

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



## **Διπλωματική Εργασία**

**Βελτιστοποίηση Αξιοπιστίας Φωτοβολταϊκών  
Μετατροπών DC/AC**

**Γραμματικός Αναστάσιος**

Εξεταστική Επιτροπή:

Κουτρούλης Ευτύχιος (Επικ. Καθηγητής-επιβλέπων)

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Καθηγητής)

Σταυρακάκης Γεώργιος (Καθηγητής)

**Χανιά 2014**

---

# Περίληψη

---

Στα συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, κάθε φορά που το σύστημα είναι μη λειτουργικό χάνεται η δυναμική για παραγωγή ενέργειας και εσόδων. Η απώλεια δυνητικών εσόδων είναι σημαντική για τα συστήματα αυτά, όπου η μεγάλη αρχική επένδυση αντισταθμίζεται από τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής της μονάδας. Κατά την εκτίμηση της απόδοσης της αρχικής επένδυσης και του κόστους της ενέργειας ανά KWh που παράγεται από ένα τέτοιο σύστημα, το σύστημα θεωρείται πως λειτουργεί χωρίς διακοπές. Όμως, αν και τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα είναι εξαιρετικά αξιόπιστα, όπως οποιοδήποτε πολύπλοκο σύστημα, περιστασιακά υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί βλάβη. Σημαντικό τμήμα των βλαβών σχετίζεται με τον μετατροπέα ισχύος DC/AC.

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει μια μέθοδο σχεδίασης Φ/Β αντιστροφών στην οποία λαμβάνονται υπόψη τα μετεωρολογικά στοιχεία της περιοχής εγκατάστασης και η αξιοπιστία του αντιστροφέα. Στη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιούνται κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό του αριθμού βλαβών του αντιστροφέα σε κάθε χρόνο λειτουργίας του. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση της αξιοπιστίας του αντιστροφέα σε διάφορους δείκτες επίδοσης του αντιστροφέα όπως είναι το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, η συνολική παραγόμενη ενέργεια και το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης του αντιστροφέα. Τα αποτελέσματα σχεδίασης δείχνουν ότι οι μετατροπείς DC/AC που σχεδιάζονται με αυτή τη μέθοδο έχουν μικρότερο κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.

---

# Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκ. Καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη για την υποστήριξή του, την καθοδήγηση αλλά και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στις ικανότητές μου. Επίσης ευχαριστώ θερμά τους Καθηγητές κ.κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη και Γεώργιο Σταυρακάκη για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Για τη φιλία και τη στήριξή τους θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συναδέλφους που ήταν δίπλα μου σε όλες τις φάσεις της ζωής μου και με στήριξαν ανιδιοτελώς σε μεγάλο βαθμό.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την ηθική συμπαράσταση και υλική στήριξη που μου πρόσφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

<b>Περίληψη .....</b>	<b>ii</b>
<b>Ευχαριστίες .....</b>	<b>iii</b>
<b>Πίνακας εικόνων .....</b>	<b>vi</b>
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	1
1.2 Η ηλιακή ενέργεια .....	3
1.3 Εφαρμογές Φ/Β συστημάτων.....	4
1.4 Αξιοπιστία Φ/Β συστημάτων .....	6
<b>2. Αξιοπιστία Συστημάτων .....</b>	<b>7</b>
2.1 Βασικές έννοιες αξιοπιστίας.....	7
2.2 Στατιστικές κατανομές στην ανάλυση αξιοπιστίας .....	9
2.2.1 Εκθετική Κατανομή.....	10
2.2.2 Κατανομή Weibull.....	11
2.3 Δεδομένα για τον ρυθμό βλαβών .....	12
<b>3. Υπολογισμός ρυθμού βλαβών σε Φ/Β αντιστροφείς DC/AC .....</b>	<b>14</b>
3.1 Τοπολογία αντιστροφέα .....	14
3.2 Το πρότυπο MIL-HDBK-217F .....	18
3.3 Μοντέλα για τον υπολογισμό των ρυθμών βλαβών .....	19
3.4 Μέθοδοι για ανάλυση αξιοπιστίας αντιστροφέα. ....	25
<b>4. Ανάλυση αλγόριθμου βελτιστοποίησης.....</b>	<b>27</b>
4.1 Είσοδοι και έξοδοι του αλγόριθμου βελτιστοποίησης.....	27
4.2 Μαθηματικό μοντέλο του αντιστροφέα .....	29
4.3 Περιγραφή ανάλυσης αξιοπιστίας.....	32
4.3 Περιγραφή εργαλείων του matlab για βελτιστοποίηση. ....	36
4.3.1 Γενετικός αλγόριθμος .....	36
4.3.2 Pattern search.....	38
4.3.3 Fmincon εσωτερικών σημείων (interior point) .....	41
<b>5. Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης .....</b>	<b>44</b>
5.1 Εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης .....	44
5.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση: μη-σταθερός ρυθμός Βλαβών .....	45

5.1.2 Αντικειμενική συνάρτηση: LCOE.....	48
5.1.3 Αντικειμενική συνάρτηση: συνολική παραγόμενη ενέργεια.....	53
5.1.4 Αντικειμενική συνάρτηση: συνολικό κόστος αντιστροφέα.....	55
5.2 Έλεγχος αλγορίθμου βελτιστοποίησης .....	60
5.3 Σύγκριση με μη βελτιστοποιημένο αντιστροφέα.....	90
<b>6. Συμπεράσματα. ....</b>	<b>97</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>99</b>

---

## Πίνακας εικόνων

---

Εικόνα 1.1 Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών στην παγκόσμια παραγωγή κατά το 2012 [2].....	2
Εικόνα 1.2 Παγκόσμια ανάπτυξη Φ/Β συστημάτων (1995-2011) [2].....	4
Εικόνα 1.3 Γενικό διάγραμμα διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο Φ/Β συστημάτων [2].....	5
Εικόνα 2.1 Η μεταβολή του ρυθμού βλαβών ενός συστήματος με τον χρόνο.....	10
Εικόνα 3.1 Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με αντιστροφέα με γαλβανική απομόνωση: (α) χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστής στην πλευρά του δικτύου (β) υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής στη DC πλευρά.....	15
Εικόνα 3.2 Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή.....	15
Εικόνα 3.3 Τοπολογία πλήρους γέφυρας αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή.....	16
Εικόνα 3.4 Αρχιτεκτονική του Φ/Β συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία.....	17
Εικόνα 3.5 Μεθοδολογία ανάλυσης αξιοπιστίας Φ/Β αντιστροφέων.....	25
Εικόνα 4.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε.....	28
Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής της μεθόδου ανάλυσης της αξιοπιστίας που εφαρμόστηκε.....	33
Εικόνα 4.3 Διάγραμμα ροής της προσομοίωσης Monte Carlo.....	34
Εικόνα 5.1 Τιμές LCOE, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το μη σταθερό failure rate.....	47

Εικόνα 5.2 Τιμές μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση LCOE για τον αλγόριθμο Γ/Α.....	49
Εικόνα 5.3 Τιμές μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους συναρτήσεων για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το LCOE για τον αλγόριθμο P/S.....	51
Εικόνα 5.4 Τιμές μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το LCOE για τον αλγόριθμο fmincon.....	52
Εικόνα 5.5 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate, και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική ενέργεια.....	54
Εικόνα 5.6 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής ενέργειας για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τους αλγορίθμους Γ/Α και P/S.....	57
Εικόνα 5.7 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής ενέργειας για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τον αλγόριθμο fmincon.....	59
Εικόνα 5.8 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	61
Εικόνα 5.9 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	62
Εικόνα 5.10 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $C_f$ , $f_s$ για τη Murcia με τα $L$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	63
Εικόνα 5.11 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $C_f$ , $f_s$ για τη Murcia με τα $L$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	64
Εικόνα 5.12 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	65

Εικόνα 5.13 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 4% και μικρότερο εύρος τιμών.....	66
Εικόνα 5.14 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $C_f$ , $f_s$ για το Oslo με τα $L$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	67
Εικόνα 5.15 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα $C_f$ , $f_s$ για το Oslo με τα $L$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	68
Εικόνα 5.16 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	69
Εικόνα 5.17 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα $L$ , $f_s$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	70
Εικόνα 5.18 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	71
Εικόνα 5.19 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα $L$ , $f_s$ για το Oslo με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	72
Εικόνα 5.20 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 15%.....	73
Εικόνα 5.21 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	74
Εικόνα 5.22 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L_g$ , $C_f$ για τη Murcia με τα $L$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.....	75
Εικόνα 5.23 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L_g$ , $C_f$ για τη Murcia με τα $L$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	76
Εικόνα 5.24 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.....	77



