



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## **Ανάλυση Αξιοπιστίας, Λειτουργίας και Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ Φ. ΚΥΡΙΑΚΙΔΗΣ

**Επιβλέπων:** Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούνιος 2013





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Ανάλυση Αξιοπιστίας, Λειτουργίας και Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ Φ. ΚΥΡΙΑΚΙΔΗΣ

**Επιβλέπων:** Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...η Ιουνίου 2013.

(Υπογραφή)

.....  
Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Πάυλος Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2013

(Υπογραφή)

.....  
ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ Φ. ΚΥΡΙΑΚΙΔΗΣ  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ Φ. ΚΥΡΙΑΚΙΔΗΣ 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της αξιοπιστίας λειτουργίας και απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αναλύονται επίσης οι επιπτώσεις που προκαλούνται στα συστήματα, από διάφορα τυχαία καιρικά φαινόμενα, καθώς και στρατηγικές επιδιόρθωσης με σκοπό την μεγιστοποίηση του κέρδους. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε πρόγραμμα στο περιβάλλον προγραμματισμού της Matlab. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει την ετήσια προσομοίωση βλαβών του εκάστοτε φωτοβολταϊκού συστήματος και την προσομοίωση του καιρού της υπό μελέτη περιοχής, με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo.

Στην εργασία περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo, καθώς και διάφορες κατανομές όπως η εκθετική και κανονική, που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο. Περιγράφεται επίσης η συμπεριφορά και κίνηση του ήλιου ανά περιόδους και η μέθοδος υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Στην εργασία αναλύονται δύο φωτοβολταϊκά συστήματα. Το πρώτο σύστημα που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4 θεωρείται το πρότυπο σύστημα που έδωσε και το ερέθισμα για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Σκοπός είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με μέθοδο Monte Carlo, σε σχέση με τα αποτελέσματα που περιγράφονταν στο δημοσίευμα της βιβλιογραφίας [1]. Το δεύτερο σύστημα που περιγράφεται, βασίζεται στο φωτοβολταϊκό πάρκο που είναι εγκατεστημένο στο Tennessee των Η.Π.Α [2]. Αυτό είναι μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος σύστημα στο οποίο γίνεται η ανάλυση της επίδρασης των καιρικών συνθηκών.

Τέλος παρουσιάζεται μια ανάλυση ευαισθησίας για το δεύτερο φωτοβολταϊκό σύστημα από την οποία εξάγονται γενικά συμπεράσματα που αφορούν την συμπεριφορά και απόδοση του συστήματος αναλόγως του μεγέθους, της τοπολογίας και των καιρικών συνθηκών που επικρατούν.

### Λέξεις κλειδιά:

Φωτοβολταϊκό Σύστημα, Πεδίο, Υποπεδίο, Monte Carlo, Νέφωση, Overcast, Ικανότητα – Ισχύς, Δείκτες Αξιοπιστίας.



## ABSTRACT

The subject of this thesis is to analyze the operating, reliability and performance of photovoltaic systems. We also analyze the impact to the systems, caused by various random weather, and repair strategies in order to maximize profit. For this purpose, we developed a program in the programming environment of Matlab. The algorithm includes the annual simulation of faults, of each photovoltaic system and the simulation of the weather conditions, which prevailing at the under study area, using the Monte Carlo simulation method.

This paper describes the Monte Carlo simulation method, and various distributions such as exponential and normal, that used in the algorithm. Also describes the behavior and movement of the sun from time to time and the method used to calculate the solar radiation that reaches the surface of the earth.

We have analyzed two photovoltaic systems. The first system, presented in Chapter 4, is considered the prototype system that gave the stimulus for the drafting of this paper. The aim was to compare the results of the Monte Carlo simulation method, with the results described in the article of the literature [1]. The second system described, is based on the solar system located in Tennessee, USA [2]. This system's installed power is greater and here we analyze the influence of weather conditions to the system.

Finally, a sensitivity analysis for the second photovoltaic system is presented, from which general conclusions concerning the behavior and performance of the system depending on the size, topology and prevailing weather conditions, are exported.

### Keywords:

Photovoltaic System, field, subfield, Monte Carlo, Cloud, Overcast, Power, Reliability Index.





## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βάθους καρδίας τους γονείς και τον αδερφό μου για την απέραντη συμπαράσταση και βοήθεια που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Χωρίς την δική τους συμβολή δεν θα μπορούσα να καταφέρω τίποτα.

Θα ήθελα ακόμα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ευάγγελο Διαλυνά οποίος με εμπιστεύτηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Η συνεργασία που είχαμε από την έναρξη των σπουδών μου μέχρι και την ολοκλήρωση ήταν πραγματικά άψογη και για εμένα πολύ σημαντική.

Δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους κ. Λουκά Δαούτη Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και κ. Θοδωρή Διαγούπη για την βοήθεια που μου έδωσαν στα πρώτα σημαντικά στάδια της εργασίας αλλά και για το συνεχές ενδιαφέρον που έδειχναν κατά την εκπόνηση της.

Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συμφοιτητές μου για όλα τα χρόνια που περάσαμε μαζί. Ιδιαίτερα ευχαριστώ των συμφοιτητή και φίλο μου Χαράλαμπο Ρωσσίδη για τη βοήθεια του στα πρώτα μου βήματα με την Matlab.

Χρυσοβαλάντης Φ. Κυριακίδης

Ιούνιος 2013

## Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	13
1.1 Γενικά .....	14
1.2 Τύποι Βλαβών.....	15
1.3 Κριτήρια Απώλειας Συνέχειας.....	16
1.4 Παράμετροι Αξιοπιστίας.....	16
1.5 Δείκτες Αξιοπιστίας.....	18
1.6 Αξιοπιστία και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	21
ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO.....	21
2.1 Γενικά .....	22
2.2 Παραγωγή Τυχαίων Αριθμών .....	23
2.2.1 Γενικά.....	23
2.2.2 Παραγωγή ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων αριθμών.....	24
2.3 Παραγωγή Τυχαίων Μεταβλητών.....	26
2.3.1 Εκθετική κατανομή .....	27
2.3.2 Κανονική κατανομή .....	27
2.4 Στατιστική Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	31
2.5 Τεχνικές Μείωσης της Διασποράς.....	33
2.5.1 Μέθοδος των αντίθετων μεταβλητών.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	34
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	34
3.1 Γενικά .....	35
3.2 Υπολογισμός της Θέσης του Ήλιου .....	37
3.2.1 Καθορισμός γεωγραφικού πλάτους και μήκους.....	38
3.2.2 Υπολογισμός ηλιακής ώρας.....	39
3.2.3 Οριζόντιο σύστημα.....	40
3.2.4 Προσδιορισμός γωνιών 'β' και 'Ζ'.....	40
3.3 Ηλιακή Ακτινοβολία .....	42
3.3.1 Ηλιακή σταθερά .....	42

3.3.2 Ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη.....	42
3.3.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης.....	44
3.3.4 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο.....	47
3.4 Επίδραση της Σκίασης.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	51
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .....	51
4.1 Γενικά .....	52
4.2 Μοντέλο Συστήματος .....	52
4.3 Επίλυση με Αναλυτική Μέθοδο.....	57
4.3.1 Γενικά .....	57
4.3.2 Εύρεση πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος .....	57
4.3.3 Εύρεση ικανότητας και αποδιδόμενης ενέργειας του συστήματος .....	59
4.3.4 Συχνότητα κατάστασης και ρυθμός αναχώρησης.....	59
4.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	61
4.3.6 Μειονεκτήματα μεθόδου .....	62
4.4 Επίλυση με Μέθοδο Προσομοίωσης.....	63
4.4.1 Γενικά .....	63
4.4.2 Ανάλυση και επίλυση του μοντέλου .....	64
4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων .....	68
4.4.4 Ανάλυση στρατηγικών επιδιόρθωσης.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	73
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ MATLAB .....	73
5.1 Γενικά .....	74
5.2 Διαδικασία Προσομοίωσης Βλαβών.....	74
5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης Καιρού .....	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	92
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ .....	92
6.1 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	93
6.2 Επίδραση των Βλαβών και του Καιρού στην Τελική Απόδοση του Συστήματος .....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	103
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	103
7.1 Συμπεράσματα.....	104

Παράρτημα Α – Αναλυτική Μέθοδος για την Αξιοπιστία Λειτουργίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	110
Παράρτημα Β – Ιστογράμματα ωρών λειτουργίας του συστήματος σε κάθε διάστημα ισχύος ανά μήνα .....	114
Παράρτημα Γ – Διαγράμματα ροής (Flow charts) για τον αλγόριθμο προσομοίωσης βλαβών .	116
Παράρτημα Δ - Διαγράμματα ροής (flow charts) για τον αλγόριθμο προσομοίωσης του καιρού .....	120
<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i> .....	124

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται τα γενικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος και εξηγείται ο όρος 'αξιοπιστία συστημάτων'. Γίνονται επίσης αναφορές στα ήδη των βλαβών και στις παραμέτρους αξιοπιστίας που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των δεικτών αξιοπιστίας [3] [4]. Τέλος αναλύεται η σημασία της αξιοπιστίας στα συστήματα παραγωγής από ΑΠΕ.

## 1.1 Γενικά

Στη σύγχρονη εποχή η ποιότητα ενός συστήματος είναι συνυφασμένη με την αξιόπιστη λειτουργία του και το χρόνο ζωής του. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ανάγκη για συνεχή τροφοδότηση του καταναλωτή με ηλεκτρική ενέργεια υψηλής στάθμης ποιότητας, είναι επιτακτική. Η επίτευξη αυτού του στόχου, προϋποθέτει ότι, το σύστημα λειτουργεί εντός κάποιου συνόλου λειτουργικών περιορισμών ποιότητας, όπως είναι οι μεταβολές τάσης και συχνότητας αλλά και κάποια κριτήρια ευστάθειας του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση ο καταναλωτής θα πρέπει να έχει διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια κάθε στιγμή οπότε το σύστημα θα πρέπει να είναι αξιόπιστο. Η αξιοπιστία του συστήματος δεν μπορεί πρακτικά να φτάσει στο απόλυτο ποσοστό του εκατό τις εκατό. Μια ολόκληρη επιστήμη βρίσκεται πίσω από την μελέτη της αξιοπιστίας των συστημάτων, ψάχνοντας τρόπους βελτίωσης της στάθμης αξιοπιστίας ενός συστήματος, αλλά και τρόπους πρόβλεψης των καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα. Αυτή η γνώση είναι σημαντική ώστε να γίνει σωστός σχεδιασμός του συστήματος και να αποφευχθούν δυσάρεστες εκπλήξεις κατά τη λειτουργία του.

Ως αξιοπιστία του συστήματος, ορίζεται η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί με βάση τις προδιαγραφές λειτουργίας του για τη χρονική περίοδο που σχεδιάστηκε να λειτουργεί και με τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες.

Είναι φανερό από τον ορισμό ότι, μια μελέτη προσδιορισμού της αξιοπιστίας ενός συστήματος προϋποθέτει τον πλήρη καθορισμό των αρχών λειτουργίας του. Ο καθορισμός της αξιοπιστίας ενός συστήματος με πιθανοτηκές μεθόδους είναι ένα εργαλείο, το οποίο επιτρέπει στο μηχανικό, να έχει μια εικόνα για τα ενδεχόμενα βλάβης του συστήματος και την μελλοντική του συμπεριφορά.

Μετά τον πλήρη καθορισμό και κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος και των ιδιοτεροτήτων του, μπορεί να δημιουργηθεί ένα κατάλληλο μοντέλο που να το εξομοιώνει, και να επιλεγεί η βέλτιστη μέθοδος ανάλυσης του. Είναι λοιπόν απαραίτητο τόσο το μοντέλο όσο και η μέθοδος ανάλυσης να ανταποκρίνονται στον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το σύστημα σε ενδεχόμενα αποτυχίας ή επιτυχίας λειτουργίας του. Τα βήματα που ακολουθούνται για τον καθορισμό του μοντέλου και της μεθόδου ανάλυσης είναι τα ακόλουθα:

- Κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων του συστήματος.
- Κατανόηση της λειτουργίας του πλήρους συστήματος.
- Αναγνώριση του τρόπου αποτυχίας των επιμέρους στοιχείων και του συνολικού συστήματος.
- Εύρεση μεθόδων μείωσης των συνεπειών των αποτυχιών, με κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος.

Ακολουθώντας τα πιο πάνω βήματα προκύπτει ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει το συγκεκριμένο υπό μελέτη σύστημα. Η μέθοδος ανάλυσης του μοντέλου εξαρτάται επίσης από το συγκεκριμένο σύστημα και τις ιδιοτερότητες του. Σε κάθε περίπτωση το

μοντέλο που θα προκύψει δεν μπορεί να θεωρείται κατάλληλο για την επίλυση κάθε συστήματος. Η ακρίβεια και εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, είναι άμεσο αποτέλεσμα της επιλογής μοντέλου προσομοίωσης του πραγματικού συστήματος. Είναι σαφές ότι κανένα μοντέλο δεν μπορεί να εξομοιώσει με απόλυτη ακρίβεια ένα πραγματικό σύστημα. Αυτό που απαιτείται είναι το μοντέλο να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική λειτουργία. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την όσο το δυνατό μικρότερη απλοποίηση του μοντέλου και περιορισμό στις παραδοχές και προσεγγίσεις που γίνονται. Εντούτοις επειδή τα μοντέλα και οι αναλύσεις τους εκτελούνται με υπολογιστικά προγράμματα, θα πρέπει ο σχεδιασμός να είναι τέτοιος, που να επιτρέπει την εκτέλεση της προσομοίωσης σε λογικά χρονικά πλαίσια.

## 1.2 Τύποι Βλαβών

Οι διάφορες βλάβες που μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα σύστημα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση κάποια χαρακτηριστικά όπως το αν μπορούν να επισκευαστούν ή όχι, ή αν προκαλούν απομόνωση μεγαλύτερου τμήματος του συστήματος ή είναι τοπικές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διάφορα είδη βλαβών και αναλύεται η σημασία τους.

- **Παθητικές βλάβες** (Passive failure): είναι το κλασσικό είδος βλάβης κατά το οποίο το στοιχείο που υφίσταται την βλάβη βγαίνει εκτός λειτουργίας χωρίς όμως να ενεργοποιήσει κάποιο μέσο προστασίας. Η βλάβη του στοιχείου προκαλεί την αποκοπή μόνο του κλάδου στο οποίο βρίσκεται.
- **Ενεργές βλάβες** (Active failure): τέτοιου είδους βλάβη ενός στοιχείου προκαλεί, την λειτουργία του μέσου προστασίας της πρώτης ζώνης προστασίας, με αποτέλεσμα εκτός από τον κλάδο στον οποίο ανήκει το στοιχείο, ενδεχομένως να βγαίνουν εκτός λειτουργίας και άλλοι κλάδοι. Τέτοιες βλάβες είναι συνήθως τα βραχυκυκλώματα.
- **Μόνιμες βλάβες** (Permanent failure): είναι βλάβες κατά τις οποίες τα υλικά του στοιχείου υφίστανται φθορά και πρέπει να αντικατασταθούν. Οι μόνιμες βλάβες των στοιχείων έχουν μεγάλη διάρκεια, αφού η επιδιόρθωση τους απαιτεί χρόνο.
- **Παροδικές βλάβες** (Temporary failure): σε αντίθεση με τις μόνιμες, οι παροδικές βλάβες είναι μικρότερης διάρκειας αφού τα στοιχεία δεν υφίστανται υλικές ζημιές που να χρήζουν επιδιόρθωσης.
- **Μεταβατικές βλάβες** (Transient failure): είναι βλάβες που προκαλούνται κυρίως από χειρισμούς όπως ένταξη ή αποκοπή μονάδας ή φορτίου. Οι βλάβες αυτές δεν προκαλούν συνήθως φθορά των στοιχείων και αποκαθίστανται με την λειτουργία των προστασιών. Η διάρκεια τους είναι συνήθως πολύ μικρή.

- **Βλάβες Κοινής αιτίας (Common Mode failure):** είναι βλάβες που προκαλούνται σε περισσότερα από ένα στοιχεία, από κάποιο εξωτερικό αίτιο. Οι πολλαπλές βλάβες δεν είναι επακόλουθο ή μια της άλλης και συμβαίνουν συνήθως σε τοπικό επίπεδο.

Ένα τελευταίο είδος βλάβης που βγάζει μέρος του συστήματος εκτός λειτουργίας είναι η προγραμματισμένη συντήρηση. Η συντήρηση αν και δεν είναι κατ' ουσία βλάβη, εντάσσεται στις βλάβες αφού προκαλεί αποκοπή μέρους του δικτύου. Η διαφορά της συντήρησης από τα υπόλοιπα είδη, είναι ότι αυτή προγραμματίζεται και μπορεί να μην πραγματοποιηθεί, σε περίπτωση που κάποιο στοιχείο που επηρεάζει την σωστή λειτουργία του συστήματος, υπέστη βλάβη.

### 1.3 Κριτήρια Απώλειας Συνέχειας

Η προβληματική λειτουργία ενός ζυγού μπορεί να σημαίνει δύο πράγματα, ανάλογα με το κριτήριο βλάβης που θα χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν δύο κριτήρια βλάβης για ένα σύστημα, το κριτήριο της ολικής απώλειας της συνέχειας και το κριτήριο της μερικής απώλειας της συνέχειας [4].

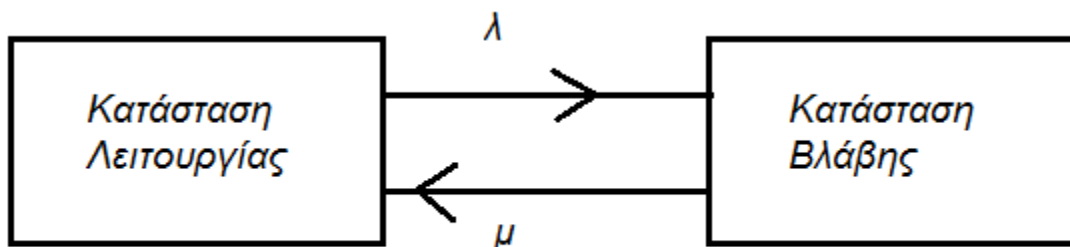
- **Ολική απώλεια της συνέχειας:** Όταν χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο κριτήριο, ως βλάβη θεωρούμε τα ενδεχόμενα κατά τα οποία ο ζυγός που εξετάζεται βγαίνει πλήρως εκτός λειτουργίας και δεν μπορεί να τροφοδοτήσει το φορτίο. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει όλοι οι κλάδοι που θα μπορούσαν να τροφοδοτήσουν το φορτίο να είναι σε βλάβη. Επίσης θεωρούμε ότι ο κάθε κλάδος έχει απεριόριστη ικανότητα και μπορεί να τροφοδοτήσει από μόνος του το φορτίο με πλήρη ισχύ.
- **Μερική απώλεια της συνέχειας:** Κατά το συγκεκριμένο κριτήριο ο κάθε κλάδος που τροφοδοτεί τον ζυγό έχει συγκεκριμένη ικανότητα φόρτισης. Βλάβη θεωρείται η κατάσταση στην οποία το φορτίο δεν τροφοδοτείται πλήρως, αφού κάποιος κλάδος έχει βγει εκτός. Τα ενδεχόμενα βλάβης με αυτό το κριτήριο είναι περισσότερα, αλλά η επίδραση τους στην τελική τροφοδοτούμενη ενέργεια είναι μικρότερη.

### 1.4 Παράμετροι Αξιοπιστίας

Στις πιο πάνω παραγράφους έγινε αναφορά στα θέματα αξιοπιστίας των συστημάτων και στα διάφορα είδη βλάβης που μπορεί να υποστεί ένα σύστημα. Σε μια ανάλυση ενός συστήματος, θα πρέπει όλα τα πιο πάνω να ποσοτικοποιηθούν για να μπορούν μέσω μαθηματικών μοντέλο να δώσουν την εικόνα του συστήματος.



Η ποσοτικοποίηση γίνεται μέσω των παραμέτρων αξιοπιστίας. Οι παράμετροι αυτοί εκφράζουν σε μονάδες χρόνου και μονάδες ενδεχομένων συνήθως τις διάφορες καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το σύστημα, καθώς και την διάρκεια παραμονής του σε αυτές. Το απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό των δύο καταστάσεων: 'λειτουργία' και 'βλάβη' όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1. Η μετάβαση από την μια κατάσταση στην άλλη εκφράζεται μέσω των παραμέτρων που εξηγούνται στην συνέχεια.



Σχήμα 1.1: Μοντέλο Markov δύο καταστάσεων

### Ρυθμός Βλάβης 'λ'

Ως ρυθμός βλάβης ορίζεται ο λόγος των παρατηρούμενων βλαβών του στοιχείου προς τον συνολικό χρόνο λειτουργίας του. Ο ρυθμός βλάβης έχει μονάδα μέτρησης τις 'βλάβες ανά μονάδα χρόνου' όπου η μονάδα χρόνου λαμβάνεται συνήθως το ένα έτος λειτουργίας. Από στο σχήμα 1.1 παρατηρείται ότι το 'λ' εκφράζει την μετάβαση από την κατάσταση λειτουργίας στην κατάσταση βλάβης. Οι ώρες μεταξύ των διαδοχικών βλαβών ορίζονται μέσω του δείκτη 'm' που είναι ο αντίστροφος του 'λ'.

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad \text{εξ.1.1}$$

### Ρυθμός επισκευής 'μ' ή μέσος χρόνος διάρκειας επισκευής 'r'

Ως μέσος χρόνος διάρκειας επισκευής καλείται ο χρόνος κατά τον οποίο το στοιχείο βρίσκεται στην κατάσταση βλάβης και επισκευάζεται. Η παράμετρος 'r' εκφράζει την μέση διάρκεια στην οποία το σύστημα είναι στην κατάσταση βλάβης και υφίσταται επισκευή και έχει μονάδες χρόνου. Το αντίστροφο του 'r' εκφράζει τον ρυθμό επισκευής ο οποίος κατά αντιστοιχία με τον ρυθμό βλάβης εκφράζει την μετάβαση από την κατάσταση βλάβης στην κατάσταση λειτουργίας.

$$r = \frac{1}{\mu} \quad \text{εξ.1.2}$$

## Μη διαθεσιμότητα 'U'

Μη διαθεσιμότητα του συστήματος είναι η πιθανότητα το σύστημα να είναι σε κατάσταση βλάβης, κάποια στιγμή στο μέλλον. Ως πιθανότητα το μέγεθος είναι αδιάστατο αλλά πολλές φορές μπορεί να εκφράζεται και σε μονάδες χρόνου (π.χ ώρες ανά έτος). Η μη διαθεσιμότητα του συστήματος μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του χρόνου εκτός λειτουργίας προς τον συνολικό χρόνο (χρόνος λειτουργίας + χρόνος εκτός λειτουργίας).

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{r}{r + m} \quad \text{εξ.1.3}$$

## Διαθεσιμότητα 'A'

Η διαθεσιμότητα του συστήματος κατ' αναλογία με τη μη διαθεσιμότητα, είναι η πιθανότητα που δηλώνει ότι το σύστημα θα λειτουργεί κάποια στιγμή στο μέλλον. Μπορεί να βρεθεί ως ο λόγος του χρόνου λειτουργίας προς τον συνολικό χρόνο (χρόνος λειτουργίας + χρόνος εκτός λειτουργίας) αλλά ισχύει και η σχέση  $A=1-U$ .

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{m}{m + r} \quad \text{εξ.1.4}$$

## 1.5 Δείκτες Αξιοπιστίας

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε λόγος για τις παραμέτρους αξιοπιστίας συστημάτων. Οι παράμετροι αξιοπιστίας είναι ουσιαστικά τα εργαλεία που μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε τους δείκτες αξιοπιστίας. Οι δείκτες αυτοί μας επιτρέπουν να εκφράσουμε την αξιοπιστία του συστήματος μέσα από αριθμούς. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποιοι βασικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται συνήθως.

### Διάρκεια Απώλειας Φορτίου

Ο δείκτης αυτός εκφράζει σε ώρες την αναμενόμενη διάρκεια κατά την οποία το σύστημα δεν μπορεί να τροφοδοτήσει τη ζήτηση φορτίου. Η χρονική διάρκεια λαμβάνεται συνήθως σε βάση ενός έτους (π.χ ώρες ανά έτος). Ο συγκεκριμένος δείκτης δεν μπορεί να προσδιορίσει τη χρονική στιγμή που δεν τροφοδοτείται το φορτίο (π.χ αιχμή) οπότε δεν είναι ικανός να προσδιορίσει το μέγεθος του προβλήματος και τις

επιπτώσεις του, καθώς επίσης δεν προσδιορίζει ούτε τη συχνότητα του προβλήματος. Εν τούτοις είναι ο δείκτης που χρησιμοποιείται κατά βάση στις μελέτες αξιοπιστίας.

### **Αναμενόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια 'A.M.T.E'**

Ο δείκτης αυτός εκφράζει την συνολική ενέργεια που δεν τροφοδοτείται συνήθως σε βάση ενός έτους (π.χ. MWh ανά έτος). Ο συγκεκριμένος δείκτης μπορεί να δώσει μια εικόνα του συνολικού προβλήματος και της σοβαρότητας του. Η εύρεση του δείκτη αυτού γίνεται με χρήση του δείκτη διάρκειας απώλειας φορτίου και δίνεται ως το γινόμενο αυτού και του φορτίου που δεν τροφοδοτείται την συγκεκριμένη περίοδο.

### **Ενεργειακός Δείκτης Αξιοπιστίας**

Ο δείκτης αυτός είναι ένα κανονικοποιημένο μέγεθος που εκφράζει το ποσοστό κάλυψης της ζήτησης από το σύστημα. Μπορεί να υπολογιστεί από το συμπλήρωμα της A.M.T.E που δίνει ουσιαστικά την πραγματική τροφοδοτούμενη ενέργεια διαιρεμένη με τη συνολική ζητούμενη ενέργεια. Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι χρήσιμος στη σύγκριση διαφόρων συστημάτων που έχουν συνήθως διαφορετικά μεγέθη.

### **Αναμενόμενη Συχνότητα Απώλειας Φορτίου**

Η συχνότητα απώλειας φορτίου εκφράζει τις φορές που το σύστημα μεταβαίνει από την κατάσταση τροφοδότησης στην κατάσταση απώλειας φορτίου και εκφράζεται σε γεγονότα ανά έτος. Με αυτό τον δείκτη έχουμε μια εικόνα του κάθε πόσο το σύστημα δεν θα μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο. Υπάρχει ακόμα ο δείκτης διάρκειας απώλειας που εκφράζεται ως ο λόγος της αναμενόμενης διάρκειας απώλειας φορτίου προς τη συχνότητα απώλειας φορτίου και μας δίνει τη διάρκεια των ανεπαρκειών.

## **1.6 Αξιοπιστία και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον στην αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως είναι η ηλιακή, η αιολική, η παραγωγή βιοκαλλιεργειών και άλλα σε ολόκληρο τον κόσμο. Οι τιμές των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχουν μειωθεί τα τελευταία πέντε χρόνια κατά 50% κάτι που οδήγησε σε μια εντυπωσιακή αύξηση του αριθμού των εγκαταστάσεων τους. Κατά το 2012 εγκαταστάθηκαν περίπου 6GW φωτοβολταϊκών στην Η.Π.Α και πάνω από 90GW

παγκοσμίως. Μόνο στην Γερμανία είναι εγκατεστημένα συστήματα των 30GW περίπου συνολικά. Έχουν τεθεί από την ευρωπαϊκή ένωση διάφοροι στόχοι, μέσο συμφωνιών, με πιο διαδεδομένο το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο προβλέπει διάφορες δράσεις από τις χώρες μέλη μέχρι το 2020. Η Ελλάδα έχει θέσει ως στόχο, την συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στην συνολική παραγωγή ενέργειας, κατά 40% μέχρι το 2020. Συγκεκριμένα ως εθνικός στόχος έχει τεθεί η εγκατάσταση 1500 MWp μέχρι το 2014 και συνολικά 2200 MWp μέχρι το 2020.

Η ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή βοηθά στη μείωση εκπομπής ρύπων μειώνοντας τις επιδράσεις στο περιβάλλον, ωστόσο δημιουργεί διάφορα προβλήματα στην λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα αυτά έχουν να κάνουν συνήθως με την ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας και καθιστούν την ικανότητα διείσδυσης των πηγών αυτών στο σύστημα μικρή [5].

Οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, ως ρυθμιστές του συστήματος κρατώντας τη στάθμη τάσης και συχνότητας εντός των προδιαγραφών. Το μεγάλο τους μειονέκτημα έγκειται στο ότι χρειάζονται αρκετό χρόνο για να ενταχθούν πλήρως όταν βρίσκονται σε κατάσταση μη λειτουργίας. Η στοχαστικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που προσθέτουν στο σύστημα οι ανανεώσιμες μονάδες, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη απώλεια φορτίου. Είναι σημαντικό λοιπόν να μπορεί να προβλεφθεί η παραγωγή αυτή και σε συνδυασμό με την πρόβλεψη των καταστάσεων βλάβης, να μπορεί να σχεδιαστεί και να λειτουργήσει το σύστημα με ευελιξία. Στην αντίθετη περίπτωση θα πρέπει το σύστημα να λειτουργεί με στρεφόμενη εφεδρεία συμβατικών μονάδων σε βαθμό μη οικονομικό.

Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθεί ένα λογισμικό πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab στο οποίο θα προσομοιώνεται ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Ο στόχος της εργασίας είναι να προσομοιώσει τη λειτουργία του πάρκου ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την αναμενόμενη απόδοση του σταθμού καθώς επίσης και σενάρια επιδιόρθωσης σε περίπτωση βλάβης. Είναι σημαντικό να υπάρχει μια εικόνα για την ανά ώρα ικανότητα αλλά και απόδοση του συστήματος για ένα έτος. Ο πιο πάνω στόχος θα επιτευχθεί με την χρήση της μεθόδου Monte Carlo η οποία αναλύεται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Με την μέθοδο αυτή γίνεται δυνατή η παρακολούθηση τις αναμενόμενης συμπεριφοράς του συστήματος σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ MONTE CARLO

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι τεχνικές της μεθόδου Monte Carlo και θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτή θα χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας.

## 2.1 Γενικά

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρθηκε η σημασία της ανάλυσης της αξιοπιστίας των συστημάτων στις μέρες μας. Έγινε επίσης αναφορά στο ρόλο που παίζει η αξιοπιστία λειτουργίας των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στο παρόν κεφάλαιο θα πρέπει να αναλυθούν οι διάφορες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί ώστε η ανάλυση αξιοπιστίας να γίνεται με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα κύρια είδη μεθοδολογιών που ακολουθούνται βασίζονται κυρίως είτε σε αναλυτικά μοντέλα που περιγράφουν το πρόβλημα, είτε σε μοντέλα προσομοίωσης των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο λειτουργίας. Και για τις δύο μεθόδους έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά προγράμματα τα οποία βοηθούν στην μοντελοποίηση είτε συγκεκριμένων προβλημάτων είτε γενικότερων μορφών τους. Τα κύρια προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η συγκέντρωση και αποθήκευση πληροφοριών για το πρόβλημα καθώς και η σωστή μοντελοποίηση του. Επίσης είναι σημαντικό χωρίς να ξεφεύγει από το ρεαλιστικό μοντέλο, το λογισμικό να είναι σε θέση να κάνει τους υπολογισμούς σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια. Ως εκ τούτου οι διάφορες προσεγγίσεις και απλοποιήσεις πρέπει να γίνονται με πολύ μεγάλη προσοχή.

Τα αναλυτικά μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην Αμερική και κάποιες χώρες της Ευρώπης. Το κύριο πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να ανιχνεύσουν με σχετική ευκολία, σπάνιες καταστάσεις βλάβης του συστήματος. Η αναλυτική μέθοδος στηρίζεται στην απαρίθμηση και ανάλυση των διαφόρων καταστάσεων του συστήματος. Αυτό έχει ως βασικό μειονέκτημα ότι σε συστήματα μεγάλου όγκου δεδομένων και καταστάσεων, η μέθοδος γίνεται αργή και δύσχρηστη. Αυτό ήταν και αντικείμενο μελέτης προς επίλυση. Ως εκ τούτου έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι που σκοπό έχουν την μείωση των καταστάσεων που συνεκτιμούνται, με εφαρμογή ειδικών κριτηρίων, καθώς και την ανάπτυξη μεθόδων διαβάθμισης της σοβαρότητας των καταστάσεων, ώστε οι λιγότερο σοβαρές καταστάσεις να αγνοούνται [3].

Σε αντίθεση με τα αναλυτικά μοντέλα, τα μοντέλα προσομοίωσης δεν χρησιμοποιούν τις καταστάσεις βλάβης του συστήματος αλλά προσομοιώνουν τις καταστάσεις κάθε στοιχείου χωρίς αυτό να σημαίνει ότι με τη βλάβη του στοιχείου παθαίνει βλάβη και το όλο σύστημα. Η κύρια μέθοδος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε και στην οποία στηρίζεται και η παρούσα εργασία είναι η μέθοδος Monte Carlo. Αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στην Γαλλία, Ιταλία και Βραζιλία. Η Monte Carlo στηρίζεται στην δημιουργία ενός πιθανοτικού μοντέλου του συστήματος. Ακολουθείται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων της επίλυσης του μοντέλου μέσω λογισμικού προγράμματος και καταγράφονται τα αποτελέσματα στο τέλος κάθε επίλυσης. Αυτά τα αποτελέσματα οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων, για την αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος που προσομοιώνει. Είναι ικανή μέθοδος για την εύρεση με μεγάλη ακρίβεια των συχνών βλαβών του συστήματος που όμως μπορεί να μην

προκαλούν πλήρη βλάβη του. Η μέθοδος προσομοίωσης είναι αρκετά ευέλικτη και δίνει πληροφορία για την χρονολογική σειρά των ενδεχομένων που σε κάποια προβλήματα είναι καθοριστικής σημασίας. Για παράδειγμα σε κάποιο φωτοβολταϊκό σύστημα η στιγμή που συμβαίνει η βλάβη σε σχέση με την ηλιοφάνεια την δεδομένη στιγμή είναι σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει ή όχι την τελική απόδοση του συστήματος. Πρέπει να τονιστεί ότι οι υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου προσομοίωσης εξαρτώνται σε μικρότερο βαθμό από το μέγεθος του συστήματος σε σχέση με τις αναλυτικές μεθόδους. Εν τούτοις οι μέθοδοι προσομοίωσης αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα, στην εύρεση των σπάνιων ενδεχομένων βλάβης. Για την ακριβή εύρεση απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων που συχνά είναι αρκετά χρονοβόρος. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκαν διάφορες τεχνικές μείωσης της διασποράς, που σκοπός τους είναι να μειώσουν την αβεβαιότητα σε σχέση με το πεπερασμένο μέγεθος των δειγμάτων, ώστε να επιταχύνουν την διαδικασία προσομοίωσης κρατώντας την ακρίβεια στα επιθυμητά επίπεδα [6].

## 2.2 Παραγωγή Τυχαίων Αριθμών

### 2.2.1 Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μέθοδος Monte Carlo είναι μια στατιστική μέθοδος που στηρίζεται στην θεωρία των πιθανοτήτων. Για να γίνει μια οποιαδήποτε προσέγγιση με την μέθοδο αυτή χρειάζεται να δημιουργηθούν κάποιοι τυχαίοι αριθμοί. Αυτοί θα εφαρμοστούν σε μια συνάρτηση πιθανότητας που περιγράφει το προς επίλυση μοντέλο και θα δώσουν μια τυχαία μεταβλητή ως αποτέλεσμα. Η τυχαία αυτή μεταβλητή θα εκφράζει κάποιο μέγεθος, χρήσιμο για την ανάλυση της αξιοπιστίας του συστήματος.

Η επιλογή των τυχαίων αριθμών γίνεται συνήθως με χρήση γεννητριών τυχαίων αριθμών, που είτε υπάρχουν έτοιμες και ενσωματωμένες σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον (όπως π.χ στη Matlab), είτε δημιουργούνται από τον αναλυτή του συστήματος. Η μαθηματική μέθοδος δημιουργίας τυχαίων αριθμών προϋποθέτει ότι οι αριθμοί δεν μπορούν να είναι εντελώς ασυσχέτιστοι μεταξύ τους οπότε καλούνται 'ψευδοτυχαίοι αριθμοί' [7]. Οι αριθμοί αυτοί κατανέμονται ομοιόμορφα στο διάστημα  $[0,1]$  και είναι ιδανικό, να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερη σχέση μεταξύ τους. Η γεννήτρια θα πρέπει να δημιουργηθεί έτσι ώστε οι αριθμοί που παράγονται να έχουν μεγάλη περίοδο επανάληψης. Αυτό σημαίνει ότι το πλήθος των διαφορετικών τυχαίων αριθμών που παράγονται, είναι αρκετά μεγάλο.

Αφού γίνει η παραγωγή των ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων αριθμών, με κατάλληλο μετασχηματισμό παράγονται από αυτούς, τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν

την κατάλληλη κατανομή, όπως αυτή περιγράφεται από το μοντέλο. Πιο κάτω παρουσιάζεται η γενική διαδικασία ως παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση [6]:

- Αρχικά παράγεται ο τυχαίος αριθμός που κατανέμεται ομοιόμορφα στο διάστημα  $[0, 1]$  με συνάρτηση κατανομής:

$$F_u(u) = \begin{cases} 0 & \text{για } u < 0 \\ u & \text{για } 0 \leq u < 1 \\ 1 & \text{για } u \geq 1 \end{cases}$$

- Στη συνέχεια βρίσκεται την τιμή της τυχαίας μεταβλητής 'x', ώστε  $F_x(x) = u$ . Η εύρεση του 'x' γίνεται με αντιστροφή της συνάρτησης όπως παρακάτω:

$$x = F_x^{-1}(u)$$

- Η τυχαία μεταβλητή 'x' που βρέθηκε, θα ακολουθεί την συνάρτηση κατανομής  $F_x(x)$  η οποία περιγράφει το προς επίλυση μοντέλο.

## 2.2.2 Παραγωγή ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων αριθμών

Η παραγωγή των ομοιόμορφα κατανεμημένων τυχαίων αριθμών είναι το πρώτο στάδιο της μεθόδου Monte Carlo. Στα προηγούμενα χρόνια, όταν η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών αλλά και οι δυνατότητές τους ήταν περιορισμένα, γίνονταν προσπάθειες καταγραφής πινάκων, τυχαίων αριθμών. Στις μέρες μας όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, τα διάφορα υπολογιστικά προγράμματα, ηλεκτρονικών υπολογιστών έχουν έτοιμες ενσωματωμένες γεννήτριες παραγωγής τυχαίων αριθμών.

Η δημιουργία των τυχαίων αριθμών στηρίζεται σε αναδρομικές σχέσεις υπολογισμού υπολοίπων που προκύπτουν από γραμμικό μετασχηματισμό. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται κυρίως είναι η 'πολλαπλασιαστική μέθοδος' και κάποιες παραλλαγές της, όπως είναι η 'μικτή μέθοδος'.

### Πολλαπλασιαστική Μέθοδος

Κατά την πολλαπλασιαστική μέθοδο σύγκλισης τα υπόλοιπα διαδοχικών δυνάμεων ενός αριθμού αποτελούν την σειρά των τυχαίων αριθμών που παράγονται όπως φαίνεται από την σχέση 2.1:

$$x_i = x^i \text{ mod}(m) \quad \text{εξ.2.1}$$



Το μειονέκτημα της πιο πάνω μεθόδου είναι ότι σε περίπτωση που το πλήθος των απαιτούμενων τυχαίων αριθμών είναι μεγάλο, οι υπολογισμοί είναι δύσκολο να εφαρμοστούν αφού γίνεται η ύψωση ενός αριθμού σε πολύ μεγάλη δύναμη.

Μια παραλλαγή της σχέσης 2.1 είναι η σχέση 2.2 όπου ο υπολογισμός γίνεται αναδρομικά όπως φαίνεται παρακάτω [6]:

$$x_{i+1} = ax_i \bmod(m) \quad \text{εξ.2.2}$$

όπου:

- $x_{i+1}$ : ο νέος τυχαίος αριθμός
- $x_i$ : ο τρέχον τυχαίος αριθμός
- $a$ : πολλαπλασιαστής (σταθερά που επιλέγεται κατάλληλα)
- $m$ : μέγιστο υπόλοιπο (επιλέγεται κατάλληλα)

Όπως φαίνεται από την εξίσωση 2.2 το 'x' παίρνει τιμές ακέραιες θετικές από μηδέν έως 'm'. Οι ζητούμενοι τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα [0,1] δίνονται από την σχέση 2.3:

$$u_i = \frac{x_i}{m} \quad \text{εξ.2.3}$$

Η αρχική τιμή  $x_0$  προσδιορίζεται έτσι ώστε να έχει μεγάλη περίοδο, οπότε θα πρέπει να είναι της τάξης το 'm'. Ο συντελεστής 'α' προέκυψε μέσα από μια στατιστική διαδικασία πολλών δοκιμών όπου παρατηρήθηκε ότι μια τιμή  $a = 7^5 - 1$  είναι μια καλή επιλογή [7]. Αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί η τιμή  $a = 2^{16}$  από την IBM στις αρχές της δεκαετίας του 70, όμως παρατηρήθηκε ότι οι αρχικοί αριθμοί που παράγονταν είχαν μεγάλη συσχέτιση. Τέλος το υπόλοιπο 'm' λαμβάνεται συνήθως ίσο με  $m = 2^k$  όπου το 2 εκφράζει τη βάση του συστήματος αρίθμησης που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι υπολογιστές (δυναμικό σύστημα) και 'k' είναι το μήκος της λέξης που δέχεται ο υπολογιστής.

## Μικτή Μέθοδος

Η μικτή μέθοδος σύγκλισης είναι θα λέγαμε μια γενίκευση της πολλαπλασιαστικής μεθόδου. Οι τυχαίοι αριθμοί περιγράφονται από της εξίσωση 2.4:

$$x_{i+1} = (ax_i + \beta) \bmod(m) \quad \text{εξ.2.4}$$

όπου:

- $\beta$ : σταθερός όρος αύξησης (θετικός ακέραιος)

Όπως και προηγουμένως, υπάρχουν κάποια κριτήρια για την επιλογή των συντελεστών της εξίσωσης. Το 'm' επιλέγεται με το ίδιο κριτήριο όπως και στην πολλαπλασιαστική μέθοδο. Οι συντελεστές 'α' και 'β' θα πρέπει να ικανοποιούν τα πιο κάτω κριτήρια:

- $a \bmod(8) = 5$  και  $\frac{m}{100} < a < m - \sqrt{m}$
- Το 'c' να είναι περιττός αριθμός και να ικανοποιεί τη σχέση  $\frac{c}{m} = \frac{1}{2} - \frac{1}{6}\sqrt{3} = 0.21132$

Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μεικτή μέθοδος με παραμέτρους όπως φαίνονται πιο κάτω:

α	314159269
β	453806245
m	2147483647

Οι πιο πάνω συντελεστές επιτρέπουν να παράγονται τυχαίοι αριθμοί που ικανοποιούν όλα τα κριτήρια που αναφέρθηκαν.

