οι συνολικές ώρες κάθε χρόνου κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο, οι οποίες κυμαίνονται από 3432 έως 3499 ώρες.



Σχήμα 5.14: Το οικονομικό κέρδος και το κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).



Σχήμα 5.15: Ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα με μπαταρίες).

Στο Σχήμα 5.14 φαίνεται το οικονομικό κέρδος και το κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε, ενώ στο Σχήμα 5.15 φαίνεται πόση ενέργεια πωλείται και αγοράζεται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος σε kWh αντίστοιχα.

5.4.2 Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο

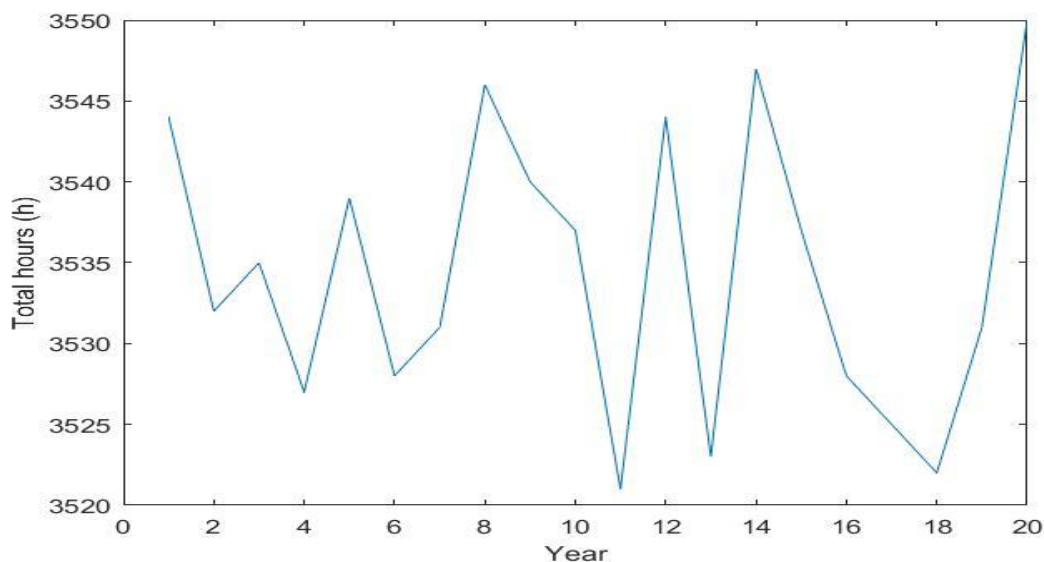
Ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης στην οροφή τα οποία στη χειρότερη περίπτωση παραγωγής ενέργειας να μπορούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας των 175200 ωρών του συστήματος να πωλούν όλο και περισσότερη ώρα ενέργεια στο δίκτυο. Ο Πίνακας 5.12 δείχνει ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με 93 Φ/Β πλαίσια συνολικά και γωνίας οροφής 5°.

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	5	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	3	90	90	3*1	1
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*1	1
Conventional	12	90	90	3*2	2
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	-	-	-	-	-