Εικόνα 5.25 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10% και μικρότερο εύρος τιμών.....	78
Εικόνα 5.26 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L_g$ , $C_f$ για το Oslo με τα $L$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.....	79
Εικόνα 5.27 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα $L_g$ , $C_f$ για το Oslo με τα $L$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.....	80
Εικόνα 5.28 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $L_g$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.....	81
Εικόνα 5.29 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $f_s$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.....	82
Εικόνα 5.30 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $f_s$ για τη Murcia με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 8% και μικρότερο εύρος τιμών.....	83
Εικόνα 5.31 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $L_g$ για το Oslo με τα $C_f$ , $f_s$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 3%.....	84
Εικόνα 5.32 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $f_s$ για το Oslo με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.....	85
Εικόνα 5.33 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα $L$ , $f_s$ για το Oslo με τα $C_f$ , $L_g$ σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 8% και μικρότερο εύρος τιμών.....	86
Εικόνα 5.34 Σύγκριση τιμών LCOE βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.....	91
Εικόνα 5.35 Σύγκριση τιμών συνολικής ενέργειας βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα .....	91
Εικόνα 5.36 Σύγκριση τιμών συνολικού κόστους βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.....	92

Εικόνα 5.37 Σύγκριση τιμών μη σταθερού failure rate βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.....	92
Εικόνα 5.38 Σύγκριση τιμών LCOE βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.....	94
Εικόνα 5.39 Σύγκριση τιμών συνολικής ενέργειας βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.....	94
Εικόνα 5.40 Σύγκριση τιμών μη σταθερού failure rate βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.....	95
Εικόνα 5.41 Σύγκριση τιμών συνολικού κόστους βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.....	95

# 1.

## Εισαγωγή

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και των Φ/Β συστημάτων τα οποία είναι διασυνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Κατόπιν αναλύεται η έννοια της αξιοπιστίας Φ/Β συστημάτων και παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

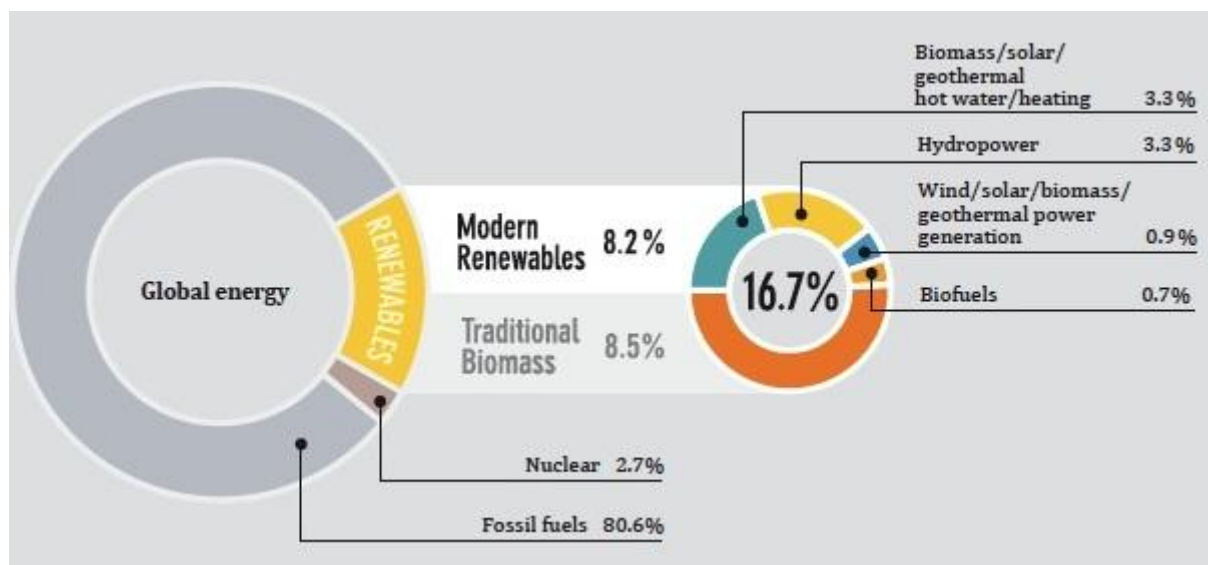
### 1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει αυξηθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες και θα συνεχίσει να αυξάνεται βάσει ιστορικών τάσεων. Οι αναγκαίοι πόροι για την στήριξη αυτού του πληθυσμού θα αυξηθούν με τη σειρά τους. Ένας από τους πιο ζωτικής σημασίας, ιδιαίτερα με τη ραγδαία ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας, είναι η ενέργεια.

Η ενεργειακή κρίση έγινε έντονη στα τέλη του 20ού αιώνα, γεννώντας την επιθυμία να βρεθούν πρόσθετες πηγές ενέργειας ώστε να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη ζήτηση [1]. Μια επιλογή ήταν η αύξηση της παραγωγής συμβατικών πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα, όπως η πυρηνική ενέργεια και τα ορυκτά καύσιμα. Η άλλη ήταν η διερεύνηση της εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πολλές διαφορετικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αναδειχθεί σαν εφικτές λύσεις και καθεμία έχει θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά. Στο σύνολό τους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν σαν κοινά

χαρακτηριστικά ότι υπάρχουν ανεξάντλητες στη φύση και ότι δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους. Αυτοί οι παράγοντες είναι το κύριο κίνητρο για τις χώρες να ξεκινήσουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό τους πρόγραμμα.

Εκτιμάται ότι το 16,7% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης το 2010 παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές [2]. Μια περαιτέρω ανάλυση για την προέλευση της παγκόσμιας παραγόμενης ενέργειας το 2010 φαίνεται στην Εικόνα 1.1. Επίσης το 2011 σχεδόν το ήμισυ των νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφορούσε ανανεώσιμες πηγές. Το ποσοστό της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, και αναμένεται να συνεχίσει με αυτήν την τάση και στο μέλλον.

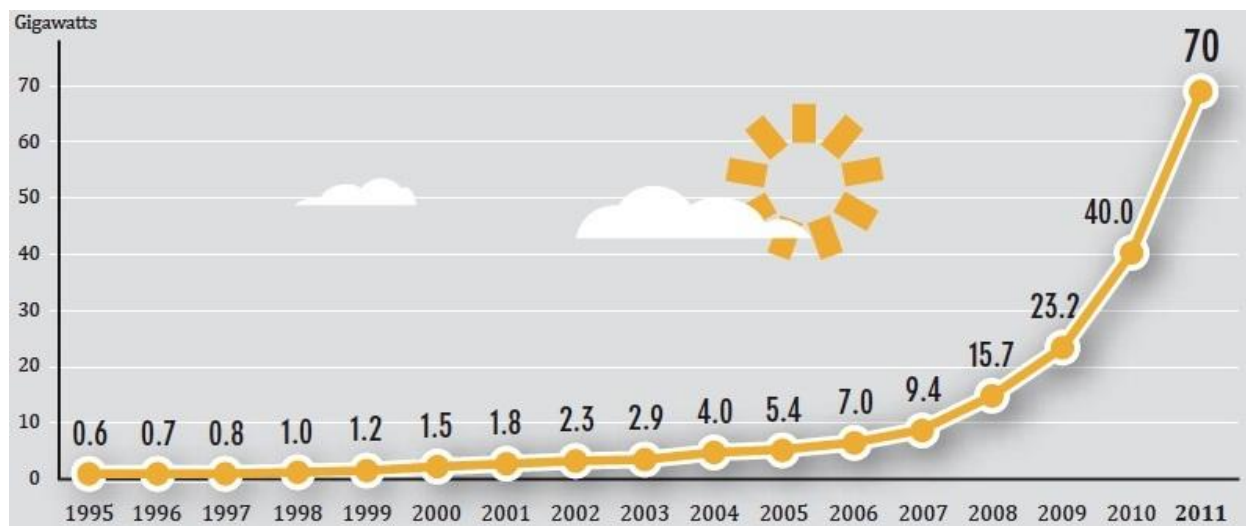


Εικόνα 1.1 Μερίδιο ανανεώσιμων πηγών στην παγκόσμια παραγωγή κατά το 2010 [2].

Περαιτέρω ανάλυση της Εικόνας 1.1, δείχνει πως η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως είναι τα ορυκτά καύσιμα. Οι δύο άλλες μεγαλύτερες πηγές είναι η πυρηνική ενέργεια και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Τα ορυκτά καύσιμα παράγουν μόλυνση κατά την καύση τους. Οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να παράγουν τεράστια ποσά ενέργειας. Ωστόσο, συνοδεύονται από τοξικά πυρηνικά απόβλητα που πρέπει να αποθηκευτούν μέσω ταφής και ενδεχόμενο ατύχημα έχει καταστροφικά αποτελέσματα για το οικοσύστημα της περιοχής. Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί φράγματα ποταμών, διαταράσσοντας τη φυσική ροή τους, αλλάζοντας τελείως το γύρω οικοσύστημα. Μια μορφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που κερδίζει δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια είναι η ηλιακή. Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις καθαρότερες μορφές που διατίθεται καθώς η μετατροπή της ενέργειας από τον ήλιο σε ηλεκτρική πραγματοποιείται χωρίς οποιαδήποτε απόβλητα ή επιβλαβή υποπροϊόντα. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στην ηλιακή ενέργεια.