## 2.3 Παραγωγή Τυχαίων Μεταβλητών

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η διαδικασία παραγωγής τυχαίων αριθμών. Οι αριθμοί αυτοί θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή τυχαίων μεταβλητών. Οι τυχαίες μεταβλητές είναι επίσης τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή, η οποία επιλέγεται κατάλληλα με βάση το μοντέλο που αναλύεται. Οι τυχαίες μεταβλητές εκφράζουν αριθμητικά διάφορες παραμέτρους του συστήματος. Για παράδειγμα σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο υπάρχουν οι τυχαίες μεταβλητές που εκφράζουν τον χρόνο λειτουργίας μέχρι την επόμενη βλάβη και τη διάρκεια επισκευής του στοιχείου που παθαίνει τη βλάβη, καθώς επίσης και την διάρκεια της ηλιοφάνειας για κάθε μέρα.

Για τον προσδιορισμό των τυχαίων μεταβλητών αντιστρέφεται η συνάρτηση της κατανομής, όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο §2.2.1, και μπαίνει ως όρισμα ο τυχαίος αριθμός που είχε βρεθεί. Πιο κάτω γίνεται εκτενής ανάλυση της διαδικασίας για διάφορες κατανομές.

### 2.3.1 Εκθετική κατανομή

Η συνάρτηση κατανομής για την εκθετική κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$F_x(x) = 1 - e^{-\lambda x}, \quad x \geq 0 \quad \text{εξ.2.5}$$

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο §2.2.1 ψάχνουμε το 'x' ώστε να ικανοποιείται η σχέση  $F_x(x) = u$ , όπου το 'u' είναι ο τυχαίος αριθμός που έχει παραχθεί. Θα πρέπει λοιπόν να αντιστραφεί η  $F_x(x)$  και να λυθεί ως προς 'u' όπως φαίνεται πιο κάτω:

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - u) = -\frac{1}{\lambda} \ln(u) \quad \text{εξ.2.6}$$

Στην πιο πάνω εξίσωση έγινε η απλοποίηση  $\ln(1 - u) \equiv \ln(u)$  αφού οι 'u' είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα [0,1] όπως και οι '1-u'.

Ορίζοντας το σύνολο 'X = { x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>..., x<sub>n</sub> }' θα λέγαμε ότι αποτελείται από τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν την εκθετική κατανομή.

### 2.3.2 Κανονική κατανομή

Η κανονική κατανομή δεν μπορεί να βρεθεί με αναλυτική μέθοδο και συνήθως τα αποτελέσματα βρίσκονται σε ειδικούς πίνακες. Είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή στον τομέα των πιθανοτήτων και της στατιστικής. Στην παρούσα εργασία η κανονική κατανομή θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση της συμπεριφοράς των καιρικών συνθηκών όπως είναι η νεφωκάλυψη και ο δείκτης αιθριότητας σε μια περιοχή.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κανονικής κατανομής είναι συμμετρική γύρω από μια μέση τιμή και δίνεται από της εξίσωση 2.7.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{εξ.2.7}$$

όπου:

- σ: η τυπική απόκλιση
- μ: η μέση τιμή
- χ: η τιμή γύρω από την μέση τιμή

Η πιθανότητα ένας τυχαίος αριθμός  $x$  που ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή ' $\mu$ ' και τυπική απόκλιση ' $\sigma$ ', να βρίσκεται εντός ενός διαστήματος  $(\alpha_1, \alpha_2)$ , δίνεται από την ολοκλήρωση της εξίσωσης 2.7 όπως φαίνεται στην 2.8.

$$P_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad \text{εξ.2.8}$$

Όπως μπορεί να φανεί από την εξίσωση 2.8, η ολοκληρωτική σχέση είναι δύσκολο να εκφραστεί σε μια απλή αναλυτική μορφή, αφού το ολοκλήρωμα είναι δύσκολο να επιλυθεί με απλές ολοκληρωτικές μεθόδους. Εν τούτοις με αριθμητικές τεχνικές ολοκλήρωσης όπως την μέθοδο Simpson οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν.

Η μέθοδος Simpson χρησιμοποιείται για την εύρεση ολοκληρωμάτων της μορφής :  $\int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx$ . Αν το διάστημα ολοκλήρωσης  $[\alpha, \beta]$  υποδιαιρείται σε άρτιο πλήθος ίσου μήκους υποδιαστημάτων ( $n=2,4,6\dots$ ), που το κάθε ένα έχει μήκος  $h$ , τότε το ολοκλήρωμα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx = \frac{h}{3} \{f(x_0) + f(x_n) + 2[f(x_2) + f(x_4) + \dots + f(x_{n-2})] + 4[f(x_1) + f(x_3) + \dots + f(x_{n-1})]\}$$

$$\text{όπου: } h = \frac{\beta - \alpha}{n}$$

Για υπολογισμούς με το χέρι χρησιμοποιούνται συνήθως έτοιμοι πίνακες που δίνουν το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της κατανομής για ένα μεγάλο εύρος πιθανών ορίων. Για τους υπολογισμούς, βρίσκεται αρχικά η τυποποιημένη κανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ένα, με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad \text{εξ.2.9}$$

όπου η μεταβλητή ' $z$ ' υπολογίζεται από τον μετασχηματισμό:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad \text{εξ.2.10}$$

Εναλλακτικά για τον υπολογισμό της πιθανότητας  $P(z)$  του ' $z$ ' χρησιμοποιείται το προσεγγιστικό πολυώνυμο όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.11 [3].

$$P(z) = f(z)[b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5] + e(z) \quad \text{εξ.2.11}$$

όπου:

- $t = \frac{1}{1+rz}$
- $r = 0.2316419$
- $b_1 = 0.31938153$
- $b_2 = -0.356561782$
- $b_3 = 1.781477937$
- $b_4 = -1.821255978$
- $b_5 = 1.330274429$

Το σφάλμα υπολογισμών  $e(z)$  μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο αφού είναι της τάξης του  $10^{-8}$ . Λόγω της συμμετρικότητας της κανονικής κατανομής η πιθανότητα για αρνητικές τιμές το 'z' ισούται με την πιθανότητα για τις θετικές του τιμές.

Στην πραγματικότητα αυτό που μας ενδιαφέρει στην μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo είναι έχοντας την πιθανότητα που δίνεται ως τυχαίος αριθμός, να υπολογίσουμε την τιμή της τυχαίας μεταβλητής 'x' που θα ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αυτό μπορεί να γίνει υπολογίζοντας αρχικά το 'z' από την σχέση 2.12.

$$z = t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} + e(P) \quad \text{εξ.2.12}$$

όπου:

- $t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{p}\right)}$
- $c_0 = 2.515517$
- $c_1 = 0.802853$
- $c_2 = 0.010328$
- $d_1 = 1.432788$
- $d_2 = 0.189269$
- $d_3 = 0.001308$

Το σφάλμα  $e(P)$  είναι της τάξης το  $10^{-4}$  οπότε μπορεί πάλι να αμεληθεί. Για τον υπολογισμό της τυχαίας μεταβλητής 'x' που ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 'μ' και τυπική απόκλιση 'σ' μπορεί να λυθεί η εξίσωση 2.10 ως προς 'x'.

Η προσεγγιστική μέθοδος όπως περιγράφεται πιο πάνω, είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Επιπλέον για να δημιουργηθούν τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μετασχηματισμός Box-Muller, που βασίζεται σε πολικό σύστημα. Η πολική μέθοδος θα εκφραστεί με βάση την εκδοχή του R.Knop [8], η οποία είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Ο μετασχηματισμός Box–Muller, λέει ότι αν έχουμε δύο ανεξάρτητους τυχαίους αριθμούς  $U_1, U_2$ , ομοιόμορφα κατανομημένους στο διάστημα  $(0,1)$  τότε οι τυχαίες μεταβλητές  $X_1, X_2$  που ακολουθούν την κανονική κατανομή, δίνονται από τις σχέσεις:

$$X_1 = R \cos(\theta) = \sqrt{-2 \ln(U_1)} * \cos(2\pi U_2) \quad \text{εξ.2.7.α}$$

$$X_2 = R \sin(\theta) = \sqrt{-2 \ln(U_1)} * \sin(2\pi U_2) \quad \text{εξ.2.7.β}$$

όπου:

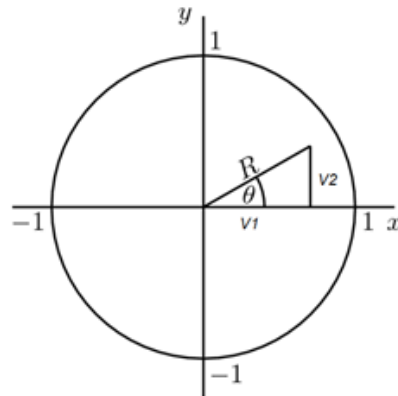
- $R^2 = -2 \ln U_1$
- $\theta = 2\pi U_2$

Όπως παρατηρείται για την εύρεση των τυχαίων μεταβλητών  $X_1, X_2$  χρειάζεται να λυθούν οι τριγωνομετρικές εξισώσεις. Αυτό προσθέτει καθυστέρηση στην επίλυση με υπολογιστή. Για να αποφευχθούν οι τριγωνομετρικές εξισώσεις θα γίνει χρήση του θεωρήματος των πολικών συντεταγμένων.

Με βάση το θεώρημα του R.Κνορ δοθέντων δύο τυχαίων αριθμών,  $V_1, V_2$  ομοιόμορφα κατανομημένων στο διάστημα  $[-1,1]$  τίθεται η εξίσωση:

$$s = R^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad \text{εξ.2.8}$$

Αν το  $s = 0$  ή  $s \geq 1$ , οπότε είναι εκτός του μοναδιαίου κύκλου, το ζεύγος  $V_1, V_2$  απορρίπτεται και δοκιμάζεται ένα καινούριο ζεύγος. Αφού τα  $V_1, V_2$  είναι ομοιόμορφα κατανομημένα και επιλέγονται μόνο σημεία που ανήκουν στον μοναδιαίο κύκλο, το  $s$  θα είναι επίσης ομοιόμορφα κατανομημένο στο ανοικτό διάστημα  $(0,1)$ .



$$R^2 = v_1^2 + v_2^2$$

$$\cos \theta = \frac{v_1}{R}$$

$$\sin \theta = \frac{v_2}{R}$$

Σχήμα 2.1: Κύκλος πολικών συντεταγμένων

Με βάση το πιο πάνω θεώρημα, όπως φαίνεται και στο σχήμα, μπορούν να αντικατασταθούν το  $\cos(\theta) = \cos(2\pi U_2)$  της εξίσωσης 2.7.α με το  $\cos(\theta) = \frac{V_1}{\sqrt{s}}$  και το  $\sin(\theta) = \sin(2\pi U_2)$  της εξίσωσης 2.7.β με το  $\sin(\theta) = \frac{V_2}{\sqrt{s}}$ .

Με τις πιο πάνω τροποποιήσεις καταλήγουμε στην τελική μορφή των εξισώσεων για τα  $X_1, X_2$  όπου δεν υπάρχουν πλέον οι τριγωνομετρικές πράξεις. Το  $U_1$  που είναι τυχαίος αριθμός κατανεμημένος στο διάστημα (0,1), μπορεί να αντικατασταθεί από το 's', που είναι επίσης τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στο ίδιο διάστημα.

Με τις πιο πάνω τροποποιήσεις λοιπόν καταλήγουμε στις εξής σχέσεις για τα  $X_1, X_2$  :

$$X_1 = V_1 * \sqrt{-\frac{2 \ln(s)}{s}} \quad \text{εξ.2.9.α}$$

$$X_2 = V_2 * \sqrt{-\frac{2 \ln(s)}{s}} \quad \text{εξ.2.9.β}$$

όπου:

- $V_1 = 2U_1 - 1$  ομοιόμορφα κατανεμημένο στο [-1,1]
- $V_2 = 2U_2 - 1$  ομοιόμορφα κατανεμημένο στο [-1,1]

## 2.4 Στατιστική Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Μέχρι στιγμής έχουν αναλυθεί οι μέθοδοι που ακολουθούνται για τον υπολογισμό μιας τυχαίας μεταβλητής 'X'. Η τυχαία μεταβλητή 'X', προκύπτει από την προσομοίωση του συστήματος και η τιμή της εκφράζει ένα μέγεθος που περιγράφει κάποια λειτουργία του συστήματος. Η αναμενόμενη μέση τιμή της 'X' είναι η παράμετρος 'μ' που πρέπει να προσδιοριστεί. Κατά τους κύκλους επαναλήψεων που γίνονται, κατά τη μέθοδο Monte Carlo, προκύπτουν διάφορες μεταβλητές 'X' (έστω 'v' στο πλήθος) που είναι όλες πανομοιότυπα κατανεμημένες με μέση τιμή 'μ'. Ο μέσος όρος της 'X' που δίνεται από την σχέση 2.10 είναι αυτός που δίνει μια εκτίμηση (ή προσεγγιστική τιμή) της παραμέτρου 'μ', που ζητείται. Ο αριθμός των επαναλήψεων ορίζεται συνήθως έτσι, ώστε η παράμετρος 'μ' που θα προκύψει να βρίσκεται εντός ενός ορίου εμπιστοσύνης γύρω από την μέση τιμή. Το όριο εμπιστοσύνης δίνεται ως διασπορά των δειγμάτων. Έτσι η κάθε μεταβλητή  $X_1, \dots, X_n$  που προκύπτει, έχει μέση τιμή την 'μ' και διασπορά  $\sigma^2$  που δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:  $\mu = E[X_i]$  και  $\sigma^2 = Var(X_i)$ .

Η μέση τιμή του δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{X_i}{\nu} \quad \text{εξ.2.10}$$

Η  $\bar{X}$  είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της παραμέτρου 'μ' αφού η αναμενόμενη τιμή της ισούται με την αναμενόμενη τιμή της 'μ'. Αυτό προκύπτει αν υπολογιστεί η μέση τιμή της  $\bar{X}$  και αντικατασταθεί σε αυτήν η εξίσωση 2.10 όπως φαίνεται πιο κάτω:

$$E(\bar{X}) = E\left[\sum_{i=1}^{\nu} \frac{X_i}{\nu}\right] = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{E[X_i]}{\nu} = \frac{\nu\mu}{\nu} = \mu$$

Η ποιότητα της  $\bar{X}$  σαν εκτιμήτρια της μέσης τιμής 'μ', δίνεται όπως φαίνεται στις πιο κάτω σχέσεις, ως το τετραγωνικό σφάλμα, που αποτελεί την αναμενόμενη τιμή των τετραγωνικών αποκλίσεων μεταξύ  $\bar{X}$  και 'μ'.

$$Var(\bar{X}) = E[(\bar{X} - \mu)^2]$$

$$Var(\bar{X}) = Var\left(\sum_{i=1}^{\nu} \frac{X_i}{\nu}\right) = \frac{1}{\nu^2} * \nu\sigma^2 = \frac{\sigma^2}{\nu} \quad \text{εξ.2.11}$$

Η  $\bar{X}$  είναι τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή 'μ' και διασπορά  $\frac{\sigma^2}{\nu}$  και θα είναι μια καλή εκτιμήτρια της 'μ' όταν η τυπική απόκλιση  $\frac{\sigma}{\sqrt{\nu}}$  παίρνει μικρές τιμές.

Η διασπορά του δείγματος ορίζεται από της εξίσωση 2.12 ως:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} (X_i - \bar{X})^2}{\nu - 1} \quad \text{εξ.2.12}$$

Η  $s^2$  είναι μια αμερόληπτη εκτιμήτρια της  $\sigma^2$ .

Σε κάθε διαδικασία προσομοίωσης επιλέγεται αρχικά μια αποδεκτή τιμή της τυπικής απόκλισης έστω 'ε'. Η διαδικασία της παραγωγής δειγμάτων συνεχίζεται μέχρι οι τιμές  $\frac{\sigma}{\sqrt{\nu}}$  και  $\frac{s}{\sqrt{\nu}}$ , να είναι μικρότερες από την τιμή 'ε'.

Όταν το μέγεθος του δείγματος είναι μικρό, η 's' μπορεί να μην είναι μια καλή εκτιμήτρια της 'σ' οπότε η διαδικασία που ακολουθείται διαφοροποιείται κάπως. Επιλέγεται και πάλι το όριο 'ε' και παράγονται τουλάχιστον 30 τιμές. Στη συνέχεια η επιπλέον παραγωγή τιμών θα σταματήσει όταν παραχθούν 'κ' τιμές ώστε  $\frac{s}{\sqrt{\kappa}} < \varepsilon$ . Η εκτιμήτρια 'μ' δίνεται από την εξίσωση 2.10 όπου το πλήθος είναι πλέον 'κ'.



## 2.5 Τεχνικές Μείωσης της Διασποράς

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο §2.1, το μειονέκτημα μιας μεθόδου προσομοίωσης είναι ότι απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό όγκο και χρόνο ώστε να εντοπίσει σπάνια ενδεχόμενα, αφού χρειάζεται μεγάλος αριθμός επαναλήψεων. Για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μείωσης της διασποράς του δείγματος, ώστε να επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση.

### 2.5.1 Μέθοδος των αντίθετων μεταβλητών

Η μέθοδος που αναλύεται είναι αυτή των αντίθετων μεταβλητών, που χρησιμοποιήθηκε και για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Ας υποθέσουμε ότι για την εκτίμηση της  $\mu = E[X_i]$  παράγονται οι μεταβλητές  $X_1$  και  $X_2$ , που ακολουθούν την ίδια κατανομή και έχουν μέση τιμή 'μ'. Τότε θα ισχύει ότι:

$$Var\left(\frac{X_1+X_2}{2}\right) = \frac{1}{4}[Var(X_1) + Var(X_2) + 2Cov(X_1, X_2)] \quad \text{εξ.2.13}$$

Όπως φαίνεται στην εξίσωση 2.13 αν οι  $X_1$  και  $X_2$  είναι αρνητικά συσχετισμένες μεταξύ τους η διασπορά που προκύπτει είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που θα προέκυπτε αν οι δύο μεταβλητές ήταν ανεξάρτητες.

Υποθέτοντας τώρα ότι η μεταβλητή  $X_1$  είναι συνάρτηση ενός πλήθους τυχαίων αριθμών, έστω  $X_1 = f(U_1, U_2, \dots, U_n)$  όπου οι  $U_1, U_2, \dots, U_n$  είναι ανεξάρτητοι τυχαίοι αριθμοί, πρέπει να οριστεί η  $X_2$  ώστε αυτή να είναι αρνητικά συσχετισμένη με την  $X_1$ . Εάν ο  $U$  είναι τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα  $(0,1)$  τότε και ο  $1-U$  θα είναι επίσης τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένος στο ίδιο διάστημα. Ως εκ τούτου η μεταβλητή  $X_2$  μπορεί να δοθεί κατ' αντιστοιχία με την  $X_1$  ως  $X_2 = f(1 - U_1, 1 - U_2, \dots, 1 - U_n)$  και θα έχει την ίδια κατανομή με την  $X_1$ . Επίσης αφού η  $1-U$  είναι αρνητικά συσχετισμένη με την  $U$ , αποδεικνύεται ότι και η  $X_2$  θα είναι αρνητικά συσχετισμένη με την  $X_1$  όταν η συνάρτηση 'f' είναι μονότονη [6].

Μέσο των πιο πάνω σκέψεων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μετά την παραγωγή των  $U_1, U_2, \dots, U_n$  τυχαίων αριθμών για την εύρεση της  $X_1$ , δεν χρειάζεται να γίνει παραγωγή νέας ομάδας τυχαίων αριθμών, αλλά, η  $X_2$  θα προκύψει από τους τυχαίους αριθμούς  $1 - U_1, 1 - U_2, \dots, 1 - U_n$ . Ως εκ τούτου μειώνεται η διασπορά αλλά και ο χρόνος υπολογισμού των δειγμάτων, αφού υπολογίζονται λιγότεροι τυχαίοι αριθμοί.

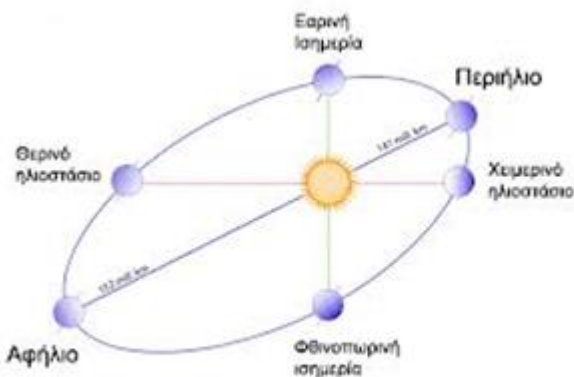
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και το πώς αυτή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες μέχρι να φτάσει στην γη. Θα παρουσιαστούν επίσης κάποια σημαντικά γενικά στοιχεία που αφορούν την γεωμετρία ήλιου – γης και τα διάφορα συστήματα προσδιορισμού της θέσης του ήλιου. Τέλος θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης αλλά και επί κεκλιμένου επιπέδου.

### 3.1 Γενικά

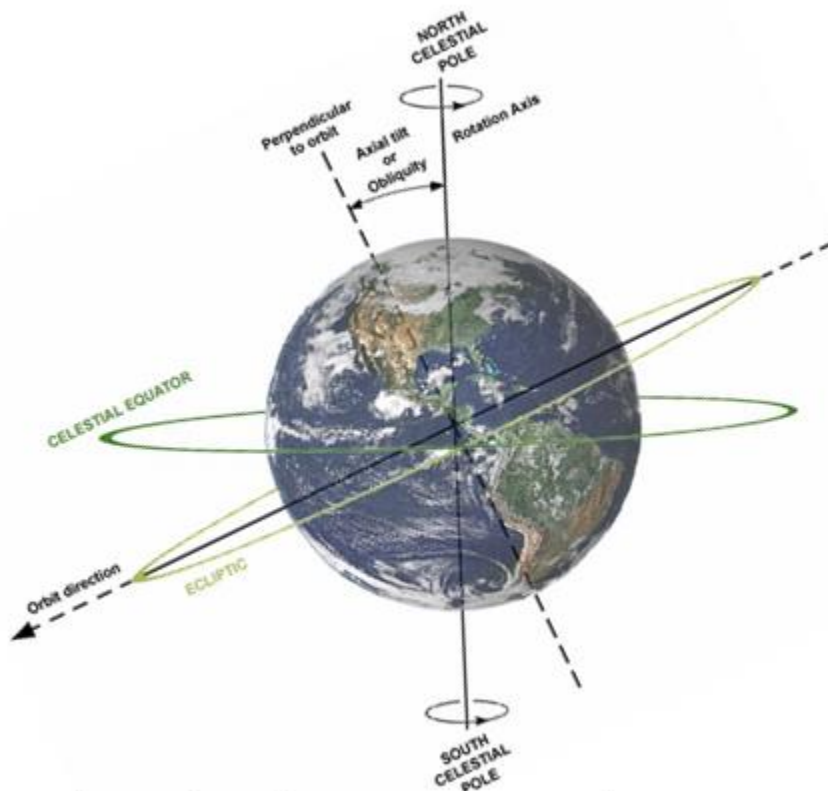
Είναι σημαντικό για τη μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος να μελετηθεί αρχικά η γεωμετρία ήλιου – γης. Ο ήλιος είναι το σταθερό άστρο του ηλιακού μας συστήματος, γύρω από τον οποίο κινείται η γη. Η Γη εκτελεί ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο, πάνω σε ένα νοητό επίπεδο, το «εκλειπτικό επίπεδο». Για την πλήρη περιστροφή της Γης γύρω από τον ήλιο χρειάζονται 365 ημέρες ενώ ο πλανήτης ολοκληρώνει μια ιδιοπεριστροφή γύρω από τον άξονα του σε 24 ώρες. Ο πολικός άξονας της γης σχηματίζει σταθερή γωνία ως προς εκλειπτικό επίπεδο που ισούται με  $23.45^\circ$  καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς, η απόσταση του κέντρου της γης από το κέντρο του ήλιου αυξομειώνεται κατά περιόδους και έχει υπολογιστεί ότι είναι περίπου  $1,5 * 10^8 Km \pm 1,7\%$  [9]. Αυτό είναι που δημιουργεί τις εποχές. Κατά τους θερινούς μήνες η γη βρίσκεται στο **αφήλιο** (μακρινότερη απόσταση), ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες βρίσκεται στο **περιήλιο** (κοντινότερη απόσταση). Στις 21 Μαρτίου καθώς και στις 21 Σεπτεμβρίου η γη βρίσκεται στη εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία αντίστοιχα, οπότε η διάρκεια της ημέρας είναι 12 ώρες όπως φαίνεται και στην πιο κάτω εικόνα 3.1.



Σχήμα 3.1: Γεωμετρία Ήλιου - Γης

Για να μελετηθεί η θέση του ήλιου ως προς τη γη, είναι ευκολότερο να θεωρηθεί ότι η γη είναι ακίνητη και ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από αυτή. Έτσι ένας παρατηρητής στο κέντρο της γης θα βλέπει τον ήλιο να περιστρέφεται γύρω από αυτήν, εκτελώντας τροχιά πάνω στο εκλειπτικό επίπεδο (ecliptic). Θα πρέπει να οριστεί επίσης και ένα άλλο επίπεδο, αυτό του ουράνιου ισημερινού (celestial equator) το οποίο εμπεριέχει τον ισημερινό της γης και τέμνει τον πολικό άξονα κάθετα. Ορίζοντας τα δύο αυτά επίπεδα η μεταξύ τους γωνία είναι ίση με  $23,45^\circ$ . Είναι φανερό ότι κατά τη διάρκεια του έτους ο ήλιος βρίσκεται σε διαφορετική θέση πάνω στο εκλειπτικό επίπεδο, ανάλογα με την μέρα του έτους. Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της γης πάνω στο οποίο φαίνονται οι νοητοί άξονες. Για ένα παρατηρητή στο κέντρο της γης, ο ήλιος

ανάλογα με την ημέρα του έτους φαίνεται να έχει διαφορετική γωνία ως προς το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού.



Σχήμα 3.2: Θέση του ήλιου ως προς τον παρατηρητή στη Γη

Η γωνία αυτή ονομάζεται ηλιακή απόκλιση, έχει εύρος  $\pm 23,45^\circ$  και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα 'δ'. Κατά τη διάρκεια της ημέρας η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά  $0,5^\circ$  οπότε για τους υπολογισμούς θεωρείται ότι παραμένει σταθερή για κάθε ημέρα [9]. Η γωνία 'δ' δίνεται από την εξίσωση:

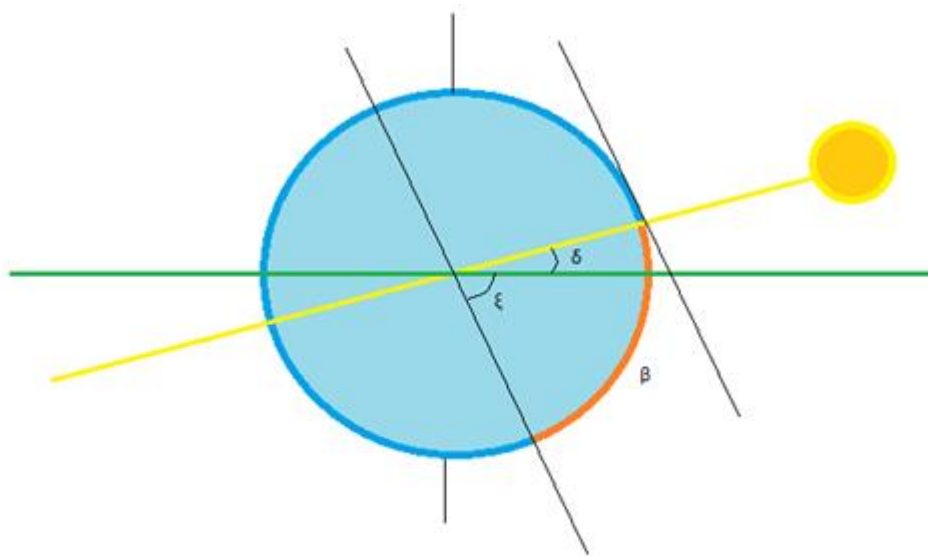
$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360^\circ}{365} * (DoY + 284)\right) \quad \text{εξ.3.1}$$

όπου:

- **DoY:** είναι η μέρα του έτους με πρώτη μέρα να θεωρείται η πρώτη Ιανουαρίου.

## 3.2 Υπολογισμός της Θέσης του Ήλιου

Όταν ο παρατηρητής βρίσκεται στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού, η γωνία της ηλιακής απόκλισης συμπίπτει με τη γωνία του ύψους του ήλιου. Στην πράξη ο παρατηρητής ή το ηλιακό πάνελ θα βρίσκονται στην επιφάνεια της γης και μάλιστα σε θέση μακριά από τον ισημερινό. Έτσι θα πρέπει να μεταφερθούν σε ένα παράλληλο σύστημα στο οποίο θα προσδιορίζεται η θέση του ήλιου σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Το σύστημα ονομάζεται παράλληλο αφού μεταφέρεται από το επίπεδο της επιφάνειας της γης παράλληλα στο κέντρο της, όπου είναι το σημείο αναφοράς. Σε σχέση με το νέο επίπεδο ο ήλιος σχηματίζει την γωνία 'δ' ως προς το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού, ενώ ο ουράνιος ισημερινός σχηματίζει μια άλλη γωνία (έστω 'ξ') ως προς το επίπεδο αναφοράς. Η γωνία (θέση) του ήλιου ως προς τον παρατηρητή θα είναι το άθροισμα των δύο γωνιών. Η γωνία αυτή θα συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα 'β'. Στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται παραστατικά ο τρόπος προσδιορισμού της γωνίας 'β'.



Σχήμα 3.3: Προσδιορισμός γωνίας 'β' Ήλιου

Ο προσδιορισμός της γωνίας ύψους του ήλιου 'β' είναι σημαντικός στις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων αφού με βάση αυτή γίνεται ο υπολογισμός της αποδιδόμενης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ παίρνει την μέγιστη τιμή της κατά την ηλιακή ώρα 12:00. Η γωνία 'β' εξαρτάται επίσης από τη θέση πάνω στην επιφάνεια της γης στην οποία βρίσκεται ο παρατηρητής.

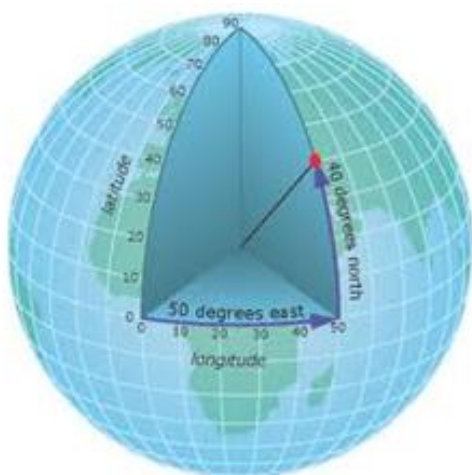
### 3.2.1 Καθορισμός γεωγραφικού πλάτους και μήκους.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος εύρεσης της θέσης του παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της γης. Κάθε σημείο πάνω στην επιφάνεια του πλανήτη χρειάζεται δύο συντεταγμένες για να προσδιοριστεί. Ο τρόπος προσδιορισμού ενός σημείου πάνω στην γη γίνεται με χρήση πολικών συντεταγμένων. Από το κέντρο της γης γίνεται ο υπολογισμός των δύο γωνιών που εκφράζουν το γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος, ως προς δύο επίπεδα αναφοράς.

Ο προσδιορισμός του γεωγραφικού πλάτους έχει ως αναφορά το επίπεδο του ισημερινού. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου αυτού και της νοητής γραμμής που ενώνει το κέντρο της γης με το σημείο που πρόκειται να προσδιοριστεί είναι η γωνία του γεωγραφικού πλάτους. Το γεωγραφικό πλάτος λαμβάνεται θετικό στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο νότιο.

Για τον προσδιορισμό του γεωγραφικού μήκους, ως επίπεδο αναφοράς θεωρείται το ημικύκλιο που τέμνει κάθετα το επίπεδο του ισημερινού και σχηματίζει τον μεσημβρινό που περνά από το αστεροσκοπείο του Greenwich στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού αναφοράς και του μεσημβρινού που περνά από την τοποθεσία που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η γωνία γεωγραφικού μήκους. Το γεωγραφικό μήκος λαμβάνει θετικές τιμές δυτικά του μεσημβρινού αναφοράς και αρνητικές ανατολικά του.

Στις πιο κάτω εικόνες παρουσιάζονται δύο παραδείγματα προσδιορισμού σημείων στην επιφάνεια της γης.



Σχήμα 3.4 - 3.5 : Προσδιορισμός της θέσης σημείου πάνω στην επιφάνεια της Γης

### 3.2.2 Υπολογισμός ηλιακής ώρας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο ήλιος για μια οποιανδήποτε τοποθεσία πάνω στη γη θα πάρει την υψηλότερη θέση του κατά την ηλιακή ώρα 12:00. Θα πρέπει να γίνει σαφές ότι η ηλιακή ώρα δεν συμπίπτει με την τοπική ωρολογιακή ώρα της περιοχής. Για την εύρεση της ηλιακής ώρας ακολουθείται μια μεθοδολογία κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη τόσο η θέση της περιοχής πάνω στη γη όσο και οι αποκλίσεις που υπάρχουν λόγω της ελλειπτικής τροχιάς που ακολουθεί η γη γύρω από τον ήλιο.

Αρχικά θα πρέπει να οριστεί ο μεσημβρινός αναφοράς της περιοχής για την οποία ενδιαφερόμαστε. Ο μεσημβρινός αναφοράς δίνεται από την εξίσωση 3.2:

$$L_{ST} = 15 \frac{\circ}{h} * \Delta T_{GMT} \quad \text{εξ.3.2}$$

όπου:

- $L_{ST}$ : ο μεσημβρινός αναφοράς
- $\Delta T_{GMT}$ : Ζώνη ώρας (για την Ελλάδα +2)

Αφού οριστεί ο μεσημβρινός αναφοράς η μεθοδολογία συνεχίζει στον υπολογισμό της εξίσωσης χρόνου η οποία εισάγει μια διόρθωση της ώρας που οφείλεται στην ελλειπτική τροχιά της γης.

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 * \cos(B) - 1,5 * \sin(B) \quad \text{εξ.3.3}$$

όπου:

- E: εξίσωση χρόνου σε λεπτά
- B: γωνία ημέρας σε μοίρες που δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{360}{365} * (DoY - 81)$$

Έχοντας ορίσει αυτούς τους δύο παράγοντες μπορεί να οριστεί η ηλιακή ώρα από την εξίσωση 3.4:

$$T_{solar} = T_{local} + E + 4 \frac{min}{\circ} * (L_{ST} - L_{local}) \quad \text{εξ3.4}$$

όπου:

- $T_{solar}$ : Ηλιακή ώρα
- $T_{local}$ : Τοπική ώρα (πάντα η χειμερινή ώρα είναι η σωστή)
- $L_{local}$ : Το γεωγραφικό μήκος της περιοχής

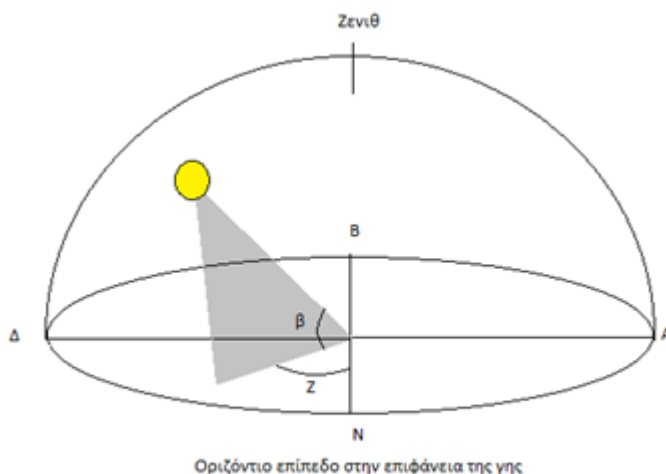
Όλοι οι υπολογισμοί που αφορούν την θέση του ήλιου και την ακτινοβολία που στέλνει γίνονται με αναφορά την ηλιακή ώρα πάντοτε.

### 3.2.3 Οριζόντιο σύστημα

Στην παράγραφο 3.2.1 παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται η θέση μιας περιοχής πάνω στην γη. Στη συνέχεια θα προσδιοριστεί η θέση των άστρων, ως προς τη συγκεκριμένη περιοχή. Το άστρο που μας ενδιαφέρει είναι ασφαλώς ο ήλιος. Για να προσδιοριστεί η θέση του ήλιου ανά πάσα στιγμή εισάγεται ένα νέο σύστημα συντεταγμένων. Το νέο σύστημα θα είναι οριζόντιο στην επιφάνεια της γης στη θέση του παρατηρητή. Θεωρείται ότι η γη είναι σταθερή και περιβάλλεται από τον ουράνιο θόλο, πάνω στον οποίο κινείται ο ήλιος. Η τομή της καθέτου του οριζοντίου επιπέδου με τον ουράνιο θόλο, προσδιορίζει το ζενίθ (υψηλότερο σημείο) της θέσης.

Με παρόμοια προσέγγιση όπως και για τον καθορισμό του γεωγραφικού πλάτους και μήκους, η θέση του ήλιου πάνω στον ουράνιο θόλο μπορεί να προσδιοριστεί με δύο πολικές γωνίες. Τα επίπεδα αναφοράς αυτή τη φορά είναι, το οριζόντιο επίπεδο και το ημικύκλιο που περνά από τον Νότο.

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως η γωνία ύψους του ήλιου 'β' είναι αυτή που ορίζεται από το οριζόντιο επίπεδο και την ευθεία μεταξύ του παρατηρητή και του ήλιου. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ημικυκλίου που περνά από τον νότο και αυτού που περνά από τον ήλιο πάνω στον ουράνιο θόλο ονομάζεται αζιμούθια γωνία και συμβολίζεται με το ελληνικό 'Ζ'. Η αζιμούθια γωνία προσδιορίζει την απόκλιση του ήλιου από τον νότο.



Σχήμα 3.6: Οριζόντιο Σύστημα συντεταγμένων

### 3.2.4 Προσδιορισμός γωνιών 'β' και 'Ζ'.

Έχοντας οριστεί όλες τις απαραίτητες έννοιες στις προηγούμενες παραγράφους μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στην παρουσίαση των μαθηματικών σχέσεων για την εύρεση των γωνιών 'β' και 'Ζ'. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι δύο αυτές



γωνίες εξαρτώνται από την ημέρα του έτους, την θέση πάνω στην γη και την ώρα της ημέρας.

Ο παράγοντας που επηρεάζεται από την ημέρα του έτους είναι η γωνία ηλιακής απόκλισης 'δ' η οποία δίνεται από την εξ.3.1 στην παράγραφο §3.1. Από την ώρα της ημέρας προσδιορίζεται η ηλιακή ωριαία γωνία, η οποία συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα 'ω' και δίνεται στην εξίσωση 3.5:

$$\omega = 15 \frac{\circ}{h} * (T_{SOLAR} - 12h) \quad \text{εξ.3.5}$$

όπου:

- ω: Ηλιακή ωριαία γωνία
- T<sub>solar</sub>: η ηλιακή ώρα για τον δεδομένο τόπο τη δεδομένη ημέρα (σε ώρες)
- 12: η ώρα για την ηλιακή μεσημβρία (στο ζενίθ)
- 15°/h: σταθερά αναλογίας ηλιακής γωνίας-ώρας.

Η ηλιακή γωνία ώρας παίρνει αρνητικές τιμές πριν το 'ηλιακό μεσημέρι' και θετικές τιμές μετά.

Τέλος προσδιορίζεται το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής όπως στην παράγραφο §3.2.1, το οποίο συμβολίζεται με το ελληνικό 'φ'.

Αφού προσδιοριστούν όλες οι πιο πάνω γωνίες μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της γωνίας ύψους του ήλιου από τη σχέση:

$$\sin(\beta) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) \quad \text{εξ.3.6}$$

Επίσης η αζιμούθια γωνία προσδιορίζεται από την σχέση:

$$\cos(Z) = \frac{\sin(\beta) * \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\beta) * \cos(\varphi)} \quad \text{εξ.3.7}$$

Με τον προσδιορισμό των πιο πάνω μπορεί να είναι γνωστή η θέση του ήλιου ανά ώρα, για κάθε μέρα του έτους.

## 3.3 Ηλιακή Ακτινοβολία

### 3.3.1 Ηλιακή σταθερά

Ο ήλιος προσφέρει καθημερινά μεγάλες ποσότητες ενέργειας στην επιφάνεια της γης. Για τον καθορισμό της ηλιακής ενέργειας που δέχεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο στη γη θα πρέπει να καθοριστούν κάποια μεγέθη, όπως είναι η ηλιακή πυκνότητα ισχύος. Στο διάστημα λίγο έξω από την ατμόσφαιρα της γης η ηλιακή πυκνότητα ισχύος έχει μικρές διακυμάνσεις λόγω της αλλαγής της απόστασης ήλιου – γης. Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο §3.1 η τροχιά της γης είναι ελλειπτική και έτσι η γη εισέρχεται στο **περιήλιο** της τροχιάς (κοντινή απόσταση) μετά το χειμερινό ηλιοστάσιο, ενώ εισέρχεται στο **αφήλιο** της τροχιάς της (μακρινή απόσταση) μετά το θερινό ηλιοστάσιο. Ως μέγεθος αναφοράς στο διάστημα λαμβάνεται η πυκνότητα ισχύος στο μέσο της απόστασης ήλιου – γης. Η ηλιακή σταθερά πυκνότητας ισχύος  $G_{Solar\ Constant}$  λαμβάνεται από το 1974 ίση με  $1353\text{W/m}^2$  ενώ από το 1991 υιοθετήθηκε η τιμή  $1367\text{ W/m}^2$  [9].

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει λίγο έξω από την ατμόσφαιρα της γης κάθε μέρα χρησιμοποιείται η σχέση:

$$G_{Extra\ Terrestrial} = G_{Solar\ Constant} * [1 + 0,033 * \cos(\frac{360^{\circ} * DoY}{365})] \quad \text{εξ.3.8}$$

όπου:

- $G_{Solar\ Constant}$ : η ηλιακή σταθερά ( $1367\text{ W/m}^2$ )
- $G_{Extra\ Terrestrial}$ : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{W/m}^2$ ) έξω από την ατμόσφαιρα της γης σε κάθετη συγκεκριμένη επιφάνεια για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους DoY.
- DoY: ημέρα του έτους.

### 3.3.2 Ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη

Η περίμετρος του ήλιου που αναλογεί στη γη είναι περίπου  $40000\text{km}$  και δεδομένης της ηλιακής σταθεράς που αναφέρθηκε προηγουμένως ( $1367\text{W/m}^2$ ) η συνολική ισχύς που δέχεται η γη από τον ήλιο είναι περίπου  $174000\text{TW}$ . Λόγω της γήινης ατμόσφαιρας που προστατεύει την επιφάνεια του πλανήτη, στην επιφάνεια της θάλασσας φτάνει περίπου  $1\text{kW/m}^2$  που αναφέρεται ως η ισχύς ενός ήλιου. Η ανηγμένη σε 'ισχύ ενός ήλιου' ισχύς που δέχεται ο πλανήτης στην επιφάνεια του ετησίως αντιστοιχεί σε 5 ώρες οπότε η ετήσια μέση ισχύς που προσπίπτει συνολικά στο επίπεδο της θάλασσας είναι

102000TW. Είναι φανερό ότι η ισχύς αυτή υπερκαλύπτει την παγκόσμια ενεργειακή απαίτηση του πλανήτη, είναι όμως δύσκολο να αξιοποιηθεί.