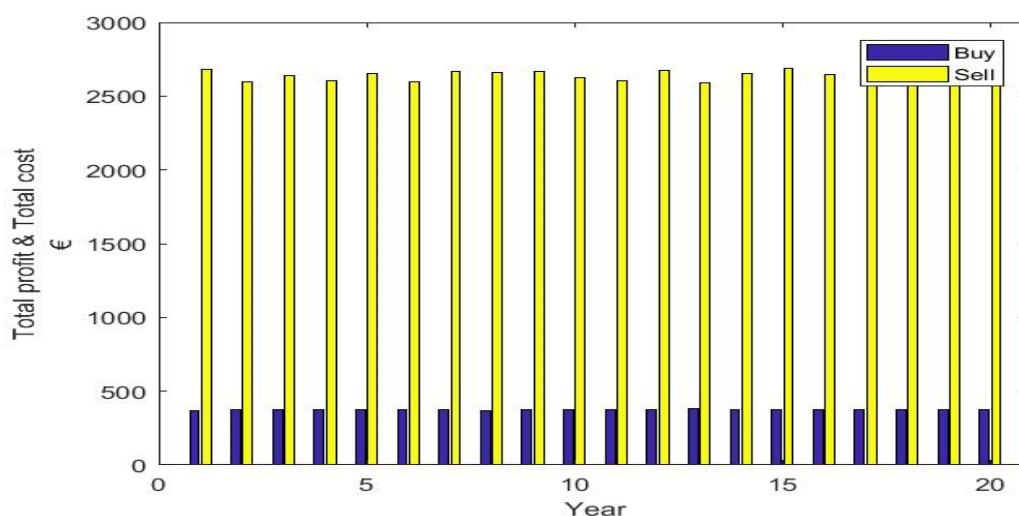
Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι οι συνολικές ώρες που το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο είναι 70687 ώρες. Παρατηρείται βέβαια ότι το σύστημα αυτό όπως και προηγουμένως λόγω των πολλών Φ/Β πλαισίων έχει μεγάλο κόστος εξοπλισμού. Το κόστος του εξοπλισμού φτάνει τα 24260€, όμως λόγω του γεγονότος ότι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος το σύστημα πουλάει για πολλές ώρες ενέργεια στο δίκτυο το συνολικό καθαρό κόστος

πέφτει στα 3338.14€. Η συνολική ενέργεια που το σύστημα μπορεί να πουλάει στα 20 χρόνια λειτουργίας είναι 581958.60 kWh.

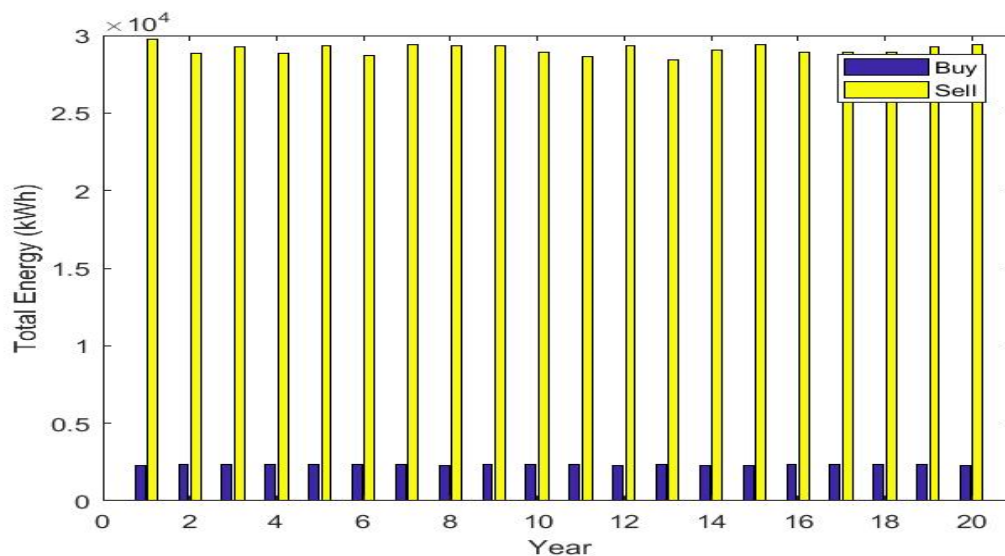


Σχήμα 5.16: Σύνολο ωρών κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).

Παραπάνω στο Σχήμα 5.16 φαίνονται οι συνολικές ώρες κάθε χρόνου κατά τις οποίες το σύστημα πουλάει ενέργεια στο δίκτυο, οι οποίες κυμαίνονται από 3521 έως 3550 ώρες.



Σχήμα 5.17: Το οικονομικό κέρδος και το κόστος για την ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε € για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).



Σχήμα 5.18: Ενέργεια που πωλείται και αγοράζεται σε kWh για κάθε χρόνο λειτουργίας (Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες).