## 1.2 Η ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος είναι μια εξαιρετικά ισχυρή πηγή ενέργειας και η επιφάνεια της Γης λαμβάνει αρκετή ενέργεια από τον ήλιο σε μία ώρα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της για ένα έτος [3]. Η ηλιακή τεχνολογία δημιουργήθηκε αρχικά για να τροφοδοτήσει τους πρώτους δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη το 1950 [1]. Όταν η τεχνολογία ήταν σε πρώιμη μορφή, οι χρήσεις της περιορίζονταν σε εφαρμογές όπως το διάστημα. Ωστόσο, τα τελευταία πέντε χρόνια, η αγορά ηλιακής ενέργειας γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη. Από το 2010 έως το 2011, η παγκόσμια ανάπτυξη φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων ανήλθε στα 30 GW ανεβάζοντας το συνολικό νούμερο στα 70GW [2]. Η Εικόνα 1.2 δείχνει την εκθετική αύξηση, ιδιαίτερα κατά την τελευταία πενταετία, της ισχύος των εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων.

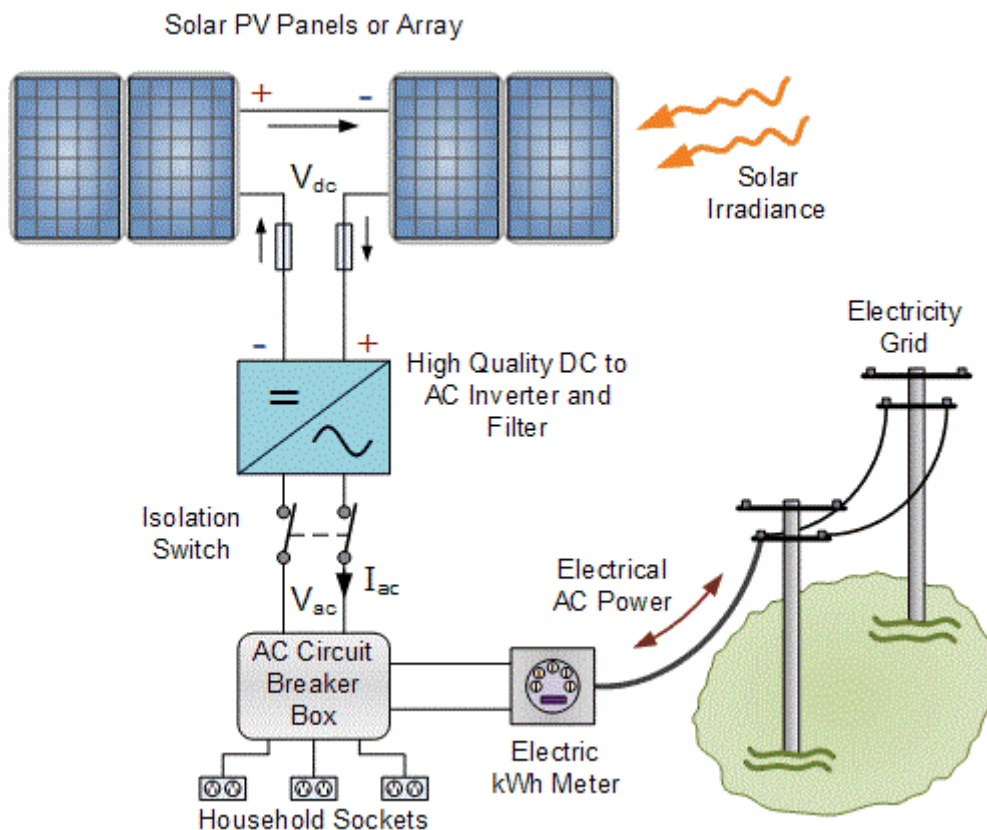


Εικόνα 1.2 Παγκόσμια ανάπτυξη Φ/Β συστημάτων (1995-2011) [2].

Η αύξηση της χρήσης Φ/Β συστημάτων μπορεί να αποδοθεί σε πολλούς παράγοντες, αλλά οι κύριοι λόγοι είναι το περιβαλλοντικό όφελος, οι νέοι νόμοι των κρατών, κίνητρα από τις παγκόσμιες αγορές και τέλος οι βελτιώσεις στην τεχνολογία των Φ/Β στοιχείων που είχαν σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και την αύξηση της αποδοτικότητάς τους [1]. Αν και υπάρχουν πολλοί τύποι υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των Φ/Β στοιχείων, η γενική τάση είναι ότι η αποδοτικότητά τους αυξάνεται. Με τη μείωση του κόστους, την αύξηση της αποδοτικότητας και τα κυβερνητικά κίνητρα δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι η χρήση της ηλιακής τεχνολογίας θα αυξηθεί περαιτέρω στο μέλλον.

### 1.3 Εφαρμογές Φ/Β συστημάτων

Οι ηλιακές εφαρμογές κυμαίνονται από μικρά οικιακά συστήματα που παράγουν μόνο μερικά KW μέχρι ηλιακά πάρκα που μπορούν να παράγουν μερικές εκατοντάδες MW. Η ικανότητα των Φ/Β συστημάτων να ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό στο μέγεθος είναι μια απόδειξη για το πόσο επεκτάσιμα και σπονδυλωτά είναι τα συστήματα αυτά. Ανεξάρτητα από την χρήση τους, η κύρια διάκριση των Φ/Β γίνεται σε αυτά που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρισμού ή όχι. Στην Εικόνα 1.3 φαίνεται η γενική τοπολογία των συνδεδεμένων στο δίκτυο Φ/Β συστημάτων [2].



Εικόνα 1.3 Γενικό διάγραμμα Φ/Β συστημάτων διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο [2].

Τα μη-διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα παρέχουν ενέργεια σε ένα τοπικό φορτίο και μόλις η παράγωγή ξεπεράσει τις ανάγκες του φορτίου η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται συνήθως σε συσσωρευτές για μεταγενέστερη χρήση. Τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συνδέονται στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής εγκατάστασης. Μερικά διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα έχουν επίσης τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές. Για ένα οικιακό Φ/Β σύστημα το τοπικό φορτίο περιλαμβάνει οτιδήποτε καταναλώνει ενέργεια στην οικία που έχει τοποθετηθεί. Τα Φ/Β συστήματα που δεν ήταν διασυνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο κατείχαν μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς, αλλά μέσα σε λίγο χρόνο αυτό άλλαξε με τα συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο να κυριαρχούν τα τελευταία χρόνια. Η άλλη τάση της αγοράς είναι να αυξηθεί σημαντικά ο αριθμός των οικιακών Φ/Β συστημάτων.

## 1.4 Αξιοπιστία Φ/B συστημάτων

Στις συμβατικές πηγές ενέργειας, η αστοχία που σχετίζεται με βλάβες έχει ως αποτέλεσμα το κόστος επισκευής και το κόστος της ενέργειας που δεν παράγεται όσο το σύστημα επισκευάζεται. Όταν η μονάδα είναι σε κατάσταση αδράνειας, δεν καταναλώνεται καύσιμο, και η παραγωγή συνεχίζεται όταν το σύστημα επισκευαστεί. Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κάθε φορά που το σύστημα είναι μη λειτουργικό χάνεται η δυναμική για παραγωγή ενέργειας και εσόδων. Η απώλεια δυνητικών εσόδων είναι σημαντική για συστήματα ανανεώσιμων πηγών, όπου η μεγάλη αρχική επένδυση αντισταθμίζεται από τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής της μονάδας. Κατά την εκτίμηση της απόδοσης της αρχικής επένδυσης και της τιμής της ενέργειας ανά KWh που παράγεται από ένα τέτοιο σύστημα, το σύστημα θεωρείται πως λειτουργεί χωρίς διακοπές. Τα Φ/B είναι εξαιρετικά αξιόπιστα, αλλά όπως οποιοδήποτε πολύπλοκο σύστημα, περιστασιακά υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί βλάβη. Η συντριπτική πλειοψηφία των βλαβών σχετίζεται με τον μετατροπέα ισχύος DC/AC [4]-[6]. Πρόκειται για μια συσκευή με ηλεκτρονικές και ηλεκτρολογικές διατάξεις, η οποία μετατρέπει το παραγόμενο από τη Φ/B γεννήτρια συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, συμβατό με το δίκτυο του ηλεκτρισμού. Όπως αναφέρθηκε, τα Φ/B συστήματα ποικίλουν σε μέγεθος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούν αντιστροφείς σε ένα ευρύ φάσμα μεγεθών και τοπολογιών [7]-[9], γεγονός που κάνει πολύπλοκη την αξιολόγηση και την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον σχεδιασμό των Φ/B αντιστροφέων χωρίς μετασχηματιστή λαμβάνοντας υπόψη την αξιοπιστία τους. Υπολογίζονται οι βέλτιστες τιμές για τα επί μέρους δομικά στοιχεία του αντιστροφέα ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος και να μεγιστοποιηθεί η παραγόμενη ενέργεια. Στους υπολογισμούς αυτούς σημαντικό ρόλο παίζει και ο αριθμός των πιθανών βλαβών κατά την διάρκεια ζωής του αντιστροφέα.