Στην παρούσα μελέτη θα πρέπει να προσδιοριστεί η ακτινοβολία που δέχονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, για να γίνει η εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με την απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν έχουν ως εξής:

- Καθορίζεται ο χώρος της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου (γεωγραφικό πλάτος και μήκος).
- Ορίζεται η γωνία απόκλισης του ήλιου 'δ' για κάθε μέρα του έτους.
- Ορίζεται η γωνία ανατολής/δύσης του ήλιου ( $\Omega$ ) για την κάθε μέρα.
- Προσδιορίζεται η διάρκεια ημέρας (N) από την γωνία ανατολής/δύσης του ήλιου.
- Υπολογίζεται ο μέσος ημερήσιος δείκτης αιθιότητας  $K_t$  που προσδιορίζει το ποσοστό ηλιοφάνειας.
- Υπολογίζεται η ανά ώρα προσπίπτουσα ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα πιο πάνω βήματα εξηγούν την διαδικασία για τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης. Κατά πάσα πιθανότητα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα είναι τοποθετημένα υπό κλίση ώστε σε αυτά να προσπίπτει η μέγιστη δυνατή ακτινοβολία. Για να γίνει ο προσδιορισμός αυτός εισάγονται κάποιοι διορθωτικοί όροι.

Γενικά είναι δύσκολο να προσδιοριστεί επακριβώς η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης, αφού επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την καθαρότητα της ατμόσφαιρας, όπως είναι η υγρασία, η σκόνη, η νέφωση κ.α. Για να γίνει λοιπόν μια προσέγγιση στις περισσότερες αναλύσεις μετράται η ακτινοβολία στο διάστημα και σε συνδυασμό με στατιστικά στοιχεία και μετρήσεις στην υπό εξέταση περιοχή υπολογίζεται η αναμενόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης.

Από τα στατιστικά στοιχεία υπολογίζεται η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο της επιφάνειας και ακολούθως προσαρμόζονται οι τιμές για κεκλιμένο επίπεδο [10]. Στην παρούσα μελέτη εισαγάγαμε στοιχεία που αφορούν την νέφωση στην περιοχή, από στατιστικά στοιχεία που λήφθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ). Με βάση τα στατιστικά αυτά στοιχεία γίνεται μια προσομοίωση τυχαίων γεγονότων νέφωσης όπως θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

### 3.3.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης

Σε αυτή την παράγραφο θα προσδιοριστεί επακριβώς η μεθοδολογία και θα δοθούν οι μαθηματικοί τύποι προσδιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης [9][10].

Αρχικά όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης όπου θα γίνει η εξέταση. Προσδιορίζεται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής καθώς και ο μεσημβρινός που βρίσκεται πιο κοντά σε αυτή. Η θέση του φωτοβολταϊκού πάρκου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην όλη μελέτη αφού από αυτήν εξαρτάται η σχετική θέση του ήλιου και τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά. Αφού καθοριστεί η γωνία 'φ' του γεωγραφικού πλάτους προσδιορίζεται η γωνία 'δ' από τη εξίσωση 3.1:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360^\circ}{365} * (DoY + 284)\right)$$

Η γωνία 'δ' υπολογίζεται για κάθε μέρα. Το τρίτο βήμα είναι να οριστεί η γωνία ανατολής/δύσης του ήλιου 'Ως' η οποία προσδιορίζει τη σχετική γωνία του ήλιου κατά την ανατολή ή τη δύση του και η οποία εκφράζεται σε ακίνια.

$$\Omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) * \tan(\delta)) \quad \text{εξ.3.9}$$

Με γνωστή την γωνία ώρας ανατολής/δύσης του ήλιου προσδιορίζεται η συνολική διάρκεια της ημέρας 'N', η οποία χρειάζεται για τον καθορισμό του δείκτη αιθριότητας.

$$N = \Omega_s * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{2}{15n} \quad \text{εξ.3.10}$$

Αφού έχει προσδιοριστεί η διάρκεια της ημέρας για τον υπολογισμό του δείκτη αιθριότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι.

1. Κατά την πρώτη μέθοδο υπολογίζεται η μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα της γης που δίνεται από τη εξίσωση 3.11:

$$H_o = \frac{24}{\pi} * G_{Solar\ Constant} * [1 + 0,033 * \cos(\delta)] * [\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\Omega_s) + \left(\frac{\pi}{180} * \Omega_s\right) * \sin(\varphi) * \sin(\delta)]$$

όπου:

- $H_o$ : μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα της γης
- $G_{Solar\ Constant}$ : η ηλιακή σταθερά ( $1367\text{ W/m}^2$ )
- $\Omega$ : γωνία ώρας ανατολής/δύσης του ήλιου σε ακτίνια

Ο δείκτης αιθριότητας με βάση την συγκεκριμένη μέθοδο δίνεται ως ο λόγος:

$$K_{\tau} = \frac{H}{H_o} \quad \text{εξ.3.12}$$

όπου με 'H' συμβολίζεται η μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης, όπως αυτή μετράται. Είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί στοιχεία τα οποία δίνονται από μετρήσεις στην συγκεκριμένη περιοχή. Σε περίπτωση που δεν υπάρχουν οι εν λόγω μετρήσεις η μέθοδος εφαρμόζεται με προσεγγιστικό τρόπο.

2. Η δεύτερη μέθοδος είναι και αυτή που θα εφαρμοστεί στην παρούσα μελέτη, και στηρίζεται σε στατιστικά στοιχεία τα οποία δίνονται από την Ε.Μ.Υ και στα οποία δεν παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις σε βάθος χρόνου. Η μαθηματική σχέση υπολογισμού του δείκτη αιθριότητας δίνεται πιο κάτω [9]:

$$K_{\tau} = \frac{H}{H_o} = a_2 + b_2 * \frac{n}{N_d} \quad \text{εξ.3.13}$$

Οι όροι  $a_2$  και  $b_2$  είναι συντελεστές που έχουν προσδιοριστεί εμπειρικά και λαμβάνουν υπόψη τα κλιματικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής. Συγκεκριμένα ο συντελεστής  $a_2$  δίνεται ως:

$$a_2 = 0,1 + 0,24\left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}_d}\right) \quad \text{εξ.3.14}$$

όπου

- $\bar{n}$ : είναι η μέση ετήσια ηλιοφάνεια (από στοιχεία της Ε.Μ.Υ)
- $\bar{N}_d$ : η μέση ετήσια διάρκεια της ημέρας.

Ο όρος  $b_2$  δίνεται κατά ανάλογο τρόπο ως:

$$b_2 = 0,38 + 0,08\left(\frac{\bar{N}_d}{\bar{n}}\right) \quad \text{εξ.3.15}$$

Έχοντας προσδιορίσει της δύο τιμές των  $a_2$  και  $b_2$  μπορεί να βρεθεί ο δείκτης αιθριότητας για κάθε μέρα του έτους. Ο υπολογισμός αυτός απαιτεί την γνώση της ηλιοφάνειας ανά ημέρα, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί είτε από μετρήσεις είτε μέσω της μεθόδου τυχαίων αριθμών που ακολουθούν εκθετική κατανομή και μέση τιμή που δίνεται από τα στατιστικά στοιχεία της Ε.Μ.Υ. Η μέθοδος επιλογής των τυχαίων αριθμών

γίνεται μέσο γεννήτριας τυχαίων αριθμών με βάση της μεθόδου Monte Carlo που εξηγείται σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας.

Ο δείκτης αιθριότητας καθορίζει τον βαθμό αιθριότητας στην υπό μελέτη περιοχή και επηρεάζει εκτός από την άμεση, και την διάχυτη ακτινοβολία. Η μέση διάχυτη ολική ακτινοβολία ανά ημέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{H_d}{H} = 1.446 - 2.965 * K_t + 1.727 * K_t^2 \quad \text{εξ.3.16}$$

Αφού έγιναν όλοι οι πιο πάνω υπολογισμοί μπορεί να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο πάνω στη γη. Αρχικά υπολογίζεται η μέση ωριαία ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα της γης που δίνεται από τη σχέση:

$$I_o = G_{Extra\ Terrestrial} * \sin(\beta) \quad \text{εξ.3.17}$$

όπου:

- Το  $G_{Extra\ Terrestrial}$  είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) έξω από την ατμόσφαιρα της γης και δίνεται από την εξ.3.8.
- Το  $\sin(\beta)$  είναι το ημίτονο της γωνίας ύψους του ήλιου που δίνεται από την εξ.3.6.

Για να γίνει ο υπολογισμός της μέσης ωριαίας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο πάνω στην επιφάνεια της γης πολλαπλασιάζεται το  $I_o$  με ένα συντελεστή διόρθωσης 'κ', ο οποίος εισάγει τις αλλοιώσεις που επιδέχεται η ηλιακή ακτινοβολία κατά την είσοδο της στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Ο συντελεστής 'κ' δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$$\kappa = K_t * (\alpha_1 + \beta_1 * \cos(\omega)) \quad \text{εξ.3.18}$$

όπου:

$$\alpha_1 = 0,409 + 0,5016 * \sin(\Omega_s - \frac{\pi}{3}) \quad \text{εξ.3.19}$$

και

$$\beta_1 = 0,6609 + 0,4767 * \sin(\Omega_s - \frac{\pi}{3}) \quad \text{εξ.3.20}$$

Η τελική τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης δίνεται ως:

$$I = I_o * \kappa \quad \text{εξ.3.21}$$

### 3.3.4 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στις πρακτικές εφαρμογές μας ενδιαφέρει κατά κύριο λόγο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Για τον προσδιορισμό λοιπόν αυτής πολλαπλασιάζεται το 'I' από την εξίσωση 3.21, με ένα συντελεστή διόρθωσης 'R'. Για την εύρεση του 'R' θα χρειαστεί να προσδιοριστούν δύο συντελεστές. Ο πρώτος συντελεστής συμβολίζεται με το 'R<sub>b</sub>' και δίνεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi-S)*\cos(\delta)*\cos(\omega)+\sin(\varphi-S)*\sin(\delta)}{\sin(\delta)*\sin(\varphi)+\cos(\delta)*\cos(\varphi)*\cos(\omega)} \quad \text{εξ.3.22}$$

Όπου:

- S: συμβολίζεται η κλίση του επιπέδου το οποίο μελετάμε.

Ο δεύτερος συντελεστής που πρέπει να οριστεί είναι ο λόγος της διάχυτης προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Η μαθηματική σχέση υπολογισμού δίνεται από την εξίσωση 3.23:

$$\frac{I_d}{I} = \frac{\frac{H_d}{H}}{\alpha_1 + \beta_1 * \cos(\omega)} \quad \text{εξ.3.23}$$

Αφού προσδιοριστούν και οι δύο πιο πάνω συντελεστές για κάθε ώρα της ημέρας υπολογίζεται ο τελικός συντελεστής διόρθωσης 'R' από τη εξίσωση 3.24:

$$R = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) * R_b + \left(\frac{I_d}{I}\right) * \frac{1+\cos(S)}{2} + p * \frac{1-\cos(S)}{2} \quad \text{εξ.3.24}$$

όπου:

- p: είναι ο δείκτης ανάκλασης και λαμβάνεται περίπου ίσος με 0,2

Η τελική τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός πλαισίου υπό κλίση 'S' δίνεται από τη σχέση:

$$I_s = I * R \quad \text{εξ.3.25}$$

## 3.4 Επίδραση της Σκίασης

Η εξίσωση 3.25 προϋποθέτει ότι το κεκλιμένο επίπεδο δέχεται ολόκληρη την ηλιακή ακτινοβολία ανά πάσα στιγμή λαμβάνοντας βέβαια υπόψη την σκίαση που προκαλείται από τις καιρικές συνθήκες. Ο παράγοντας νέφωση λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό του δείκτη αιθιρότητας μέσω των στατιστικών τιμών ηλιοφάνειας που λαμβάνονται από την Ε.Μ.Υ.

Αυτό που δεν λαμβάνεται υπόψη είναι η σκίαση που ενδεχομένως να προκαλείται από διάφορα αντικείμενα κοντά στον χώρο εγκατάστασης όπως κτίρια, βουνά και δέντρα. Όσον αφορά τους πιο πάνω τύπους εμποδίων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μελέτη κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού πάρκου. Στην παρούσα εργασία δεν θα ασχοληθούμε με αυτούς τους τύπους εμποδίων αφού δεν είναι γενικοί και αλλάζουν από εγκατάσταση σε εγκατάσταση.

Ένας παράγοντας σκίασης που μπορεί και πρέπει να μελετηθεί, είναι η σκίαση που υφίστανται τα πίσω πλαίσια από τα μπροστινά τους. Ο συνήθης τρόπος εγκατάστασης των πλαισίων είναι σε σειρές, οι οποίες βρίσκονται σε κάποια απόσταση η μια πίσω από την άλλη. Η απόσταση αυτή καθορίζεται στην μελέτη κατασκευής και επηρεάζει σημαντικά τις ώρες που τα πλαίσια θα δέχονται πλήρως την ηλιακή ακτινοβολία. Κατά τις ώρες που τα πλαίσια δεν φωτίζονται πλήρως από την άμεση ακτινοβολία υπολειτουργούν και αποδίδουν ισχύ αρκετά μικρότερη από την ονομαστική τους. Επίσης η μερική σκίαση των πλαισίων επιφέρει διάφορα προβλήματα όπως υπερθέρμανση των φωτοβολταϊκών κυψελίδων και καταπόνηση του υλικού μειώνοντας τον χρόνο ζωής.

Τα πιο πάνω φαινόμενα είναι εκτός του θέματος της παρούσας εργασίας οπότε δεν θα αναλυθούν περισσότερο εδώ. Ο χρόνος ζωής των πλαισίων θα λαμβάνεται από εργαστηριακές δοκιμές και από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Επίσης τα θέματα μερικής σκίασης και οι επιπτώσεις τους αναλύονται σε άλλες ειδικές μελέτες. Έχει βρεθεί από εργαστηριακές εφαρμογές ότι όταν η σκίαση υπερβαίνει το 10% περίπου του πλαισίου, αυτό αποδίδει πολύ λίγο οπότε η παραγόμενη ισχύς μπορεί να λαμβάνεται μηδενική. Αυτήν την προσέγγιση θα υιοθετήσουμε και στην παρούσα εργασία.

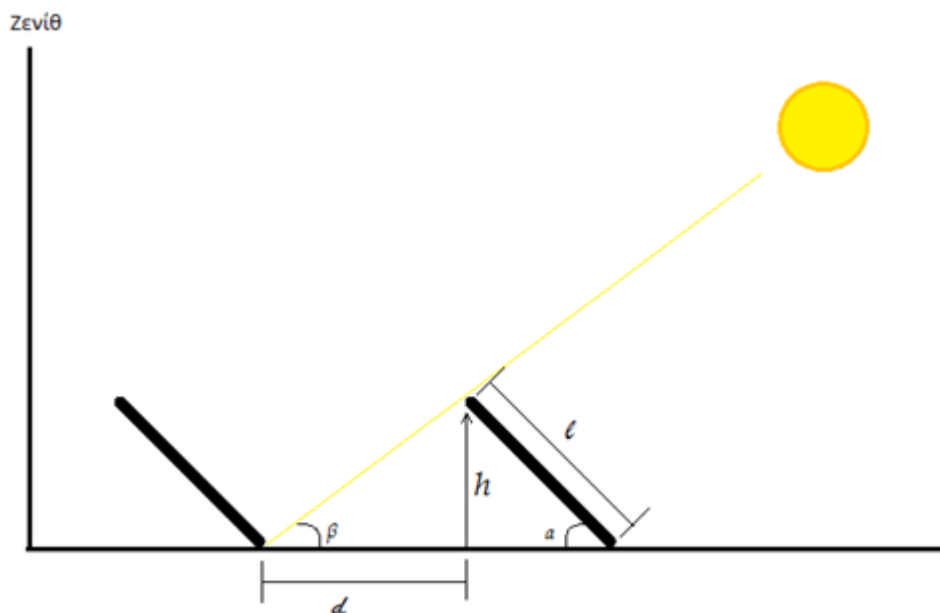
Με βάση τα όσα αναφέρονται πιο πάνω είναι σκόπιμο να ληφθεί υπόψη η σκίαση που προκαλείται μεταξύ των πλαισίων. Αυτό που πρέπει να προσδιοριστεί είναι οι ώρες της ημέρας κατά τις οποίες όλα τα πλαίσια θα δέχονται πλήρως την ηλιακή ακτινοβολία. Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί έχει τα εξής βήματα:

- Χρειάζονται ως δεδομένα το μήκος των πλαισίων, η απόσταση μεταξύ τους και η γωνία εγκατάστασης.
- Υπολογίζεται το ύψος των πλαισίων.
- Από το ύψος και την μεταξύ τους απόσταση υπολογίζεται η γωνία πρόσπτωσης του ήλιου  $\beta'$ .
- Για κάθε μέρα υπολογίζεται η γωνία απόκλισης  $\delta'$ .
- Έχοντας τη γωνία  $\beta'$ ,  $\delta'$  και  $\varphi'$  υπολογίζεται για κάθε μέρα η γωνία  $\omega'$
- Από την γωνία  $\omega'$  υπολογίζεται η ηλιακή ώρα κατά την οποία αρχίζει η πλήρης ηλιοφάνεια
- Υπολογίζεται η διάρκεια πλήρους ηλιοφάνειας.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την πιο πάνω μεθοδολογία.



Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωμετρία του συστήματος που αναλύεται. Απεικονίζονται δύο σειρές πλαισίων και θεωρείται ότι όταν η σκιά που προκαλεί το μπροστά πλαίσιο στο πίσω του φτάσει στη βάση του πίσω πλαισίου ξεκινούν τα πλαίσια να έχουν μέγιστη απόδοση.



Σχήμα 3.7: Επίπτωση σκίασης σειρών από μπροστινές σειρές τους

Με δεδομένα τα  $l, d$  και  $a$  προσδιορίζουμε το ύψος  $h$  από την ως:

$$h = l * \sin(a) \quad \text{εξ.3.26}$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η γωνία 'β' μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$\beta = \arctan(h/d) \quad \text{εξ.3.27}$$

Η γωνία 'β' και άρα η θέση του ήλιου είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους οπότε αυτό που θα αλλάζει με τις εποχές είναι η ηλιακή ώρα κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται σε αυτή τη θέση. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί η γωνία ώρας 'ω' για κάθε μέρα του έτους. Για τον υπολογισμό αυτό πρέπει να βρεθεί η γωνία απόκλισης του ήλιου 'δ' από την εξίσωση 3.1 και ακολούθως η γωνία 'ω' λύνοντας την εξίσωση 3.6 ως προς 'ω' όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$\omega = \arccos\left(\frac{\sin(\beta) - \sin(\delta) * \sin(\varphi)}{\cos(\delta) * \cos(\varphi)}\right) \quad \text{εξ.3.28}$$

Έχοντας υπολογίσει την γωνία 'ω' της ημέρας, από την εξίσωση 3.5 λύνοντας ως προς το  $T_{Solar}$  βρίσκεται η ώρα κατά την οποία το πλαίσιο ξεκινά να φωτίζεται πλήρως.

$$T_{Solar} = 12 (h) - \frac{\omega (rad)}{15(\frac{\circ}{h}) * \frac{\pi}{180}} \quad \text{εξ.3.29}$$

Η διάρκεια ηλιοφάνειας θα είναι από την ώρα  $T_{Solar}$  (πριν το ηλιακό μεσημέρι) μέχρι την ώρα  $(24 - T_{Solar})$ , (μετά το μεσημέρι).

Αφού λοιπόν είναι γνωστό πλέον ποιές και πόσες ώρες την ημέρα τα πλαίσια θα φωτίζονται, θα πρέπει από τις τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός πλαισίου που βρέθηκαν από την εξίσωση 3.25, να αφαιρεθούν εκείνες οι τιμές που αντιστοιχούν σε ώρες πριν το υπολογισμένο  $T_{Solar}$  και μετά την ώρα  $(24 - T_{Solar})$ . Έτσι η συνολική ετήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία θα είναι λιγότερη και πιο κοντά στην πραγματική αναμενόμενη τιμή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των βημάτων που έγιναν για την ολοκλήρωση του τελικού λογισμικού προγράμματος προσομοίωσης. Θα γίνει επίσης αναφορά στη βιβλιογραφία από την οποία πάρθηκε το ερέθισμα για την εκπόνηση της εργασίας και οι στόχοι που τέθηκαν ώστε να διερευνηθούν κατά πόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ακολουθούν τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [1][11].

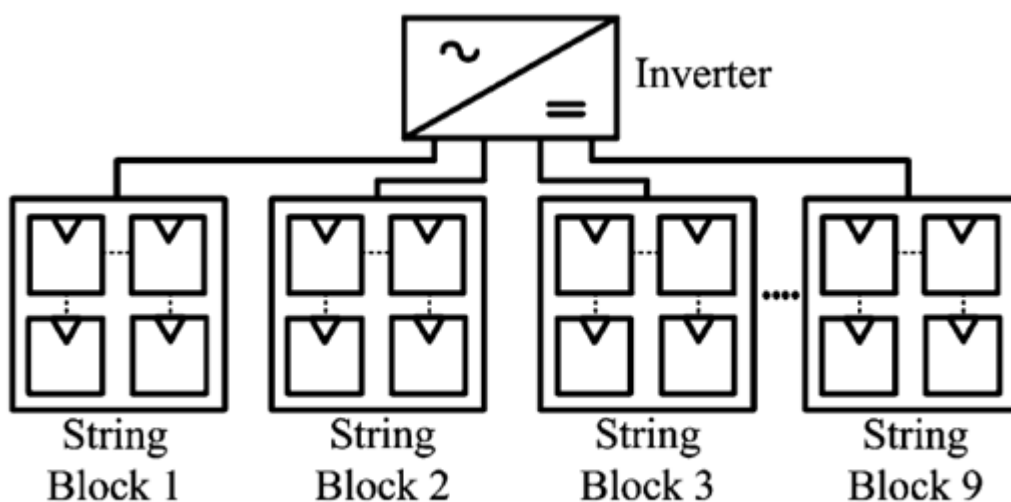
## 4.1 Γενικά

Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο δύο, η ανάλυση αξιοπιστίας ενός συστήματος μπορεί να γίνει είτε με αναλυτικές μεθόδους, είτε με μεθόδους προσομοίωσης. Όλη η παρούσα εργασία είχε ως ερέθισμα μια δημοσίευση των Sairaj V. Dhople και Alejandro D. Dominguez-Garcia, στο περιοδικό της IEEE [1]. Στην πιο πάνω δημοσίευση αναλυόταν η αναμενόμενη αξιοπιστία και απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με αναλυτικές μεθόδους. Η προσέγγιση του προβλήματος γινόταν με την ανάλυση του μοντέλου Markov, το οποίο περιέγραφε τις καταστάσεις του συστήματος. Το θεωρητικό υπόβαθρο της θεωρίας Markov παρατίθεται στο Παράρτημα 1. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει παρουσίαση του Case Study έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η διαδικασία προσέγγισης του μοντέλου.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο Case Study παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες στο να αναλυθεί μέσω αναλυτικών μεθόδων. Αυτό ήταν που οδήγησε στην δημιουργία του λογισμικού προσομοίωσης και στη χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει σαφής, η ευελιξία που προσφέρει η μέθοδος στην ανάλυση του προβλήματος αλλά και στην προσθήκη νέων παραμέτρων ώστε αυτό να αναλύεται με μεγαλύτερο ρεαλισμό.

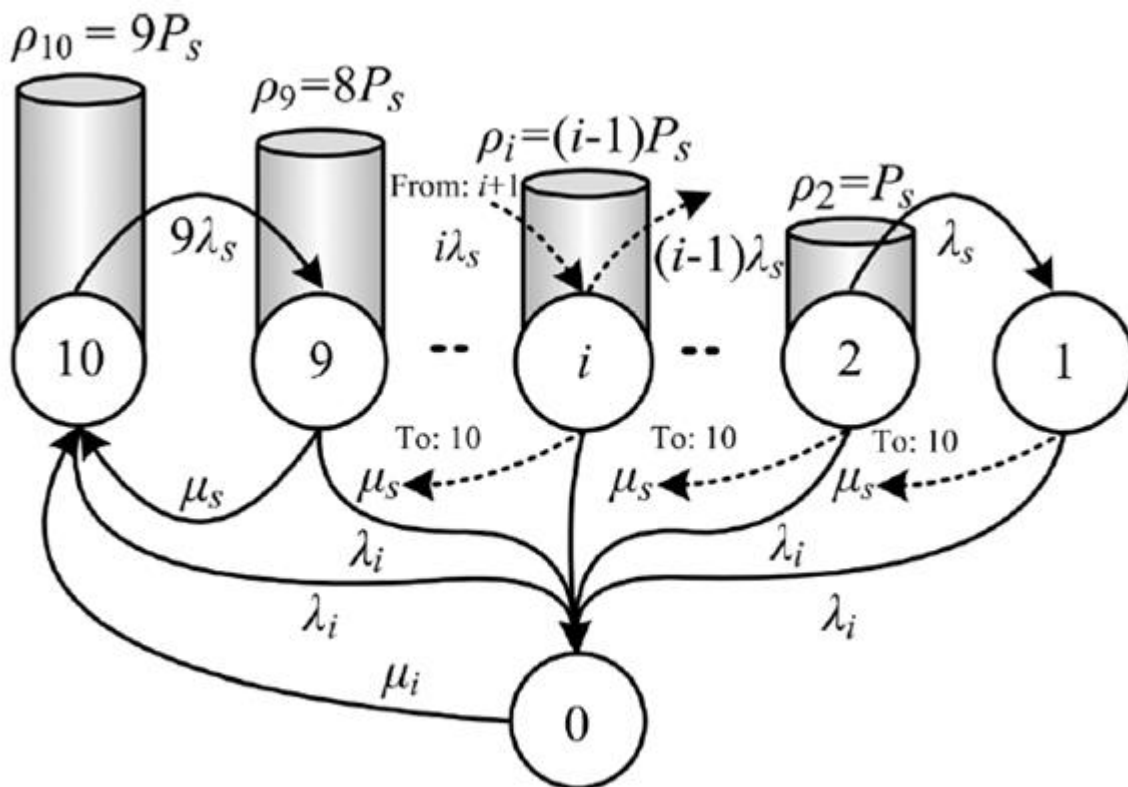
## 4.2 Μοντέλο Συστήματος

Το Μοντέλο αναφοράς που παρουσιάζεται στην δημοσίευση έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ  $P=225$  kW. Είναι άμεσα συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω ενός inverter. Το σύστημα χωρίζεται σε 9 String – blocks τα οποία είναι όμοια μεταξύ τους και συνδέονται παράλληλα ώστε να καταλήξουν στην είσοδο του inverter. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η τοπολογία του συστήματος που περιγράφεται.



Σχήμα 4.1: Τοπολογία πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος

Κάθε block έχει ικανότητα 25 kW και η κατάσταση βλάβης του είναι ανεξάρτητη από τα υπόλοιπα. Ως εκ τούτου το σύστημα έχει κάποιες διακριτές στάθμες ισχύος στις οποίες λειτουργεί. Συγκεκριμένα μπορεί να λειτουργεί σε δέκα στάθμες ξεκινώντας από τα 225 kW μέχρι το μηδέν με βήμα 25 kW. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας του συστήματος στις πιο πάνω στάθμες καθώς επίσης και ο τρόπος μετάβασης από την μια στάθμη στην άλλη.

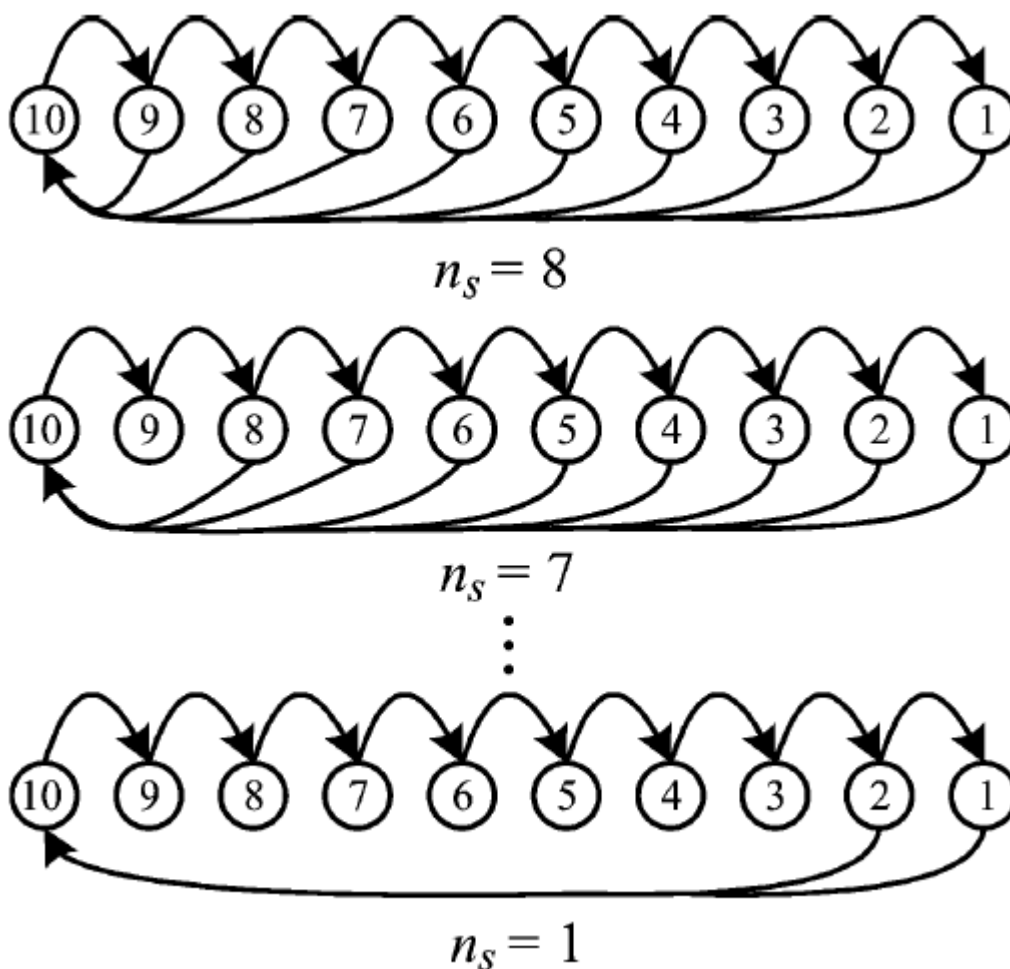


Σχήμα 4.2: Διάγραμμα καταστάσεων λειτουργίας πρότυπου φωτοβολταϊκού συστήματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 το σύστημα μεταβαίνει σε βλάβη ενός block με ρυθμό βλάβης ανάλογο του  $\lambda_s$  ενώ από οποιαδήποτε στάθμη επιστρέφει στην πλήρη λειτουργία με ρυθμό επισκευής  $\mu_s$ . Επίσης φαίνεται ότι σε περίπτωση βλάβης του inverter το σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση μηδενικής ισχύος με ρυθμό βλάβης  $\lambda_i$  ενώ επιστρέφει στην κατάσταση πλήρους λειτουργίας με ρυθμό επισκευής  $\mu_i$ .

Γίνεται σαφές από την πιο πάνω ανάλυση ότι το σύστημα ανεξαρτήτως σε ποια κατάσταση βρίσκεται επιστρέφει στην πλήρη λειτουργία με τον ίδιο ρυθμό επισκευής. Γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι αν ξεκινήσει η επιδιόρθωση σε ένα ή και στα δέκα block μαζί, ο χρόνος που χρειάζεται για να διορθωθούν είναι κοινός. Αυτό προϋποθέτει ότι το συνεργείο επισκευής έχει το δυναμικό να επιδιορθώσει όλα τα blocks ταυτόχρονα. Αυτή η λεπτομέρεια κάνει το πρόβλημα δυσκολότερο να αναλυθεί με κάποιο αλγοριθμικό πρόγραμμα υπολογιστή με αναλυτική μέθοδο, αφού αν αλλάξει η τοπολογία ή το μέγεθος του συστήματος αναφοράς που αναλύεται εδώ, αλλάζουν όλα τα δεδομένα. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σύστημα είναι πιο ευαίσθητο σε βλάβη του inverter, αφού μια βλάβη το οδηγεί σε μηδενική παραγωγή.

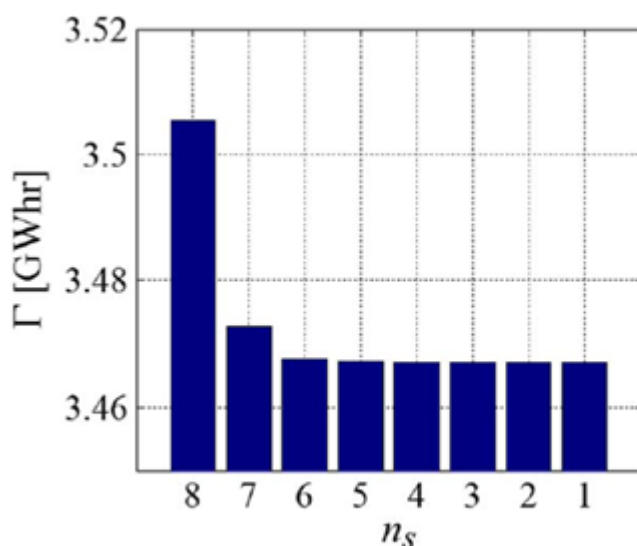
Στην συνέχεια της ανάλυσης αναπτύσσονται κάποια σενάρια τα οποία προκρίνουν την καταλληλότερη στρατηγική επιδιόρθωσης των block. Γίνεται η υπόθεση ότι αν η βλάβη συγκεκριμένου αριθμού block, έχει μεγαλύτερο κόστος επιδιόρθωσης από την απόλυτα ενέργειας που προκαλεί, τότε τα block δεν επιδιορθώνονται. Η επιδιόρθωση ξεκινά όταν το κόστος λόγω της απώλειας ενέργειας γίνει μεγαλύτερο από το κόστος επιδιόρθωσης. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι καταστάσεις που περιγράφουν αυτήν τη συμπεριφορά.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα παρουσίασης στρατηγικών επιδιόρθωσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 οι καταστάσεις  $n_s$  εκφράζουν τον αριθμό των block που λειτουργεί κάθε φορά. Για παράδειγμα στην κατάσταση  $n_s=8$  όταν χαλάσει 1 block οπότε ο αριθμός των block σε λειτουργία είναι 8, ξεκινά η επιδιόρθωση. Στην κατάσταση  $n_s=7$  αναμένεται να χαλάσουν 2 block για να ξεκινήσει η επιδιόρθωση και των δύο μαζί. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια παραγόμενης ενέργειας μέχρι να χαλάσει και το δεύτερο block ώστε να αρχίσει η επισκευή. Η συνολική δηλαδή απώλεια ενέργειας διαρκεί από τη στιγμή που χαλά το πρώτο block μέχρι το τέλος της επισκευής των δύο block.

Εφαρμόζοντας την πιο πάνω ανάλυση στη δημοσίευση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα απώλειας ενέργειας όπως φαίνονται στο διάγραμμα 4.4 [1].



Σχήμα 4.4: Επιπτώσεις των στρατηγικών επιδιόρθωσης στην απώλεια Ενέργειας

Από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ότι η μεγαλύτερη απώλεια σημειώνεται κατά την απώλεια των δύο πρώτων block ενώ η κάθε επιπλέον βλάβη έχει μικρή συνεισφορά. Ένας λόγος στον οποίο ίσως να οφείλεται αυτό είναι ότι ο χρόνος μέχρι την πρώτη βλάβη είναι μεγάλος ενώ μετά την πρώτη βλάβη τα block έχουν μεγάλη πιθανότητα βλάβης σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ρεαλιστικό αν υποθεθεί ότι τα block που είναι όμοια μεταξύ τους έχουν μια δεδομένη διάρκεια ζωής, ή ρυθμό βλάβης, οπότε είναι λογικό να πάθουν βλάβη σε κοντινές χρονικές στιγμές που κυμαίνονται γύρο από μια μέση τιμή. Ως εκ τούτου ο χρόνος αναμονής μέχρι την έναρξη της επιδιόρθωσης αυξάνεται με μειωμένο ρυθμό, όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων που πρέπει να πάθουν βλάβη.

Με δεδομένη λοιπόν την στρατηγική επιδιόρθωσης χρειάζεται να βρεθεί η οριακή χρησιμότητα του συστήματος, και να συγκριθεί με το κόστος επιδιόρθωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην δημοσίευση το κόστος επιδιόρθωσης θεωρείται σταθερό και ανεξάρτητο της στρατηγικής που επιλέγεται και έχει μονάδες μέτρησης \$/έτος. Η σχέση που δίνει την οριακή χρησιμότητα δίνεται πιο κάτω:

$$MUR_j = \frac{p(\Gamma_8 - \Gamma_j)}{CF * T} \left( \frac{\$}{yr} \right) \quad \text{εξ.4.1}$$

όπου:

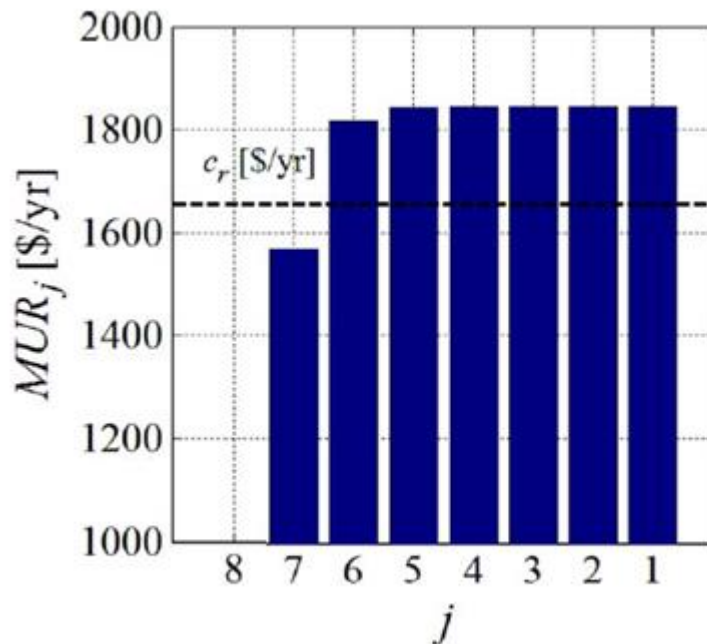
- $MUR_j$ : η οριακή χρησιμότητα της στρατηγικής j
- $p$ : η τιμή πώλησης της ενέργειας (λαμβάνεται 8.7cent/kWh στην δημοσίευση)
- $\Gamma_8$ : η παραγόμενη ενέργεια με την στρατηγική 8
- $\Gamma_j$ : η παραγόμενη ενέργεια με την στρατηγική j
- $CF$ : συντελεστής χρησιμότητας φωτοβολταϊκών (εδώ λαμβάνεται 18%)
- $T$ : περίοδος ανάλυσης (εδώ λαμβάνεται 10 έτη)

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να λυθεί μπορεί να διατυπωθεί ως εξής. Χρειάζεται να προσδιοριστεί το μεγαλύτερο  $j$ , για το οποίο το κόστος επιδιόρθωσης  $c_r$  είναι μικρότερο από το  $MUR_j$ .

Maximize  $j$

Ωστε  $c_r < MUR_j$  για  $1 \leq j \leq 8$

Τα αποτελέσματα της πιο πάνω ανάλυσης κατά το [1] βάση του οποίου γίνεται η ανάλυση παρουσιάζονται στο πιο κάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.5: Κόστος Απώλειας Ενέργειας με βάση την στρατηγική επιδιόρθωσης

Όπως φαίνεται η καλύτερη στρατηγική επιδιόρθωσης είναι αυτή κατά την οποία όταν ο αριθμός των block σε λειτουργία γίνει ίσος με 6, ξεκινά η επιδιόρθωση όλων των block. Για την πληρότητα της παρουσίασης στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της πιο πάνω ανάλυσης. Αυτά θα ληφθούν υπόψη στην συνέχεια για την ανάλυση του ίδιου προβλήματος με την μέθοδο Monte Carlo που χρησιμοποιήθηκε, ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

$\lambda_i$ (1/έτος)	$\lambda_S$ (1/έτος)	$\mu_i$ (1/έτος)	$\mu_S$ (1/έτος)	P (kW)	$\Gamma$ (GWh)	T (yr)	CF
1/3	1/270	365/15	365/8	221.94	3.51	10	18%



## 4.3 Επίλυση με Αναλυτική Μέθοδο

### 4.3.1 Γενικά

Η αρχική προσέγγιση του προβλήματος έγινε με την ανάπτυξη ενός προγράμματος σε περιβάλλον Matlab, το οποίο χρησιμοποιούσε την αναλυτική μέθοδο επίλυσης. Θεωρήθηκε ότι το κάθε block αποτελεί μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μονάδες αυτές λειτουργούν παράλληλα στο σύστημα και αποδίδουν την συνολική απαιτούμενη ενέργεια.

Συγκεκριμένα όπως αναλύθηκε και στο πρότυπο σύστημα της παραγράφου §4.2 υποτέθηκε ότι υπάρχουν εννέα μονάδες παραγωγής, όμοιες μεταξύ τους, οι οποίες δημιουργούν δέκα στάθμες λειτουργίας. Οι βλάβες που συμβαίνουν σε κάθε μονάδα είναι ανεξάρτητες. Το ζητούμενο ήταν να υπολογιστεί η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί σε οποιανδήποτε από τις δέκα στάθμες. Στον υπολογισμό της πιθανότητας λαμβανόταν υπόψη και το ενδεχόμενο βλάβης του inverter, το οποίο θεωρείται ως ενδεχόμενο κοινής βλάβης ολόκληρου του συστήματος. Μετά τον υπολογισμό της πιθανότητας το σύστημα να λειτουργεί σε μια από τις δέκα καταστάσεις, μπορεί να γίνει εύκολα ο υπολογισμός της αναμενόμενης ικανότητας του συστήματος και της συνολικής αποδιδόμενης ενέργειας.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η πιο πάνω προσέγγιση είναι, ότι η επισκευή της κάθε μονάδας απαιτεί συγκεκριμένο χρόνο και ότι οι μονάδες δεν επισκευάζονται ταυτόχρονα. Αυτό δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα όταν η στρατηγική που χρησιμοποιείται προβλέπει την έναρξη της επισκευής αμέσως μετά την βλάβη της μονάδας. Το πρόβλημα γίνεται δύσκολο να επιλυθεί στην περίπτωση επιλογής διαφορετικής στρατηγικής.