Στο παραπάνω Σχήμα 5.17 φαίνεται το οικονομικό κέρδος και το κόστος σε € που είχε το σύστημα κάθε χρόνο από την ενέργεια που πωλήθηκε και αγοράστηκε ενώ στο Σχήμα 5.18 φαίνεται πόση ενέργεια αγοράστηκε και πουλήθηκε στο δίκτυο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος σε kWh και παρατηρείται ότι η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο είναι σαφώς περισσότερη από τη περίπτωση του διασυνδεδεμένου στο δίκτυο Φ/Β συστήματος με μπαταρίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην έλλειψη μπαταριών που ικανοποιούσαν το φορτίο σε περιπτώσεις που δεν μπορούσαν τα Φ/Β πλαίσια.

5.5 Αποτελέσματα με χρήση TMY #1

5.5.1 Φ/Β σύστημα με μπαταρίες διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται πως συμπεριφέρεται το Φ/Β σύστημα αν για δεδομένα καιρού έχει δεδομένα από ένα TMY αντί για δεδομένα από το SWGEN. Ο αλγόριθμος σε αυτή την περίπτωση πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Βρέθηκε ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.13 είναι ένα σύστημα με συνολικά 78 Φ/Β πλαίσια συνολικά, 6 μπαταρίες και γωνία οροφής 26°.

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	26	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	6	-	-	2*3	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 7021.02€. Για αυτό το σύστημα στη συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 πιθανές χρονοσειρές και προκύπτει ότι η μέση ενέργεια που μπορεί να πουλάει το σύστημα για 20 χρόνια λειτουργίας είναι 428523.91 kWh, η οποία είναι μικρότερη από τις περιπτώσεις χρήσης του SWGEN, ενώ η μέση ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι 0.39 kWh.

5.5.2 Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένο στο δίκτυο

Ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων και τη κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Στον Πίνακα 5.14 φαίνεται ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 78 Φ/Β πλαίσια και γωνία οροφής 26°.

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	30	26	0	3*2	5
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	0	0
Transparent	12	90	-90	3*2	2
Conventional	6	90	0	3*1	1
Conventional	0	90	90	0	0
Conventional	18	90	-90	3*2	3
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	-	-	-	-	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 3637.69€. Για αυτό το σύστημα στη συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 πιθανές χρονοσειρές και προκύπτει ότι η μέση ενέργεια που μπορεί να πουλάει το σύστημα για 20 χρόνια λειτουργίας είναι 534605.46 kWh, ενώ η μέση ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι 47355.67 kWh. Φαίνεται ότι η ενέργεια που αγοράζει το σύστημα είναι πολύ περισσότερη από την περίπτωση του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες γεγονός που δικαιολογείται μιας και δεν υπάρχουν μπαταρίες να καλύψουν το φορτίο τις ώρες που δεν παράγεται η απαιτούμενη ενέργεια. Και σε αυτή την περίπτωση γίνεται αντιληπτό ότι η μέση ενέργεια που μπορεί να πουλάει το σύστημα είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες περιπτώσεις με χρήση SWGEN. Επίσης, πρέπει να επισημανθεί ότι το η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι πολύ μεγαλύτερη.

5.5.3 Αυτόνομο Σύστημα

Ο αλγόριθμος πρέπει να βρει τον κατάλληλο αριθμό Φ/Β πλαισίων, μπαταριών καθώς και την κατάλληλη γωνία τοποθέτησης των Φ/Β πλαισίων στην οροφή τα οποία ικανοποιούν το απαιτούμενο φορτίο και ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος του συστήματος. Στον Πίνακα 5.15 φαίνεται ότι το σύστημα το οποίο μπορεί να επιτελέσει την παραπάνω διαδικασία είναι ένα σύστημα με συνολικά 36 Φ/Β πλαίσια συνολικά, 16 μπαταρίες και γωνία οροφής 47°.

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Αυτόνομου Φ/Β συστήματος.