## 2.

# Αξιοπιστία Συστημάτων

---

Η ανάλυση της αξιοπιστίας ενός συστήματος έχει σκοπό την ανάπτυξη μεθόδων και εργαλείων για την πρόβλεψη και την αξιολόγηση των πιθανών βλαβών κατά τη διάρκεια ζωής του. Η αξιοπιστία είναι ένας παράγοντας που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος λόγω της εξάρτησης από αυτήν οικονομικών και άλλων παραγόντων. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές έννοιες και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αξιοπιστίας. Τέλος παρουσιάζονται οι τρόποι ανάκτησης πληροφοριών σχετικά με τις βλάβες ενός συστήματος.

### 2.1 Βασικές έννοιες αξιοπιστίας

Οι βλάβες σε ένα σύστημα χαρακτηρίζονται από μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf), που συμβολίζεται ως  $f(t)$ . Η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (cdf), η οποία περιγράφει την πιθανότητα μια βλάβη να έχει συμβεί πριν ή κατά το χρόνο  $t$ , έχει ως εξής:

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (1)$$

όπου  $F(\infty)=1$ . Η συνάρτηση της αξιοπιστίας, της πιθανότητας το σύστημα να είναι σε θέση να εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία υπό δεδομένες συνθήκες για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα  $t$  ορίζεται ως:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

Ο ρυθμός των βλαβών (failure rate), δηλαδή ο αριθμός των βλαβών στη μονάδα του χρόνου ορίζεται ως:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3)$$

Ο μέσος χρόνος βλάβης (MTTF) του συστήματος ορίζεται ως:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4)$$

Τέλος, υπάρχει ο μέσος χρόνος αποκατάστασης (MTTR) του συστήματος. Ο συνολικός μέσος χρόνος ανάμεσα σε διαδοχικές βλάβες του συστήματος είναι:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (5)$$

Μόλις διαπιστωθεί μια βλάβη, οι χρόνοι αποκατάστασης μπορούν να υπολογιστούν με ανάλογο τρόπο. Όταν είναι γνωστά το failure rate  $\lambda$  και ο ρυθμός αποκατάστασης  $\mu$ , η διαθεσιμότητα του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό του συνολικού χρόνου που ένα επισκευάσιμο σύστημα είναι λειτουργικό, έχει ως εξής [11]:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (6)$$

Όταν  $\mu \gg \lambda$  τότε  $A \rightarrow 1$ . Επομένως η διαθεσιμότητα αυξάνεται όσο το failure rate  $\lambda$  μειώνεται και ο ρυθμός αποκατάστασης  $\mu$  αυξάνεται. Σε ένα σύστημα που αποτελείται από  $N$  υποσυστήματα, η διαθεσιμότητα έχει ως εξής:

$$A = \prod_{i=1}^N A_i \quad (7)$$

όπου  $A_1, \dots, A_N$  είναι οι διαθεσιμότητες των επιμέρους υποσυστημάτων. Λόγω της (7), η διαθεσιμότητα όλου του συστήματος δεν δύναται να είναι μεγαλύτερη από αυτήν του πιο αδύναμου υποσυστήματος. Η εξίσωση (6) μπορεί να διατυπωθεί για το υποσύστημα  $i$  ως εξής:

$$A_i = (1 + \sigma_i)^{-1} \quad (8)$$

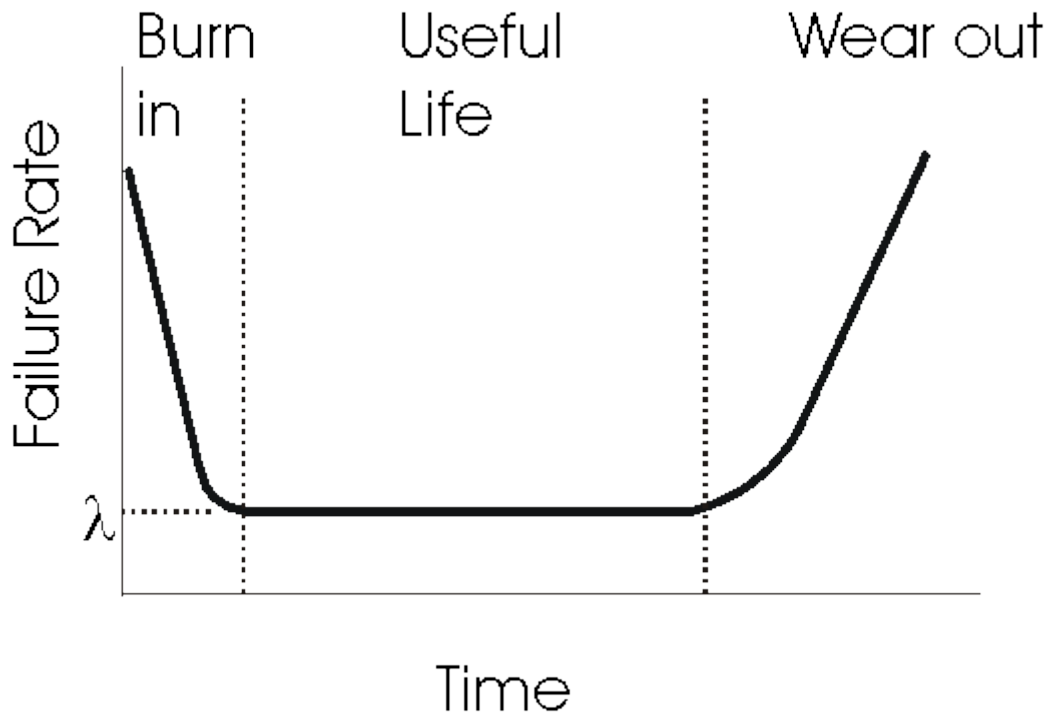
όπου:

$$\sigma_i = \frac{MTTR_i}{MTBF_i} \quad (9)$$

είναι η συμβολή του υποσυστήματος  $i$  στη μη-διαθεσιμότητα όλου του συστήματος.

## 2.2 Στατιστικές κατανομές στην ανάλυση αξιοπιστίας

Δύο από τις πιο σημαντικές στατιστικές κατανομές στην ανάλυση αξιοπιστίας είναι η εκθετική κατανομή και η κατανομή Weibull. Η αξιοπιστία του συστήματος γενικά ακολουθεί μια τάση που είναι γνωστή ως λεκανοειδής καμπύλη-bathtub curve (Εικόνα 2.1), στην οποία ο ρυθμός βλαβών μειώνεται για ένα σύντομο χρονικό διάστημα μετά την αρχή του χρόνου ζωής και κατόπιν παίρνει μια σταθερή τιμή για το μεγαλύτερο διάστημα ζωής. Τελικά, παρατηρείται μια αύξηση του ρυθμού βλαβών η οποία σηματοδοτεί το τέλος ζωής του συστήματος. Ο φθίνων ρυθμός στην αρχή και ο αυξανόμενος στο τέλος της ζωής του συστήματος αναπαριστώνται από την κατανομή Weibull, ενώ ο σταθερός ρυθμός που παρατηρείται ανάμεσα στις δυο προηγούμενες περιόδους αναπαριστάται από την εκθετική κατανομή, η οποία είναι μια ειδική μορφή της κατανομής Weibull. Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται επίσης για την αναπαράσταση των ρυθμών αποκατάστασης που συχνά δεν είναι σταθεροί.



Εικόνα 2.1 Η μεταβολή του ρυθμού βλαβών ενός συστήματος με τον χρόνο.