### 4.3.2 Εύρεση πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος

Ο πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος εκφράζει ένα διάνυσμα των διαφορετικών σταθμών της απώλειας ισχύος και της πιθανότητας εμφάνισής τους. Με βάση αυτόν τον πίνακα είναι δυνατή η πρόβλεψη της αναμενόμενης κατάστασης του συστήματος. Όταν όλες οι μονάδες του συστήματος είναι πανομοιότυπες – όπως συμβαίνει στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών πανέλων – ο πίνακας μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της διωνυμικής κατανομής. Σε περίπτωση που οι μονάδες δεν είναι όμοιες, η διωνυμική κατανομή έχει περιορισμένη χρήση. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται μια αθροιστική μέθοδος με χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων, όπου οι μονάδες προστίθενται διαδοχικά δημιουργώντας τον τελικό πίνακα [4].

Η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί σε μια κατάσταση 'X' σε MW, για πιθανή απώλεια ισχύος P, μετά την προσθήκη μιας νέας μονάδας με ισχύ C και μη διαθεσιμότητα U δίνεται από την σχέση:

$$p_{\text{μετά}}(X) = (1 - U) * p_{\text{πριν}}(X) + U * p_{\text{πριν}}(X - C) \quad \text{εξ.4.2}$$

όπου

- $p_{μετά}(X)$ : η πιθανότητα της κατάστασης 'X' μετά την προσθήκη της νέας μονάδας
- $1 - U = A$  : η διαθεσιμότητα της νέας μονάδας
- $p_{πριν}(X)$ : η πιθανότητα της κατάστασης πριν την προσθήκη της νέας μονάδας

Παρατηρείται ότι η πιθανότητα της κατάστασης  $p_{πριν}(X - C)$  μπορεί να μην υπάρχει οπότε λαμβάνεται ίσο με το μηδέν.

Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Matlab εισάγονται ως δεδομένα οι ώρες λειτουργίας του συστήματος μέχρι την πρώτη βλάβη 'm' και η διάρκεια επισκευής 'r'. Ο υπολογισμός της μη διαθεσιμότητας 'U' γίνεται με την χρήση της εξίσωσης 1.3.

Όπως έχει αναφερθεί όταν οι μονάδες είναι πανομοιότυπες ο πίνακας μπορεί να βρεθεί εύκολα με την χρήση της διωνυμικής κατανομής. Για παράδειγμα αν υπάρχουν δύο μονάδες των 25 kW με μη διαθεσιμότητα  $U=0.02$  το σύστημα θα μπορούσε να λειτουργεί σε τρεις στάθμες όπως φαίνεται στον πιο κάτω πίνακα. Η πιθανότητα της κάθε στάθμης βρίσκεται με την διωνυμική κατανομή όπως φαίνεται στον πίνακα:

Απώλεια Ισχύος (KW)	Πιθανότητα	
0	$(0.98)^2$	=0.9604
25	$2*(0.98)*(0.02)$	=0.0392
50	$(0.02)^2$	=0.0004

Σε περίπτωση που πρέπει να προστεθεί και μια επιπλέον μονάδα διαφορετικής ικανότητας μπορεί να γίνει χρήση της εξίσωσης 4.2 για να δημιουργηθεί ο τελικός πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος. Για παράδειγμα αν προστεθεί και μια τρίτη μονάδα των 50 kW με μη διαθεσιμότητα  $U=0.02$  επίσης. Τότε με την χρήση της εξίσωσης 4.2 ο νέος πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος θα είναι όπως παρακάτω.

Απώλεια Ισχύος (KW)	Πιθανότητα	
0	$(1-0.02)*(0.9604)+(0.02)*(0)$	=0.941192
25	$(1-0.02)*(0.0392)+(0.02)*(0)$	=0.038416
50	$(1-0.02)*(0.0004)+(0.02)*(0.9604)$	=0.019600
75	$(1-0.02)*(0)+(0.02)*(0.0392)$	=0.000784
100	$(1-0.02)*(0)+(0.02)*(0.0004)$	=0.000008

Η αναδρομική σχέση 4.2 έχει τόσα βήματα όσα και οι μονάδες που συμμετέχουν. Η γενική σχέση της διωνυμικής κατανομής που χρησιμοποιείται φαίνεται στη συνέχεια.

$$p(r) = \frac{n!}{r!(n-r)!} * (1 - U)^r * U^{n-r} \quad \text{εξ.4.3}$$

όπου:

- $p(r)$ : η πιθανότητα 'r' μονάδες να είναι σε λειτουργία
- $r$ : το πλήθος των μονάδων σε λειτουργία
- $n$ : το πλήθος των όμοιων μονάδων που εξετάζονται
- $U$ : η μη διαθεσιμότητα των μονάδων (κοινή για όλες)

#### 4.3.3 Εύρεση ικανότητας και αποδιδόμενης ενέργειας του συστήματος

Στην παράγραφο §4.3.2 έγινε η παρουσίαση της μεθόδου δημιουργίας του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος. Έχοντας τον πίνακα μπορεί να γίνει η πρόβλεψη για την αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος. Η μέση ισχύς που θα αποδίδει το σύστημα μπορεί να βρεθεί ως το άθροισμα του γινομένου της αποδιδόμενης ισχύος επί την πιθανότητα να λειτουργεί το σύστημα στην συγκεκριμένη κατάσταση, για όλες τις καταστάσεις. Η μαθηματική σχέση φαίνεται πιο κάτω.

$$Capacity = \sum_{i=1}^n P_i * p_i \quad \text{εξ.4.4}$$

όπου:

- $Capacity$ : η μέση αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος
- $P_i$ : η αποδιδόμενη ισχύς στην κατάσταση  $i$
- $p_i$ : η πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί στην κατάσταση  $i$

Αφού υπολογιστεί η μέση αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος ανά έτος, μπορεί εύκολα να βρεθεί και η μέση αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια για κάποια διάρκεια. Η αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια θα δίνεται από την σχέση:

$$E_y = Capacity * CF * T \quad \text{εξ.4.5}$$

όπου:

- $E_y$ : η αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια
- $CF$ : ο συντελεστής χρησιμοποίησης της μονάδας
- $T$ : η διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται

#### 4.3.4 Συχνότητα κατάστασης και ρυθμός αναχώρησης

Μέχρι τώρα έγινε αναφορά στην πιθανότητα το σύστημα να λειτουργεί σε μια κατάσταση. Δεν έγινε όμως καμία αναφορά στην συχνότητα με την οποία το σύστημα

μεταβαίνει σε μια κατάσταση αλλά ούτε και στον ρυθμό μετάβασης από μια κατάσταση σε μια άλλη. Για την εύρεση της συχνότητας και της διάρκειας μιας κατάστασης απαιτείται η γνώση του ρυθμού βλάβης και της διάρκειας επισκευής των ενδεχομένων που συμβαίνουν.

Η μέθοδος της συχνότητας και διάρκειας στηρίζεται στην λογική ότι, αν είναι γνωστή η συχνότητα εισόδου και η συχνότητα εξόδου από μια κατάσταση μπορεί να βρεθεί η συχνότητα και η διάρκεια λειτουργίας σε αυτήν. Η παραμονή του συστήματος σε μία κατάσταση μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο της πιθανότητας λειτουργίας σε αυτήν την κατάσταση με τον ρυθμό αναχώρησης από αυτήν, ή ισοδύναμα το γινόμενο της πιθανότητας μη παραμονής στην κατάσταση με τον ρυθμό εισόδου.

Τα πιο πάνω μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά από την πιο κάτω σχέση:

$$f = p_{\text{παραμονής}} * \lambda = p_{\text{αναχώρησης}} * \mu \quad \text{εξ4.6}$$

Για το σύστημα που εξετάστηκε πιο πάνω ως παράδειγμα, με δύο μονάδες των 25 kW και μια μονάδα των 50 kW, αν θεωρηθεί ρυθμός βλαβών 0.01 βλάβες/έτος και ρυθμός επισκευής 0.49 επισκευές/έτος η συχνότητα μπορεί να βρεθεί για κάθε κατάσταση με μονάδες μέτρησης ενδεχόμενα/έτος.

Οι ρυθμοί μετάβασης σε μια υψηλότερη ή μια χαμηλότερη στάθμη μπορούν να οριστούν ως  $\lambda_+$  και  $\lambda_-$  αντίστοιχα. Ο ρυθμός μετάβασης σε μια υψηλότερη στάθμη δίνεται ως το άθροισμα των ρυθμών επισκευής των μονάδων που βρίσκονται σε βλάβη, ενώ ο ρυθμός μετάβασης σε μια χαμηλότερη στάθμη δίνεται ως το άθροισμα των ρυθμών βλάβης των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία.

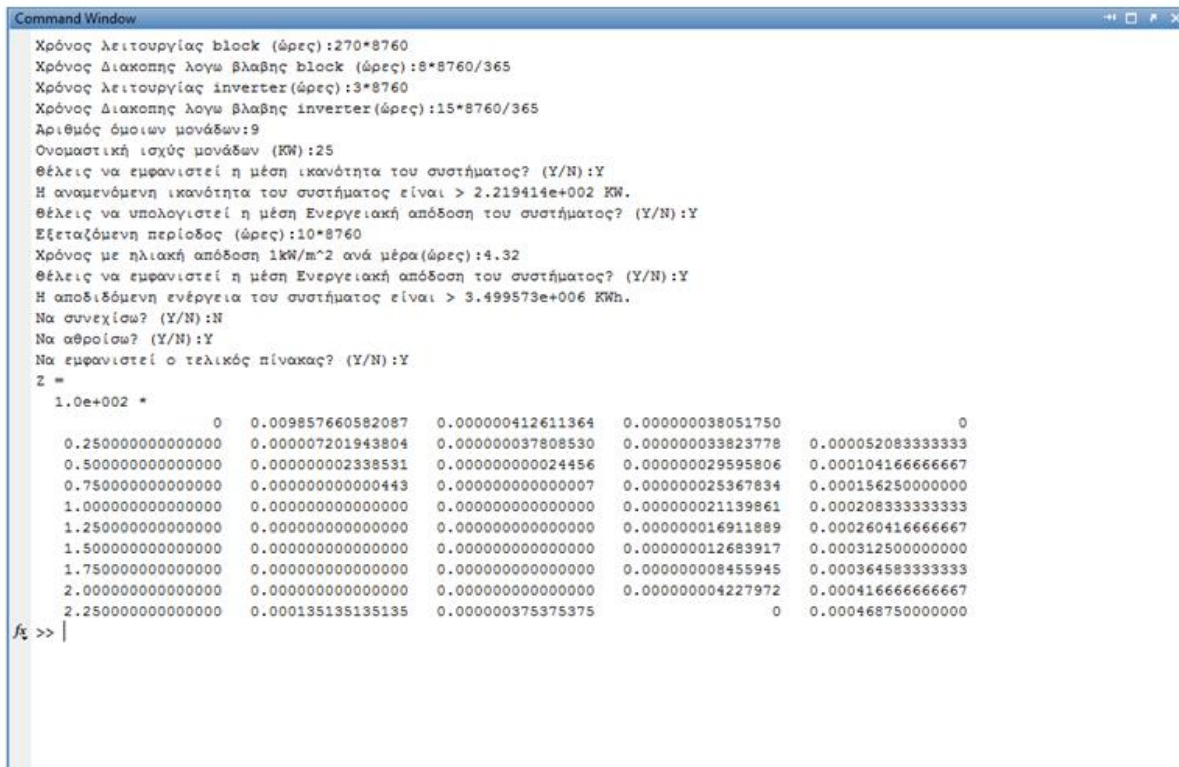
Με βάση τα πιο πάνω δεδομένα για το παράδειγμα που αναλύεται σε αυτό το μέρος, στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα όπως αυτά υπολογίζονται από το πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab.

Απώλεια Ισχύος	Πιθανότητα κατάστασης	Συχνότητα Κατάστασης	$\lambda_-$	$\lambda_+$
<b>0</b>	0,941192	0,02823576	0,030000	0,000000
<b>25</b>	0,038416	0,01959216	0,020000	0,490000
<b>50</b>	0,019600	0,01018416	0,019800	0,499800
<b>75</b>	0,000784	0,00077616	0,010000	0,980000
<b>100</b>	0,000008	0,00001176	0,000000	1,470000

### 4.3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες υποπαραγράφους έγινε η ανάλυση της προσέγγισης του μοντέλου που αναλύθηκε στην παράγραφο §4.2. Στο πρότυπο μοντέλο υπάρχουν 9 όμοιες μονάδες των 25 kW με δεδομένους ρυθμούς βλαβών και επισκευής τόσο για τον inverter όσο και για τα blocks όπως φαίνεται στον πίνακα, στο τέλος της παραγράφου §4.2. Εισάγοντας τα δεδομένα στο πρόγραμμα, παρουσιάζεται ο πίνακας πιθανότητας απώλειας φορτίου ο οποίος περιέχει επιπλέον και την συχνότητα της κάθε κατάστασης αλλά και τον ρυθμό μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων. Τέλος το πρόγραμμα ρωτά τον χρήστη αν θέλει να εμφανίζονται τα αποτελέσματα για την αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος αλλά και την αναμενόμενη αποδιδόμενη ισχύ.

Στην πιο κάτω εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η οθόνη του προγράμματος και οι ερωτήσεις που γίνονται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.



```
Command Window
Χρόνος λειτουργίας block (ώρες):270*8760
Χρόνος Διακοπής λόγω βλαβής block (ώρες):8*8760/365
Χρόνος λειτουργίας inverter(ώρες):3*8760
Χρόνος Διακοπής λόγω βλαβής inverter(ώρες):15*8760/365
Αριθμός όμοιων μονάδων:9
Ονομαστική ισχύς μονάδων (KW):25
Θέλεis να εμφανιστεί η μέση ικανότητα του συστήματος? (Y/N):Y
Η αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος είναι > 2.219414e+002 KW.
Θέλεis να υπολογιστεί η μέση Ενεργειακή απόδοση του συστήματος? (Y/N):Y
Εξεταζόμενη περίοδος (ώρες):10*8760
Χρόνος με ηλιακή απόδοση 1kW/m^2 ανά μέρα(ώρες):4.32
Θέλεis να εμφανιστεί η μέση Ενεργειακή απόδοση του συστήματος? (Y/N):Y
Η αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος είναι > 3.499573e+006 KWh.
Να συνεχίσω? (Y/N):N
Να αθροίσω? (Y/N):Y
Να εμφανιστεί ο τελικός πίνακας? (Y/N):Y
Z =
1.0e+002 *
      0      0.009857660582087      0.000000412611364      0.000000038051750      0
      0.250000000000000      0.000007201943804      0.000000037808530      0.000000033823778      0.000052083333333
      0.500000000000000      0.00000002338531      0.00000000024456      0.000000029595806      0.000104166666667
      0.750000000000000      0.000000000000443      0.000000000000007      0.000000025367834      0.000156250000000
      1.000000000000000      0.000000000000000      0.000000000000000      0.000000021139861      0.000208333333333
      1.250000000000000      0.000000000000000      0.000000000000000      0.000000016911889      0.000260416666667
      1.500000000000000      0.000000000000000      0.000000000000000      0.000000012683917      0.000312500000000
      1.750000000000000      0.000000000000000      0.000000000000000      0.000000008455945      0.000364583333333
      2.000000000000000      0.000000000000000      0.000000000000000      0.000000004227972      0.000416666666667
      2.250000000000000      0.000135135135135      0.000000375375375      0      0.000468750000000
f_t >> |
```

Σχήμα 4.6: Παρουσίαση οθόνης προγράμματος Αναλυτικής Μεθόδου

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την πιο πάνω εικόνα, τα αποτελέσματα του προγράμματος συμβαδίζουν με αυτά της δημοσίευσης. Συγκεκριμένα η αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος είναι η ίδια ενώ η αποδιδόμενη ενέργεια είναι πολύ κοντά. Επιπλέον το πρόγραμμα δίνει μια ξεκάθαρη εικόνα των σημείων λειτουργίας του συστήματος.

Είναι ξεκάθαρο ότι το σύστημα με τα δεδομένα που εισάγονται, παρουσιάζεται να είναι πολύ αξιόπιστο με διαθεσιμότητα που φτάνει το 98.6% περίπου. Πρέπει να σημειωθεί ότι παρουσιάζεται αυξημένη η πιθανότητα της ολικής απώλειας του συστήματος σε σχέση με την απώλεια από 50 KW μέχρι και 200 KW. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού μια απώλεια από 50 KW μέχρι και 200 KW απαιτεί να χαλάσουν αρκετά blocks, ενώ η ολική απώλεια μπορεί να συμβεί με την βλάβη μόνο του inverter. Λόγω του ότι ο χρόνος ζωής του inverter είναι κατά πολύ μικρότερος του χρόνου ζωής των block, το πιο πάνω συμπέρασμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ρεαλιστικό.

#### **4.3.6 Μειονεκτήματα μεθόδου**

Η προσέγγιση του μοντέλου με την αναλυτική μέθοδο όπως παρουσιάστηκε πιο πάνω, επιτρέπει να έχει ο μελετητής μια καλή εικόνα της λειτουργίας του συστήματος, της αναμενόμενης απόδοσης του, καθώς και της πιθανότητας να βρεθεί σε κάποια ανεπιθύμητη κατάσταση. Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο §2.1 το πλεονέκτημα της αναλυτικής μεθόδου είναι ότι μπορεί να ανιχνεύσει σπάνια ενδεχόμενα. Εν τούτοις είναι σχετικά λιγότερο ευέλικτη μέθοδος απ' ό,τι η μέθοδος προσομοίωσης και χρειάζεται δεδομένα που συλλέγονται από πολυετείς παρατηρήσεις πραγματικών συστημάτων.

Η προσέγγιση που αναλύεται στις πιο πάνω υποπαραγράφους έχει ένα βασικό μειονέκτημα το οποίο είναι απαγορευτικό για την χρησιμοποίηση της στην παρούσα εργασία. Ενώ τα αποτελέσματα που αφορούν την αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος και την αποδιδόμενη ενέργεια συμπίπτουν με αυτά του πρότυπου συστήματος, η αλυσίδα Markov που χρησιμοποιείται είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα στο πρότυπο σύστημα έγινε η θεώρηση ότι η επισκευή του συστήματος, σημαίνει την επάνοδο του στην κατάσταση πλήρους λειτουργίας, ανεξάρτητα από το πόσες μονάδες βρίσκονταν σε βλάβη. Στην ανάλυση που αναπτύχθηκε στην παράγραφο §4.3 υποτέθηκε ότι η επισκευή ενός στοιχείου, επαναφέρει το σύστημα στην αμέσως προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας και όχι στην αρχική. Η πιο πάνω διαφορά στο μοντέλο έχει ως αποτέλεσμα η ανάλυση να μην δίνει τα ίδια αποτελέσματα όταν αλλάξει η στρατηγική επιδιόρθωσης. Ως εκ τούτου δεν μπορεί να αναλυθεί περεταίρω το πρότυπο σύστημα με την παρούσα μέθοδο.

Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα της αναλυτικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε τόσο στην ανάλυση του πρότυπου συστήματος της δημοσίευσης όσο και στην ανάλυση που περιγράφεται στην παράγραφο §4.3, είναι ότι στα αποτελέσματα δεν υπάρχει η εικόνα του συστήματος ανά πάσα στιγμή. Αυτό ίσως να μην ήταν μεγάλο πρόβλημα, αν το μοντέλο αφορούσε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές μονάδες παραγωγής, αφού οι μονάδες αυτές είναι σχεδιασμένες για να δουλεύουν συνέχεια, οπότε αυτό που ενδιαφέρει είναι η πιθανότητα να μην είναι διαθέσιμες. Σε αντίθεση με αυτήν την προσέγγιση, είναι σημαντικό να γνωρίζει ο μελετητής ενός φωτοβολταϊκού

συστήματος, την στιγμή κατά την οποία θα συμβεί η βλάβη. Μια βλάβη που συμβαίνει σε βραδινές ώρες και μπορεί να επισκευαστεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, δεν επηρεάζει καθόλου την λειτουργία και την απόδοση του συστήματος. Ως εκ τούτου αν υπάρχει η πληροφορία της ώρας που σημειώνεται η βλάβη και η διάρκεια επισκευής της, ο αναλυτής θα έχει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για την λειτουργία του συστήματος και για τον τρόπο με τον οποίο αυτό επηρεάζεται.

Τέλος λόγω του ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν άμεση συσχέτιση με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν όπως είναι για παράδειγμα η νεφωκάλυψη αλλά και με την τοποθεσία στην οποία είναι εγκατεστημένα, μια μέθοδος προσομοίωσης θα ήταν πιο εύκολο να συμπεριλάβει όλους αυτούς τους παράγοντες.

## **4.4 Επίλυση με Μέθοδο Προσομοίωσης**

### **4.4.1 Γενικά**

Στην παράγραφο §4.4 θα προσεγγιστεί το πρότυπο μοντέλο με την μέθοδο Monte Carlo. Σε αυτήν την παράγραφο θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα που εξάγονται από το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab, χωρίς όμως να γίνει εκτενής ανάλυση του προγράμματος. Η ανάλυση του προγράμματος θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

Αρχικά και πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της επίλυσης με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo, είναι σημαντικό να ειπωθούν κάποια γενικά στοιχεία. Η βασική διαφορά της μεθόδου προσομοίωσης από την αναλυτική μέθοδο, είναι ότι προσφέρει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία, για την εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς επιτρέπει να συμπεριληφθούν διάφοροι τυχαίοι παράγοντες κατά την ανάλυση του συστήματος.

Το σύστημα ορίζεται στο πρόγραμμα κατά στοιχείο και τα ενδεχόμενα βλάβης του κάθε στοιχείου υπολογίζονται ξεχωριστά. Η μέθοδος προσομοίωσης τρέχει το μοντέλο για ένα χρόνο στην διάρκεια του οποίου συμβαίνουν τυχαίες βλάβες σε κάθε στοιχείο του συστήματος, οι οποίες έχουν διαφορετική συχνότητα και διάρκεια ανά στοιχείο, ακολουθώντας όμως μια μέση τιμή. Εκτελούνται 1000 κύκλοι λειτουργίας του συστήματος και από αυτούς εξάγονται τα αποτελέσματα ως μέση τιμή για την λειτουργία ενός έτους.

Μια σημαντική παράμετρος που δεν θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη διαφορετικά, είναι η συμπεριφορά της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με τον όρο συμπεριφορά εννοούμε την ποσότητα ανά ώρα ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο του πλαισίου και πως αυτή μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Στο πρότυπο μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο § 4.2, για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης ενέργειας, θεωρήθηκε ο βαθμός χρησιμοποίησης

των φωτοβολταϊκών πλαισίων CF που λήφθηκε ίσος με 18%. Η τιμή αυτή είναι κάπως αυθαίρετη αφού δεν λαμβάνει υπόψη διάφορες τυχαίες μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία και λαμβάνεται ως μια μέση παρατηρούμενη τιμή. Πρέπει να τονιστεί ότι η γεωγραφική αλλά και τοπογραφική θέση εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζει σημαντικά τον δείκτη χρησιμοποίησης. Με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo, προσομοιώνεται σε πραγματικό χρόνο και ανά ώρα η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια λαμβάνοντας υπόψη ακόμα και την τυχαία σκίαση των πλαισίων από σύννεφα. Με αυτό τον τρόπο για παράδειγμα τις μεσημεριανές ώρες, όταν η αναμενόμενη παραγωγή πρέπει να είναι μέγιστη, λόγω νέφωσης μπορεί να μην είναι. Το πώς υπολογίζεται αυτό συγκεκριμένα θα εξηγηθεί σε επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά.

Η όλη αξιοπιστία του συστήματος και οι δείκτες που υπολογίζονται, επηρεάζονται άμεσα από την απόδοση του συστήματος την στιγμή της βλάβης. Αν για παράδειγμα μια βλάβη κατά την προσομοίωση, συμβεί κατά τις μεσημεριανές ώρες, αναμένεται να επηρεάσει στον μεγαλύτερο βαθμό την τελική ετήσια απόδοση ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Εν τούτοις λαμβάνοντας υπόψη διάφορα τυχαία γεγονότα όπως η νέφωση, αν την δεδομένη στιγμή που συμβαίνει η βλάβη (το μεσημέρι) ο δείκτης αιθιρότητας (που αντιπροσωπεύει την ηλιοφάνεια) είναι μικρός, η τελική επίπτωση στην απόδοση του συστήματος μπορεί να μειωθεί αισθητά. Επίσης ένας άλλος τυχαίος παράγοντας είναι η εποχή κατά την οποία συμβαίνει η βλάβη αφού μια βλάβη το καλοκαίρι έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις απ' ό τι μία βλάβη τον χειμώνα.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πιο πάνω, αναμένεται τα αποτελέσματα της μεθόδου προσομοίωσης να αντιπροσωπεύουν με μεγαλύτερο ρεαλισμό ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν θα γίνει η ανάλυση και επίλυση του πρότυπου μοντέλου με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo και θα παρουσιαστούν και συγκριθούν τα αποτελέσματα.

#### **4.4.2 Ανάλυση και επίλυση του μοντέλου**

Το πρόγραμμα προσομοίωσης με την μέθοδο Monte Carlo αναπτύχθηκε – όπως και το πρόγραμμα για την αναλυτική μέθοδο - στο λογισμικό περιβάλλον της Matlab. Στο πρόγραμμα δίνονται δεδομένα που αφορούν τα στοιχεία του φωτοβολταϊκού συστήματος όπως είναι ο μέσος ρυθμός βλαβών των block και του inverter σε ώρες καθώς και η αναμενόμενη μέση διάρκεια επισκευής. Αφού γίνουν οι επαναληπτικοί κύκλοι λειτουργίας που απαιτεί η μέθοδος προσομοίωσης εξάγονται οι δείκτες αξιοπιστίας του κάθε block και του inverter καθώς επίσης και η ικανότητα του συστήματος για κάθε ώρα.

Ακολουθως τρέχει η διαδικασία προσομοίωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και των καιρικών συνθηκών και γίνονται οι κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να παρουσιαστεί η πραγματική αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος, με βάση την προσπίπτουσα



ακτινοβολία και την ηλιοφάνεια. Έχοντας και αυτές τις πληροφορίες το πρόγραμμα υπολογίζει την αναμενόμενη ετήσια αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος. Για την προσομοίωση των καιρικών συνθηκών εισάγονται ως δεδομένα στο πρόγραμμα το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής, η γωνία εγκατάστασης των πλαισίων και η απόσταση μεταξύ των σειρών.

Αυτά είναι συνοπτικά τα στοιχεία που χρειάζονται για την εκτέλεση του προγράμματος. Η εκτενής επεξήγηση και παρουσίαση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

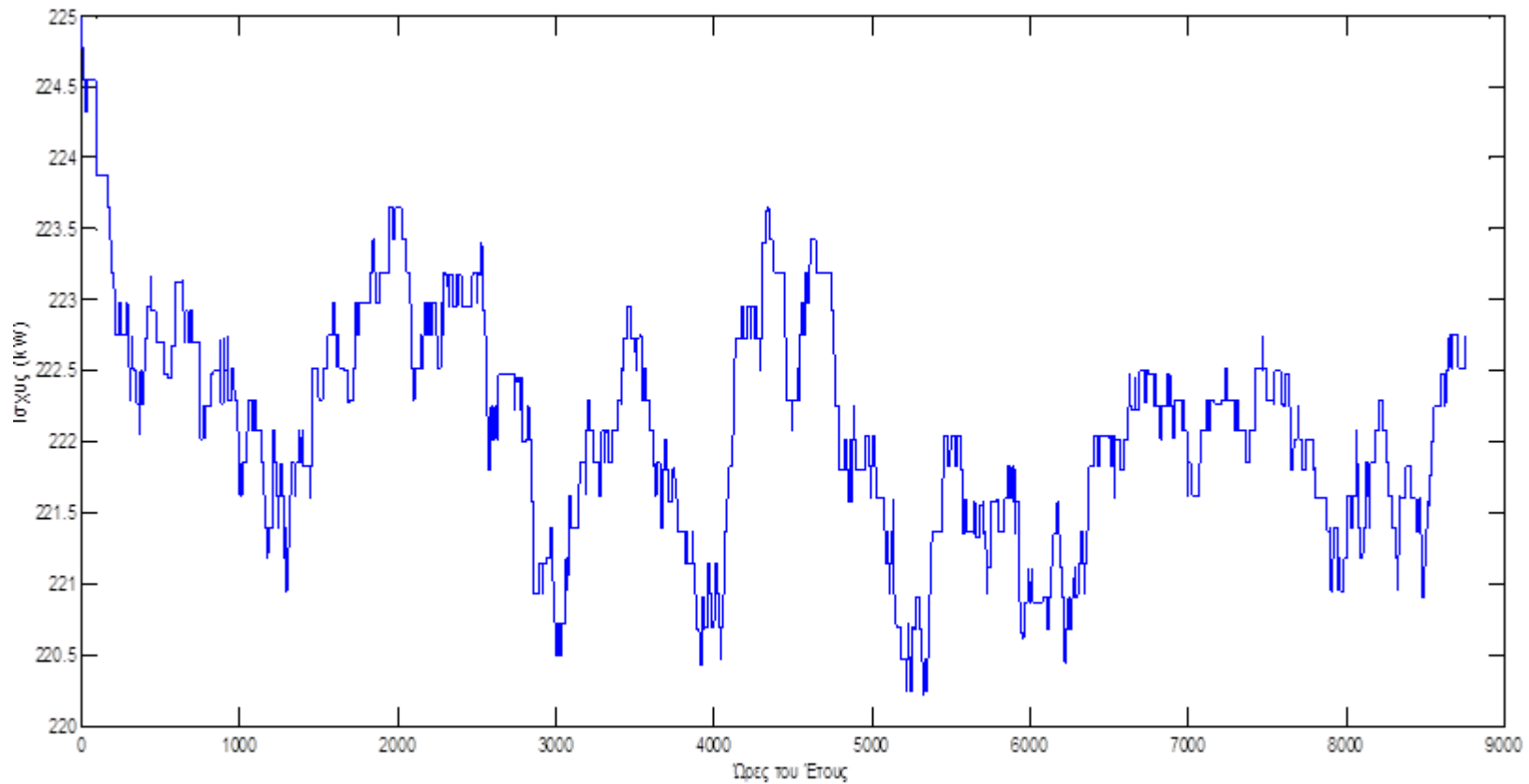
Το μοντέλο έχει αναλυθεί στην παράγραφο § 4.2. Αποτελεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο αποτελείται από 9 blocks παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους με ικανότητα 25 kW το καθένα, που καταλήγουν στην είσοδο ενός inverter. Για την αρχική επίλυση του μοντέλου θα υποθεθεί η στρατηγική που προβλέπει την άμεση έναρξη της επισκευής μετά από την βλάβη του κάθε στοιχείου. Στην συνέχεια και αφού η μέθοδος προσομοίωσης μας το επιτρέπει θα γίνουν και οι αναλύσεις που προβλέπουν διαφορετικές στρατηγικές επιδιόρθωσης, όπως αυτές περιγράφονται στην παράγραφο §4.2.

Στο πρόγραμμα εισάγονται τα δεδομένα που δίνονται για το κάθε στοιχείο από το πρότυπο μοντέλο [1]:

$\lambda_i$ (1/έτος)	$\lambda_s$ (1/έτος)	$\mu_i$ (1/έτος)	$\mu_s$ (1/έτος)
1/3	1/270	365/15	365/8

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση καταγράφονται σε πίνακα πιο κάτω. Στη συνέχεια φαίνεται η γραφική παράσταση της ετήσιας αναμενόμενης ικανότητας του συστήματος ανά ώρα. Η μέση αναμενόμενη ετήσια ικανότητα προκύπτει ίση με 222.1 kW.

		Block 1	Block 2	Block 3	Block 4	Block 5	Block 6	Block 7	Block 8	Block 9	Inverter
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες	<b>m</b>	2919840	1251223	8759830	2189780	973109	2189733	2189887	4379970	1251214	27988
Ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος	<b>λ</b>	0,003000	0,007001	0,001000	0,004000	0,009002	0,004000	0,004000	0,002000	0,007001	0,312988
Ώρες επισκευής ανά βλάβη	<b>r</b>	160	206	170	220	225	267	113	30	214	357
Μη Διαθεσιμότητα σε ώρες ανά έτος	<b>U</b>	0,479	1,442	0,170	0,879	2,021	1,070	0,453	0,060	1,500	111,614



Σχήμα 4.7: Ετήσια Αναμενόμενη Ικανότητα του συστήματος ανά ώρα του έτους

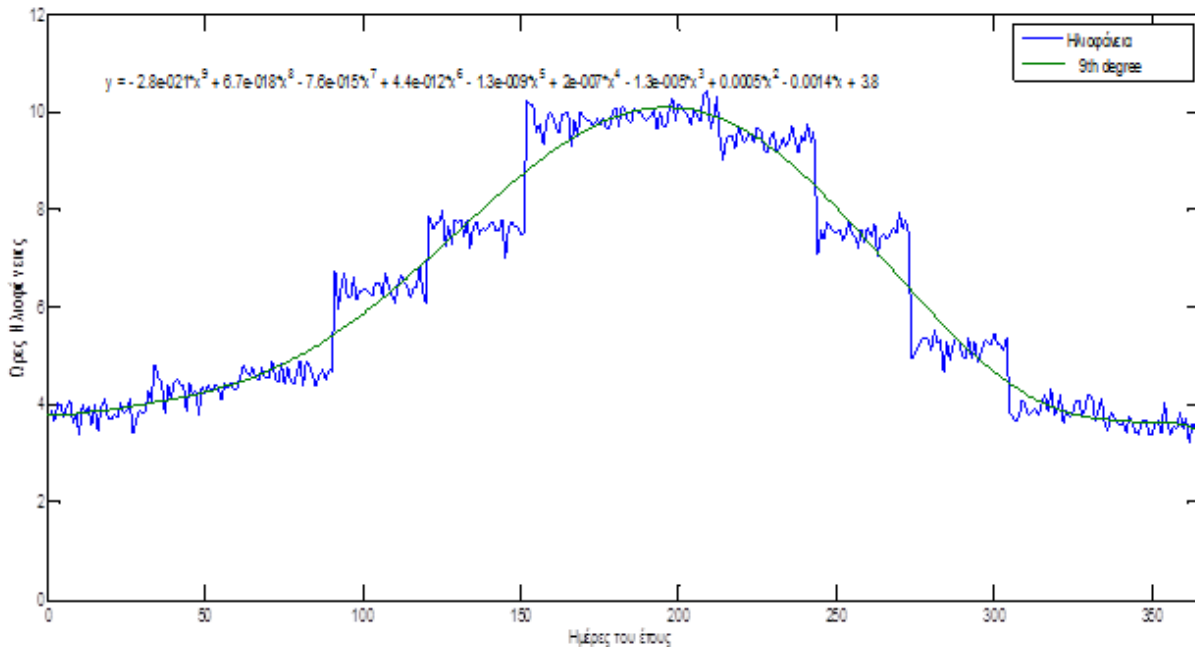
Για τον υπολογισμό της αναμενόμενης αποδιδόμενης ενέργειας του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η προσομοίωση των καιρικών συνθηκών. Υποθέεται ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι εγκατεστημένο στην Ελλάδα σε γεωγραφικό πλάτος 40 μοίρες βόρεια και με γωνία εγκατάστασης των πλαισίων 30 μοίρες. Επίσης υποθέεται ότι δεν υπάρχει σκίαση των πλαισίων από τις μπροστινές τους σειρές αφού κάτι τέτοιο δεν αναφέρεται στο δημοσίευμα [1] του πρότυπου μοντέλου που αναλύεται. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι ρεαλιστικό λόγω και του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης που μπορεί να γίνει σε μία μόνο σειρά.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στις πιο κάτω γραφικές παραστάσεις:

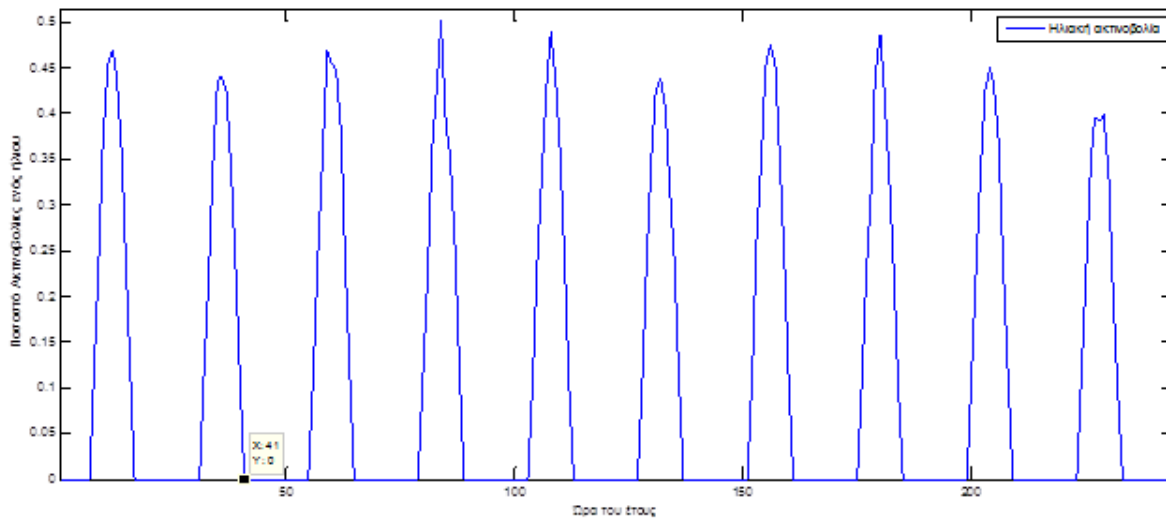
Η πρώτη γραφική παράσταση που φαίνεται παρουσιάζει την αναμενόμενη ημερήσια ηλιοφάνεια που υπολογίζεται με βάση στατιστικά στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Με μπλε χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενώ με πράσινο φαίνεται η προσεγγιστική καμπύλη αν γίνει χρήση του πολυωνύμου ενάτου βαθμού που φαίνεται στην γραφική.

Η δεύτερη γραφική παράσταση παρουσιάζει την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά ώρα. Παρουσιάζεται το στιγμιότυπο για τις πρώτες δέκα μέρες του έτους ώστε να είναι ευδιάκριτα τα σημεία. Πρέπει να επισημανθεί η βύθιση που είναι εμφανής τις μεσημεριανές ώρες της δέκατης μέρας, η οποία οφείλεται σε αυξημένη νέφωση.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η αναμενόμενη ενεργειακή απόδοση του συστήματος σε βάθος 10 ετών υπολογίζεται ίση με 3.63 GWh. Από την προσομοίωση των καιρικών συνθηκών, ο συντελεστής χρησιμοποίησης του φωτοβολταϊκού συστήματος προκύπτει ίσος με  $CF=0.186635678801744 \approx 0.19$ .



Σχήμα 4.8: Διακύμανση της ημερίσιας Ηλιοφάνειας



Σχήμα 4.9: Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά ώρα

#### 4.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Από την παρουσίαση των πιο πάνω αποτελεσμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αναλυτική μέθοδος προσέγγισης και η μέθοδος προσομοίωσης καταλήγουν σε κοινά αποτελέσματα. Η αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος είναι κοντά στα 222 kW και στις δύο περιπτώσεις με μια μικρή απόκλιση του  $\pm 0,05\%$ . Επίσης η αναμενόμενη

ικανότητα του συστήματος είναι κοντά στις 3.5 με 3.6 GWh. Η διαφορά των τιμών της αποδιδόμενης ενέργειας οφείλεται στο ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι διαφορετικός. Στην μέθοδο προσομοίωσης μπορεί να υποθεθεί ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι πιο κοντά στην πραγματική τιμή που θα παρατηρηθεί, αφού λαμβάνονται και προσομοιώνονται δεδομένα που αφορούν την περιοχή εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Επίσης στην μέθοδο προσομοίωσης μπορεί να παρατηρηθεί η αναμενόμενη λειτουργία του κάθε στοιχείου του συστήματος μέσω των δεικτών αξιοπιστίας που προκύπτουν. Αυτό είναι σημαντικό στο να γνωρίζει ο αναλυτής και διαχειριστής του συστήματος ποια είναι τα αδύνατα σημεία του συστήματος και ποια είναι η συμπεριφορά που θα αναμένει να παρατηρήσει.

Τέλος θα πρέπει να επισημανθεί ένα χαρακτηριστικό της μεθόδου προσομοίωσης που την κάνει να διαφέρει ριζικά από την αναλυτική μέθοδο. Η μέθοδος προσομοίωσης παρουσιάζει την αναμενόμενη εικόνα του συστήματος ανά ώρα του έτους. Αυτό μπορεί να είναι ένα πολύ δυνατό εργαλείο στα χέρια του αναλυτή του συστήματος. Έχοντας την εικόνα ανά ώρα του έτους επιτρέπεται να βγουν συμπεράσματα, σχετικά με το κατά πόσο μια βλάβη επηρεάζει ή όχι σημαντικά το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρείται μια πολύ χαμηλή τιμή στην ικανότητα του συστήματος τις ώρες του έτους 5248 - 5253. Από τις γραφικές παραστάσεις της ετήσιας αναμενόμενης ικανότητας ανά ώρα και της ηλιακής ακτινοβολίας ανά ώρα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, αν και το σύστημα, παρουσιάζει την χαμηλότερη ικανότητα του έτους στις ώρες αυτές, η περίοδος αντιστοιχεί σε απογευματινή προς νυχτερινή ώρα της ημέρας, όπου η απόδοση του συστήματος θα είναι πολύ μικρή έως μηδενική. Ως εκ τούτου το σύστημα δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό. Τέτοιου είδους αναλύσεις και συμπεράσματα, δεν είναι δυνατό να εξαχθούν από την αναλυτική μέθοδο.

#### **4.4.4 Ανάλυση στρατηγικών επιδιόρθωσης**

Μια από τις αδυναμίες της αναλυτικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο § 4.3, ήταν ότι δεν μπορούσε με το συγκεκριμένο μοντέλο να προχωρήσει σε ανάλυση στρατηγικών επιδιόρθωσης. Η δυνατότητα αυτή δίνεται με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo. Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, μπορεί να γίνει επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής επιδιόρθωσης. Αν επιλεγεί μια στρατηγική για παράδειγμα  $n_s=8$  όπως αυτή περιγράφηκε στην παράγραφο § 4.2 η επιδιόρθωση θα ξεκινά αμέσως μόλις χαλάσει το στοιχείο. Μια στρατηγική  $n_s=7$  σημαίνει ότι αφού χαλάσει ένα block αυτό θα παραμένει χαλασμένο, μέχρι να χαλάσει και ένα δεύτερο, οπότε η επιδιόρθωση θα ξεκινά και για τα δύο συγχρόνως και θα ολοκληρώνεται επίσης την ίδια στιγμή. Αυτό το μοντέλο περιγράφει πλήρως το πρότυπο μοντέλο [1] που αναλύεται.