Τύπος Φ/Β	Ποσότητα	Γωνία κλίσης (°)	Αζιμούθιο (°)	Φ/Β σε σειρά x Παράλληλοι κλάδοι	Ρυθμιστές τάσης
Roof	12	47	0	3*2	2
Transparent	12	90	0	3*2	2
Transparent	0	90	90	-	-
Transparent	6	90	-90	3*2	1
Conventional	6	90	0	3*2	1
Conventional	0	90	90	-	-
Conventional	0	90	-90	-	-
Inverters	2	-	-	-	-
Batteries	16	-	-	2*8	-

Για το παραπάνω σύστημα, η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι το συνολικό καθαρό κόστος ανέρχεται στα 24366.19€. Για αυτό το σύστημα στη συνέχεια γίνεται ανάλυση Monte Carlo για 1000 πιθανές χρονοσειρές και προκύπτει ότι το ποσοστό αποτυχίας είναι 0.001%. Σαν ποσοστό αποτυχίας ορίζεται πόσες ώρες από τις 175200 ώρες λειτουργίας κατά μέσο όρο το σύστημα δεν καλύπτει το φορτίο.

5.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις Φ/Β συστήματος:

- ✓ Φ/Β σύστημα με μπαταρίες συνδεδεμένο στο δίκτυο.
- ✓ Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες συνδεδεμένο στο δίκτυο.
- ✓ Αυτόνομο Σύστημα.

Πίνακας 5.16: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος με μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Είδος Βελτιστοποίησης	Συνολικό Κόστος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #2	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #3	Μέση Ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο
Βελτιστοποίηση #1	4045.02€	4045.02€	-	68315 h	259717.82 kWh
Βελτιστοποίηση #2	4423.89€	4415.12€	4423.89€	68077 h	428660.88 kWh
Βελτιστοποίηση #3	7143.28€	7075.48€	7087.52€	69352 h	482987.80 kWh
TMY #1	7021.02€	7021.02€	-	-	428523.91 kWh

Ο Πίνακας 5.16 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων βελτιστοποίησης για το Φ/Β σύστημα με μπαταρίες που είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο.

Αρχικά να σημειωθεί ότι με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #3 φαίνεται ότι στις άλλες βελτιστοποιήσεις αυξάνεται το συνολικό καθαρό κόστος τους, κάτι που είναι λογικό καθώς στη βελτιστοποίηση #3 αυξάνεται πολύ ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για να αυξηθούν οι ώρες που πουλάει ενέργεια στο δίκτυο. Όμως οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων #1, #2 που είναι το συνολικό και το μέσο συνολικό καθαρό κόστος αντίστοιχα, είναι μικρότερες από το συνολικό καθαρό κόστος της βελτιστοποίησης #3, επειδή αυτό έχει προκύψει για τη χειρότερη παραγωγή

ενέργειας. Φαίνεται ότι με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #2 η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης #1 έχει μικρότερη τιμή. Αυτό γίνεται γιατί με τη χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων η οποία χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση #1 μπορεί να παράγεται περισσότερη ενέργεια και έτσι να μειώνεται το συνολικό κόστος. Βέβαια, θα μπορούσε με τη χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων που θα χρησιμοποιούσε η βελτιστοποίηση #1, η συνολική παραγωγή ενέργειας να ήταν μικρότερη και έτσι το συνολικό κόστος να ήταν μεγαλύτερο. Επιπλέον, με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1 η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης #2 δεν έχει τελική τιμή κάτι που σημαίνει ότι σταματάει σε ένα περιορισμό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (η χωρητικότητα των μπαταριών κατά την τελευταία ώρα λειτουργίας είναι μικρότερη από την πρώτη ώρα λειτουργίας). Γίνεται αντιληπτό επίσης ότι με τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων #1, #2 μειώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης #3, που είναι οι συνολικές ώρες που το σύστημα πουλάει ενέργεια, γιατί τα αποτελέσματα τους έχουν προκύψει για μείωση του συνολικού και του μέσου συνολικού καθαρού κόστους αντίστοιχα.