### 2.2.1 Εκθετική Κατανομή

Όταν ο ρυθμός βλαβών, όπως ορίστηκε στην (3), είναι σταθερός η pdf  $f(t)$  ακολουθεί την εκθετική κατανομή [12]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Λόγω της (1), η cdf είναι :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

και από την (2) η συνάρτηση αξιοπιστίας είναι:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (12)$$

Τέλος από την (4), ο MTTF είναι:

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (13)$$

Ένας σταθερός ρυθμός αποκατάστασης καταλήγει στις ίδιες εξισώσεις αν αντικαταστήσουμε τον ρυθμό βλαβών  $\lambda$  με τον ρυθμό αποκατάστασης  $\mu$  και τον MTTF με MTTR:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (14)$$

### 2.2.2 Κατανομή Weibull

Η pdf  $f(t)$  και η cdf  $F(t)$  της κατανομής Weibull με δύο παραμέτρους είναι:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta_f} \left( \frac{t}{\eta_f} \right)^{\beta-1} e^{-(t/\eta_f)^\beta} \quad (15)$$

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta_f)^\beta} \quad (16)$$

Σε αυτή την κατανομή, η  $\eta_f$  είναι η παράμετρος κλίμακας (scale factor) και η  $\beta$  είναι η παράμετρος μορφής (shape factor). Η παράμετρος κλίμακας είναι ανάλογη με τον MTTF:

$$MTTF = \eta_f \Gamma \left( \frac{1}{\beta} + 1 \right) \quad (17)$$

όπου  $\Gamma(\cdot)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα. Ο ρυθμός βλαβών λαμβάνεται από την (3):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta_f} \left( \frac{t}{\eta_f} \right)^{\beta-1} \quad (18)$$

Ένα από τα πιο επωφελή χαρακτηριστικά της κατανομής Weibull είναι η δυνατότητά της να παρέχει σχετικά ακριβή ανάλυση χρησιμοποιώντας ένα πολύ μικρό δείγμα δεδομένων [13]. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στην περίπτωση της αξιολόγησης της λειτουργίας πεδίου σχετικά αξιόπιστων συστημάτων όπως είναι τα Φ/Β συστήματα. Οι παράμετροι της Weibull κατανομής υπολογίζονται χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους όπως η εκτίμηση της μέγιστης πιθανότητας (maximum-likelihood estimation). Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι όταν

$\beta_f=1$ , η κατανομή Weibull με δύο παραμέτρους είναι ισοδύναμη με την εκθετική κατανομή με  $\lambda=1/\eta_f$ .

Οι παράμετροι της αποκατάστασης υπολογίζονται με ανάλογο τρόπο με τις παραμέτρους αστοχίας. Ο MTTR είναι:

$$MTTR = \eta_r \Gamma\left(\frac{1}{\beta_r} + 1\right) \quad (19)$$

Επίσης ο ρυθμός αποκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\mu(t) = \frac{\beta_r}{\eta_r} \left(\frac{t}{\eta_r}\right)^{\beta_r-1} \quad (20)$$

όπου  $\eta_r$  και  $\beta_r$  είναι οι παράμετροι scale και shape αντίστοιχα, που καθορίζουν την κατανομή του ρυθμού αποκατάστασης. Οι παράμετροι αποκατάστασης δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις παραμέτρους βλαβών.

## 2.3 Δεδομένα για τον ρυθμό βλαβών

Δεδομένα για τον ρυθμό βλαβών μπορούν να ανακτηθούν με διάφορους τρόπους. Οι πιο διαδεδομένοι είναι οι εξής:

- Ιστορικά στοιχεία για τη συσκευή ή το σύστημα υπό εξέταση.

Πολλοί οργανισμοί διατηρούν εσωτερικές βάσεις δεδομένων των πληροφοριών σχετικά με τις βλάβες των συσκευών ή των συστημάτων που παράγουν, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του failure rate για τις εν λόγω συσκευές ή συστήματα. Για νέες συσκευές ή συστήματα, τα ιστορικά δεδομένα για παρόμοιες συσκευές μπορούν να χρησιμεύσουν ως εκτίμηση.

- Κρατικά και εμπορικά στοιχεία

Εγχειρίδια δεδομένων με συχνότητες βλαβών για διάφορα εξαρτήματα είναι διαθέσιμα από κρατικές και εμπορικές πηγές. Διάφορες πηγές δεδομένων για αστοχίες είναι διαθέσιμες και εστιάζουν στα εξαρτήματα του εμπορίου, ηλεκτρονικά ή μη.

- Δοκιμές εξαρτημάτων

Η πιο ακριβής ανάκτηση δεδομένων βλαβών είναι οι δοκιμές σε δείγματα των πραγματικών συσκευών ή συστημάτων. Το κόστος αυτής της διαδικασίας είναι υψηλό, για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται συχνότερα οι δυο πηγές δεδομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω.

### Μονάδες μέτρησης

Ο ρυθμός βλαβών μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας κάθε μονάδα μέτρησης του χρόνου, αλλά οι ώρες είναι η πιο κοινή μονάδα. Επίσης εκφράζονται σε βλάβες ανά εκατομμύριο ώρες, ιδιαίτερα για μεμονωμένα δομικά στοιχεία, των οποίων η πιθανότητα αστοχίας είναι πολύ μικρή. Οι βλάβες στον χρόνο (failures in time-FIT) μιας συσκευής είναι ο αριθμός των βλαβών που αναμένονται σε ένα δισεκατομμύριο ( $10^9$ ) ώρες λειτουργίας. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στη βιομηχανία ημιαγωγών.

### Προσθετικότητα

Υπό ορισμένες παραδοχές (π.χ. παραδοχές για σταθερό ρυθμό βλαβών και ότι το θεωρούμενο σύστημα δεν έχει σχετικές αλληλεξαρτήσεις), ο ρυθμός βλαβών για ένα πολύπλοκο σύστημα είναι απλά το άθροισμα των επιμέρους ρυθμών των δομικών στοιχείων εφ' όσον οι μονάδες μέτρησης συμπίπτουν, π.χ. βλάβες ανά εκατομμύριο ώρες. Αυτό επιτρέπει τη δοκιμή των επιμέρους στοιχείων ή υποσυστημάτων, των οποίων οι ρυθμοί βλαβών στη συνέχεια προστίθενται για να υπολογιστεί ο συνολικός ρυθμός βλαβών του συστήματος.

## 3.

# Υπολογισμός ρυθμού βλαβών σε Φ/Β αντιστροφείς DC/AC

---

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται αρχικά η τοπολογία του αντιστροφέα στον οποίο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση. Παρουσιάζονται τα επιμέρους δομικά στοιχεία και τα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τοπολογίες. Κατόπιν αναλύεται το πρότυπο MIL-HDBK-217F με τη βοήθεια του οποίου υπολογίζονται οι ρυθμοί βλαβών των δομικών στοιχείων του αντιστροφέα. Τέλος παρουσιάζονται μερικές προσεγγίσεις για το πρόβλημα της αξιοπιστίας αντιστροφέων από τη σχετική βιβλιογραφία.

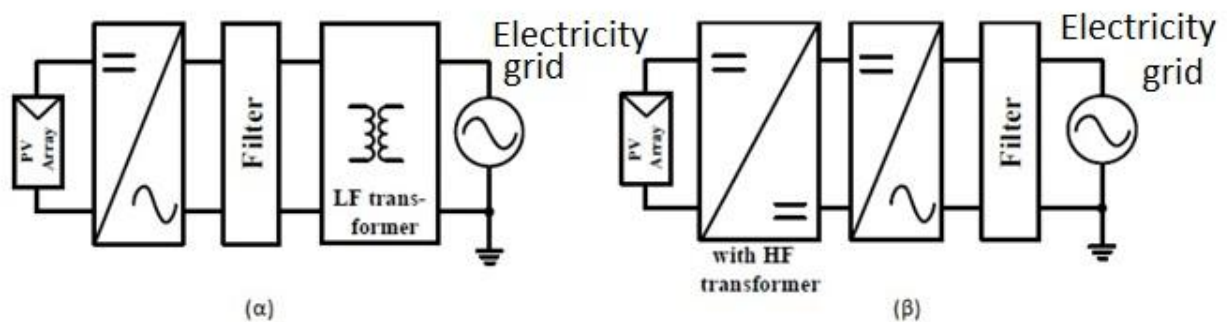
### 3.1 Τοπολογία αντιστροφέα

Ανάλογα με την ύπαρξη ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ των Φ/Β γεννητριών και του ηλεκτρικού δικτύου, οι αντιστροφείς DC/AC χαρακτηρίζονται απομονωμένοι ή μη. Η γαλβανική απομόνωση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή, ο οποίος έχει σημαντική επίδραση σε ένα διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα. Η παρουσία της γαλβανικής απομόνωσης εξαρτάται από τους τοπικούς κανονισμούς της εκάστοτε χώρας. Σε ορισμένες χώρες, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιταλία, η γαλβανική απομόνωση είναι προαπαιτούμενη και επιτυγχάνεται είτε από ένα χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή στην πλευρά του δικτύου ή

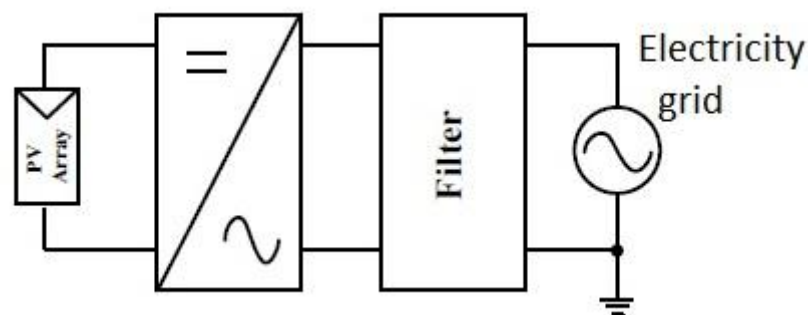


από έναν μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας στην πλευρά DC του αντιστροφέα, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στην Εικόνα. 3.1 (α) και (β), αντιστοίχως.