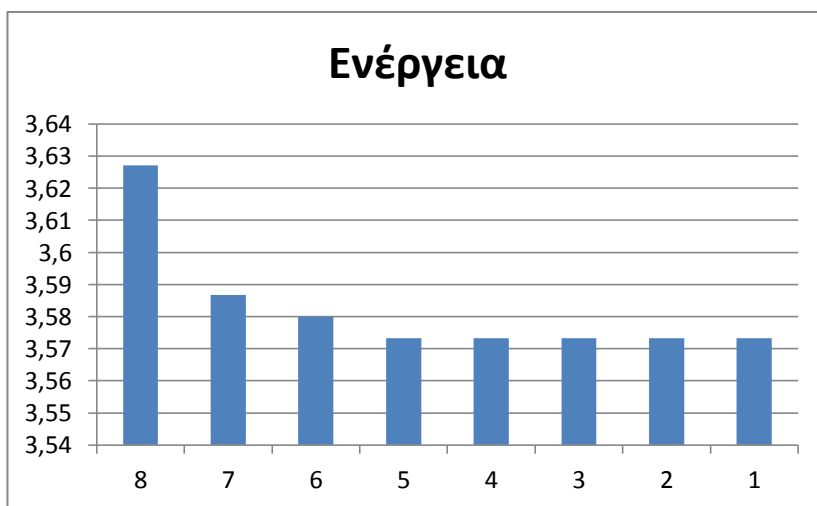
Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθούν κάποιες τροποποιήσεις που έγιναν στο πρόγραμμα, ώστε να τρέχει με σωστό τρόπο της στρατηγικές. Όπως αναφέρθηκε η μέθοδος Monte Carlo προσομοιώνει την ετήσια λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε κατά την επιλογή στρατηγικών ήταν ότι, λόγω του μεγάλου χρόνου λειτουργίας των πλαισίων μέχρι την επόμενη βλάβη, κατά την προσομοίωση δεν υπήρχε καμία βλάβη πάνω από δύο στοιχεία ταυτόχρονα. Ως εκ τούτου οι στρατηγικές επιδιόρθωσης δεν παρουσίαζαν την σωστή εικόνα του μοντέλου. Για να λυθεί το πρόβλημα μετατράπηκε ο κώδικας στην συγκεκριμένη περίπτωση ώστε ο κύκλος λειτουργίας να αφορά μια δεκαετία και όχι ένα έτος. Έτσι η λειτουργία προσομοιώνεται για μια ολόκληρη δεκαετία χωρίς διακοπές και τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά. Λόγω της αλλαγής αυτής στον κώδικα, υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση και στην τιμή της αποδιδόμενης ενέργειας κατά την στρατηγική της άμεσης επιδιόρθωσης, σε σχέση με αυτήν που παρουσιάστηκε πιο πάνω, που ωστόσο δεν είναι σημαντική.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται σε πίνακα τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις για τις διάφορες στρατηγικές επιδιόρθωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά της προσομοιώσεις οι καιρικές συνθήκες θεωρούνται ίδιες με αυτές που βρέθηκαν προηγουμένως.

**Αποτελέσματα δεκαετίας**

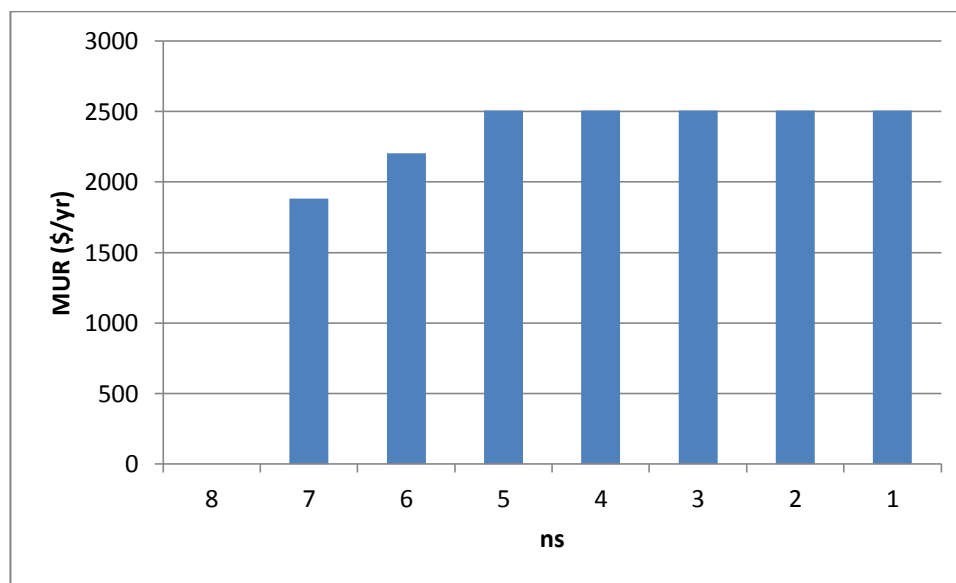
Στρατηγική $n_s$	8	7	6	5	4	3	2	1
Ικανότητα (KW)	221,85	219,38	218,96	218,56	218,56	218,56	218,56	218,56
Ενέργεια (GWh)	3,627089	3,586706	3,57984	3,5733	3,5733	3,5733	3,5733	3,5733

Τα αποτελέσματα για την αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια παρουσιάζονται και σε γραφική παράσταση για να είναι ορατή η συσχέτιση με τα αποτελέσματα του μοντέλου της παραγράφου § 4.2:



Στο πιο πάνω ιστόγραμμα είναι ορατή η ομοιότητα σε σχέση με το ιστόγραμμα που παρουσιάζεται στην παράγραφο § 4.2. Τα ποσά της αναμενόμενης αποδιδόμενης ενέργειας διαφέρουν μεν, αλλά αυτό οφείλεται στον συντελεστή χρησιμοποίησης, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως. Αυτό που πρέπει να παρατηρηθεί είναι η ομοιότητα στην μορφή αλλά και στο ποσοστό της απώλειας ενέργειας που παρατηρείται σε σχέση με το ποσοστό που παρατηρείται στο πρότυπο μοντέλο. Συγκεκριμένα από την στρατηγική  $n_s=8$  στην  $n_s=7$  παρατηρείται μείωση περίπου 1,11% της αναμενόμενης ενέργειας όταν η ανάλυση γίνεται με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo. Στο πρότυπο μοντέλο της δημοσίευσης η απώλεια ήταν αντίστοιχα 1,14%.

Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις μπορεί με ασφάλεια να βγει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο αναλύεται με τον σωστό τρόπο μέσω του προγράμματος της Matlab. Αφού έχει γίνει ο έλεγχος ορθότητας των αποτελεσμάτων μπορεί τώρα να γίνει και η οικονομική αξιολόγηση των στρατηγικών επιδιόρθωσης, για να προκύψει η βέλτιστη στρατηγική επιδιόρθωσης του συγκεκριμένου μοντέλου. Για την επίλυση βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4.1 και η διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο § 4.2. Με βάση την εξίσωση 4.1 υπολογίζονται τα αποτελέσματα κόστους σε \$/έτος για κάθε στρατηγική επιδιόρθωσης. Ως τιμή ενέργειας λαμβάνονται τα 8,7cent/kWh όπως δίνονται στο [1]. Στην γραφική παράσταση που ακολουθεί φαίνεται η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.



Με βάση τα στοιχεία της γραφικής παράστασης και για δεδομένο κόστος επισκευής σε \$/έτος, το οποίο διαφέρει αναλόγως της εγκατάστασης, μπορεί να επιλεγεί η καταλληλότερη στρατηγική επιδιόρθωσης.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να παρατηρηθεί ότι οι στρατηγικές από  $n_s=5$  μέχρι  $n_s=1$  έχουν τα ίδια αποτελέσματα απόδοσης και κόστους. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει αν ληφθεί υπόψη ότι τα φωτοβολταϊκά blocks αναμένεται να πάθουν βλάβη σε κοντινά

χρονικά διαστήματα. Ως εκ τούτου η διάρκεια μεταξύ βλαβών από την στιγμή που πραγματοποιείται η πρώτη βλάβη μειώνεται σταδιακά με αποτέλεσμα η στρατηγική επιδιόρθωσης να μην επηρεάζει την λειτουργία του συστήματος.

Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo κατά την προσομοίωση του συστήματος για την επιλογή της στρατηγικής, λαμβάνονται υπόψη και οι βλάβες που συμβαίνουν στον inverter. Στο πρότυπο μοντέλο της δημοσίευσης ο inverter λήφθηκε υπόψη μόνο κατά τη στρατηγική άμεσης επιδιόρθωσης ενώ για τις υπόλοιπες στρατηγικές αγνοήθηκε λόγω πολυπλοκότητας της επίλυσης με την αναλυτική μέθοδο.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΕ MATLAB

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση του προγράμματος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab. Θα παρουσιαστεί η διαδικασία προσομοίωσης των βλαβών και του καιρού που γίνεται σε ξεχωριστές υπορουτίνες του προγράμματος. Επίσης θα παρουσιαστεί ένα μικρό παράδειγμα φωτοβολταϊκού συστήματος ώστε να είναι πιο εύκολη η κατανόηση της λειτουργίας του προγράμματος.

## 5.1 Γενικά

Η Matlab αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προγραμματισμού και ταυτόχρονα μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού. Χρησιμοποιείται κυρίως για τεχνικό προγραμματισμό. Έχει μεγάλες γραφικές δυνατότητες, ευκολία και ταχύτητα υλοποίησης αλγορίθμων και πολλές έτοιμες συναρτήσεις. Το βασικό στοιχείο του Matlab είναι η χρήση πινάκων. Όλα τα διανύσματα εκφράζονται σαν πίνακες  $1 \times N$  ενώ οι αριθμοί σαν πίνακες  $1 \times 1$ . Αυτό κάνει το περιβάλλον αρκετά ευέλικτο και γρήγορο στις πράξεις μεταξύ πινάκων. Μεγάλος όγκος δεδομένων μπορεί να αποθηκευτεί σε πίνακες και πολλές πράξεις μπορούν να γίνουν ευκολότερα με χρήση των πινάκων. Μια αδυναμία του προγράμματος είναι ο μεγάλος – σε σχέση με άλλες γλώσσες – χρόνος για την υλοποίηση loops.

Ο λόγος που επιλέγηκε η Matlab για την υλοποίηση του προγράμματος είναι ότι αυτή χρησιμοποιείται παγκοσμίως από πολλά εργαστήρια που ασχολούνται με ανάλυση αξιοπιστίας φωτοβολταϊκών συστημάτων όπως για παράδειγμα το Sandia National Laboratory. Αυτό μας επιτρέπει καταρχάς να συμβαδίζουμε και να έχουμε ένα πρόγραμμα που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κάποιο άλλο εργαλείο ή πρόγραμμα που θα αναπτυχθεί σε κάποιο άλλο εργαστήριο. Μας επιτρέπεται επίσης όπου είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούμε εργαλεία που έχουν είδη αναπτυχθεί.

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε έχει δομηθεί σε μορφή πολλών συναρτήσεων – υπορουτίνων που καλούνται από το κυρίως πρόγραμμα όταν χρειάζονται για να υπολογίσουν κάτι. Αυτός ο τρόπος δομημένου προγραμματισμού επιτρέπει να αναπτύσσονται ευέλικτα προγράμματα, τα οποία θα δανείζονται τις υπορουτίνες που χρειάζονται για να εκτελούν τον στόχο τους. Επίσης βοηθά στην αποσυμφόρηση του κυρίως προγράμματος και κάνει το πρόγραμμα πιο ευανάγνωστο και κατανοητό.

## 5.2 Διαδικασία Προσομοίωσης Βλαβών

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει η παρουσίαση του μέρους του προγράμματος, όπου γίνεται η προσομοίωση των βλαβών του συστήματος και εξάγονται ως αποτελέσματα οι δείκτες αξιοπιστίας και η αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος. Παράλληλα θα παρουσιάζεται ένα μικρό παράδειγμα στο οποίο θα φαίνεται η οθόνη του προγράμματος όπως θα εμφανίζεται στον χρήστη.

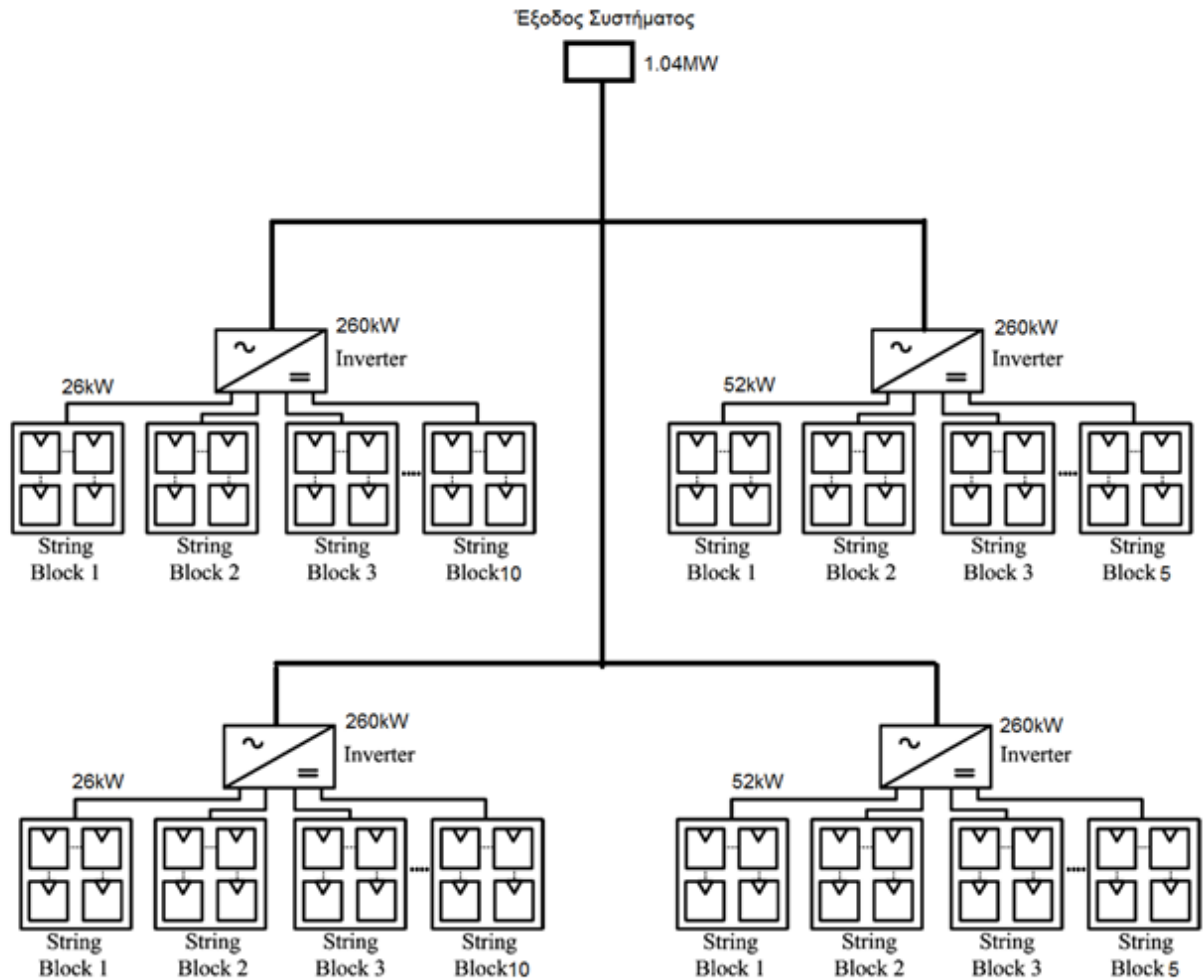
Πριν ξεκινήσει η ανάλυση του προγράμματος θα πρέπει να σημειωθεί ότι για την υλοποίηση ακολουθείται η θεωρία που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2 για την εύρεση των τυχαίων αριθμών και τυχαίων μεταβλητών. Ως αρχική τιμή  $x_0$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $x_0 = 3147483647$  η οποία εξασφαλίζει μεγάλη περίοδο των κύκλων επανάληψης. Επίσης γίνεται χρήση της τεχνικής μείωσης της διασποράς με την μέθοδο των αντίθετων μεταβλητών ώστε οι κύκλοι προσομοίωσης να μειωθούν.

Κατά τον σχεδιασμό του προγράμματος έπρεπε να οριστεί η τοπολογία του κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος ώστε οι υπολογισμοί να γίνονται σωστά. Η τοπολογία που παρουσιάζεται στο πρότυπο σύστημα του κεφαλαίου 4, αφορά ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που αποτελείται από πολλά παράλληλα όμοια blocks, τα οποία ενώνονται στην είσοδο ενός inverter. Το σύστημα λοιπόν έχει πολλές γεννήτριες παραγωγής και μια μόνο έξοδο. Αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό, δεν θα μπορούσε να εκφράζει ένα ολόκληρο φωτοβολταϊκό πάρκο με δυναμικότητα κάποιων μεγαβάτ. Ως εκ τούτου η πιο πάνω διάταξη θεωρείται ένα μέρος του όλου φωτοβολταϊκού συστήματος που στο εξής θα αναφέρεται ως υποπεδίο του συστήματος. Το πλήρες σύστημα ή πεδίο αποτελείται από πολλές τέτοιες διατάξεις που συνδέονται παράλληλα. Οι διατάξεις αυτές έχουν ξεχωριστούς inverters η κάθε μία, οπότε μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό όμοιων πλαισίων, των οποίων η δυναμικότητα από υποπεδίο σε υποπεδίο διαφέρει. Η προϋπόθεση είναι στην έξοδο των inverter να υπάρχει κοινή τάση, κάτι που αφορά το κατασκευαστικό κομμάτι του πάρκου. Όταν το αρχικό φωτοβολταϊκό σύστημα επεκτείνεται με την εγκατάσταση ακόμα ενός υποπεδίου, επιτρέπεται στον χρήστη να προσθέτει το υποπεδίο ξεχωριστά στο υπόλοιπο σύστημα. Αυτό κάνει το πρόγραμμα πιο ευέλικτο και πρακτικό.

Το πρόγραμμα ξεκινά ρωτώντας τον χρήστη ποιός είναι ο αριθμός των υποπεδίων. Στο παράδειγμα θεωρείται ένα φωτοβολταϊκό πάρκο που αποτελείται από τέσσερα υποπεδία με ικανότητα του κάθε inverter 260kW. Αυτό σημαίνει ότι το πάρκο θα έχει συνολική ικανότητα 1.04MW. Θεωρείται ακόμα ότι τα δύο υποπεδία θα αποτελούνται από 10 παράλληλα blocks ικανότητας 26kW και τα άλλα δύο από πέντε ικανότητας 52kW. Όσον αφορά τις παραμέτρους αξιοπιστίας θα χρησιμοποιηθούν αυτές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται συνολικά τα στοιχεία του φωτοβολταϊκού συστήματος του παραδείγματος.

$\lambda_i$ (1/έτος)	$\lambda_S$ (1/έτος)	$\mu_i$ (1/έτος)	$\mu_S$ (1/έτος)
1/3	1/270	365/15	365/8

Πιο κάτω φαίνεται και η τοπολογία του συστήματος στην οποία αναγράφεται και η ικανότητα του κάθε στοιχείου. Είναι φανερό ότι η τοπολογία του συστήματος θα παίξει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα αφού αν χαθεί για παράδειγμα ένα block των 52kW είναι σαν να χάνονται ταυτόχρονα δύο blocks των 26kW. Το πώς η τοπολογία επηρεάζει τις εγκαταστάσεις θα εξεταστεί σε επόμενο κεφάλαιο. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει απλά η παρουσίαση της διαδικασίας επίλυσης και των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.1: Τοπολογία Φωτοβολταϊκού συστήματος τεσσάρων υποπεδίων συνολικής ισχύς 1.04MW

Στο πιο κάτω στιγμιότυπο του προγράμματος παρουσιάζεται ο αρχικός προσδιορισμός του συστήματος. Τα δεδομένα που ζητούνται από το πρόγραμμα είναι ο αριθμός των υποπεδίων και ακολούθως για κάθε υποπεδίο ο αριθμός των όμοιων blocks που τοποθετούνται παράλληλα, η ικανότητα του κάθε block και οι παράμετροι αξιοπιστίας του κάθε στοιχείου του υποπεδίου. Οι ερωτήσεις αυτές γίνονται για κάθε υποπεδίο ξεχωριστά ώστε να οριστεί το πλήρες σύστημα. Όταν τελειώσει η εισαγωγή των δεδομένο το πρόγραμμα ρωτά τον αναλυτή ποια στρατηγική επιδιόρθωσης να ακολουθήσει. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγηκε στρατηγική άμεσης επιδιόρθωσης μετά από κάθε βλάβη. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν η στρατηγική που επιθυμείται είναι διαφορετική, το πρόγραμμα προσομοίωσης θα πρέπει να προσομοιώσει την λειτουργία μιας δεκαετίας του συστήματος και όχι ενός έτους, ώστε να εξαχθούν σωστά αποτελέσματα. Αυτό αναφέρεται και στην παράγραφο §4.4.4

όπου έγινε για πρώτη φορά η χρήση στρατηγικών. Το πώς αυτό διαφοροποιεί το πρόγραμμα θα αναλυθεί στην συνέχεια.

```
Command Window
Δώσε τον αριθμό των υποπεδίων:4
Δώσε τον αριθμό των όμοιων blockes:10
Δώσε την ισχύ ανά block (KW):26
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του κάθε inverter σε ώρες [..]:26280
Δώσε τις ώρες επισκευής του κάθε inverter [..]:360
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του block σε ώρες:2365200
Δώσε τις ώρες επισκευής του block:192
Δώσε τον αριθμό των όμοιων blockes:10
Δώσε την ισχύ ανά block (KW):26
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του κάθε inverter σε ώρες [..]:26280
Δώσε τις ώρες επισκευής του κάθε inverter [..]:360
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του block σε ώρες:2365200
Δώσε τις ώρες επισκευής του block:192
Δώσε τον αριθμό των όμοιων blockes:5
Δώσε την ισχύ ανά block (KW):52
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του κάθε inverter σε ώρες [..]:26280
Δώσε τις ώρες επισκευής του κάθε inverter [..]:360
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του block σε ώρες:2365200
Δώσε τις ώρες επισκευής του block:192
Δώσε τον αριθμό των όμοιων blockes:5
Δώσε την ισχύ ανά block (KW):52
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του κάθε inverter σε ώρες [..]:26280
Δώσε τις ώρες επισκευής του κάθε inverter [..]:360
Δώσε τον ρυθμό βλαβών του block σε ώρες:2365200
Δώσε τις ώρες επισκευής του block:192
fx Στρατηγική: Δώσε τον αριθμό των χαλασμένων στοιχείως πριν την έναρξη της επισκευής:1
```

Σχήμα 5.2: Παρουσίαση οθόνης προγράμματος Μεθόδου προσομοίωσης Monte Carlo

Έχοντας εισάγει τα δεδομένα όπως φαίνονται πιο πάνω, ξεκινά η προσομοίωση. Ο πρώτος κύκλος αφορά το πρώτο έτος. Σε αυτό το πρώτο έτος θεωρείται αρχικά ότι το σύστημα δουλεύει και υπολογίζεται η κρίσιμη ώρα αλλαγής κατάστασης του κάθε στοιχείου. Η κρίσιμη ώρα υπολογίζεται με την μέθοδο των τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέση τιμή τον ρυθμό βλαβών του στοιχείου σε ώρες, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο §2.3. Για κάθε στοιχείο η ώρα αλλαγής από την κατάσταση λειτουργίας σε κατάσταση βλάβης φυλάσσεται σε ένα πίνακα ως διάνυσμα. Αν η ώρα αυτή ξεπερνά τις 8760 ώρες που έχει ένα έτος, σημαίνει ότι το στοιχείο δεν θα πάθει βλάβη κατά τη διάρκεια του παρόντος έτους προσομοίωσης. Όταν για κάποιο στοιχείο, η κρίσιμη ώρα προκύπτει να ανήκει στο έτος, τότε όταν η ροή του προγράμματος φτάσει σε αυτή την ώρα θα υπολογιστεί μια νέα κρίσιμη ώρα που θα εκφράζει τη διάρκεια επισκευής του στοιχείου. Η κατάσταση του στοιχείου αλλάζει από λειτουργία σε βλάβη και προστίθεται σε ένα μετρητή μια βλάβη για το συγκεκριμένο στοιχείο. Η διάρκεια επισκευής υπολογίζεται επίσης από τυχαίο αριθμό που ακολουθεί την εκθετική κατανομή, με μέση τιμή τον ρυθμό επισκευής σε ώρες που δόθηκε για το συγκεκριμένο στοιχείο. Η διάρκεια επισκευής επίσης φυλάσσεται σε πίνακα και σε αυτήν

προστίθενται οι ώρες επισκευής που υπολογίζονται κάθε φορά, όταν το στοιχείο μεταβαίνει από την κατάσταση λειτουργίας σε κατάσταση βλάβης. Ο μετρητής των βλαβών και των ωρών επισκευής δεν μηδενίζεται σε κάθε κύκλο προσομοίωσης, αλλά συνεχίζει να αυξάνεται. Όταν τελειώσει η ροή του πρώτου έτους ξεκινά η ροή του δεύτερου έτους. Στην αρχή του δεύτερου έτους όλα τα στοιχεία του συστήματος θεωρούνται ξανά σε λειτουργία και υπολογίζονται νέες κρίσιμες ώρες. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το τέλος και του δεύτερου έτος και για κάθε έτος. Η διαφορά των ετών με ζυγό αριθμό (2,4,6,8,...) είναι ότι χρησιμοποιούν το ίδιο  $x_0$  με τα αντίστοιχα μονά έτη αλλά παρά να υπολογίζονται οι τυχαίοι αριθμοί με το  $u$ , υπολογίζονται με το  $1-u$ . Ο λόγος περιγράφεται στην παράγραφο § 2.5 όπου περιγράφεται η τεχνική μείωσης της διασποράς. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο απαιτούμενος αριθμός των κύκλων επανάληψης που χρειάζονται για την σύγκληση των αποτελεσμάτων.

Μετά το τέλος όλων των κύκλων επανάληψης τα στοιχεία από τον πίνακα με τους αριθμούς βλαβών κάθε στοιχείου και τον πίνακα της διάρκειας που τα στοιχεία είναι σε βλάβη, επεξεργάζονται ώστε να προκύψουν οι δείκτες αξιοπιστίας του κάθε στοιχείου. Ο μέσος χρόνος λειτουργίας κάθε στοιχείου σε ώρες δίνεται από την εξίσωση 5.1 όπως φαίνεται πιο κάτω.

$$m = \frac{(\Omega \text{ρες προσομοίωσης}) - (\chi \rho \acute{o} \nu \omicron \varsigma \text{ σε επισκευή})}{\text{αριθμός βλαβών}} \quad \text{εξ.5.1}$$

όπου:

- *Ωρες προσομοίωσης*: είναι οι 8760 ώρες κάθε κύκλου επί τον αριθμό των κύκλων (στο πρόγραμμα 1000).
- *Χρόνος σε επισκευή*: είναι η συνολική διάρκεια που το στοιχείο είναι σε βλάβη σε ώρες για όλους τους κύκλους.
- *Αριθμός βλαβών*: όλες οι βλάβες του στοιχείου που καταγράφηκαν κατά την προσομοίωση.

Ο ρυθμός βλαβών του κάθε στοιχείου σε βλάβες ανά έτος δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{8760}{m} \quad \text{εξ.5.2}$$

όπου το 8760 μπαίνει για να γίνει η μετατροπή από ώρες σε έτος.

Ο μέσος χρόνος επισκευής δίνεται από την σχέση:

$$r = \frac{(\chi \rho \acute{o} \nu \omicron \varsigma \text{ σε επισκευή})}{(\text{κύκλοι προσομοίωσης}) * \lambda} \quad \text{εξ.5.3}$$

όπου:

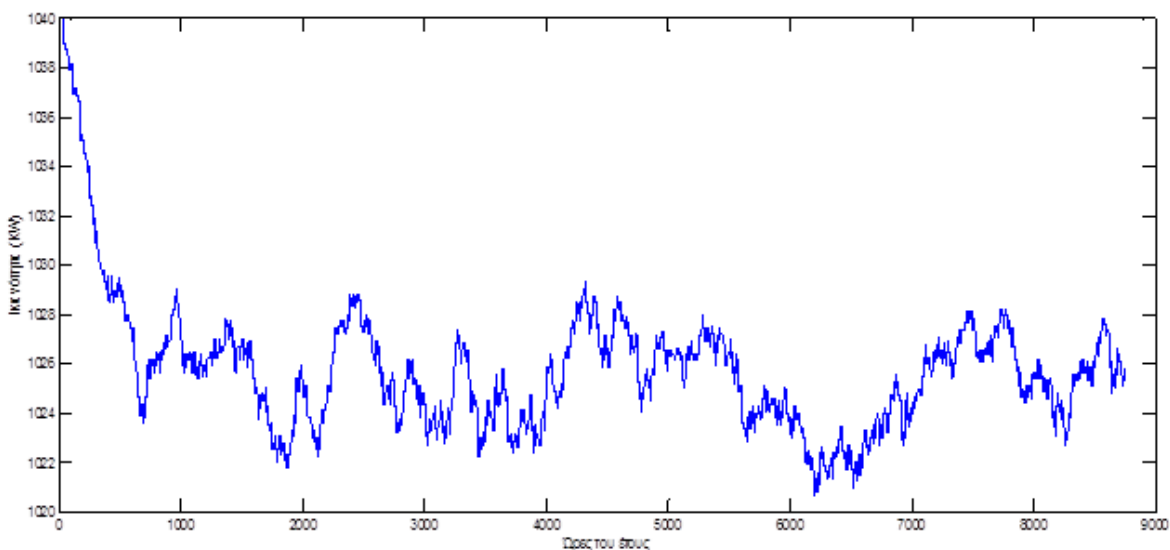
- *Χρόνος σε επισκευή*: είναι η συνολική διάρκεια που το στοιχείο είναι σε βλάβη σε ώρες για όλους τους κύκλους.
- *κύκλοι προσομοίωσης*: ο αριθμός των κύκλων (στο πρόγραμμα 1000)
- *λ*: ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος.

Τέλος η μη διαθεσιμότητα του συστήματος σε ώρες ανά έτος δίνεται ως:

$$u = \frac{\text{χρόνος σε επισκευή}}{\text{κύκλοι προσομοίωσης}} \quad \text{εξ.5.4}$$

Οι δείκτες αξιοπιστίας υπολογίζονται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Στο πρόγραμμα υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιάζονται όλοι οι δείκτες σε ένα πίνακα ή οι δείκτες του κάθε υποπεδίου ξεχωριστά. Στην επόμενη σελίδα φαίνονται τα αποτελέσματα από τους δείκτες για κάθε υποπεδίο.

Για τον υπολογισμό της μέσης ικανότητας του συστήματος ακολουθείται η εξής διαδικασία. Κατά την ροή του προγράμματος και κάθε φορά που ένα block μπαίνει σε κατάσταση βλάβης, καλείται μια συνάρτηση η οποία μειώνει την αποδιδόμενη ισχύ του υποπεδίου που ανήκει το στοιχείο. Η μείωση, αντιστοιχεί στην ισχύ που χάνεται λόγω της βλάβης του στοιχείου, και διαρκεί όσο και ο χρόνος που το στοιχείο είναι σε βλάβη. Τα αποτελέσματα φυλάσσονται σε πίνακα με 8760 στήλες, όσες και οι ώρες του έτους. Στο τέλος της προσομοίωσης η μέση τιμή κάθε στήλης εκφράζει την μέση αναμενόμενη ικανότητα του υποπεδίου. Οι ικανότητες των υποπεδίων αθροίζονται για να βρεθεί η ικανότητα του συνολικού φωτοβολταϊκού πεδίου. Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα για το συγκεκριμένο παράδειγμα:



Σχήμα 5.3: Ετήσια αναμενόμενη Ικανότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος ανά ώρα του έτους, για το σύστημα 1.04MW

Πίνακες αποτελεσμάτων δεικτών για κάθε υποπεδίο

<b>Υποπεδίο 1</b>		<b>Block 1</b>	<b>Block 2</b>	<b>Block 3</b>	<b>Block 4</b>	<b>Block 5</b>	<b>Block 6</b>	<b>Block 7</b>	<b>Block 8</b>	<b>Block 9</b>	<b>Block 10</b>	<b>Inverter</b>
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες	<b>m</b>	2919923	2189704	1094874	1094794	1751862	8759858	4379822	1459779	4379887	4379904	26613
Ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος	<b>λ</b>	0,003	0,004	0,008	0,008	0,005	0,001	0,002	0,006	0,002	0,002	0,329
Ώρες επισκευής ανά βλάβη	<b>r</b>	77	296	126	206	138	142	178	221	113	96	337
Μη Διαθεσιμότητα σε ώρες ανά έτος	<b>U</b>	0,232	1,186	1,006	1,645	0,691	0,142	0,357	1,328	0,226	0,192	110,897

<b>Υποπεδίο 2</b>		<b>Block 1</b>	<b>Block 2</b>	<b>Block 3</b>	<b>Block 4</b>	<b>Block 5</b>	<b>Block 6</b>	<b>Block 7</b>	<b>Block 8</b>	<b>Block 9</b>	<b>Block 10</b>	<b>Inverter</b>
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες	<b>m</b>	1251293	2189886	1094921	4379830	2189738	972972	4379891	2919875	1459825	1751874	24900
Ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος	<b>λ</b>	0,007	0,004	0,008	0,002	0,004	0,009	0,002	0,003	0,006	0,005	0,352
Ώρες επισκευής ανά βλάβη	<b>r</b>	135	114	79	170	262	361	109	125	175	126	340
Μη Διαθεσιμότητα σε ώρες ανά έτος	<b>U</b>	0,948	0,457	0,634	0,34	1,047	3,25	0,218	0,376	1,053	0,631	119,752

<b>Υποπεδίο 3</b>		<b>Block 1</b>	<b>Block 2</b>	<b>Block 3</b>	<b>Block 4</b>	<b>Block 5</b>	<b>Inverter</b>
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες	<b>m</b>	2189831	1751755	2919942	2189540	8759813	24888
Ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος	<b>λ</b>	0,004	0,005	0,003	0,004	0,001	0,352
Ώρες επισκευής ανά βλάβη	<b>r</b>	169	245	58	460	187	352
Μη Διαθεσιμότητα σε ώρες ανά έτος	<b>U</b>	0,675	1,226	0,175	1,839	0,187	123,73

<b>Υποπεδίο 4</b>		<b>Block 1</b>	<b>Block 2</b>	<b>Block 3</b>	<b>Block 4</b>	<b>Block 5</b>	<b>Inverter</b>
Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες	<b>m</b>	2919753	2189764	1751838	1459841	4379873	25489
Ρυθμός βλαβών σε βλάβες ανά έτος	<b>λ</b>	0,003	0,004	0,005	0,006	0,002	0,344
Ώρες επισκευής ανά βλάβη	<b>r</b>	247	236	162	159	127	347
Μη Διαθεσιμότητα σε ώρες ανά έτος	<b>U</b>	0,742	0,944	0,811	0,956	0,255	119,359



Όσον αφορά τους δείκτες αξιοπιστίας των στοιχείων, όπως παρατηρείται στους πιο πάνω πίνακες, ακόμα και αν το κάθε στοιχείο του κάθε υποπεδίου είχε ακριβώς τα ίδια χαρακτηριστικά όσον αφορά τις παραμέτρους αξιοπιστίας, οι δείκτες αξιοπιστίας τους διαφέρουν αρκετά. Ακόμα και για τα ζεύγη των υποπεδίων που είναι όμοια οι δείκτες δεν έχουν κάποια συνοχή. Αυτό είναι θεμιτό και απόλυτα φυσιολογικό αφού το κάθε στοιχείο θεωρητικά λειτουργεί ανεξάρτητα και οι τυχαίες μεταβλητές που παράγονται δεν επηρεάζουν την λειτουργία του διπλανού στοιχείου. Αυτό εξάλλου είναι και το νόημα της μεθόδου προσομοίωσης τυχαίων γεγονότων.

Το τελευταίο κομμάτι που μένει να αναλυθεί σε αυτή την παράγραφο αφορά την λειτουργία των στρατηγικών επιδιόρθωσης. Οι στρατηγικές επιδιόρθωσης που αφορούν πάνω από ένα στοιχείο σε βλάβη πριν την έναρξη της επισκευής, προσομοιώνονται σε βάθος δεκαετίας. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι ο ρυθμός βλαβών σε ώρες του κάθε block αντιστοιχεί σε μεγάλο αριθμό ετών, τάξης δεκαετιών.

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως για κάθε κύκλο προσομοίωσης με βάση το ένα έτος, όλες οι κρίσιμες ώρες μηδενίζονται και υπολογίζονται ξανά στην αρχή κάθε έτους. Αυτό σημαίνει ότι αν μια βλάβη πρέπει να παρουσιαστεί σε ώρα που αντιστοιχεί στο πέμπτο έτος, θεωρείται ότι το στοιχείο δεν παθαίνει βλάβη. Η πληροφορία του πέμπτου έτους δεν μεταφέρεται από έτος σε έτος.

Όπως παρατηρήθηκε από τις προσομοιώσεις του συστήματος για επιλογή στρατηγικής «πάνω από δύο block χαλασμένα πριν ξεκινήσει η επισκευή» σε βάση ενός έτους λειτουργίας, ποτέ δεν θα χαλάσουν τρία ή περισσότερα block μαζί. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού θεωρείται ότι το πρόγραμμα ολοκληρώνει ένα κύκλο σε δέκα και όχι σε ένα χρόνο. Παρά η ροή του κάθε κύκλου να διαρκεί 8760 ώρες τίθεται να διαρκεί 87600 ώρες. Με αυτόν τον τρόπο η πληροφορία κάποιας βλάβης που συμβαίνει μέχρι και το δέκατο έτος κάθε κύκλου, κρατείται και εκτελείται από το πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πιο σωστά αφού σε βάθος δεκαετίας μπορεί να παρουσιαστεί ταυτόχρονη βλάβη σε περισσότερα blocks. Τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης δεκαετίας φαίνονται στην παράγραφο §4.4.4.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε βάθος δεκαετίας δεν επηρεάζονται σημαντικά οι δείκτες αξιοπιστίας, για την στρατηγική άμεσης επιδιόρθωσης, σε σχέση με την προσομοίωση με βάση ένα έτος. Υπάρχει διαφοροποίηση των δεικτών, όταν αλλάξει η στρατηγική επιδιόρθωσης, αφού κάποιο στοιχείο μπορεί να μένει εκτός λειτουργίας για αρκετό καιρό. Στην προσομοίωση με βάση δεκαετίας, μπορούν να χαλάσουν και να μείνουν χαλασμένα αρκετά blocks ταυτόχρονα, κάτι που δεν επιτυγχάνεται όπως αναφέρθηκε σε προσομοίωση με βάση το έτος. Έτσι αναμένεται οι δείκτες που θα υπολογιστούν να έχουν διαφορά, ανάλογα με το ποια είναι η βάση προσομοίωσης. Ως εκ τούτου δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος θεωρούνται αυτοί που βρέθηκαν στην στρατηγική άμεσης επιδιόρθωσης. Οι υπόλοιπες στρατηγικές εκτελούνται μόνο για να βρεθεί η απώλεια ικανότητας που αναμένεται.

Στο παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής (Flow charts) που περιγράφουν την δομή και λειτουργία του αλγορίθμου. Τα διαγράμματα χωρίζονται στις υπορουτίνες που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα για καλύτερη κατανόηση.

### 5.3 Διαδικασία Προσομοίωσης Καιρού

Στην τρίτη παράγραφο του Κεφαλαίου 5 θα αναλυθεί ο τρόπος που προσεγγίζονται και προσομοιώνονται οι καιρικές συνθήκες. Με τον όρο καιρικές συνθήκες, θα εννοείται κυρίως η νέφωση της περιοχής, όπου είναι εγκατεστημένο το φωτοβολταϊκό σύστημα. Στον παράγοντα 'καιρό' είναι προφανές ότι υπάρχει μεγάλη τυχαιότητα. Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo επιτρέπει να προσομοιώνονται αυτά τα τυχαία συστήματα με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση λαμβάνονται από μετρήσεις και στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ). Έτσι τα αποτελέσματα δεν είναι εντελώς τυχαία, αλλά ακολουθούν κάποια λογική και συμφωνούν με τα στατιστικώς παρατηρούμενα δεδομένα. Αυτό εξασφαλίζει την σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων.

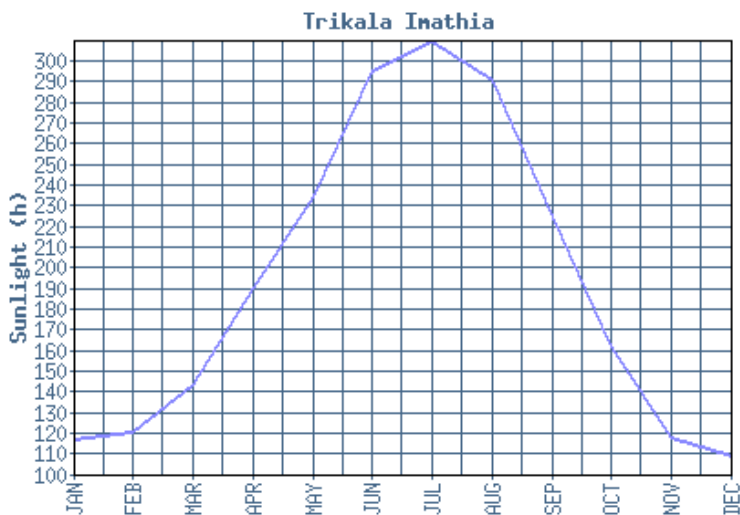
Η υπορουτίνα του προγράμματος που προσομοιώνει τον καιρό είναι ανεξάρτητη με το υπόλοιπο πρόγραμμα. Έτσι το κομμάτι των βλαβών που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δεν επηρεάζει το κομμάτι του καιρού. Αυτό προσθέτει ευελιξία στο πρόγραμμα όπως για παράδειγμα την επιλογή αν αυτό θα τρέχει σε βάση έτους ή δεκαετίας. Αφού υπολογιστούν τα αποτελέσματα που αφορούν τις βλάβες, υπολογίζονται ανεξάρτητα τα αποτελέσματα των καιρικών συνθηκών και ακολούθως συνδυάζονται για να δώσουν το τελικό αποτέλεσμα.

Η θεωρία και οι διαδικασίες που χρειάζονται στο κομμάτι του καιρού έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Στην συγκεκριμένη παράγραφο θα εξηγηθεί η γενική διαδικασία που εκτελείται στο πρόγραμμα.

Αρχικά, το πρόγραμμα ζητά από τον χρήστη να δώσει κάποια απαραίτητα γενικά στοιχεία που αφορούν τη θέση του φωτοβολταϊκού πεδίου (γεωγραφικό πλάτος), την γωνία εγκατάστασης των πλαισίων – η οποία επηρεάζει την απόδοσή τους – και το μήκος των πλαισίων. Το γεωγραφικό πλάτος είναι απαραίτητο αφού επηρεάζει την ετήσια καμπύλη θέσης του ήλιου και το μέγιστο ύψος του ήλιου. Η γωνία εγκατάστασης των πλαισίων είναι συνδεδεμένη με το γεωγραφικό πλάτος, αφού επιλέγεται βάση αυτού και βοηθά στην μεγιστοποίηση της απόδοσης των πλαισίων. Τέλος το μήκος των πλαισίων είναι μια χρήσιμη πληροφορία αφού με βάση αυτό υπολογίζεται η απαιτούμενη απόσταση που θα πρέπει να έχουν οι σειρές των πλαισίων μεταξύ τους. Ο παράγοντας σκίασης των πλαισίων μεταξύ τους περιγράφεται στην παράγραφο § 3.4.