Όσον αφορά την αξιοπιστία, φαίνεται ότι με την βελτιστοποίηση #3 το σύστημα μπορεί να πουλάει περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο όμως έχει πιο μεγάλο κόστος σε σχέση με τις βελτιστοποιήσεις #1 και #2. Αυτό είναι λογικό καθώς στην περίπτωση αυτή, το σύστημα για να μεγιστοποιήσει τις ώρες που πουλάει ενέργεια έχει μεγαλύτερο κόστος εξοπλισμού. Συγκριτικά με τη χρήση TMY, η περίπτωση με TMY (TMY #1) έχει μικρότερη αξιοπιστία από τη βελτιστοποίηση #2 και μεγαλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Σε σύγκριση με τις βελτιστοποιήσεις #1 και #2, με τη βελτιστοποίηση #3 αυξάνεται η αξιοπιστία μέχρι 85.9% αλλά για να επιτευχθεί αυτό αυξάνεται το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Παρατηρείται επίσης ότι η αξιοπιστία του συστήματος με τη βελτιστοποίηση #2 αυξάνεται κατά 65% συγκριτικά με τη βελτιστοποίηση #1, κάτι που δικαιολογείται αφού η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της βελτιστοποίησης #1 έχει προκύψει για μια πιθανή χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων. Γενικά, φαίνεται ότι η χρήση του SWGEN βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος όσον αφορά την ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο σε ποσοστό 0.03% για την περίπτωση βελτιστοποίησης #2 συγκριτικά με την περίπτωση που χρησιμοποιείται το TMY, ενώ οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων βελτιώνονται ως 42.3%

Πίνακας 5.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης Φ/Β συστήματος χωρίς μπαταρίες διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.

Είδος Βελτιστοποίησης	Συνολικό Κόστος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #2	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #3	Μέση Ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο
Βελτιστοποίηση #1	131.47€	131.47€	140.38€	69616 h	534775.06 kWh
Βελτιστοποίηση #2	140.38€	131.47€	140.38€	69616 h	534775.06 kWh
Βελτιστοποίηση #3	3338.14€	3276.74€	3284.57€	70687 h	581958.60 kWh
TMY #1	3637.69€	3637.69€	-	-	534605.46 kWh

Ο Πίνακας 5.17 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων βελτιστοποίησης για το Φ/Β σύστημα χωρίς μπαταρίες που είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο. Όπως και στον Πίνακα 5.16 έτσι και εδώ φαίνεται ότι χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα μιας βελτιστοποίησης στις άλλες δύο προκύπτουν τα ίδια συμπεράσματα. Φαίνεται ότι με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #2 η τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #1 έχει μικρότερη τιμή. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση #1 μπορεί να παράγεται περισσότερη συνολική ενέργεια. Θα μπορούσε με τη χρονοσειρά που παράγει η SWGEN για τη βελτιστοποίηση #1 να παράγεται λιγότερη συνολική ενέργεια και έτσι το κόστος να ήταν μεγαλύτερο. Γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων #1, #2 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #3 είναι μικρότερες από το συνολικό κόστος της βελτιστοποίησης #3 κάτι που οφείλεται στο ότι το συνολικό καθαρό κόστος της έχει προκύψει για τη χειρότερη παραγωγή ενέργειας. Με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1 ή #2 μειώνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (ώρες που πωλείται ενέργεια) της βελτιστοποίησης #3 γιατί οι βελτιστοποιήσεις #1, #2 μειώνουν το συνολικό και το μέσο συνολικό καθαρό κόστος αντίστοιχα.

Όσον αφορά την αξιοπιστία, όπως και στην περίπτωση του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες φαίνεται ότι με την βελτιστοποίηση #3 το σύστημα μπορεί να πουλάει περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο κατά 8.8% συγκριτικά με τις βελτιστοποιήσεις #1, #2

με τη διαφορά ότι έχει μεγαλύτερο κόστος. Αυτό είναι λογικό γιατί το σύστημα για να βελτιστοποιήσει τις ώρες που πουλάει ενέργεια έχει μεγαλύτερο κόστος εξοπλισμού. Από τον Πίνακα 5.17 επίσης φαίνεται ότι η βελτιστοποίηση #1 έχει το μικρότερο συνολικό κόστος και συγκριτικά με την αντίστοιχη περίπτωση βελτιστοποίησης με χρήση TMY #1 φαίνεται ότι η αξιοπιστία αυξάνεται αλλά σε μικρό βαθμό (0.03%). Τέλος, γενικά η χρήση του SWGEN βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος όσον αφορά την ενέργεια που πωλήθηκε στο δίκτυο και την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης συγκριτικά με τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται το TMY.