Υπάρχουν όμως χώρες όπως η Γερμανία και η Ισπανία, όπου η γαλβανική απομόνωση μπορεί να μην υφίσταται. Ένα τυπικό Φ/Β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή φαίνεται στην Εικόνα. 3.2. Η τοπολογία αυτή μειώνει το βάρος, το μέγεθος, το κόστος και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης ολόκληρου του συστήματος. Επιπροσθέτως αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος [14-17].

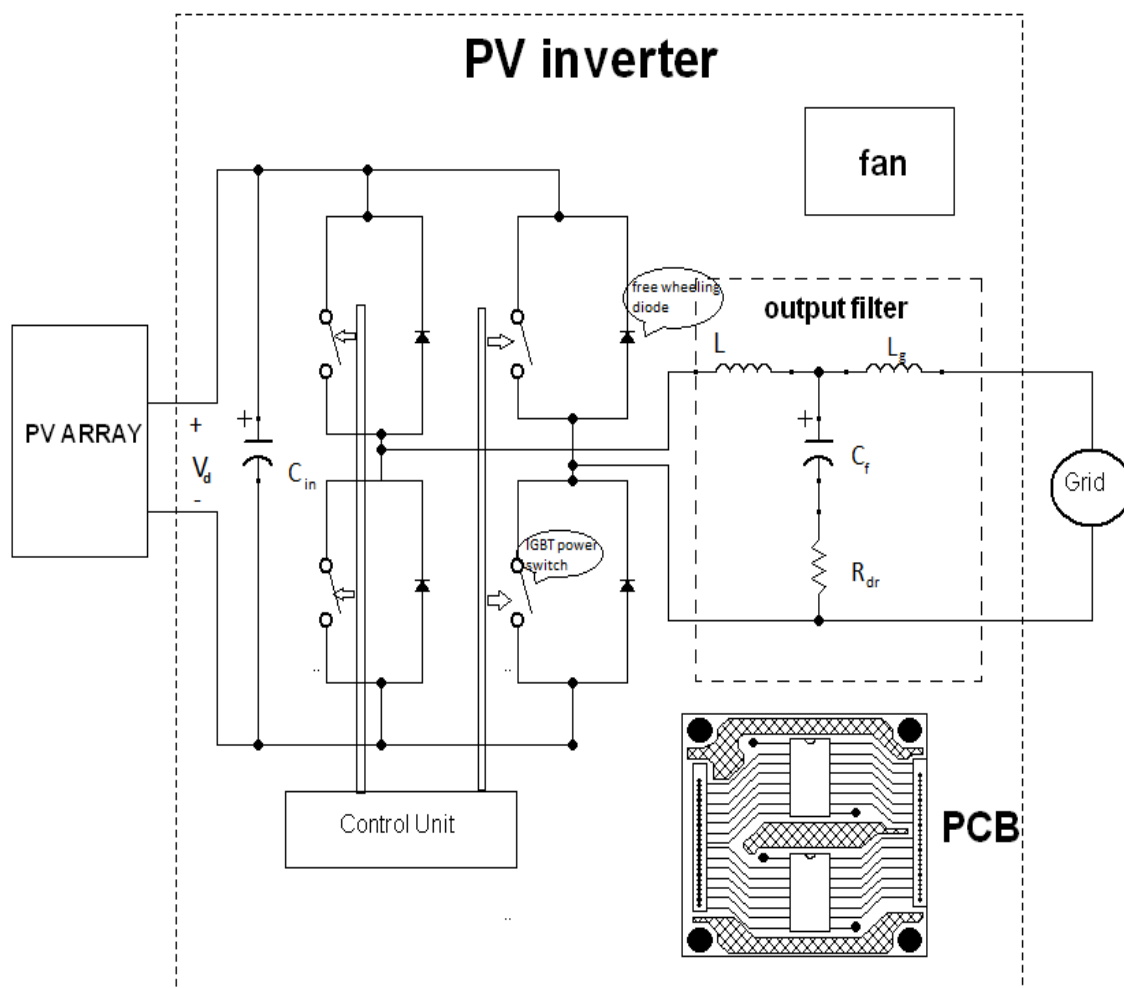


Εικόνα 3.1 Διασυνδεδεμένο Φ/Β με αντιστροφέα με γαλβανική απομόνωση: (α) χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστής στην πλευρά του δικτύου (β) υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής στην DC πλευρά.

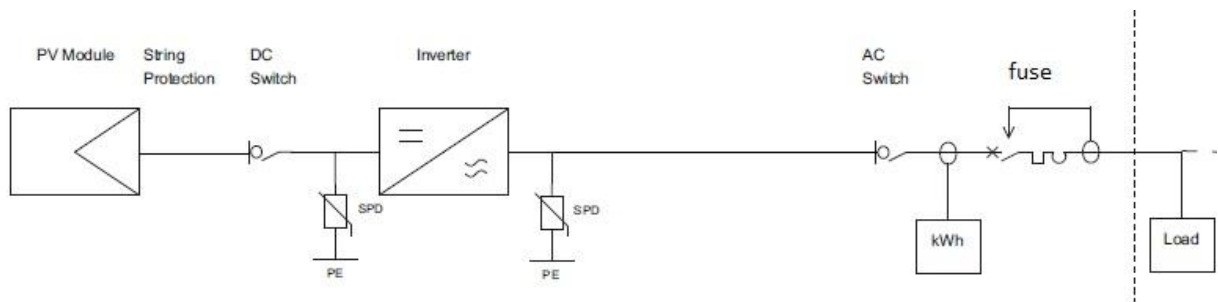


Εικόνα 3.2 Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα με αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή.

Η λεπτομερής τοπολογία του αντιστροφέα και του Φ/Β συστήματος τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία φαίνονται στις Εικόνες 3.3 και 3.4. Πρόκειται για τοπολογία πλήρους γέφυρας, χωρίς μετασχηματιστή, με LCL φίλτρο εξόδου. Το LCL φίλτρο βελτιώνει το κόστος, καθώς μικρότερα πηνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σύγκριση με τα L-φίλτρα προκειμένου να επιτευχθούν τα ίδια αποτελέσματα [17],[18]. Το κομμάτι ισχύος του αντιστροφέα βασίζεται σε διακόπτες ισχύος τύπου IGBT με διόδους ελεύθερης διέλευσης (free-wheeling diodes).



Εικόνα 3.3 Τοπολογία πλήρους γέφυρας αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή [32].



Εικόνα 3.4 Αρχιτεκτονική του Φ/Β συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η αρχιτεκτονική των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο Φ/Β συστημάτων. Μεταξύ Φ/Β γεννήτριας και αντιστροφέα υπάρχει διακόπτης DC, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα αποσύνδεσης της Φ/Β γεννήτριας για σκοπούς συντήρησης και ασφάλειας. Μεταξύ αντιστροφέα και ηλεκτρικού δικτύου υπάρχουν διακόπτης AC και ασφάλεια για τη προστασία των AC γραμμών του ηλεκτρικού δικτύου.

Για να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός του ρυθμού βλαβών ολόκληρου του αντιστροφέα, αυτός αποδομείται στα επιμέρους στοιχεία του. Κατόπιν οι επιμέρους ρυθμοί βλαβών προστίθενται για να καταλήξουμε στον συνολικό. Τα δομικά στοιχεία του αντιστροφέα είναι τα ακόλουθα:

- ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής  $C_{in}$  στην είσοδο του αντιστροφέα,
- οι 4 δίοδοι και τα 4 IGBTs του υποσυστήματος ισχύος (σε διάταξη πλήρους γέφυρας),
- τα πηνία  $L$  και  $L_g$  του LCL φίλτρου,
- η αντίσταση  $R_{dr}$  του LCL φίλτρου,
- ο πυκνωτής  $C_f$  του LCL φίλτρου,
- ο ανεμιστήρας του συστήματος,
- η μονάδα ελέγχου με τα FPGA, DSP boards κ.λπ. ,
- ο διακόπτης AC στην έξοδο του αντιστροφέα,
- ο διακόπτης DC στην είσοδο του αντιστροφέα,

- η πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB),
- όλα τα καλώδια διασύνδεσης των εξαρτημάτων και συσκευών του συστήματος και
- η ασφάλεια στην έξοδο του αντιστροφέα.