Αφού δοθούν αρχικά τα πιο πάνω στοιχεία, το πρόγραμμα ξεκινά την προσομοίωση του καιρού. Η καμπύλη που περιγράφει την μέση ημερήσια ηλιοφάνεια ανά μήνα, έχει ενσωματωθεί στο πρόγραμμα και είναι αυτή που πάρθηκε από τα στοιχεία της Ε.Μ.Υ. Η καμπύλη αυτή αλλάζει από περιοχή σε περιοχή. Υπάρχει η δυνατότητα ανάλογα με την

περιοχή να γίνει αλλαγή της καμπύλης που χρησιμοποιείται. Πιο κάτω παρουσιάζονται ορισμένες καμπύλες που δίνονται από τους σταθμούς της Ε.Μ.Υ σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι ώρες ηλιοφάνειας αφορούν το σύνολο του μήνα οπότε η ημερήσια τιμή λαμβάνεται ως ο μέσος όρος για κάθε μήνα.

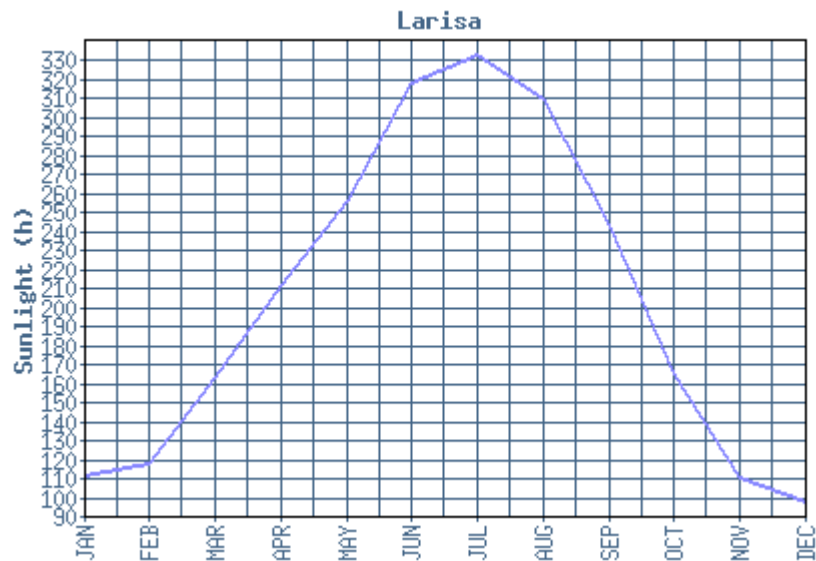


<b>1° Semester</b>	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN
Monthly Average Sunlight	117.1	120.4	143.8	190.4	234.9	295.3
<b>2° Semester</b>	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Monthly Average Sunlight	309.6	290.6	224.9	162.1	118.3	109.1

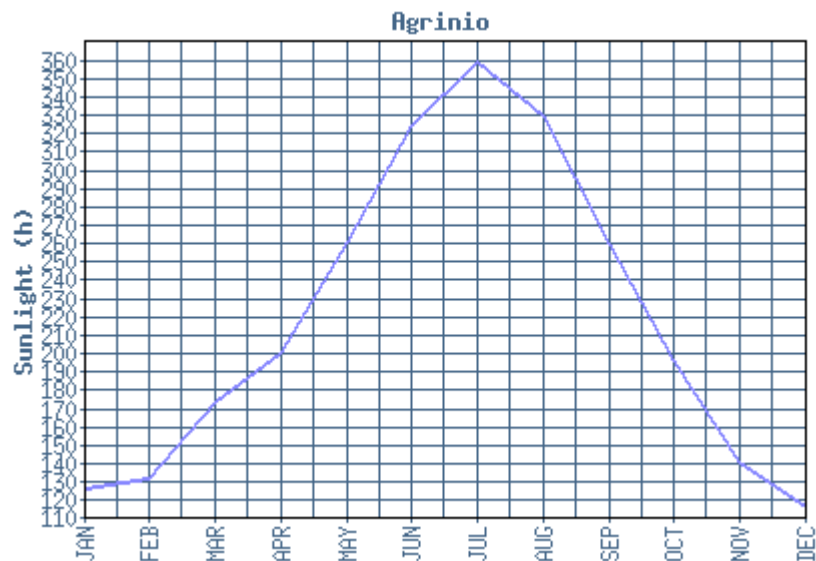


<b>1° Semester</b>	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN
Monthly Average Sunlight	98.4	111.4	147.4	191.6	237.5	293.9
<b>2° Semester</b>	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Monthly Average Sunlight	309.6	290.6	224.9	162.1	118.3	109.1

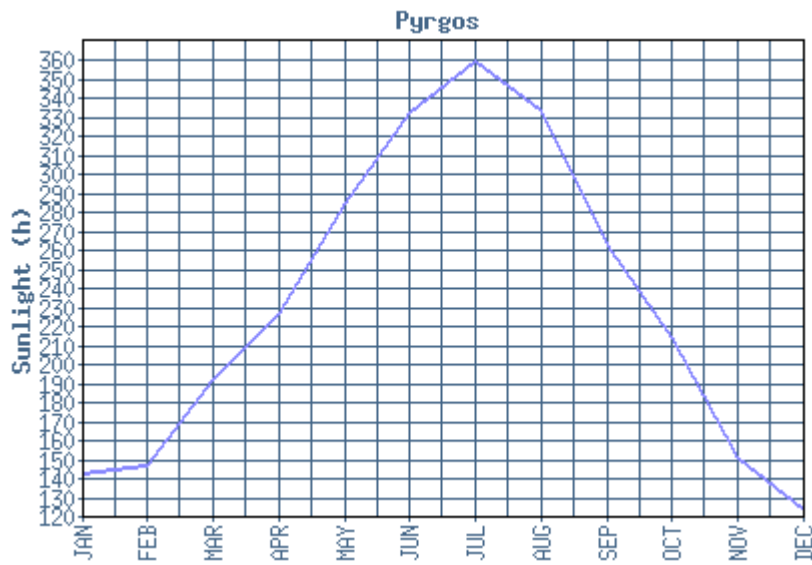
<b>Monthly Average Sunlight</b>	316.5	294.7	236.3	169.0	106.8	85.9
---------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	------



<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	112.2	119.2	163.9	211.9	256.7	318.9
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	332.8	309.6	243.6	165.9	112.0	98.8



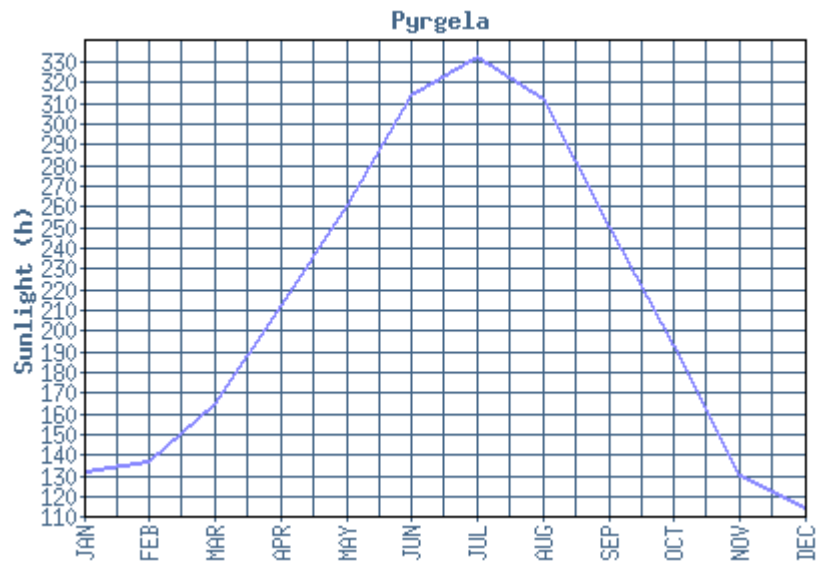
<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	126.9	132.4	173.5	201.7	261.4	325.1
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	360.1	330.0	259.9	196.4	140.7	117.2



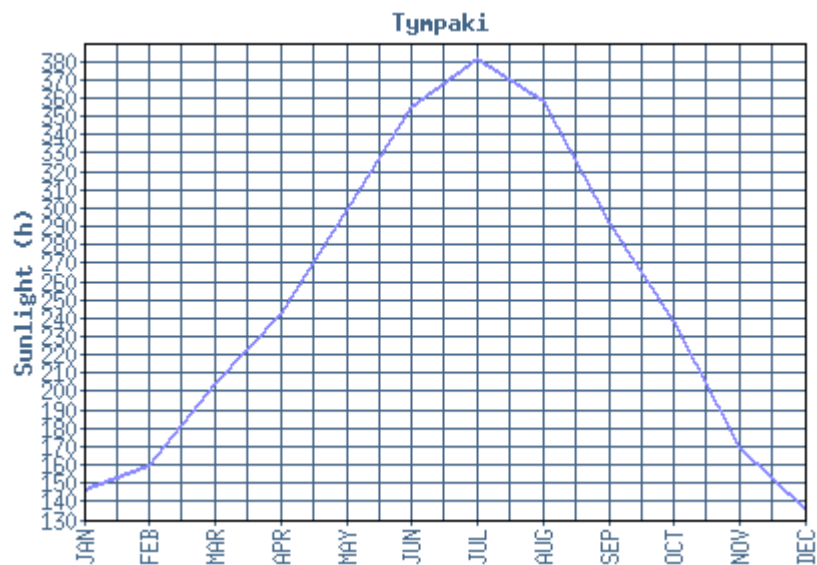
<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
Monthly Average Sunlight	143.2	147.4	193.4	227.2	285.3	332.3
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
Monthly Average Sunlight	360.4	333.9	263.6	215.2	152.5	124.9



<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
Monthly Average Sunlight	127.8	131.7	176.2	210.4	262.9	318.9
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
Monthly Average Sunlight	325.6	306.7	257.0	197.2	141.0	116.7



<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	133.1	137.7	165.7	213.2	261.3	314.6
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	332.5	312.8	250.8	193.2	131.2	115.1

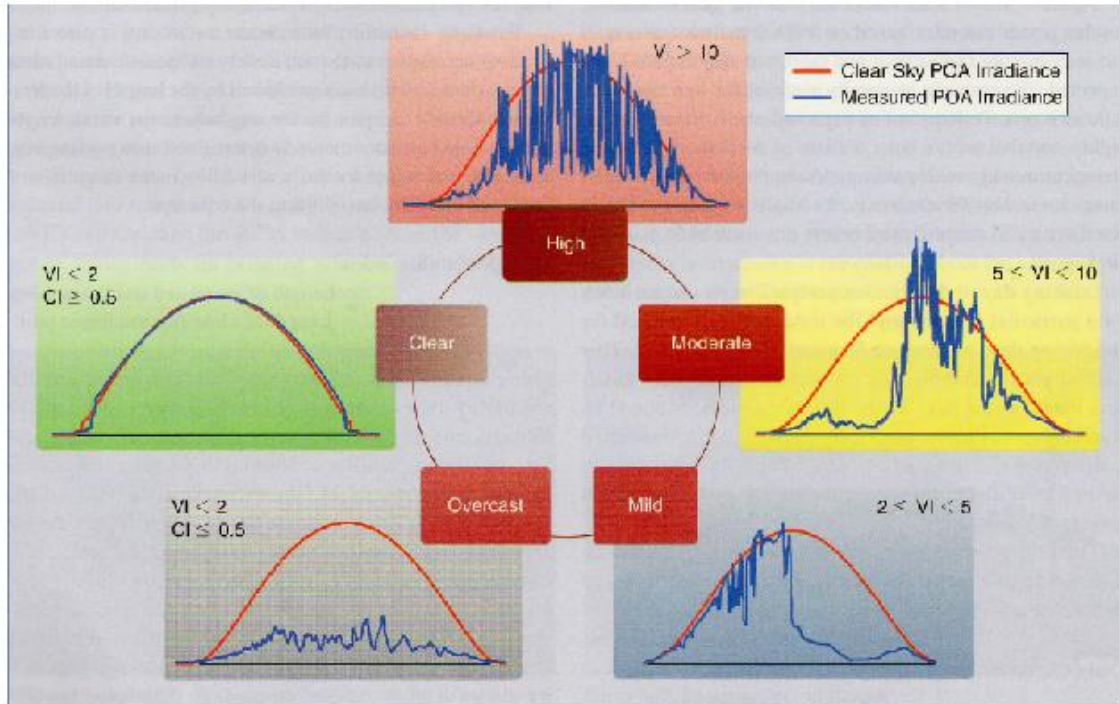


<b>1° Semester</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	146.7	160.2	205.3	243.2	299.9	356.0
<b>2° Semester</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEC</b>
<b>Monthly Average Sunlight</b>	382.0	359.1	292.1	238.5	169.5	136.0

Από τις πιο πάνω καμπύλες βρίσκεται το 'n' που αντιπροσωπεύει την μέση ημερήσια ηλιοφάνεια ανά μήνα και χρησιμοποιείται στις εξισώσεις 3.14 και 3.15. Για την εύρεση του 'n' το οποίο χρησιμοποιείται στην εξίσωση 3.13 και το οποίο αντιπροσωπεύει την τυχαία ηλιοφάνεια σε ώρες, την συγκεκριμένη ημέρα του έτους, εφαρμόζεται η μέθοδος των τυχαίων αριθμών. Από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών προκύπτει ένας αριθμός ο οποίος, αφού εφαρμοστεί στην εμπειρική εξίσωση 2.12 επιστρέφει μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή. Για την προσομοίωση καιρού η κανονική κατανομή είναι η καταλληλότερη. Ως μέση τιμή της κατανομής επιλέγεται η τιμή του  $\bar{n}$  του μήνα για τον οποίο γίνονται οι υπολογισμοί κάθε φορά. Η τυπική απόκλιση από την μέση τιμή, επιλέγεται ως ποσοστό αυτής. Το πιο ποσοστό πρέπει να επιλεγεί είναι θέμα μελέτης και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες ευαισθησίας [12][13][14].

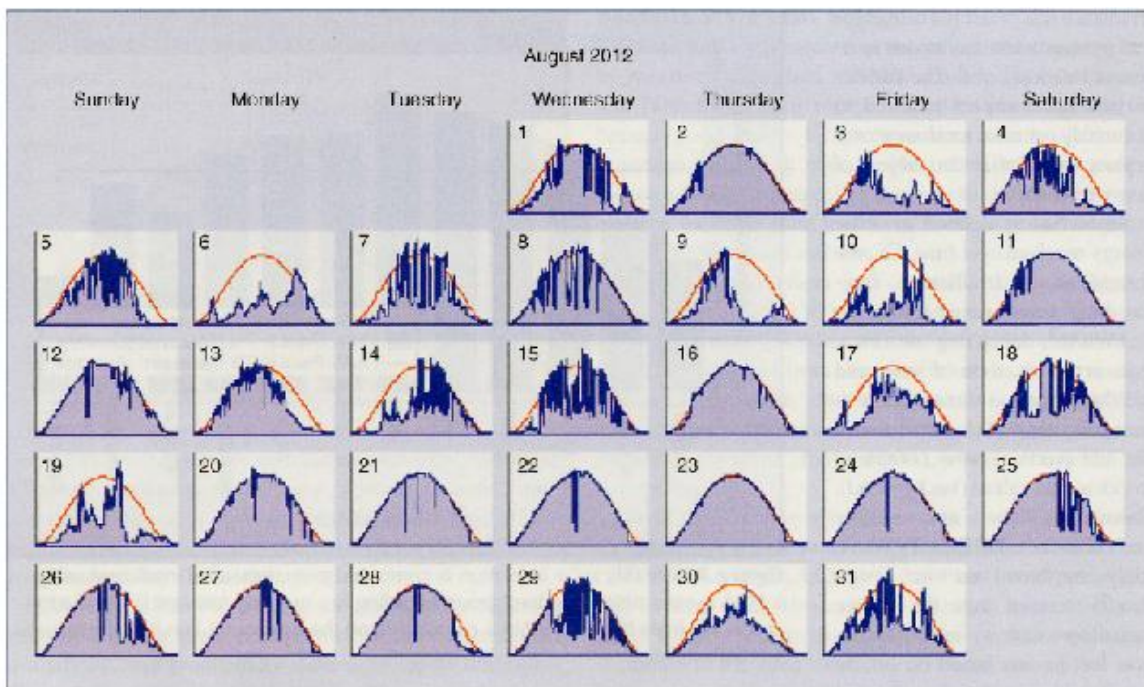
Έχοντας υπολογίσει την τιμή του 'n' για μια ημέρα μπορεί να βρεθεί ο δείκτης αιθριότητας της ημέρας. Η αρχική προσέγγιση που έγινε κατά την εκπόνηση της εργασίας, προνοούσε ότι ο δείκτης αιθριότητας είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η παραδοχή δεν ήταν επαρκώς ρεαλιστική οπότε χρειάστηκε να τροποποιηθεί. Στον αλγόριθμό που αναπτύχθηκε θεωρείται ότι ο δείκτης αιθριότητας που υπολογίστηκε αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή για όλη τη μέρα. Ως εκ τούτου μπορεί να υπολογιστεί η ωριαία αιθριότητα, ως μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή αυτή που υπολογίστηκε ως ημερήσια. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια τυχαία διακύμανση της αιθριότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας, που προσομοιώνει την κίνηση και εμφάνιση νεφών από ώρα σε ώρα.

Η διαδικασία που περιγράφεται πιο πάνω προσδίδει ρεαλισμό στα αποτελέσματα και εξασφαλίζει ότι είναι δυνατόν η μέγιστη απόδοση του πεδίου, να μην σημειώνεται κατά το μεσημέρι, λόγω ακριβώς της νέφωσης. Αυτό ήταν και το ζητούμενο από την αρχή. Το θέμα της νέφωσης και το πώς αυτή προσομοιώνεται, είναι κάτι που απασχολεί πολλά εργαστήρια σε ολόκληρο τον κόσμο. Από παρατηρήσεις που έγιναν, η συμπεριφορά των νεφών μπορεί να χαρακτηριστεί με διάφορους τρόπους, αναλόγως των επιπτώσεων που έχουν [12][13]. Πιο κάτω παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4, η μορφή που θα έχει η ηλιακή ακτινοβολία με βάση τη νέφωση κάποιας μέρας, όπως μετρήθηκε στο φωτοβολταϊκό πεδίο του Tennessee των Η.Π.Α [2]. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν απεικονίζονται με βήμα λεπτά της ημέρας. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την αναμενόμενη μορφή για μια ημέρα, όταν παρουσιάζεται ο συγκεκριμένος βαθμός νέφωσης κάθε φορά. Στο πρόγραμμα προσομοιώνεται και η περίπτωση overcast νέφωσης που φαίνεται στο σχήμα 5.4, μέσο τυχαίων εμφανίσεων που συμβαίνουν μέσα στο έτος και που ακολουθούν την κανονική κατανομή, με διαφορετική πιθανότητα να συμβούν, αναλόγως του μήνα. Στην περίπτωση overcast νέφωσης η απόδοση μειώνεται στο 20% της αναμενόμενης.



Σχήμα 5.4: Κατηγορίες μεταβλητότητας της ηλιακής ακτινοβολίας με βάση το δείκτη αιθριότητας ανά λεπτό.

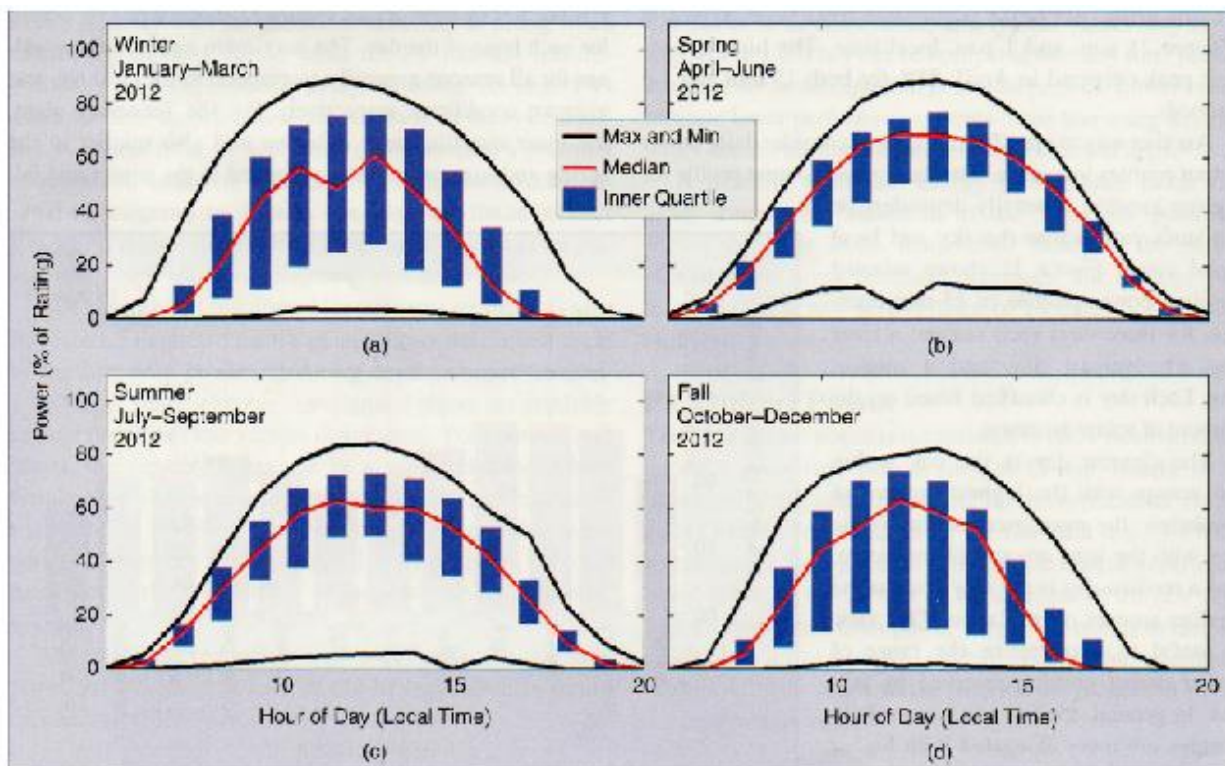
Στη συνέχεια στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μέρα του μήνα Αυγούστου όπως αυτές καταγράφηκαν.



Σχήμα 5.5: Ηλιακή ακτινοβολία για κάθε μέρα του μήνα Αυγούστου στο Tennessee των Η.Π.Α

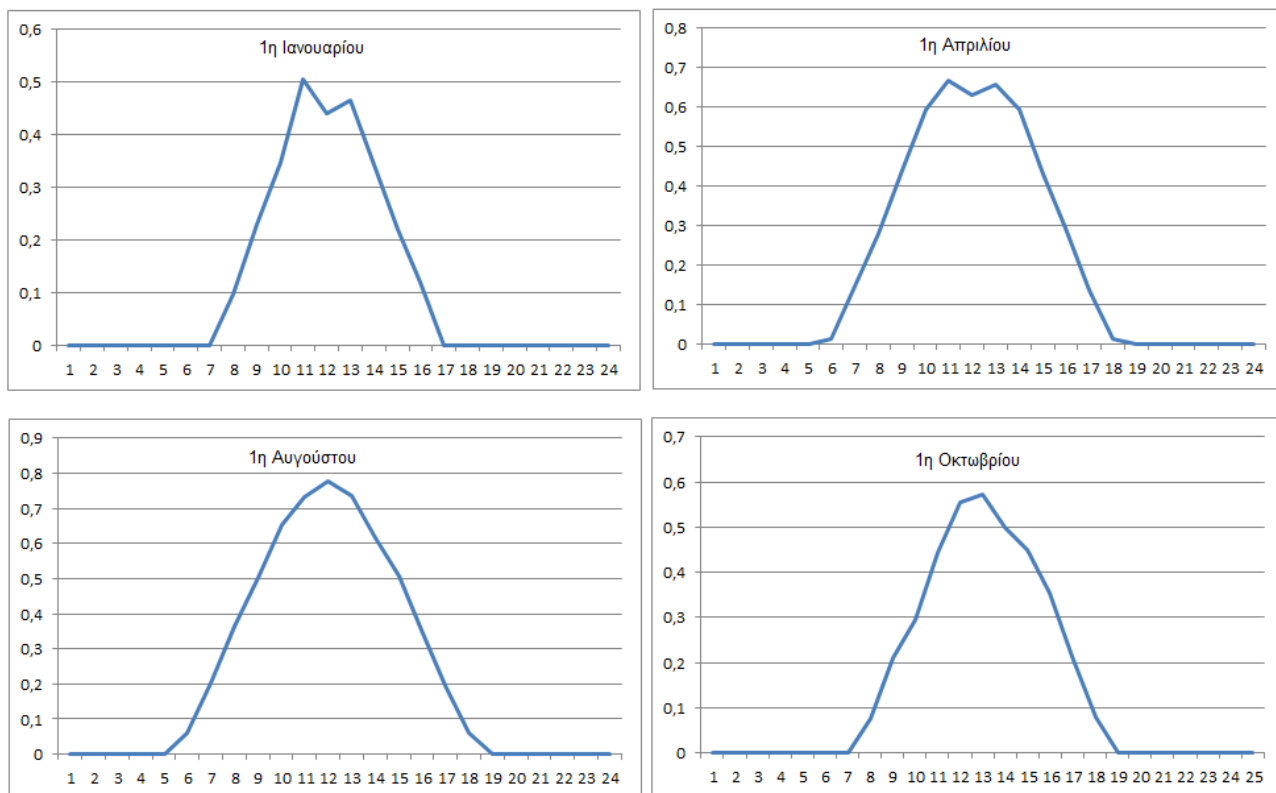


Τα πιο πάνω αποτελέσματα από μετρήσεις είναι λογικό να μην παρατηρούνται με τον ίδιο τρόπο στα αποτελέσματα του προγράμματος προσομοίωσης. Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε λαμβάνει την ηλιοφάνεια ανά ώρα, οπότε οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στο σχήμα 5.5, δεν παρατηρούνται στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Εν τούτοις τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με αυτά που παρουσιάζονται ως συμπεράσματα για τον σταθμό Tennessee των Η.Π.Α. Πιο κάτω φαίνεται η ανά ώρα καμπύλη της ηλιοφάνειας που αναμένεται να παρουσιάζεται σε κάθε εποχή του έτους.



Σχήμα 5.6: Πρότυπη αναμενόμενη ηλιοφάνεια για κάθε εποχή του έτους, από μετρήσεις στο Tennessee των Η.Π.Α

Στο σχήμα 5.6 με κόκκινη γραμμή φαίνεται η μορφή που αναμένεται να παρουσιάζεται κυρίως ανά εποχή του έτους. Είναι φανερό ότι κατά τους χειμερινούς μήνες αναμένεται μεγαλύτερη διακύμανση στην ηλιοφάνεια. Για να προσομοιωθεί αυτή η συμπεριφορά στο πρόγραμμα, τίθεται η τυπική απόκλιση για τον ανά ώρα δείκτη αιθριότητας, να μεταβάλλεται, αναλόγως του μήνα. Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζονται τυπικά, τέσσερις μέρες που αντιστοιχούν σε τέσσερις εποχές, όπως υπολογίζονται από το πρόγραμμα.



Σχήμα 5.7: Αναμενόμενη Ηλιοφάνεια για τις τέσσερις εποχές του έτους, θεωρώντας την πρώτη μέρα κάθε αντιπροσωπευτικού μήνα.

Το σχήμα 5.7 δείχνει την μορφή που έχουν, τέσσερις μέρες που αντιστοιχούν σε κάποια εποχή του έτους. Οι μέρες αυτές δεν είναι το πρότυπο απαραίτητα για όλο τον μήνα, αλλά είναι μια καλή εικόνα για το τι αναμένεται να παρατηρηθεί. Σε σύγκριση με τις καμπύλες του σχήματος 5.6, παρατηρείται ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης ακολουθεί αρκετά καλά την μορφή των μετρούμενων καμπυλών. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί ότι οι μετρήσεις του σχήματος 5.6 αφορούν τα δεδομένα της περιοχής στην οποία έγιναν και μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από τυχόν μετρήσεις στην περιοχή που προσομοιώνει το πρόγραμμα. Εν τούτοις οι γενικές παρατηρήσεις που αφορούν την μορφή των καμπυλών δε θα πρέπει να σημειώνουν μεγάλες αποκλίσεις.

Αφού μελετήθηκε η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η προσομοίωση του καιρού η ανάλυση προχωρά στο επόμενο βήμα. Αφού υπολογιστεί ο δείκτης αιθριότητας της κάθε ώρας γίνονται όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την εύρεση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανά ώρα, σε κεκλιμένο επίπεδο, όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια το πρόγραμμα υπολογίζει με δεδομένο το μήκος των πλαισίων, την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση μεταξύ των σειρών, ώστε τα πλαίσια να φωτίζονται πλήρως, για τουλάχιστον τέσσερις ώρες οποιανδήποτε μέρα του έτους. Η απόσταση αυτή προτείνεται - ως ελάχιστη - στον χρήστη ο οποίος καλείται να εισάγει την πραγματική απόσταση μεταξύ των σειρών. Αφού γίνει αυτό με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3 για την σκίαση, υπολογίζονται οι πραγματικές ώρες

πλήρους λειτουργίας των πλαισίων. Με τον όρο «πραγματικές ώρες» εννοούνται οι ώρες της μέρας κατά τις οποίες φωτίζεται η πλήρης επιφάνεια των πλαισίων. Οι ώρες αυτές δεν επηρεάζονται από τυχόν νέφωση που προκαλεί σκίαση, αλλά μόνο από την σκίαση μεταξύ σειρών.

Στο τέλος της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να δει σε διαγράμματα την αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος, την διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας ανά μέρα για ένα έτος, την ωριαία διακύμανση του δείκτη αιθριότητας και την αναμενόμενη ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τα πλαίσια. Ο παράγοντας σκίαση μεταξύ σειρών μπορεί να αγνοηθεί αν η τοπολογία του φωτοβολταϊκού συστήματος αφορά μόνο μια σειρά, όπως έγινε και στην ανάλυση του πρότυπου μοντέλου του Κεφαλαίου 4.

Για την οικονομική ανάλυση των αποτελεσμάτων όταν ακολουθούνται οι στρατηγικές το πρόγραμμα υπολογίζει και την αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια του συστήματος. Για τον υπολογισμό της ενέργειας είναι σαφές ότι προηγείται η προσομοίωση του καιρού. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία έχει υπολογιστεί οι ανά ώρα τιμές αθροίζονται. Το άθροισμα αυτό αντιστοιχεί ουσιαστικά στο γινόμενο του συντελεστή χρησιμοποίησης με της 8760 ώρες του έτους. Το ποσό αυτό πολλαπλασιάζεται με την μέση ικανότητα του συστήματος και προκύπτει η μέση αναμενόμενη ετήσια ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού με όμοια αποτελέσματα είναι ο ανά ώρα πολλαπλασιασμός των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας και των τιμών της αναμενόμενης ικανότητας. Ακολούθως το άθροισμα των ανά ώρα τιμών θα δώσει ξανά την αναμενόμενη αποδιδόμενη ενέργεια για ένα έτος.

Στο παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής (flow charts) για τον αλγόριθμο προσομοίωσης του καιρού. Όπως και προηγουμένως τα διαγράμματα περιγράφουν ξεχωριστά την κάθε υπορουτίνα του προγράμματος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση ευαισθησίας που αφορά τις παραμέτρους αξιοπιστίας του συστήματος και το πώς η μεταβολή τους επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. Θα παρουσιαστούν επίσης συγκριτικά αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση των βλαβών και του καιρού στην τελική απόδοση του συστήματος.

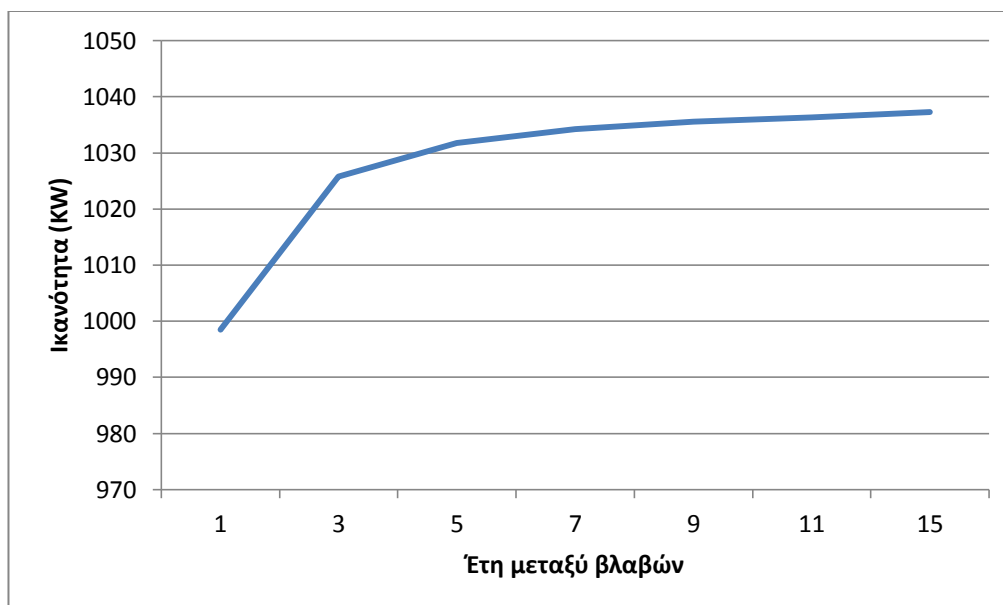
## 6.1 Ανάλυση Ευαισθησίας

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστεί η ανάλυση ευαισθησίας που αφορά την αλλαγή των παραμέτρων αξιοπιστίας και το πώς αυτή επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα. αρχικά θα γίνει αλλαγή των παραμέτρων που αφορούν τους inverters, κρατώντας τις παραμέτρους των blocks σταθερές, ενώ στη συνέχεια θα γίνει το αντίθετο. Σκοπός είναι να εξεταστεί σε πιο βαθμό επηρεάζει το κάθε στοιχείο τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Για την ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 και φαίνεται στο σχήμα 5.1. Κατά την ανάλυση του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού συστήματος θεωρούνται οι παράμετροι αξιοπιστίας που δόθηκαν στο πρότυπο μοντέλο του Κεφαλαίου 4. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας θα μεταβάλλεται ο ρυθμός βλαβών αρχικά του inverter και στη συνέχεια των block, για να εξεταστεί πώς οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση με αλλαγή των παραμέτρων του inverter.

A/A Προσομοίωσης	$\lambda_i$ (1/έτος)	$\lambda_S$ (1/έτος)	$\mu_i$ (1/έτος)	$\mu_S$ (1/έτος)	Ικανότητα (KW)
1	1/1	1/270	365/15	365/8	998,5162
2 - Πρότυπο	1/3	1/270	365/15	365/8	1025,805
3	1/5	1/270	365/15	365/8	1031,726
4	1/7	1/270	365/15	365/8	1034,208
5	1/9	1/270	365/15	365/8	1035,527
6	1/11	1/270	365/15	365/8	1036,32
7	1/15	1/270	365/15	365/8	1037,293

Στο πρότυπο μοντέλο θεωρείται ότι ο inverter παθαίνει βλάβη κάθε περίπου 3 χρόνια. Στην ανάλυση μελετούνται οι περιπτώσεις που ο inverter παθαίνει βλάβη κάθε έτος, κάθε 5,7,9,11 και 15 έτη. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα της αναμενόμενης ικανότητας του συστήματος για κάθε περίπτωση συγκεντρώνονται στην πιο κάτω γραφική παράσταση.

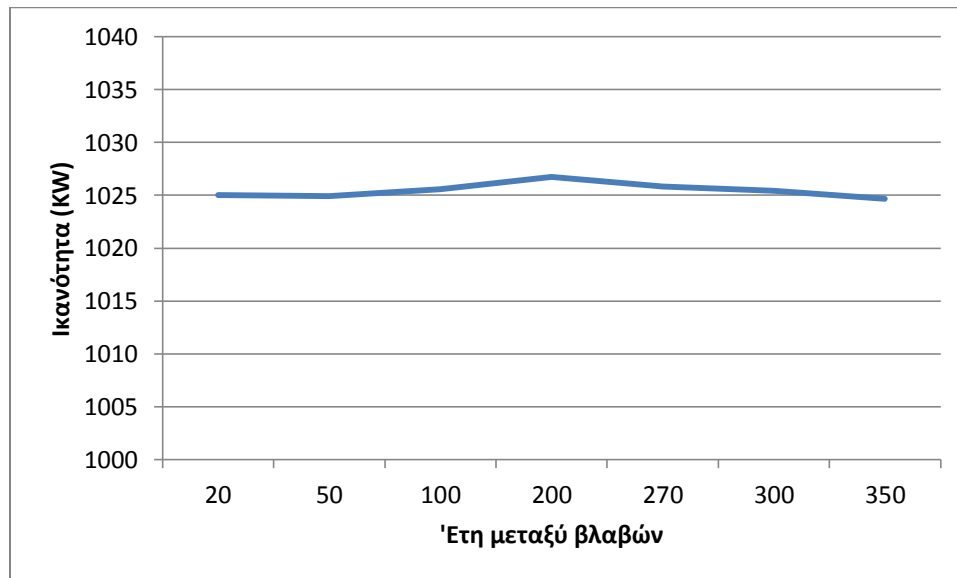


Από την γραφική παράσταση παρατηρείται ότι η αλλαγή στην αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος μεταβάλλεται ραγδαία για τις πρώτες τρεις περιπτώσεις. Από την τέταρτη περίπτωση και μετά η μεταβολή δεν είναι σημαντική και αμβλύνεται συνεχώς. Ως εκ τούτου αν θα έπρεπε να γίνει η επιλογή του inverter με βάση την αξιοπιστία του, θεωρώντας ότι αυξάνεται και η αξία αγοράς με την αύξηση της αξιοπιστίας, θα ήταν λογικό να μελετηθούν οι περιπτώσεις τριών, πέντε και ίσως 7 ετών λειτουργίας μεταξύ βλαβών. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία το κόστος ανεβαίνει χωρίς ανάλογα οφέλη στη λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια επιχειρείται ξανά μια ανάλυση ευαισθησίας με βάση τις παραμέτρους των blocks. Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται τα στοιχεία για την κάθε περίπτωση.

A/A Προσομοίωσης	$\lambda_i$ (1/έτος)	$\lambda_s$ (1/έτος)	$\mu_i$ (1/έτος)	$\mu_s$ (1/έτος)	Ικανότητα (KW)
1	1/3	1/20	365/15	365/8	1025,023
2	1/3	1/50	365/15	365/8	1024,923
3	1/3	1/100	365/15	365/8	1025,572
4	1/3	1/200	365/15	365/8	1026,727
5- Πρότυπο	1/3	1/270	365/15	365/8	1025,805
6	1/3	1/300	365/15	365/8	1025,412
7	1/3	1/350	365/15	365/8	1024,665

Στον πιο πάνω πίνακα φαίνονται οι παράμετροι αξιοπιστίας που επιλέγηκαν για την ανάλυση ευαισθησίας των blocks. Τα αποτελέσματα της αναμενόμενης ικανότητας του συστήματος φαίνονται στην πιο κάτω γραφική.



Από την γραφική παρατηρείται ότι η μεταβολή των παραμέτρων αξιοπιστίας των block, δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την αναμενόμενη ικανότητα του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι η αναμενόμενη ικανότητα παραμένει σταθερή και ίση περίπου με αυτήν που παρατηρείται στο πρότυπο μοντέλο.

Από τα πιο πάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αναμενόμενη απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις παραμέτρους των inverter και σε λιγότερο από τα blocks. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο αφού η βλάβη ενός inverter βγάζει όλα τα blocks που ενώνονται σε αυτόν, εκτός.

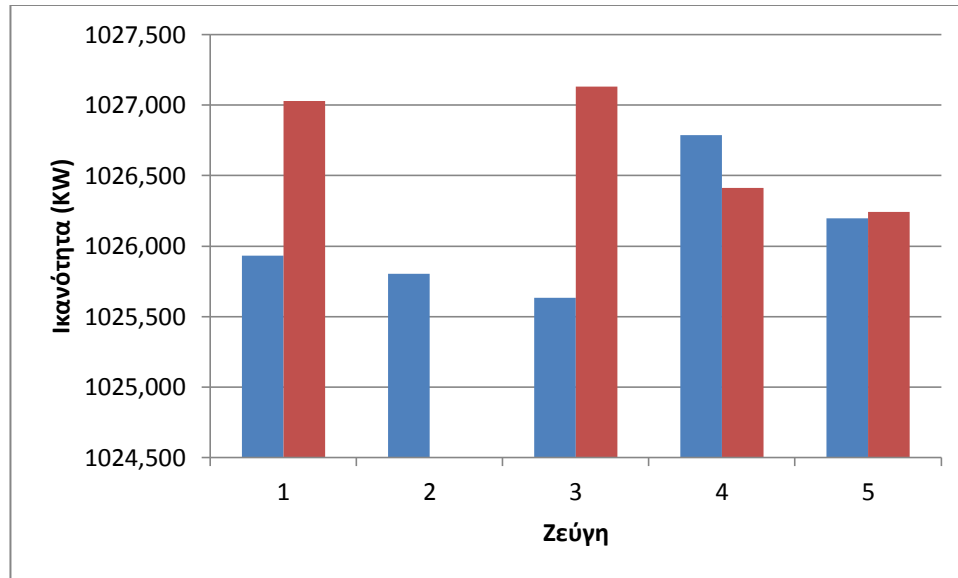
Το πιο πάνω συμπέρασμα μας προκαλεί να αναλύσουμε την συμπεριφορά μονάδων ίδιας ικανότητας, με διαφορετική τοπολογία. Θα θεωρηθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα του παραδείγματος του σχήματος 5.1, και θα τρέξουν κάποιες προσομοιώσεις αλλάζοντας την τοπολογία του συστήματος. Τα στοιχεία για την τοπολογία παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα. Ζητούμενο είναι να μελετηθεί κατά πόσο είναι καλύτερο να υπάρχουν περισσότερα ή λιγότερα υποπεδία και σε κάθε ένα από αυτά αν είναι καλύτερα να υπάρχουν λιγότερα blocks μεγαλύτερης ικανότητας ή περισσότερα blocks μικρότερης ικανότητας.

A/A Προσομοίωσης	Υποπεδίο 1	Υποπεδίο 2	Υποπεδίο 3	Υποπεδίο 4	Υποπεδίο 5	Υποπεδίο 6	Υποπεδίο 7	Υποπεδίο 8	Ικανότητα (KW)
1	5x26	5x26	5x26	5x26	5x26	5x26	5x26	5x26	1025,931
2	10x13	10x13	10x13	10x13	10x13	10x13	10x13	10x13	1027,028
3 - Πρότυπο	10x26	10x26	5x52	5x52	-	-	-	-	1025,805
4	5x52	5x52	5x52	5x52	-	-	-	-	1025,633
5	10x26	10x26	10x26	10x26	-	-	-	-	1027,130
6	10x52	10x52	-	-	-	-	-	-	1026,788
7	20x26	20x26	-	-	-	-	-	-	1026,411
8	20x52	-	-	-	-	-	-	-	1026,196
9	40x26	-	-	-	-	-	-	-	1026,241

Από τον πιο πάνω πίνακα αλλά και την γραφική παράσταση που ακολουθεί, διαπιστώνεται ότι:

- a. Μεγαλύτερη ικανότητα αναμένεται στην περίπτωση που όταν υπάρχουν πολλά υποπεδία, υπάρχουν πολλά blocks μικρότερης ικανότητας, σε κάθε υποπεδίο.
- b. Για την περίπτωση που υπάρχουν ένα ή δύο υποπεδία δεν μπορεί να βγει ασφαλές συμπέρασμα οπότε θεωρείται ότι ισοσταθμίζεται το γεγονός ότι το σύστημα έχει λιγότερους inverter με το γεγονός ότι έχει γενικά μεγάλο αριθμό block στον κάθε inverter.
- c. Δεν μπορεί να ειπωθεί με ασφάλεια αν είναι προτιμότερο να υπάρχουν πολλά υποπεδία, ή αν πρέπει το σύστημα να χωρίζεται σε όσο το δυνατό λιγότερα υποπεδία.