Πίνακας 5.18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης αυτόνομου συστήματος.

Είδος Βελτιστοποίησης	Συνολικό Κόστος	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #1	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης #2	Ποσοστό αποτυχίας % (ώρες που δεν ικανοποιείται το απαιτούμενο φορτίο)
Βελτιστοποίηση #1	22898.59€	22898.59€	-	0.002
Βελτιστοποίηση #2	27703.48€	27703.48€	27703.48€	0
TMY #1	24366.19€	24366.19€	-	0.001

Ο Πίνακας 5.18 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων βελτιστοποίησης για το αυτόνομο Φ/Β σύστημα. Αρχικά, παρατηρείται ότι με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #1 η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης #2 δεν έχει τελική τιμή κάτι που σημαίνει ότι σταματάει σε ένα περιορισμό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (η χωρητικότητα των μπαταριών κατά την τελευταία ώρα λειτουργίας είναι μικρότερη από την πρώτη ώρα λειτουργίας ή οι μπαταρίες δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο και η προσομοίωση τερματίζεται χωρίς επιτυχία). Επιπλέον, παρατηρείται ότι με τα αποτελέσματα κάθε βελτιστοποίησης οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων άλλων βελτιστοποιήσεων έχουν την ίδια τιμή γεγονός που οφείλεται στο ότι το συνολικό καθαρό κόστος εξαρτάται μόνο από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης #1 χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης #2 είναι ίδια με την τιμή της

αντικειμενικής συνάρτησης #2. Φαίνεται ότι με την βελτιστοποίηση #1 το σύστημα έχει ποσοστό αποτυχίας 0.002% και το μικρότερο κόστος ενώ με τη χρήση TMY #1 το σύστημα έχει ποσοστό αποτυχίας 0.001% .

Συγκριτικά με την περίπτωση που γίνεται χρήση TMY φαίνεται ότι η βελτιστοποίηση #2 είναι πιο αξιόπιστη από την TMY (TMY #1) και από τη βελτιστοποίηση #1, ενώ γενικά η αξιοπιστία του συστήματος χρησιμοποιώντας SWGEN αυξάνεται χρησιμοποιώντας ανάλυση Monte Carlo κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιοπιστία των Φ/Β συστημάτων είναι πολύ σημαντική μιας και όλο και περισσότερο ενσωματώνονται σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές. Για αυτό το λόγο, σε αυτή την διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η ανάπτυξη μίας μεθόδου για την βελτιστοποίηση της αξιοπιστίας Φ/Β συστημάτων που ενσωματώνονται σε κτήρια.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές βελτιστοποιήσεις οι οποίες βελτιστοποιούν την αξιοπιστία Φ/Β συστημάτων που ενσωματώνονται σε κτήρια:

- που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και έχουν τη δυνατότητα για αποθήκευση ενέργειας.
- που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο και δεν έχουν τη δυνατότητα για αποθήκευση ενέργειας.
- που αποτελούν ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα που δεν συνδέεται στο δίκτυο.