### 3.2 Το πρότυπο MIL-HDBK-217F

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρότυπο MIL-HDBK-217F για τον υπολογισμό του ρυθμού βλαβών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Το MIL-HDBK-217F [20] είναι το παλαιότερο και πιο διαδεδομένο πρότυπο αξιοπιστίας. Αναπτύχθηκε το 1962 από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ για να παρέχει μια κοινή βάση για σύγκριση προβλέψεων αξιοπιστίας των ανταγωνιστικών σχεδιασμών ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Παρέχει μοντέλα αξιοπιστίας για πολλούς τύπους εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά συστήματα. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε ένα συνδυασμό δεδομένων πεδίου, στατιστικής ανάλυσης και απλουστευμένων παραδοχών για τα εξαρτήματα που περιλαμβάνει. Έχει συχνά επικριθεί ότι παράγει υπολογισμούς αξιοπιστίας που δείχνουν μικρότερη αξιοπιστία από την πραγματική [21],[22].

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύχθηκαν μια σειρά από εναλλακτικές λύσεις για το MIL-HDBK-217F, όπως περιγράφεται στο [23], το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά από την Bellcore και το πρότυπο IEEE 493 [24], το οποίο αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει ζητήματα αξιοπιστίας συστημάτων ενέργειας. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία βασίζονται στο MIL-HDBK-217F κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας του. Ωστόσο, είναι αρκετά ευέλικτοι ώστε να χρησιμοποιηθούν πιθανότητες αποτυχίας από άλλες πηγές.

Τα failure rates που μοντελοποιούνται στο [20] είναι σταθερά στον χρόνο και παίρνουν τη μορφή:

$$\lambda = \lambda_b \prod_{i=1}^n \pi_i \quad (21)$$

όπου  $\lambda_b$  είναι ο βασικός ρυθμός αστοχίας και  $\pi_i$  είναι συντελεστές που εξαρτώνται από το περιβάλλον λειτουργίας, την ποιότητα του εξαρτήματος και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν

την αξιοπιστία (ο αριθμός των συντελεστών  $n$  εξαρτάται από τον τύπο του εξαρτήματος). Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι βλάβες ανά ένα εκατομμύριο ώρες.

### 3.3 Μοντέλα για τον υπολογισμό των ρυθμών βλαβών

Παρακάτω αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των ρυθμών βλαβών για κάθε δομικό στοιχείο του αντιστροφέα όπως παρουσιάστηκαν πριν:

1) Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής εισόδου: ο ρυθμός βλαβών για έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή όπως περιγράφεται στο [20] είναι:

$$\lambda_c = \lambda_b \pi_{cv} \pi_Q \pi_E \quad (22)$$

όπου  $\pi_{cv}$  είναι ο συντελεστής χωρητικότητας (capacitance factor),  $\pi_Q$  είναι ο συντελεστής ποιότητας (quality factor), και  $\pi_E$  είναι ο συντελεστής του περιβάλλοντος (environment factor). Ο βασικός ρυθμός αστοχίας  $\lambda_b$  για ηλεκτρολυτικό πυκνωτή με ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας 105 ° C είναι:

$$\lambda_b = 0.00254 \left[ \left( \frac{S}{0.5} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 5.09 \left( \frac{T + 273}{378} \right)^5 \right] \quad (23)$$

όπου ο συντελεστής  $S$  είναι το πηλίκο της τάσης λειτουργίας προς τη μέγιστη ονομαστική τάση του πυκνωτή και η μεταβλητή  $T$  είναι η θερμοκρασία λειτουργίας σε βαθμούς Κελσίου.

Ο συντελεστής χωρητικότητας  $\pi_{cv}$  είναι:

$$\pi_{cv} = 0.34C^{0.18} \quad (24)$$

όπου  $C$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα. Οι τιμές για τα  $\pi_Q$  και  $\pi_e$  παρατίθενται στο [20] για διάφορες ποιοτικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές. Επειδή ο πυκνωτής εισόδου, όπως και τα άλλα εξαρτήματα του αντιστροφέα προς βελτιστοποίηση δεν έχει στρατιωτικές προδιαγραφές,

θεωρείται ότι  $\pi_Q=10$ . Τέλος ο πυκνωτής λειτουργεί σε εσωτερικό περιβάλλον με σχετικά ελεγχόμενες συνθήκες οπότε  $\pi_E=1$ .

2) IGBTs: για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, επιλέχτηκε η μέθοδος που περιγράφεται στο [22]. Η μέθοδος αυτή, καθορίζει τον ρυθμό βλαβών ενός IGBT ίσο με το μισό εκείνου ενός ισοδύναμου σε ισχύ MOSFET. Έτσι, ο ρυθμός βλαβών για κάθε IGBT είναι:

$$\lambda_{IGBT} = 0.5\lambda_b\pi_T\pi_Q\pi_E \quad (25)$$

όπου  $\pi_T$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας (temperature factor) και  $\pi_Q$  και  $\pi_E$  είναι οι συντελεστές ποιότητας και περιβάλλοντος λειτουργίας, αντίστοιχα. Για τα MOSFETs ισχύει ότι  $\lambda_b = 0.060$ . Ο συντελεστής θερμοκρασίας  $\pi_T$  είναι:

$$\pi_T = \exp\left[-1925\left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298}\right)\right] \quad (26)$$

όπου  $T_j$  είναι η θερμοκρασία λειτουργίας των ημιαγωγών του IGBT (junction temperature). Για μη στρατιωτικών προδιαγραφών IGBTs και για τις συνθήκες λειτουργίας των IGBTs έχουμε:  $\pi_Q=5$  και  $\pi_E=1$ . Οι δίοδοι και τα IGBTs βρίσκονται σε κοινή ψήκτρα οπότε η θερμοκρασία  $T_j$  υπολογίζεται ως εξής:

$$T_j(t, y) = T_A(t, y) + \theta_{jc,ps} \cdot P_{ps,i}(t, y) + \theta_{ca} \cdot \sum_{j=1}^4 [P_{ps,j}(t, y) + P_{ld,j}(t, y)] \quad (27)$$

όπου  $T_A(t, y)$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος του αντιστροφέα,  $\theta_{jc,ps}$ , είναι η θερμική αντίσταση μεταξύ ημιαγωγών και κελύφους του IGBT,  $\theta_{ca}$  είναι η θερμική αντίσταση της ψήκτρας και  $P_{ps,j}(t, y)$ ,  $P_{ld,j}(t, y)$  οι απώλειες ισχύος σε κάθε IGBT και δίοδο, αντίστοιχα. Οι απώλειες ισχύος των IGBTs υπολογίζονται με τα μοντέλα που περιγράφονται στα [26],[27] και τα υπόλοιπα μεγέθη δίνονται από τον κατασκευαστή.

3) Δίοδοι: ο ρυθμός βλαβών για τις διόδους που χρησιμοποιούνται στον αντιστροφέα όπως περιγράφεται στο [20] δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{diode} = \lambda_b\pi_T\pi_S\pi_C\pi_Q\pi_E \quad (28)$$

---

Για τον βασικό ρυθμό βλαβών ισχύει ότι  $\lambda_b=0.025$ . Ο συντελεστής θερμοκρασίας  $\pi_T$  είναι:

$$\pi_T = \exp \left[ -3091 \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (29)$$

Η θερμοκρασία  $T_j$  υπολογίζεται με ανάλογο τρόπο με τα IGBTs:

$$T_j(t, y) = T_A(t, y) + \theta_{jc,d} \cdot P_{ld,i}(t, y) + \theta_{ca} \cdot \sum_{j=1}^4 [P_{lps,j}(t, y) + P_{ld,j}(t, y)] \quad (30)$$

όπου  $T_A(t, y)$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος του inverter,  $\theta_{jc,d}$ , είναι η θερμική αντίσταση μεταξύ ημιαγωγών και κελύφους της διόδου,  $\theta_{ca}$  είναι η θερμική αντίσταση της ψήκτρας και  $P_{lps,j}(t, y)$ ,  $P_{ld,j}(t, y)$  οι απώλειες ισχύος σε κάθε IGBT και δίοδο αντίστοιχα. Οι απώλειες ισχύος των διόδων υπολογίζονται με τα μοντέλα που περιγράφονται στα [26],[27] και τα υπόλοιπα μεγέθη δίνονται από τον κατασκευαστή.