Στην πιο πάνω γραφική παράσταση παρουσιάζονται ομαδοποιημένες σε ζεύγη οι διάφορες περιπτώσεις. Το κάθε ζεύγος έχει όμοιο αριθμό υποπεδίων και μεταβάλλεται ο αριθμός των blocks σε καθένα από αυτά.

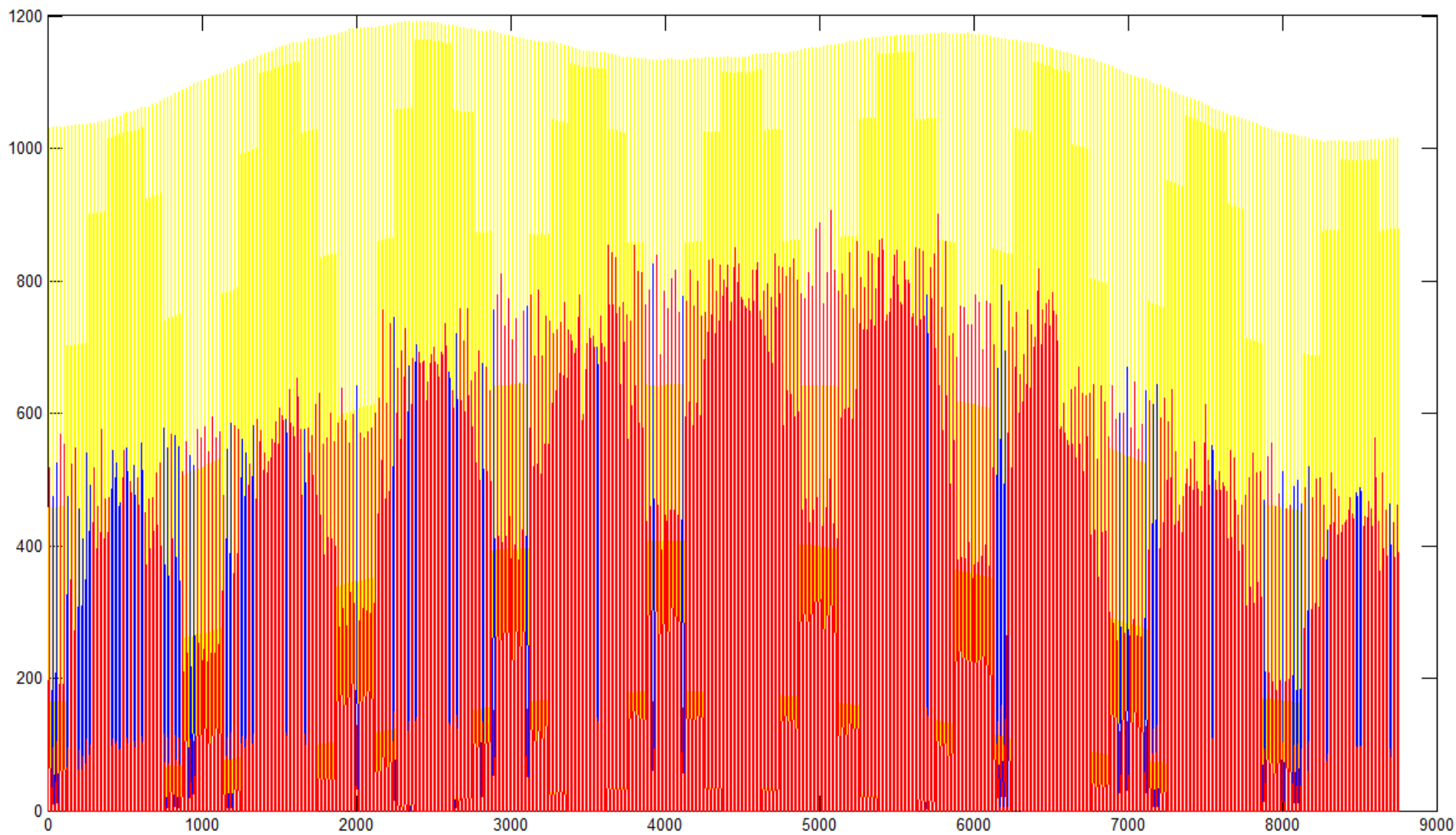
## 6.2 Επίδραση των Βλαβών και του Καιρού στην Τελική Απόδοση του Συστήματος.

Αφού έγινε η ανάλυση ευαισθησίας πιο πάνω, θα παρουσιαστούν σε αυτή την παράγραφο τα αποτελέσματα που αφορούν τον συνδυασμό βλαβών και καιρού. Θα μελετηθεί η επίδραση του καιρού στην τελική απόδοση του συστήματος όταν λαμβάνονται υπόψη τα διάφορα φαινόμενα όπως overcast, πλήρης ηλιοφάνεια και μερική νέφωση [12][13][14]. Σε κάθε περίπτωση θα παρουσιάζονται συγκριτικές γραφικές παραστάσεις των διαφόρων περιπτώσεων όπου θα είναι ορατά τα αποτελέσματα.

Αρχικά θα συγκριθούν οι τρεις περιπτώσεις όπου θεωρείται ότι:

- I. Η περίοδος που εξετάζεται συμπεριλαμβάνει το ενδεχόμενο overcast καιρού.
- II. Η περίοδος που εξετάζεται έχει μερική νέφωση (χωρίς overcast).
- III. Η περίοδος που εξετάζεται έχει πλήρη ηλιοφάνεια συνέχεια.

Στις πιο πάνω τρεις περιπτώσεις αναμένεται, η παραγόμενη ισχύς να μεταβάλλεται αρκετά. Πιο κάτω παρουσιάζεται η πρώτη γραφική παράσταση που περιέχει αυτές τις τρεις περιπτώσεις.



Σχήμα 6.1: Σύγκριση Περιπτώσεων Αποδιδόμενης Ενέργειας για: Πλήρη Ηλιοφάνεια (Κίτρινο), Μερικής Νέφωσης (Μπλέ), Overcast Νέφωσης (Κόκκινο).

Όπως φαίνεται και από τη γραφική παράσταση 6.1 στην περίπτωση πλήρους ηλιοφάνειας η αναμενόμενη απόδοση καθώς και η μέση αποδιδόμενη ικανότητα του συστήματος ξεπερνούν πρακτικά την εγκατεστημένη Ισχύ. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι το σύστημα μπορεί να παράγει ανάλογη ισχύ, όση και η προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία. Αυτό είναι ρεαλιστικό αφού από την κατασκευή τους τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν πολύ περισσότερες κυψελίδες, από αυτές που χρειάζονται για να αποδώσουν την ονομαστική τους ισχύ. Ο λόγος που κατασκευάζονται έτσι είναι ακριβώς για να μπορούν να παράγουν την ονομαστική ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής, σε συνθήκες μη ιδανικές.

Με μπλε χρώμα φαίνεται η καμπύλη που περιγράφει την αναμενόμενη απόδοση σε περίπτωση μερικής νέφωσης. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, στα σημεία που ταυτίζεται η κόκκινη και η μπλε καμπύλη παρουσιάζεται το κόκκινο χρώμα. Ως εκ τούτου η καμπύλη που περιγράφει την μερική νέφωση είναι ο συνδυασμός της κόκκινης και μπλε.

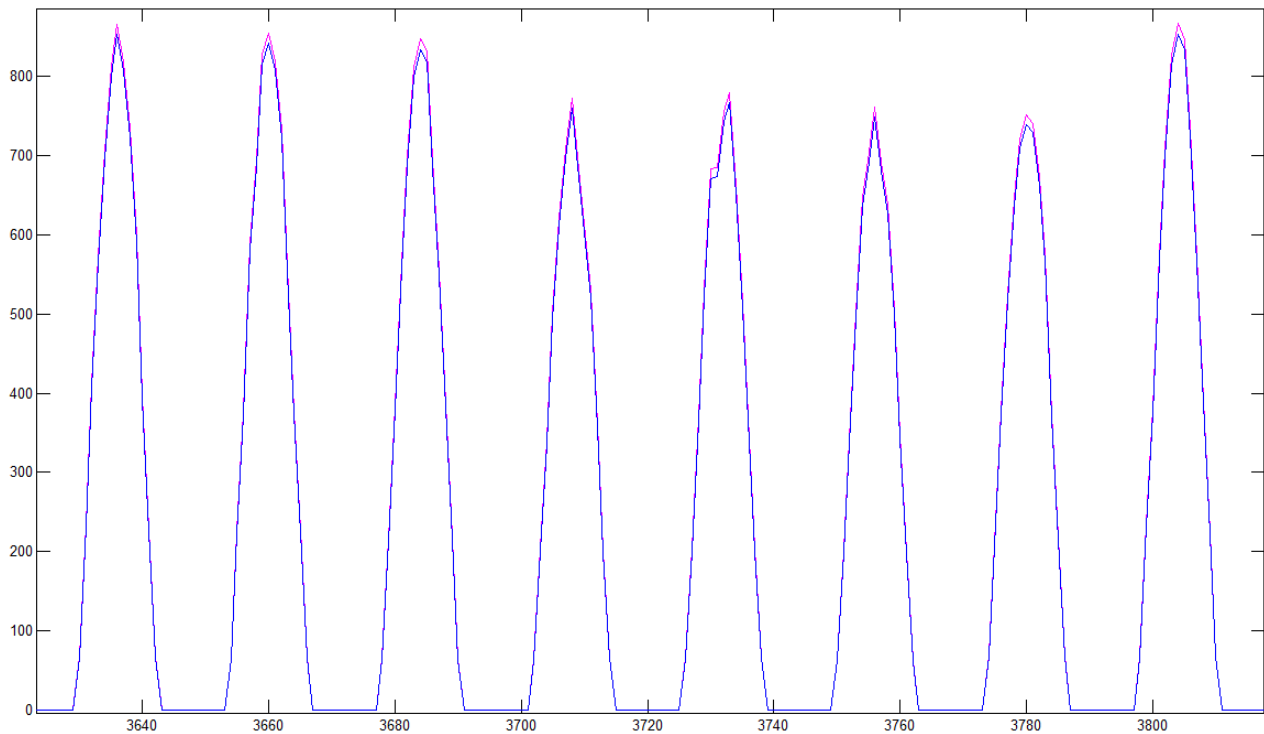
Τέλος με κόκκινο χρώμα φαίνεται η περίπτωση που ενώ υπάρχει μερική νέφωση, κατά διαστήματα υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης overcast νέφωσης. Παρατηρείται ότι αυτό συμβαίνει κυρίως στην αρχή και στο τέλος του έτους – φθινόπωρο, χειμώνας – και λιγότερο στο μέσο – άνοιξη, καλοκαίρι – όπως είναι αναμενόμενο.

Από τα στοιχεία του προγράμματος υπολογίζεται ότι, η μέση αποδιδόμενη ετήσια ενέργεια του συγκεκριμένου συστήματος θα είναι κατά περίπτωση:

Πλήρης Ηλιοφάνεια	= 2845 GWh
Μερική Νέφωση	= 1640 GWh
Νέφωση και Overcast	= 1463 GWh

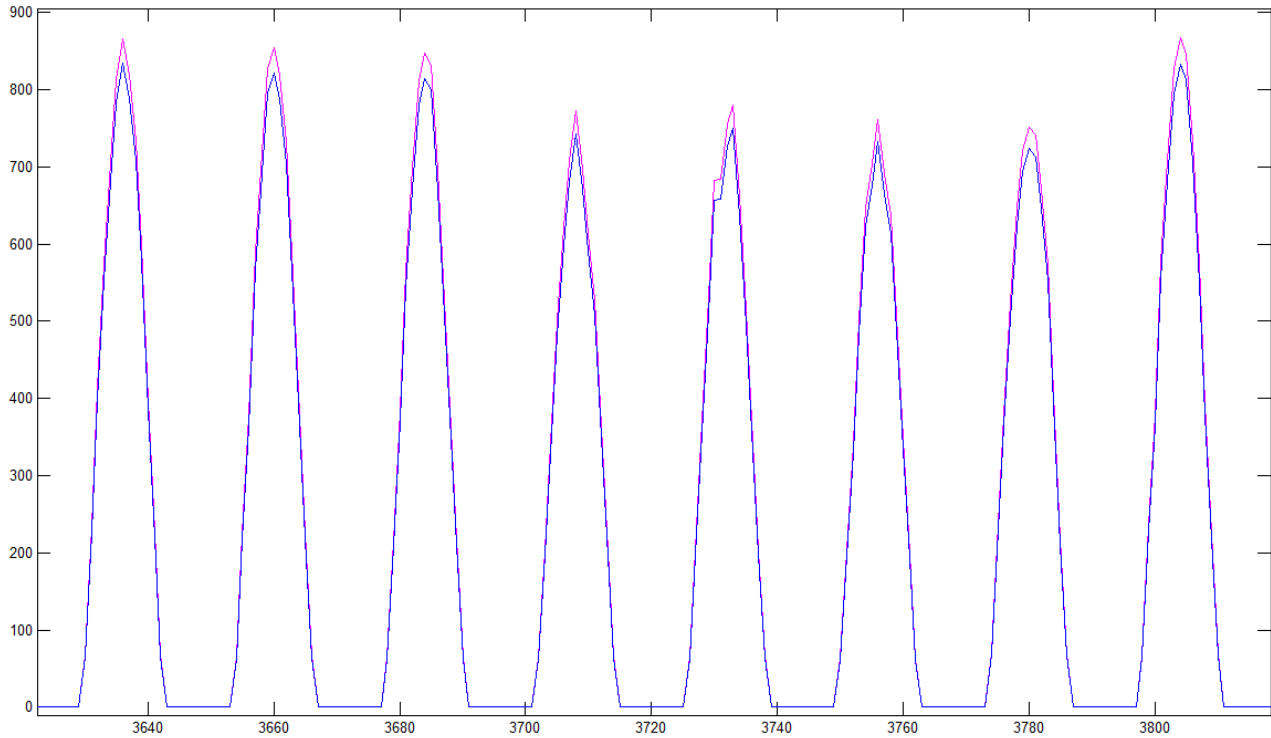
Παρατηρείται ότι σε έτος με πιθανότητα overcast νέφωσης, η συνολική απόδοση του συστήματος πέφτει περίπου κατά 11% σε σχέση με το αν δεν υπήρχε η περίπτωση overcast νεφώσεων. Επίσης θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η μελέτη της νέφωσης που μπορεί να υποστεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι πολύ σημαντική και αλλάζει δραματικά τα αποτελέσματα. Η αποδιδόμενη ενέργεια που αναμένεται να παρατηρηθεί είναι το 60% αυτής που θα αναμενόταν σε έτος με πλήρη ηλιοφάνεια. Αυτό αποδεικνύει την ανάγκη μελέτης της νέφωσης για πιο ρεαλιστικά και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στην επόμενη γραφική παράσταση του σχήματος 6.2, παρουσιάζονται οι δύο μορφές που θα είχε η αποδιδόμενη ενέργεια όταν, σε περίοδο με μερική νέφωση (κανονική περίοδος), λαμβάνονταν ή όχι, υπόψη οι βλάβες.



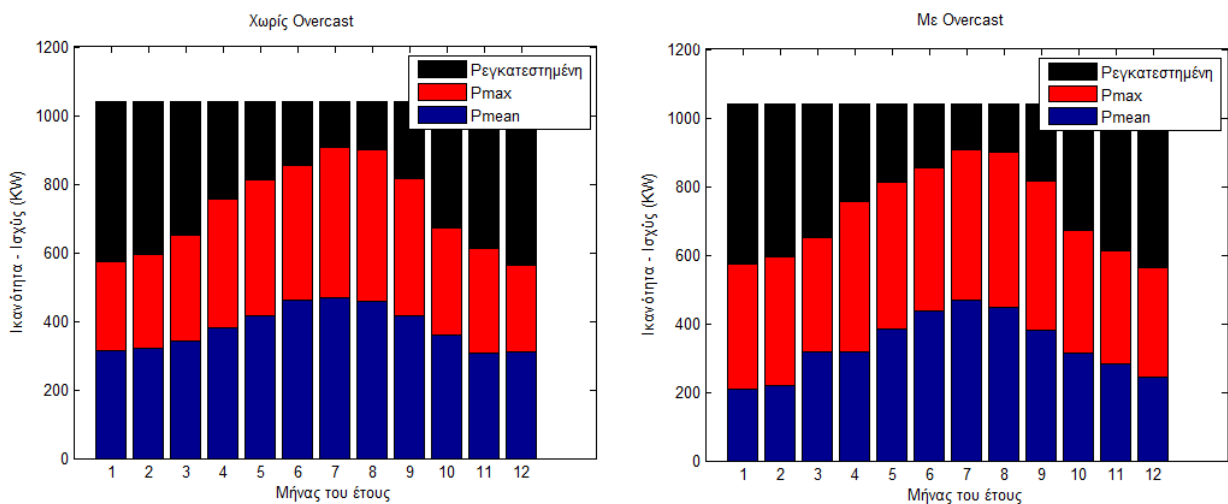
Σχήμα 6.2: Σύγκριση επίδρασης βλαβών σε έτος με μερική νέφωση.

Στο σχήμα 6.2, με μοβ χρώμα παρουσιάζεται η καμπύλη κατά την περίπτωση που δεν υπάρχουν βλάβες, ενώ με μπλε, αυτή κατά την οποία οι βλάβες του συστήματος συνυπολογίζονται. Όπως είναι φανερό επειδή η αυξομείωση της αναμενόμενης ισχύος λόγω βλαβών είναι μικρή, δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στις δύο περιπτώσεις. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η απόδοση του συστήματος επηρεάζεται περισσότερο από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν και λιγότερο από την αξιοπιστία των στοιχείων που το αποτελούν. Εν τούτοις αυτό το συμπέρασμα δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να παρεξηγηθεί διότι αν οι παράμετροι - και τελικά οι δείκτες – αξιοπιστίας του συστήματος ήταν κακοί, τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά. Για να εξεταστεί αυτή την περίπτωση έγινε μια δεύτερη προσομοίωση χρησιμοποιώντας ρυθμό βλαβών των inverter ένα ανά έτος. Τα αποτελέσματα παρατηρούνται στο σχήμα 6.3. φαίνεται ότι η επίδραση των βλαβών για την ίδια περίοδο αυξάνεται αρκετά σε σχέση με προηγουμένως. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα είναι ότι, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα όπου οι παράμετροι αξιοπιστίας είναι σχετικά καλοί (αξιόπιστο σύστημα), αυτό που επηρεάζει κυρίως τη λειτουργία και απόδοση του συστήματος είναι οι καιρικές συνθήκες.



Σχήμα 6.3: Σύγκριση επίδρασης βλαβίων σε έτος με μερική νέφωση.

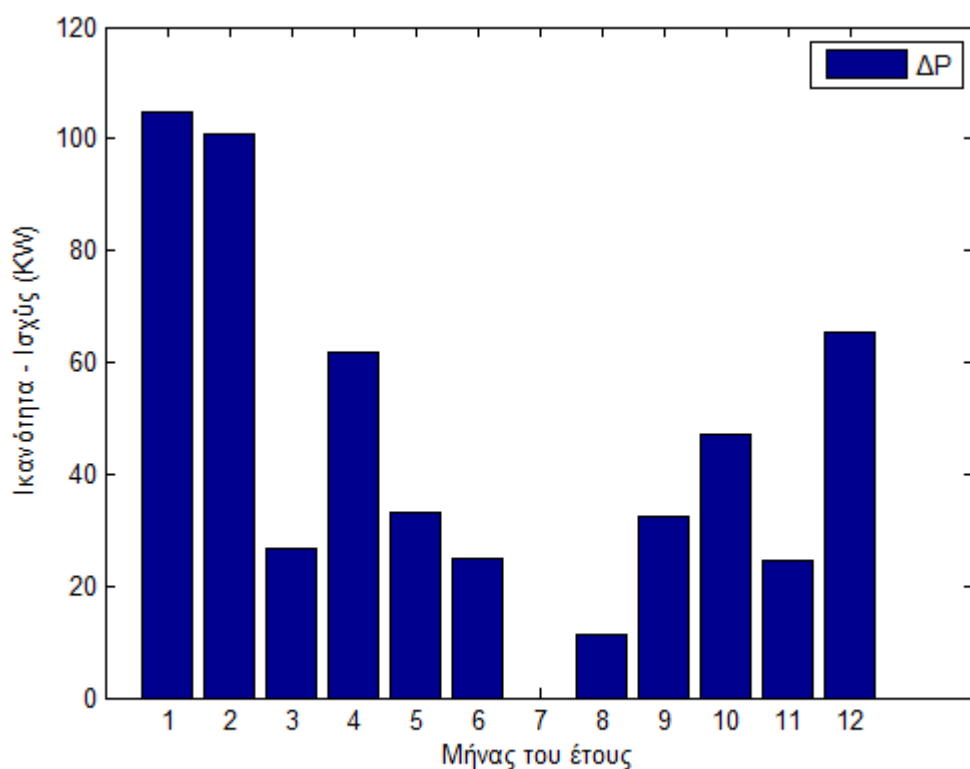
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού συστήματος ανά μήνα. Από τις εποχές του έτους εξαρτάται τόσο η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα πλαίσια, όσο και οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Στο σχήμα 6.4 παρουσιάζονται δύο γραφικές παραστάσεις στις οποίες φαίνεται ανά μήνα η μέση αποδιδόμενη ισχύς με μπλε χρώμα, η μέγιστη απόδοση ισχύος που σημειώθηκε στο μήνα με κόκκινο χρώμα και η υπολειπόμενη ισχύς μέχρι την ονομαστική με μαύρο χρώμα. Οι δύο γραφικές παρουσιάζονται μαζί ώστε να γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων, όταν θεωρείται ότι υπάρχει και overcast νέφωση ή όχι.



Σχήμα 6.4: Σύγκριση Μέσης Αποδιδόμενης Ισχύος ανά μήνα - Μέγιστης ισχύος του μήνα

Παρατηρείται από το σχήμα 6.4 ότι η μέγιστη απόδοση του μήνα συνήθως δεν επηρεάζεται από την overcast νέφωση. Αυτό που αλλάζει και που ενδιαφέρει στην ανάλυση, είναι η μέση αποδιδόμενη ισχύς. Παρατηρείται ότι όταν υπάρχει πιθανότητα overcast νέφωσης, η μέση αναμενόμενη απόδοση των μηνών: Ιανουαρίου, Φεβρουαρίου, Νοεμβρίου και Δεκεμβρίου, είναι εμφανώς μικρότερη. Αυτό όπως εξηγήθηκε συμβαίνει λόγω του ότι η πιθανότητα εμφάνισης τέτοιου καιρού είναι μεγαλύτερη αυτούς τους μήνες.

Στο σχήμα 6.5 που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά στην μέση αναμενόμενη απόδοση ανά μήνα στις δύο περιπτώσεις που αναφέρθηκαν πιο πάνω.



Σχήμα 6.5: Διαφορά Μέσης Αποδιδόμενης Ισχύος ανά μήνα (μεταξύ των τιμών όταν λαμβάνεται υπόψη το overcast και όταν δεν λαμβάνεται)

Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η διαφορά είναι πολύ μικρή έως αδιάφορη. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται στους πρώτους και τελευταίους μήνες του έτους κατά τους οποίους είναι εντονότερο το φαινόμενο overcast νέφωσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των προηγούμενων Κεφαλαίων.

## 7.1 Συμπεράσματα

Αφού μελετήθηκαν οι διάφορες περιπτώσεις και καταστάσεις που μπορεί να επηρεάζουν την λειτουργία του συστήματος μπορούμε να καταγράψουμε κάποιες βασικές παρατηρήσεις.

Αρχικά καταγράφονται οι παρατηρήσεις που αφορούν την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος:

- Από την ανάλυση ευαισθησίας παρατηρείται ότι οι βλάβες που μπορεί να υποστεί ο inverter έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις στην λειτουργία και απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η επιλογή του inverter με βάση την αξιοπιστία, πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το επιπλέον κόστος αγοράς. Διαπιστώνεται ότι μια μέση διάρκεια μεταξύ βλαβών που μπορεί να επιλεγεί είναι τα τρία έως πέντε χρόνια. Για μεγαλύτερη τιμή στην αξιοπιστία, δεν παρατηρείται η ανάλογη βελτίωση στην λειτουργία του συστήματος. Επίσης θα πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση μη αξιόπιστων inverter με ρυθμό βλαβών μικρότερο των τριών ετών.
- Οι παράμετροι αξιοπιστίας των blocks δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την τελική απόδοση του συστήματος, όταν πρόκειται κυρίως για συστήματα με μεγάλο αριθμό υποπεδίων. Η μέση απόδοση του συστήματος εξαρτάται από την αξιοπιστία του inverter.
- Σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα με πολλά υποπεδία, προτιμάται να χωρίζονται τα υποπεδία σε περισσότερα μικρότερης ικανότητας blocks, παρά σε λιγότερα μεγαλύτερης ικανότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βλάβη ενός block θα έχει μικρότερες επιπτώσεις στην τελική απόδοση του συστήματος αφού θα χαθεί μικρότερη εγκατεστημένη ισχύς.

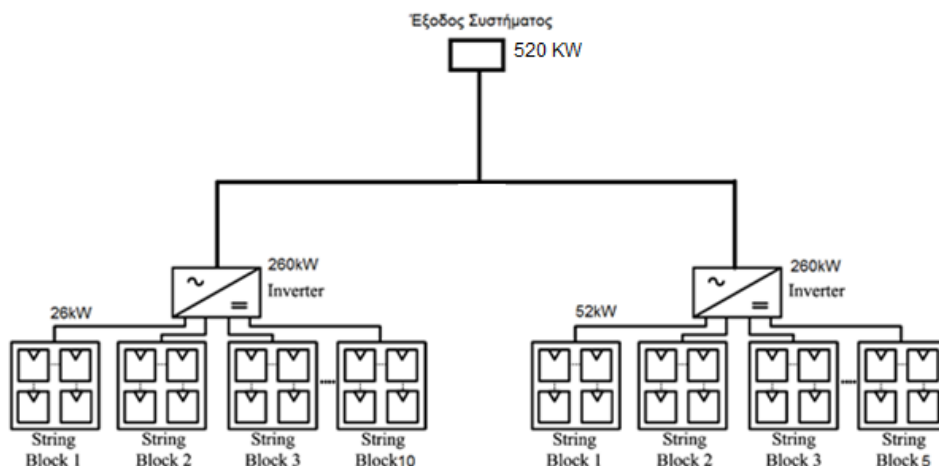
Στη συνέχεια καταγράφονται οι παρατηρήσεις που αφορούν τις επιπτώσεις του καιρού στο φωτοβολταϊκό σύστημα:

- Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν και κυρίως η νέφωση προκαλεί την μείωση κατά 40% της απόδοσης του συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που κατασκευάζονται πλαίσια με μεγαλύτερο αριθμό κυψελίδων απ' ό,τι χρειάζεται. Για παράδειγμα ένα πλαίσιο με ονομαστική τάση 24V, περιέχει 72 κυψέλες πυριτίου σε σειρά, που η κάθε μια αποδίδει 0,7V με ονομαστική ένταση 6,5-7,5A. Όπως παρατηρείται αν γίνουν οι πράξεις η ονομαστική ισχύς που δίνει ο κατασκευαστής για το πλαίσιο, είναι η μισή από την πραγματική ικανότητα του πλαισίου. Αυτό γίνεται για να αντισταθμιστεί ο παράγοντας μείωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.



- Σε περίπτωση overcast νέφωσης, η τελική απόδοση του συστήματος μπορεί να υποστεί μείωση μεγαλύτερη του 10%, σε σχέση με την απόδοση όταν δεν παρατηρείται overcast νέφωση. Αυτό το στοιχείο είναι σημαντικό και λαμβάνεται υπόψη κυρίως όταν στην περιοχή εγκατάστασης παρατηρούνται συχνά τέτοια φαινόμενα. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι φαινόμενα που προκαλούν ανάλογα αποτελέσματα είναι για παράδειγμα η σκόνη στην ατμόσφαιρα και η αυξημένη υγρασία. Σε περιοχές όπως η Κρήτη και γενικά η νότια Ελλάδα και η Κύπρος, παρατηρούνται συχνά τέτοια φαινόμενα. Η διαφορά έγκειται ίσως στην εποχή που εμφανίζονται αυτά τα φαινόμενα. Είναι αρκετά εύκολο με κάποιες μικρές τροποποιήσεις στον κώδικα του προγράμματος να προσομοιωθούν και αυτοί οι παράγοντες που όμως δεν εξετάζονται στην παρούσα εργασία.
- Η τελική απόδοση του συστήματος, επηρεάζεται περισσότερο από τις καιρικές συνθήκες και την εποχή του έτους παρά από τις βλάβες των στοιχείων. Αν για παράδειγμα σημειωθεί βλάβη λόγω κακών καιρικών συνθηκών μπορεί με ασφάλεια να υποθεθεί ότι η βλάβη δεν θα έχει σοβαρή επίπτωση στην τελική απόδοση του συστήματος, αφού σε τέτοιες καιρικές συνθήκες το σύστημα θα υπολειπουργούσε ούτως ή αλλιώς. Μεγαλύτερες θα ήταν οι επιπτώσεις μιας βλάβης που σημειώνεται κάποια καλοκαιρινή ηλιόλουστη μέρα. Το συμπέρασμα αυτό είναι αναμενόμενο αφού η λειτουργία των στοιχείων δεν έχει ραγδαίες αλλαγές λόγω βλαβών σε ένα έτος, αλλά η μεταβολή του καιρού είναι συνεχής και επηρεάζει την απόδοση.

Για την αξιολόγηση των συμπερασμάτων και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών, στο πρόγραμμα υπολογίζονται και εμφανίζονται σε ιστογράμματα διάφορες παράμετροι απόδοσης. Τα ιστογράμματα που ακολουθούν αφορούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δύο υποπεδίων, συνολικής ισχύς 520KW. Η τοπολογία του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 7.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 7.1: Τοπολογία Φωτοβολταϊκού συστήματος 2 υποπεδίων συνολικής ισχύς 520KW

Οι παράμετροι αξιοπιστίας των στοιχείων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

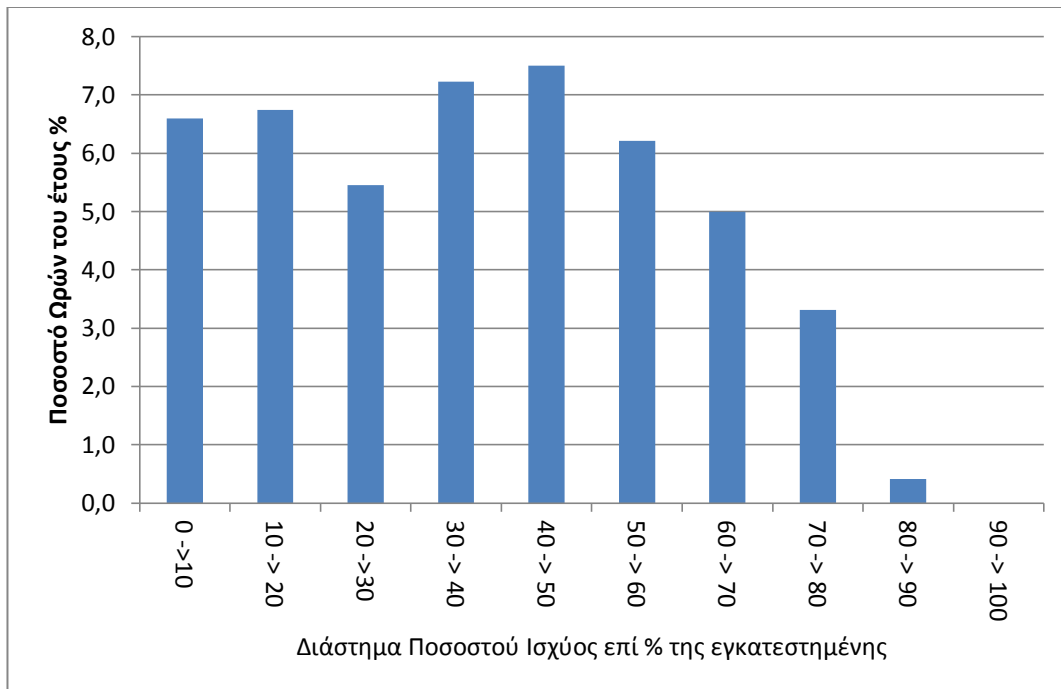
	<b>Inverter 1</b>	<b>Inverter 2</b>	<b>Blocks</b>
<b>Διάρκεια μεταξύ βλαβών (έτη)</b>	3 έτη	4 έτη	20 έτη
<b>Διάρκεια επισκευής (ώρες)</b>	360 ώρες	360 ώρες	200 ώρες

Το πρώτο ιστόγραμμα που παρουσιάζεται αφορά το ποσοστό του ετήσιου χρόνου κατά το οποίο το σύστημα αποδίδει ισχύ, πάνω από ένα όριο ισχύος. Το όριο ισχύος παρουσιάζεται επίσης ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος.



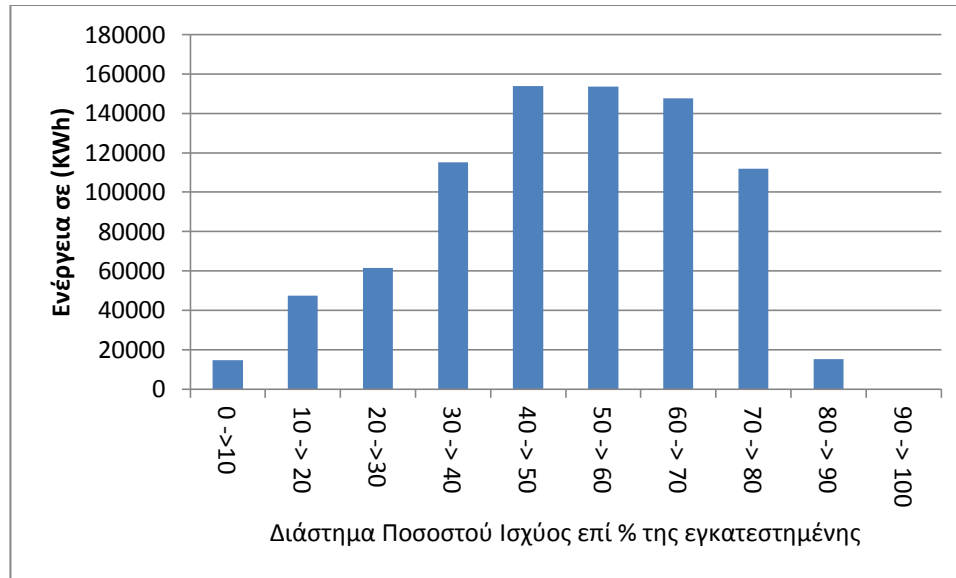
Από το πάνω ιστόγραμμα παρατηρείται ότι κατά το 52% των ωρών του έτους - δηλαδή λίγο περισσότερο από τις μισές ώρες του έτους, το σύστημα δεν παράγει καθόλου. Οι ώρες αυτές αφορούν ασφαλώς την διάρκεια της νύχτας. Καθώς αυξάνεται το ποσοστό ισχύος που μπαίνει σαν όριο οι ώρες του έτους μειώνονται. Διαπιστώνεται ότι η πιθανότητα το σύστημα να αποδώσει πάνω από το 80% της εγκατεστημένης του ισχύος είναι πολύ περιορισμένη. Επίσης είναι σχεδόν βέβαιο ότι το σύστημα δεν θα αποδώσει ποτέ πάνω από το 90% της εγκατεστημένης του ισχύος. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην μελέτη διαστασιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τα αθροιστικά ποσοστά που παρουσιάζονται στο ιστόγραμμα δεν δίνουν ξεκάθαρη πληροφορία για τα αποδοτικότερα διαστήματα του συστήματος. Στο ιστόγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το ποσοστό των ωρών του έτους, που το σύστημα βρίσκεται σε κάποια θέση λειτουργίας, ως ποσοστό της εγκατεστημένης του ισχύος, με εύρος 10%.



Στο πιο πάνω ιστόγραμμα δεν παρουσιάζεται το ποσοστό κατά το οποίο η παραγωγή είναι μηδενική αφού αυτό παρουσιάστηκε προηγουμένως. Αυτό που πρέπει να παρατηρηθεί εδώ είναι ότι την μεγαλύτερη περίοδο του έτους η απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 30% με 50%. Επίσης για μεγάλο διάστημα του έτους παρουσιάζονται και τα ποσοστά από 0% μέχρι 20%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επίδραση των νεφών που μειώνει τα υψηλά ποσοστά απόδοσης και την περιορίζει σε πιο χαμηλά ποσοστά. Τέλος όπως ξεκάθαρα μπορεί να παρατηρηθεί το σύστημα δεν αποδίδει ποτέ το 90 με 100% της εγκατεστημένης του ισχύς.

Το προηγούμενο ιστόγραμμα δίνει την πληροφορία που αφορά τις ώρες που το σύστημα βρίσκεται σε κάποια διαστήματα απόδοσης. Η πληροφορία αυτή είναι κάπως ελλιπής ή και παραπλανητική, αφού μπορεί το σύστημα να βρίσκεται για πολλές ώρες σε κάποιες στάθμες απόδοσης, αλλά η συνολική αποδιδόμενη ενέργεια σε αυτές τις στάθμες να είναι πολύ περιορισμένη. Αυτό που κυρίως αφορά τον μελετητή, είναι σε ποιες στάθμες σημειώνεται η μέγιστη απόδοση ενέργειας από το σύστημα. Στο ιστόγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε στάθμης.



Είναι φανερό από το πιο πάνω ιστόγραμμα ότι αν και το σύστημα παράγει για μεγάλα διαστήματα του έτους στις περιοχές 0-10% και 10-20%, η τελική αποδιδόμενη ενέργεια από αυτές τις στάθμες είναι χαμηλή. Από την άλλη το σύστημα βρίσκεται για μικρή περίοδο στο διάστημα 70-80% αλλά η απόδοση του σε αυτό το διάστημα είναι σημαντική. Τα δύο αυτά γεγονότα είναι αναμενόμενα αφού τα πρώτα διαστήματα έχουν μικρή συμβολή στην τελική παραγωγή ενώ τα διαστήματα πάνω από 70% συμβαίνουν για μικρή περίοδο το καλοκαίρι, αλλά έχουν σημαντική απόδοση.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται τα ιστογράμματα περιόδου λειτουργίας του συστήματος σε ένα διάστημα ισχύος, ανά μήνα. Παρατηρείται από αυτά ότι, από τον Ιούνιο μέχρι και τον Αύγουστο όπου κορυφώνεται η καλοκαιρινή περίοδος, το σύστημα παράγει και στις περιοχές 80-90% της εγκατεστημένης του ισχύος. Κατά κύριο λόγο το σύστημα αποδίδει ικανοποιητικά σε θέμα ωρών στα διαστήματα 30-50% καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ενώ ποτέ δεν λειτουργεί στο διάστημα 90-100% της εγκατεστημένης ισχύος.

Τέλος ολοκληρώνοντας το θέμα της παραμονής σε κάποιο διάστημα απόδοσης, θα πρέπει να καταγραφούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των στρατηγικών επιδιόρθωσης για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Η στρατηγική που θα επιλεγεί, μπορεί να επηρεάζει την απόδοση του συστήματος αρνητικά, αλλά να είναι οικονομικότερη λαμβανομένων υπόψη των εξόδων επιδιόρθωσης. Είναι προφανές ότι σε ένα πολύ μεγάλο σύστημα με πολλά υποπεδία και μεγάλο αριθμό blocks, η βλάβη ενός block προκαλεί σχεδόν αμελητέα απώλεια ενέργειας, ενώ το κόστος επιδιόρθωσης απαιτεί συνεργείο, ανταλλάχτηκα και χρόνο, που είναι οικονομικά ασύμφορα.

Η στρατηγική που θα επιλεγεί είναι ανάλογη του όγκου του συστήματος. Διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το σύστημα, τόσο λιγότερο επηρεάζεται από την βλάβη των

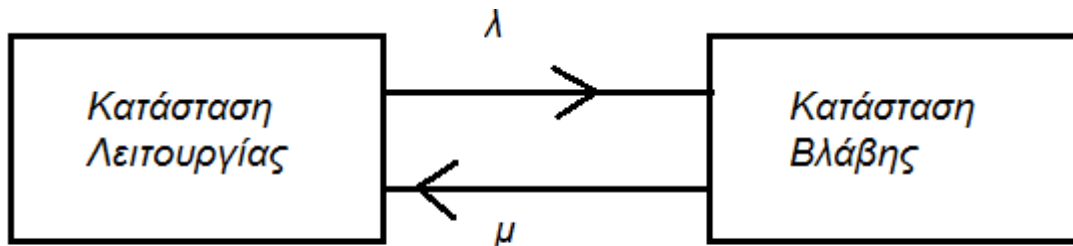
στοιχείων του. Σε μεγάλα συστήματα μπορούν να επιλεγούν στρατηγικές που επιτρέπουν την απώλεια αρκετών block. Αυτό που είναι σαφές και πρέπει να σημειωθεί είναι ότι, πάντα οι inverters θα ακολουθούν την στρατηγική άμεσης επιδιόρθωσης.

## Παράρτημα Α – Αναλυτική Μέθοδος για την Αξιοπιστία Λειτουργίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μεθοδολογία Markov χρησιμοποιείται για την αναλυτική εύρεση της αξιοπιστίας των συστημάτων, στα οποία ο χρόνος επισκευής είναι πεπερασμένος. Αυτό που χαρακτηρίζει την μεθοδολογία Markov είναι το γεγονός ότι δεν έχει μνήμη. Με τον όρο 'χωρίς μνήμη' δηλώνεται ότι η μελλοντική κατάσταση του συστήματος δεν έχει καμία εξάρτηση με τις καταστάσεις του παρελθόντος, εκτός από την αμέσως προηγούμενη. Έτσι η μελλοντική κατάσταση του συστήματος εξαρτάται μόνο από την παρούσα θέση του. Επιπρόσθετα η πιθανότητα μετάβασης του συστήματος από την μια κατάσταση σε μια άλλη είναι η ίδια οποιανδήποτε χρονική στιγμή. Αυτό χαρακτηρίζεται ως στασιμότητα της ανέλιξης. Με τον όρο ανέλιξη εννοείται η στοχαστική μεταβολή της κατάστασης του συστήματος [3].