Οι βελτιστοποιήσεις γίνονται με τη χρήση του αλγορίθμου PSO και της ανάλυσης Monte Carlo ενώ κάνουν χρήση των δεδομένων που παράγει μία SWGEN με σκοπό να βελτιστοποιήσουν την αξιοπιστία του Φ/Β συστήματος. Τα συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο στόχο έχουν να πουλούν όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στο δίκτυο ενώ το αυτόνομο σύστημα στόχο έχει να ικανοποιεί το φορτίο όλες τις ώρες λειτουργίας για πολλές διαφορετικές χρονοσειρές. Συγκριτικά με τη χρήση ενός ΤΜΥ φαίνεται ότι το σύστημα γίνεται πιο αξιόπιστο και πιο οικονομικό για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η χρήση της ανάλυσης Monte Carlo γίνεται για να μειωθεί η επίδραση της τυχαιότητας των χρονοσειρών που παράγει ο SWGEN, ενώ ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιεί το κόστος του συστήματος ή να μεγιστοποιήσει τις ώρες κατά τις οποίες πωλείται ενέργεια στο δίκτυο (βελτιστοποίηση #3). Η αξιοπιστία του συστήματος χωρίς μπαταρίες που είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο, με χρήση του SWGEN και την ενσωμάτωση της ανάλυσης Monte Carlo κατά της διάρκειας της βελτιστοποίησης, βελτιώνεται κατά 0.03% συγκριτικά με τη χρήση ΤΜΥ. Το

ίδιο συμβαίνει και για την περίπτωση του Φ/Β συστήματος με μπαταρίες όπου η αξιοπιστία αυξάνεται κατά 0.03% (βελτιστοποίηση #2). Τέλος, με τη βελτιστοποίηση #3 η αξιοπιστία του συστήματος για τις περιπτώσεις που το σύστημα είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο αυξάνεται μέχρι και 85.9% συγκριτικά με τις βελτιστοποιήσεις #1 και #2, αλλά για να επιτευχθεί αυτό αυξάνεται το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος. Για το αυτόνομο σύστημα, η αξιοπιστία με τη χρήση της SWGEN ενσωματώνοντας την ανάλυση Monte Carlo κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης έχει ποσοστό αποτυχίας 0% με τη διαφορά όμως ότι έτσι αυξάνεται το κόστος του συστήματος.

Οι βελτιστοποιήσεις μπορούν να εφαρμοστούν για διάφορα είδη κατοικιών ενώ επίσης με παραλλαγή τους μπορούν να ενσωματωθούν και ανεμογεννήτριες ή αιολικά πάρκα αφού ο SWGEN έχει τη δυνατότητα να παράγει και ανεμολογικά δεδομένα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kiran Ranabhat, Leev Patrikeev, Aleksandra A. Revina, Kirill Andrianov, Valerii Lapshinsky, Elena Sofronova, “An introduction to solar cell technology”, Journal of Applied Engineering Science, Vol. 14, pp. 481-491, 2016.
- [2] Lewis F., “Low Cost Solar Electric Power”, 1st edn, Springer, University of Washington Seattle, 2014.
- [3] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών, «Οδηγός φωτοβολταϊκών», διαθέσιμο στη σελίδα https://helapco.gr/pdf/PV_Guide_Aug_2013.pdf , όπως ανακτήθηκε τον Ιανουάριο του 2022.
- [4] R. Dontikurti, A. Gurram, D. Rao, «Design of Knowledge Base for Efficient Solar Tracking», Journal of Applied Science and Computations (JASC), Vol. 6, pp. 371-388, 2019.
- [5] Σταυρακάκης Γ., "Σημειώσεις του μαθήματος Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", Πολυτεχνείο Κρήτης, 2020.
- [6] Κουτρούλης Ε., "Σημειώσεις του μαθήματος Ηλεκτρονικά Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας", Πολυτεχνείο Κρήτης, 2021.
- [7] Pierre Ailliot, Marie Boutigny, Eftichis Koutroulis, Athanasios Malisovas, Valérie Monbet, “Stochastic weather generator for the design and reliability evaluation of desalination systems with Renewable Energy Sources”, Renewable Energy, Vol. 158, pp. 541-553, 2020.
- [8] <https://www.mathworks.com/discovery/monte-carlo-simulation.html>
- [9] Γλυκός Θ., «Βελτιστοποίηση παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε κτήρια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα», Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019.
- [10] Athanasios Malisovas, Eftichios Koutroulis, “Design Optimization of RES-Based Desalination Systems Cooperating With Smart Grids”, IEEE Systems Journal, Vol. 14, pp. 4706-4717, 2020.

- [11] Shi Y., Eberhart R.C., "A modified particle swarm optimizer", Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp.69-73, 1998.