Σε ένα ηλεκτρικό (ή άλλο) σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία Markov για την ανάλυση των καταστάσεων του. Αν η βλάβη και επισκευή των στοιχείων ακολουθεί την εκθετική κατανομή η μεθοδολογία χαρακτηρίζεται ως στάσιμη ανέλιξη Markov. Πιο κάτω θα παρουσιαστούν τα γενικά χαρακτηριστικά και οι σχέσεις που προκύπτουν από την ανάλυση.

Θεωρώντας ένα απλό σύστημα ενός στοιχείου το οποίο παθαίνει βλάβες με σταθερό ρυθμό βλαβών ' $\lambda$ ' και επισκευής ' $\mu$ ', οι οποίες ακολουθούν την εκθετική κατανομή, μπορούν να θεωρηθούν δύο καταστάσεις του συστήματος. Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζονται οι δύο καταστάσεις του συστήματος.



Σχήμα π1: Μοντέλο Markov δύο καταστάσεων

Θεωρώντας ένα μικρό χρονικό διάστημα  $dt$  στο οποίο δεν μπορούν να συμβούν δύο ή περισσότερες μεταβάσεις, και ορίζοντας ως  $P1$  και  $P2$  τις πιθανότητες λειτουργίας και βλάβης του στοιχείου αντίστοιχα, φάχνουμε την πιθανότητα το σύστημα να είναι σε λειτουργία και την πιθανότητα το σύστημα να είναι σε βλάβη την χρονική στιγμή  $t+dt$ . Η πιθανότητα το σύστημα να είναι σε λειτουργία μπορεί να βρεθεί θεωρώντας το άθροισμα των πιθανοτήτων το στοιχείο να ήταν σε λειτουργία και να παραμείνει και την

πιθανότητα το στοιχείο να ήταν σε βλάβη και να επισκευαστεί. Έτσι η πιθανότητα λειτουργίας την στιγμή  $t+dt$  ορίζεται από την εξίσωση:

$$P_1(t + dt) = P_1(t) * (1 - \lambda dt) + P_2(t) * (\mu dt) \quad \text{εξ.π1}$$

Και αντίστοιχα η πιθανότητα το σύστημα να είναι σε βλάβη:

$$P_2(t + dt) = P_2(t) * (1 - \mu dt) + P_1(t) * (\lambda dt) \quad \text{εξ.π2}$$

Από τις πιο πάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\frac{P_1(t+dt)-P_1(t)}{dt} = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \quad \text{εξ.π3}$$

Και καθώς  $dt \rightarrow 0$  :

$$P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \quad \text{εξ.π4}$$

Και ομοίως

$$P_2'(t) = \lambda P_1(t) - \mu P_2(t) \quad \text{εξ.π5}$$

Με κατάλληλο μετασχηματισμό Laplace και με κάποιες παραδοχές καταλήγουμε στις εξισώσεις:

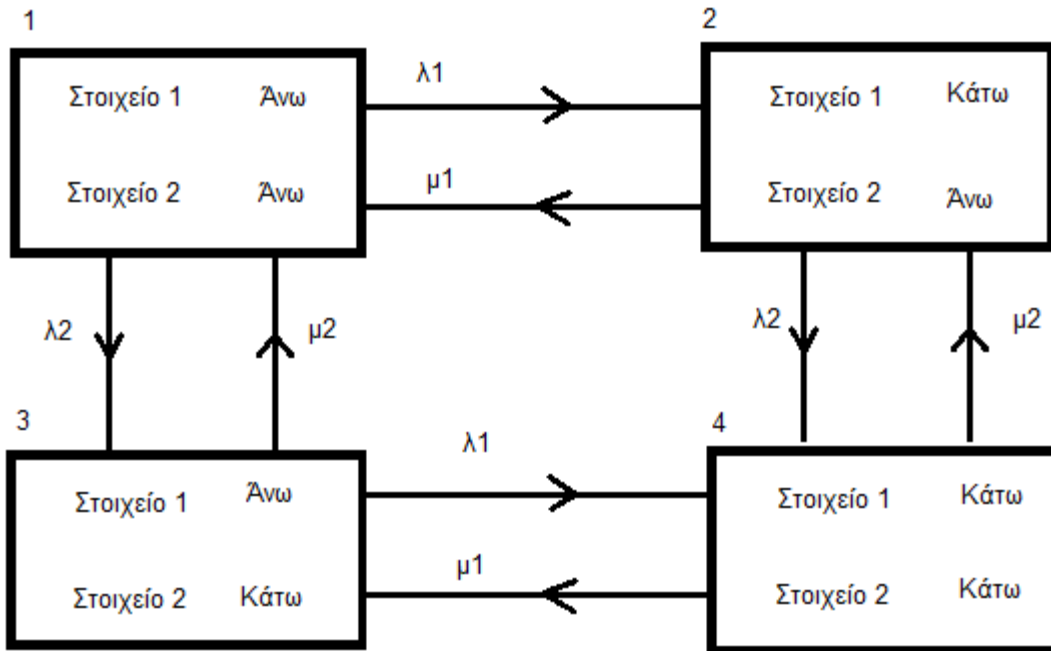
$$P_1 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \text{εξ.π6}$$

Και

$$P_2 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad \text{εξ.π7}$$

Από τις εξ.π6 και εξ.π7 φαίνεται ότι οι οριακές πιθανότητες  $P_1$  και  $P_2$  είναι ανεξάρτητες των αρχικών συνθηκών.

Η μετάβαση του συστήματος από τη μια κατάσταση στην άλλη μπορεί να παρασταθεί και σε πίνακα, τα στοιχεία του οποίου παριστάνουν τον ρυθμό μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη. Αν για παράδειγμα ένα σύστημα έχει δύο στοιχεία όπως παριστάνεται στο σχήμα π2, η πιθανότητα παραμονής στην κάθε κατάσταση δίνεται μέσω των εξισώσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα π2: Χωροταξικό διάγραμμα καταστάσεων για σύστημα με δύο στοιχεία

$$P = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1-\lambda_1-\lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \hline \mu_1 & 1-\lambda_2-\mu_1 & 0 & \lambda_2 \\ \hline \mu_2 & 0 & 1-\lambda_1-\mu_2 & \lambda_1 \\ \hline 0 & \mu_2 & \mu_1 & 1-\mu_1-\mu_2 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1 * (1 - \lambda_1 - \lambda_2) + P_2 * \mu_1 + P_3 * \mu_2 + P_4 * 0 \\ P_2 &= P_1 * \lambda_1 + P_2 * (1 - \lambda_2 - \mu_1) + P_3 * 0 + P_4 * \mu_2 \\ P_3 &= P_1 * \lambda_2 + P_2 * 0 + P_3 * (1 - \lambda_1 - \mu_2) + P_4 * \mu_1 \\ P_4 &= P_1 * 0 + P_2 * \lambda_2 + P_3 * \lambda_1 + P_4 * (1 - \mu_1 - \mu_2) \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= 1 \end{aligned}$$

Από τις πιο πάνω εξισώσεις επιλύοντας το σύστημα προκύπτουν οι σχέσεις που περιγράφουν τις πιθανότητες για την κάθε κατάσταση.

$$P_1 = \frac{\mu_1 * \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}$$



$$P_2 = \frac{\lambda_1 * \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}$$

$$P_3 = \frac{\mu_1 * \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}$$

$$P_4 = \frac{\lambda_1 * \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}$$

Αν τα δύο στοιχεία του συστήματος είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους σημαίνει ότι το σύστημα θα είναι διαθέσιμο όταν βρίσκεται στην κατάσταση 1 ενώ θα είναι μη διαθέσιμο σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση. Ως εκ τούτου η διαθεσιμότητα 'Α' και μη διαθεσιμότητα 'Υ' του συστήματος προκύπτουν από τις πιο κάτω σχέσεις.

$$A = P_1 = \frac{\mu_1 * \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad \text{εξ.π8}$$

$$U = P_2 + P_3 + P_4 = \frac{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 + \lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad \text{εξ.π9}$$

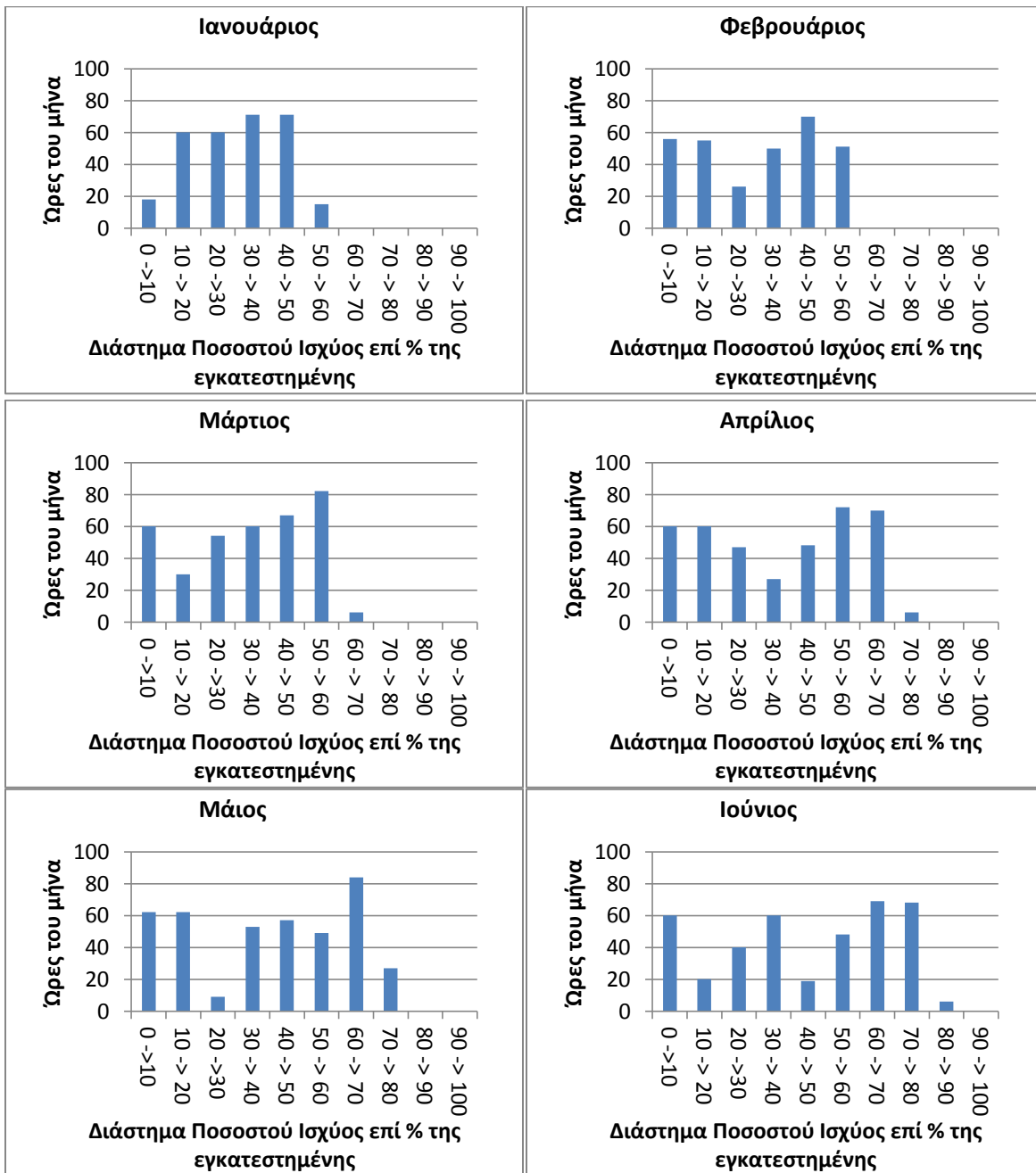
Με όμοια λογική αν τα δύο στοιχεία είναι ενωμένα παράλληλα προκύπτει ότι:

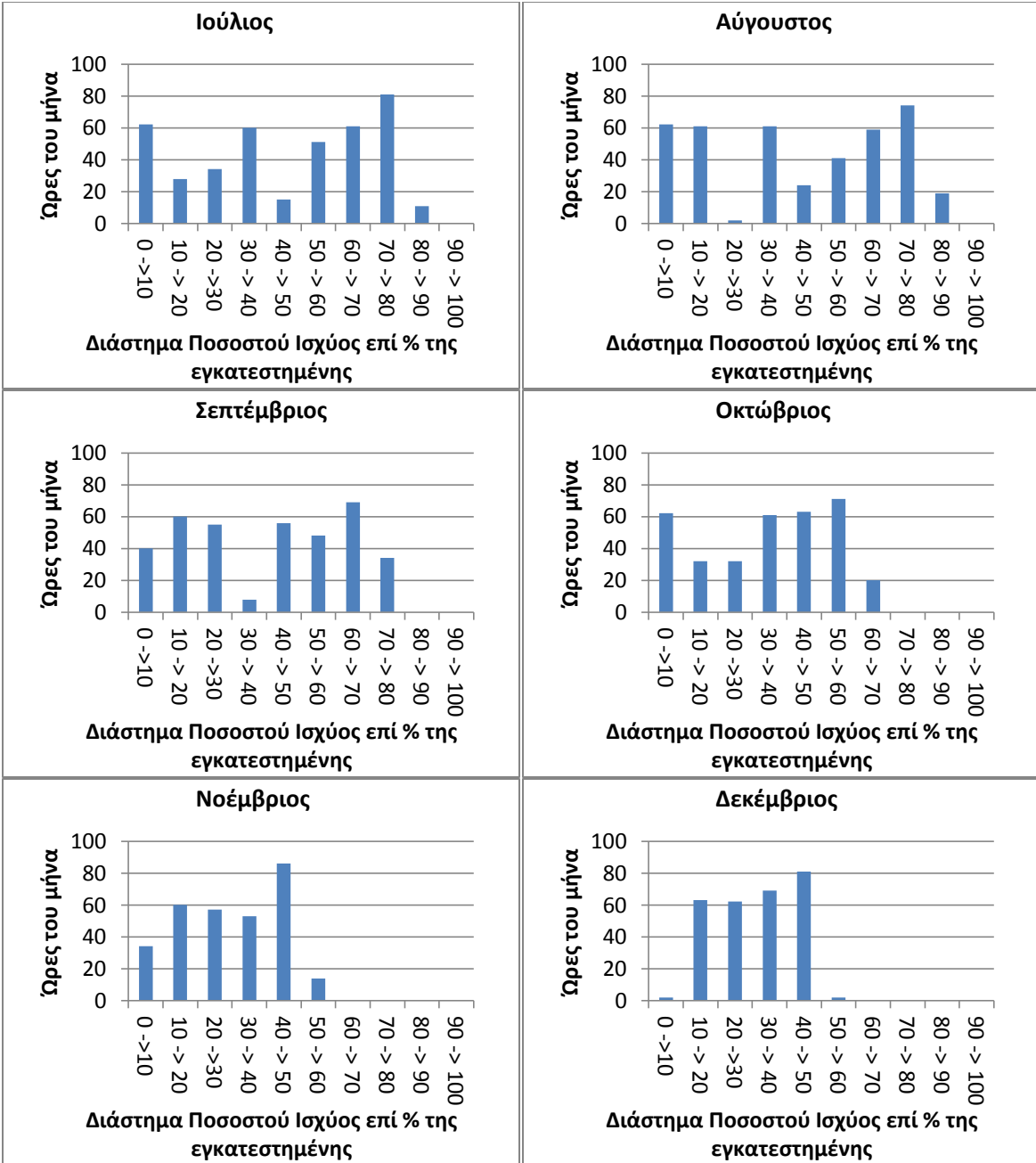
$$A = P_1 + P_2 + P_3 = \frac{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad \text{εξ.π10}$$

$$U = P_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad \text{εξ.π11}$$

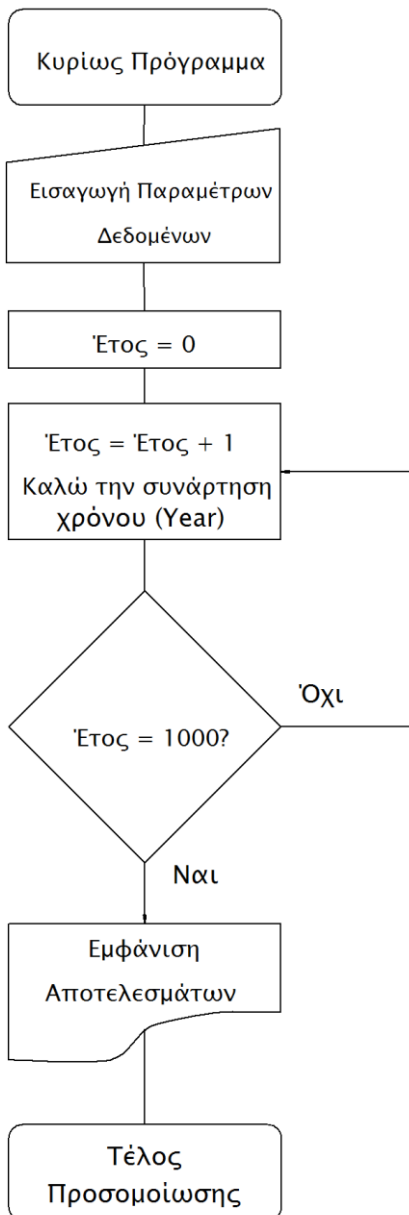
Όπως φαίνεται από την πιο πάνω παρουσίαση η αναλυτική μέθοδος Markov απαιτεί το σύστημα να ορίζεται αναλυτικά από κάποια συνάρτηση πιθανότητας. Η επίλυση των αναλυτικών μοντέλων μπορεί να είναι χρονοβόρα ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος που αναλύεται.

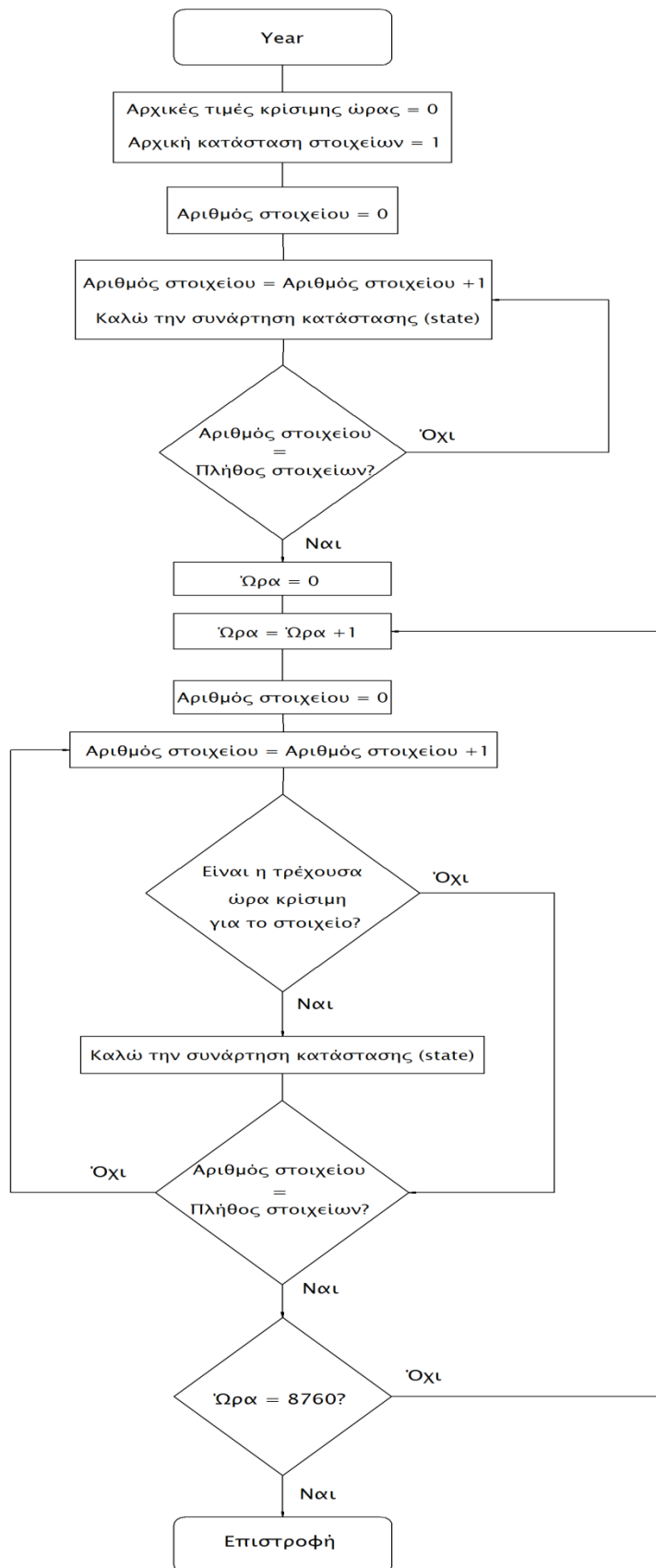
## Παράρτημα Β – Ιστογράμματα ωρών λειτουργίας του συστήματος σε κάθε διάστημα ισχύος ανά μήνα

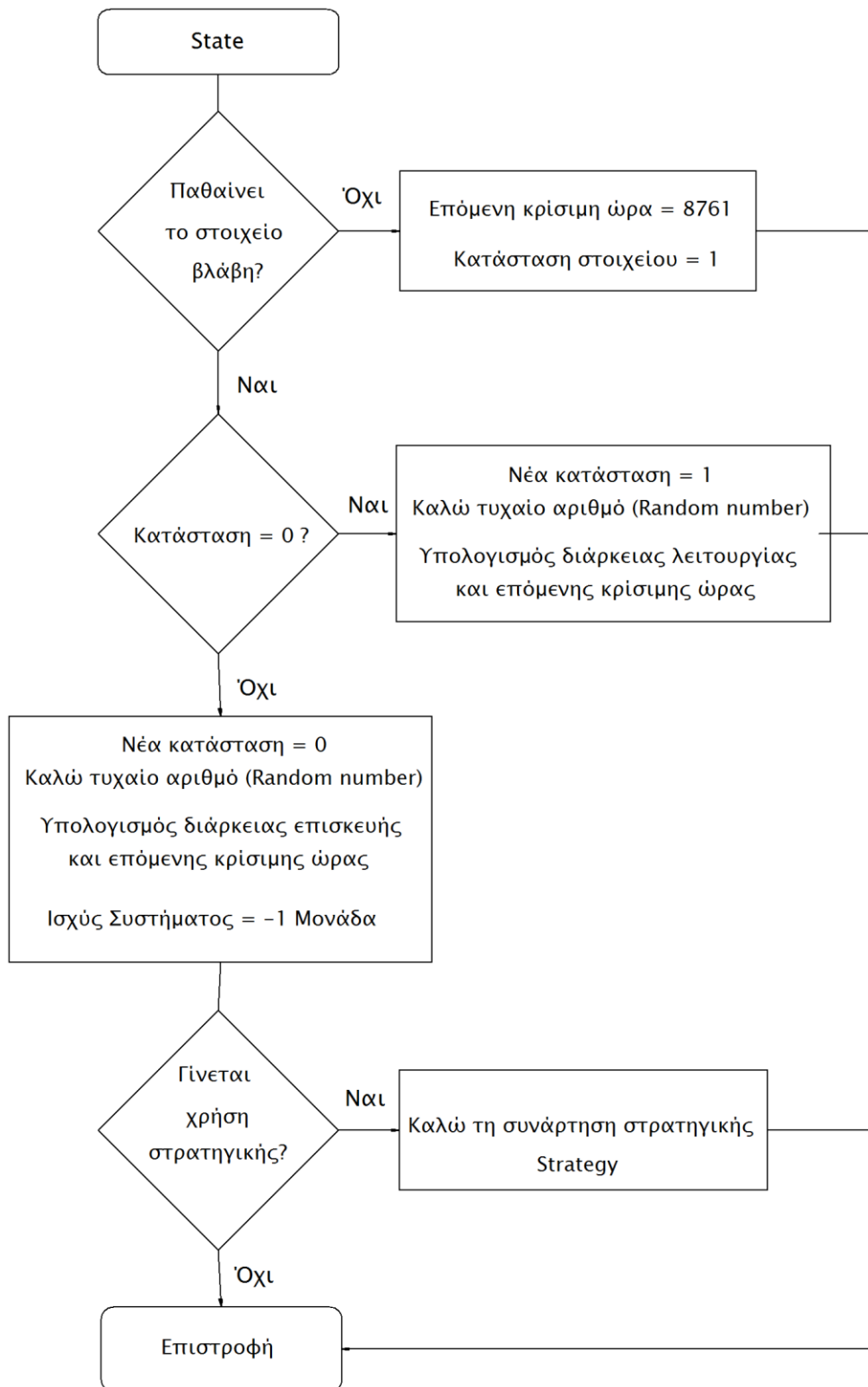


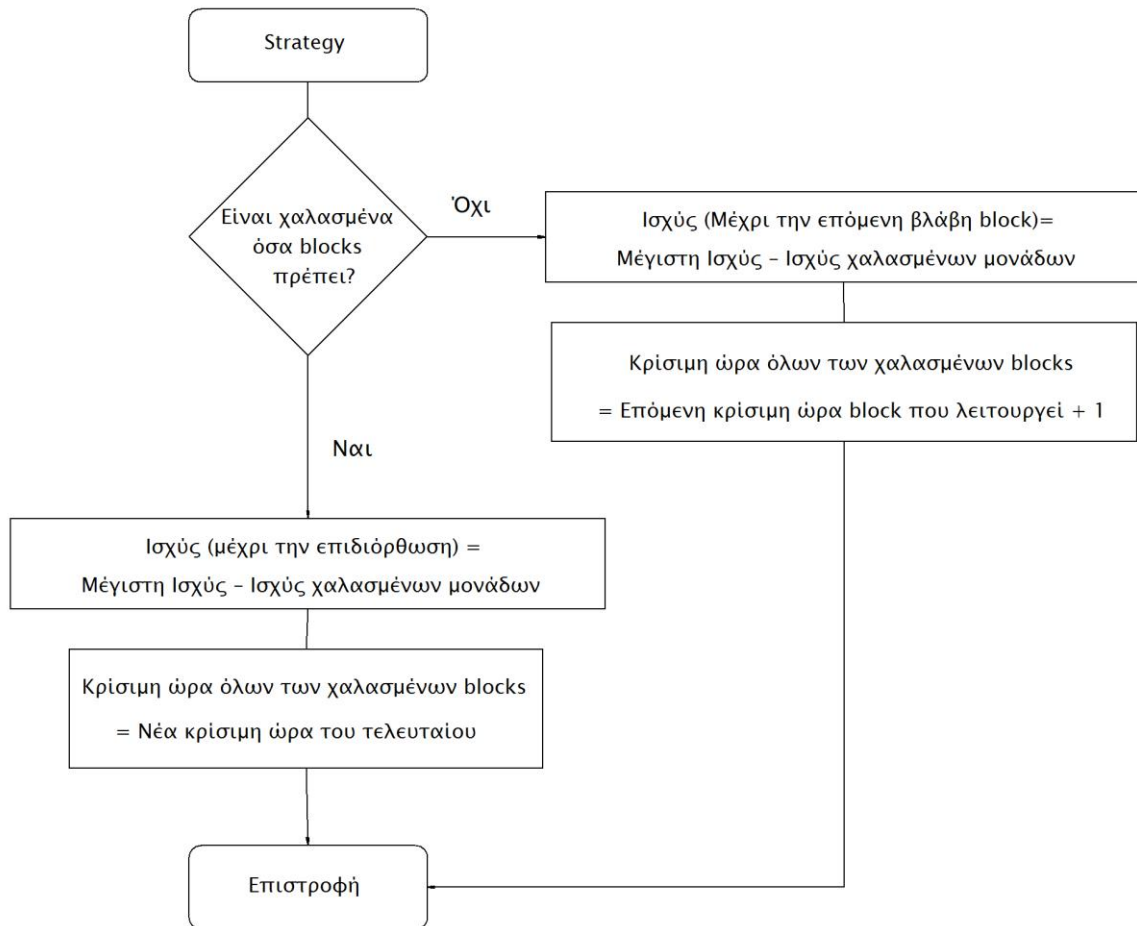


## Παράρτημα Γ – Διαγράμματα ροής (Flow charts) για τον αλγόριθμο προσομοίωσης βλαβών

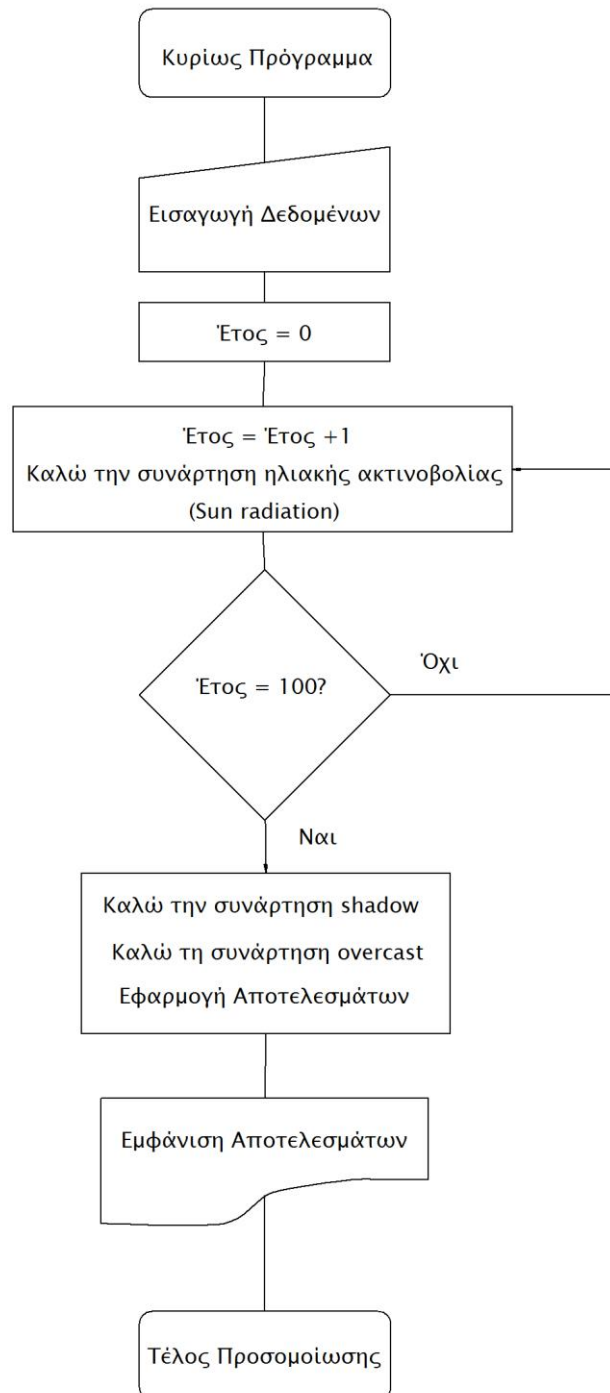




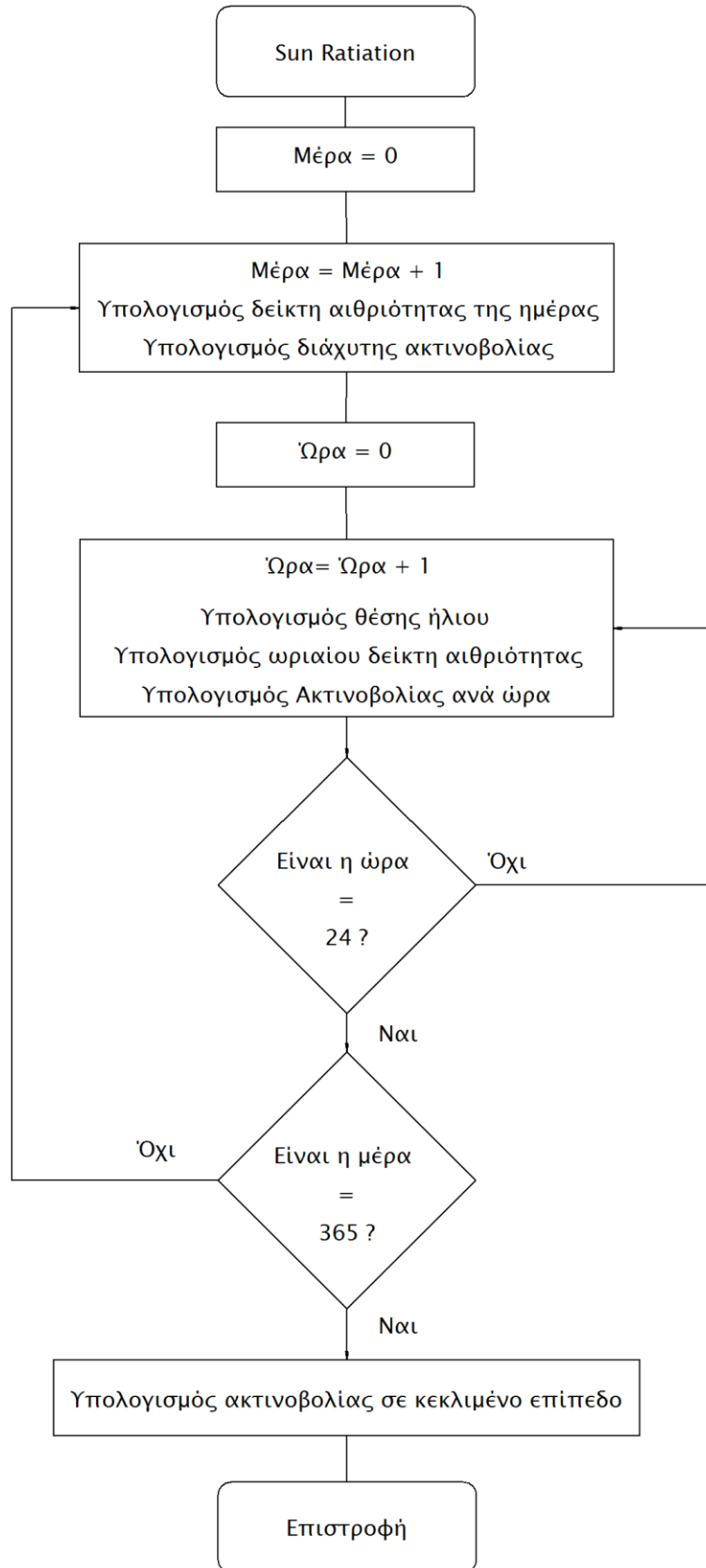


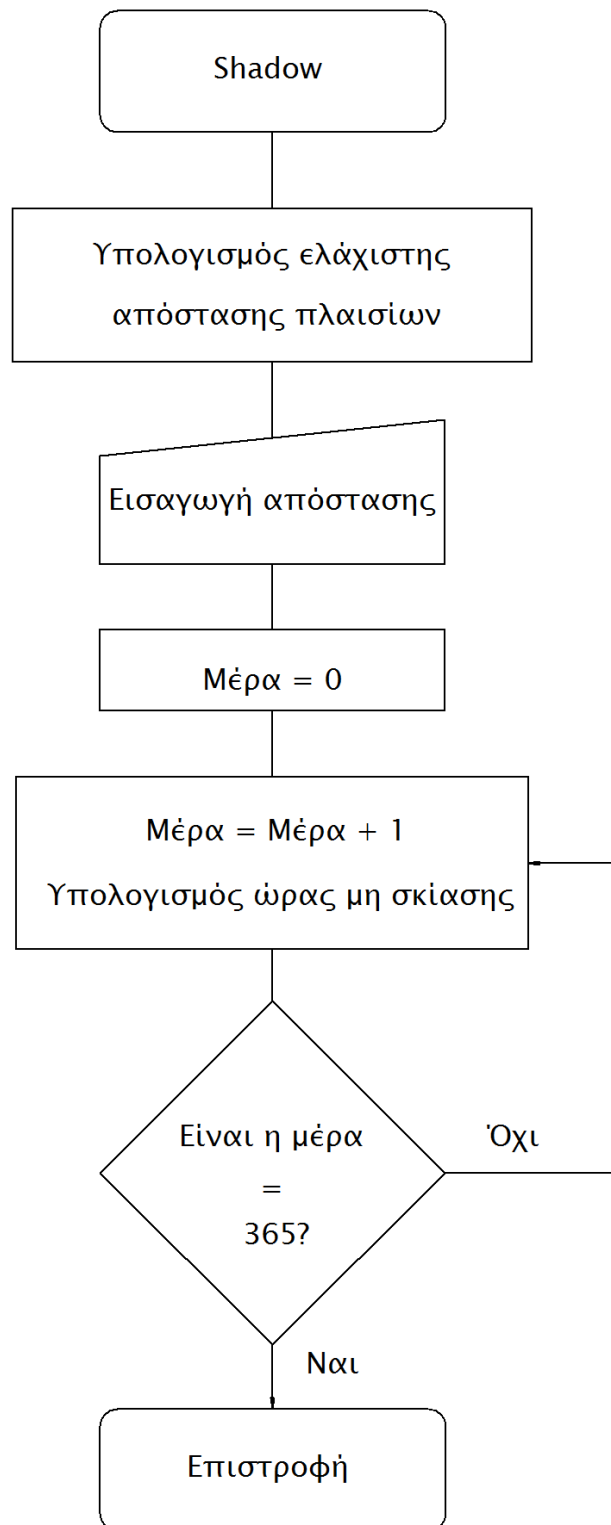


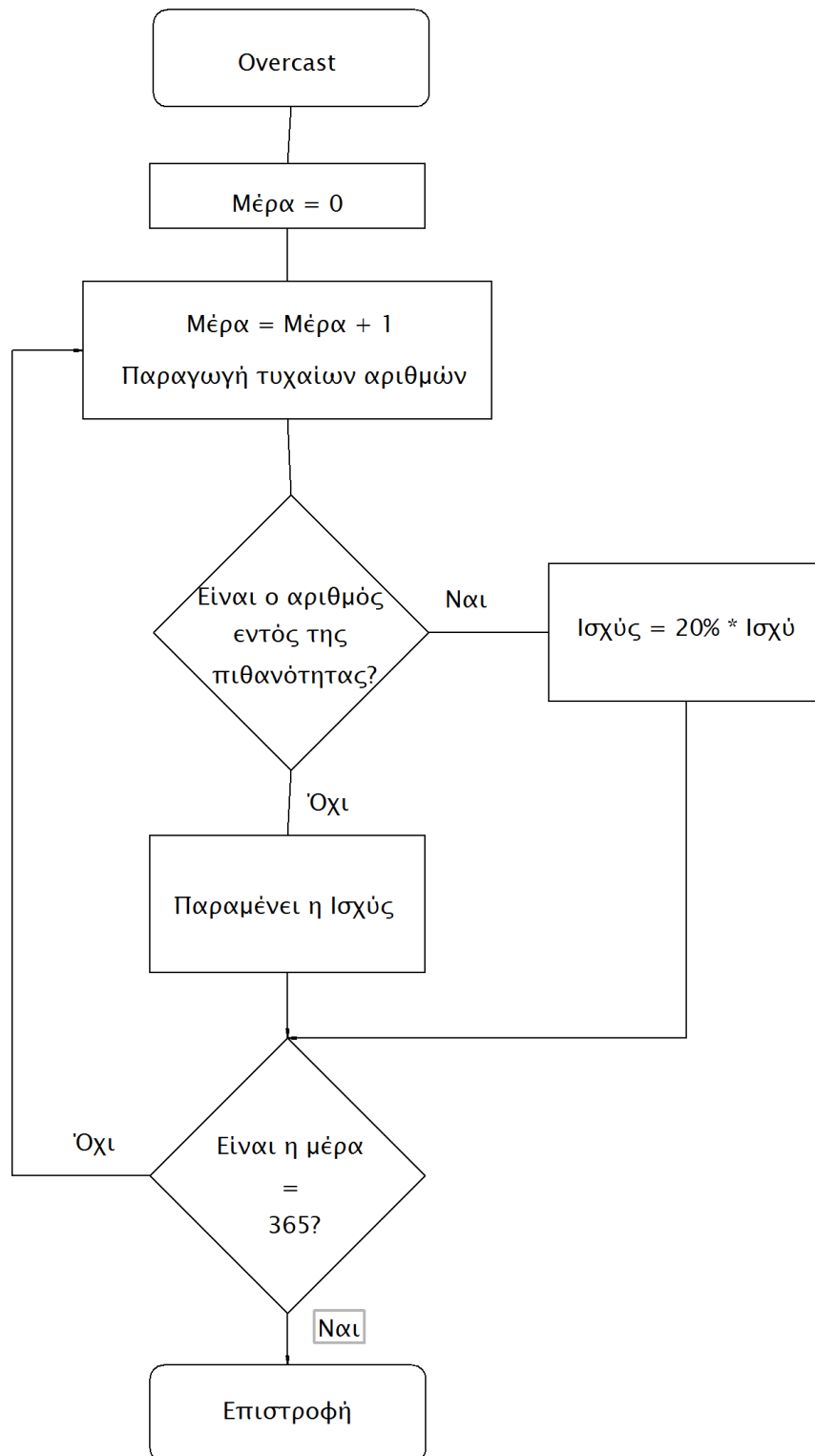
## Παράρτημα Δ - Διαγράμματα ροής (flow charts) για τον αλγόριθμο προσομοίωσης του καιρού











## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Estimation of Photovoltaic System Reliability and Performance Metrics, Sairaj V. Dhople, *Student Member, IEEE*, and Alejandro D. Domínguez-García, *Member, IEEE, February 2012.*
- [2] Power & Energy magazine for electric power professionals, IEEE - Volume 11 – Number 2 – March/April 2013
- [3] Ανάλυση Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων, Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1998
- [4] Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Αθήνα 1996.
- [5] Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, Μιχαήλ Π. Παπαδόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [6] Προσομοίωση Monte Carlo, Ευάγγελος Ν. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Αθήνα Οκτώβριος 1996.
- [7] Μέθοδοι Monte Carlo. Σπύρος Ι. Χατζησπύρος. Σημειώσεις στην Υπολογιστική Στατιστική μέρος Α
- [8] R.Knop Remark on algorithm 334 [G5]: normal random deviates.
- [9] Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις, Κ.Θ.Δερβός Καθηγητής Ε.Μ.Π, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
- [10] Πρακτικά Τρίτου Εθνικού Συνεδρίου Για Τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας. Θεσσαλονίκη 9-11/11/1988. ΕΛΚΕΠΑ Ελληνικό κέντρο παραγωγής. Ινστιτούτο τεχνολογίας εφαρμογών. ινστιτούτο ηλιακής τεχνολογίας
- [11] Estimation of Photovoltaic System Reliability Parameters, A. Pregelj, M. Begovic, A. Rohatgi, A. Ristow, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta USA
- [12] Evaluation and derivation of cloud-cover algorithms for calculation of surface irradiance in sub-Antarctic and Antarctic environments, HAE-CHEOL KIM\* and EILEEN E. HOFMANN, Antarctic Science Ltd Printed in the UK , 2005

- [13] Evaluation and derivation of cloud-cover algorithms for calculation of surface irradiance in sub-Antarctic and Antarctic environments. HAE-CHEOL KIM and EILEEN E. HOFMANN. Antarctic Science 17 (1): 135–150 (2005) © Antarctic Science Ltd Printed in the UK
- [14] Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) "Περιβάλλον και Ανάπτυξη" Μεταπτυχιακή Εργασία Κλιματικός Άτλαντας Ελλάδος. Εκδόσεος Ε.Μ.Π. Φαρμακάκη Αικατερίνη. Αθήνα Μάρτιος 2005.