Ο συντελεστής  $\pi_s$  είναι:

$$\pi_s = \begin{cases} 0.054, V_s < 0.3 \\ V_s^{2.43}, 0.3 < V_s \leq 1 \end{cases} \quad (31)$$

όπου  $V_s$  είναι το πηλίκο της τάσης στα άκρα της διόδου προς την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση. Για μη-στρατιωτικών προδιαγραφών διόδους και για τις συνθήκες λειτουργίας τους στον Φ/Β αντιστροφέα έχουμε:  $\pi_Q=5.5$  και  $\pi_E=1$ . Ο συντελεστής κατασκευής (construction factor)  $\pi_C$  για τις διόδους του αντιστροφέα είναι ίσος με 1.

4) Πηνία (L+L<sub>g</sub>): όπως περιγράφεται στο [28] προκύπτουν τα εξής για τον ρυθμό βλαβών του πηνίου:

$$\lambda_{\_INDUCTOR} = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E \quad (32)$$

Ο βασικός ρυθμός  $\lambda_b$  είναι ίσος με 0.00003. Ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι:

$$\pi_T = \exp \left[ \frac{-0.11}{(8.617)(10)^{-5}} \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right] \quad (33)$$

Για την θερμοκρασία  $T_j$  ισχύουν τα παρακάτω:

$$T_L(t, y) = T_A(t, y) + 1.1 \cdot 125 \cdot P_{l,L}(t, y) \cdot V_n / (S_l \cdot L \cdot P_n) \quad (34)$$

όπου  $T_A(t, y)$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $P_{l,L}(t, y)$  είναι η απώλεια ισχύος στο πηνίο,  $V_n$  και  $P_n$  οι ονομαστικές τιμές για την τάση εξόδου και την ισχύ εξόδου του αντιστροφέα, αντίστοιχα, και  $S_l$  η επιφάνεια ακτινοβολίας του πηνίου ανά μονάδα αυτεπαγωγής και ανά μονάδα ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας. Τα μεγέθη  $V_n$ ,  $P_n$ ,  $S_l$  δίνονται από τον κατασκευαστή και οι απώλειες ισχύος υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα από τα [26],[27]. Για μη-στρατιωτικών προδιαγραφών πηνία και για τις συνθήκες λειτουργίας τους στον Φ/Β αντιστροφέα είναι:  $\pi_Q = 3$  και  $\pi_E = 1$ .

5) Αντίσταση LCL φίλτρου: ο ρυθμός βλαβών για την αντίσταση του φίλτρου όπως περιγράφεται στο [20] είναι:

$$\lambda_{RESISTOR} = \lambda_b \pi_R \pi_Q \pi_E \quad (35)$$

Για τον βασικό ρυθμό  $\lambda_b$  ισχύει ότι:

$$\lambda_b = 4.5 \cdot 10^{-9} \exp \left[ 12 \left( \frac{T_A + 273}{343} \right) \right] \exp \left[ \frac{S}{0.6} \left( \frac{T_A + 273}{273} \right) \right] \quad (36)$$

όπου  $T_A$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος και  $S$  το πηλίκο της ισχύος που αναπτύσσεται στην αντίσταση προς την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ. Ο συντελεστής αντίστασης (resistance factor) υπολογίζεται ως εξής:



<b>Πίνακας 3.1. Τιμές του συντελεστή <math>\pi_R</math> για διάφορες τιμές του <math>R</math></b>	
Αντίσταση (Ohms)	$\pi_R$
$R < 0.1 \text{ M}$	1
$0.1 \text{ M} \leq R < 1 \text{ M}$	1.1
$1 \text{ M} \leq R < 10 \text{ M}$	1.6
$R > 10 \text{ M}$	2.5

Για μη στρατιωτικών προδιαγραφών αντιστάσεις και για τις συνθήκες λειτουργίας τους στον Φ/Β αντιστροφέα θεωρείται ότι:  $\pi_Q = 15$  και  $\pi_E = 1$ .

6) Πυκνωτής του LCL φίλτρου: ο ρυθμός βλαβών για πυκνωτή όπως περιγράφεται στο [20] είναι:

$$\lambda_{c2} = \lambda_b \pi_{cv} \pi_Q \pi_E \quad (37)$$

όπου  $\pi_{cv}$  είναι ο συντελεστής χωρητικότητας,  $\pi_Q$  είναι ο συντελεστής ποιότητας, και  $\pi_E$  είναι ο συντελεστής του περιβάλλοντος. Ο βασικός ρυθμός βλαβών  $\lambda_b$  για πυκνωτή με ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας  $105^\circ \text{C}$  είναι:

$$\lambda_b = 0.00099 \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_C + 273}{358} \right)^{18} \right] \quad (38)$$

όπου ο συντελεστής  $S$  είναι το πηλίκο της τάσης λειτουργίας προς τη μέγιστη ονομαστική τάση του πυκνωτή και η μεταβλητή  $T_C$  είναι η θερμοκρασία λειτουργίας σε βαθμούς Κελσίου.

Ο συντελεστής χωρητικότητας  $\pi_{cv}$  είναι:

$$\pi_{cv} = 1.1 C^{0.085} \quad (39)$$

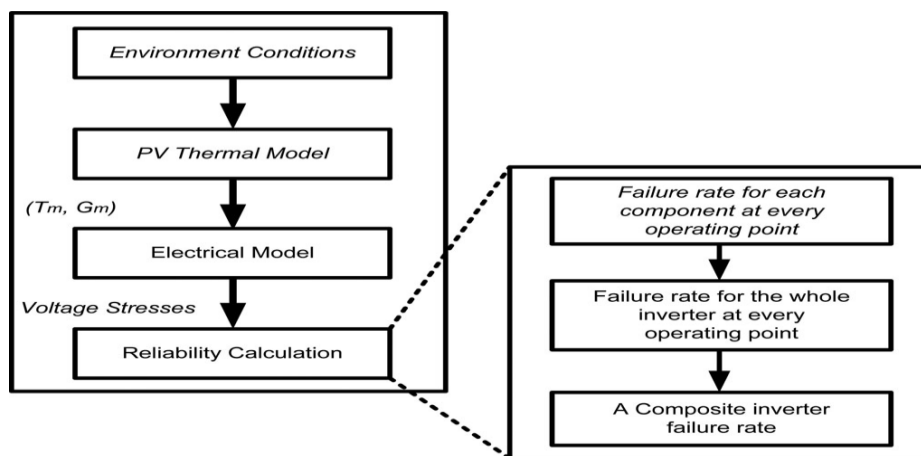
όπου  $C$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα του πυκνωτή. Οι τιμές για τα  $\pi_Q$  και  $\pi_E$  παρατίθενται στο [20] για διάφορες ποιοτικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές. Επειδή ο πυκνωτής του φίλτρου όπως και τα άλλα εξαρτήματα του Φ/Β αντιστροφέα δεν έχει στρατιωτικές προδιαγραφές, τίθεται  $\pi_Q=10$ . Τέλος, ο πυκνωτής λειτουργεί σε εσωτερικό περιβάλλον με σχετικά ελεγχόμενες συνθήκες οπότε  $\pi_E=1$ .

Υπόλοιπα εξαρτήματα: για να πραγματοποιηθεί πιο ρεαλιστική ανάλυση αξιοπιστίας του Φ/Β αντιστροφέα, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές για τα failure rates των υπόλοιπων εξαρτημάτων. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Όλες οι τιμές αφορούν ένα εξάρτημα. Στην περίπτωση που υπάρχουν πολλά εξαρτήματα ίδιου τύπου (IGBTs, δίοδοι, καλώδια, κ.λπ.) πολλαπλασιάζεται ο αριθμός που προκύπτει από τα παραπάνω μοντέλα με τον αριθμό των εξαρτημάτων.

<b>Πίνακας 3.2. Failure rates υπόλοιπων εξαρτημάτων</b>	
<u>Τύπος Εξαρτήματος</u>	<u>Ρυθμός Βλαβών (αριθμός βλαβών/10<sup>6</sup> ώρες) [πηγή αναφοράς]</u>
Μονάδα ελέγχου	17.2 [22]
Ανεμιστήρας	1.36 [10]
AC διακόπτης	0.034 [29]
DC διακόπτης	0.2 [29]
Καλώδιο	0.00024 [29]
Ασφάλεια	5.712 [29]
PCB	2.1696 [30]

### 3.4 Μέθοδοι για ανάλυση αξιοπιστίας αντιστροφέα.

Τα τελευταία χρόνια κρίθηκε αναγκαίο κατά τον σχεδιασμό αντιστροφέων στα Φ/Β συστήματα να λαμβάνονται υπόψη το κόστος και η αξιοπιστία. Μια μέθοδος ανάλυσης αξιοπιστίας παρουσιάζεται στο [28]. Αναλύει διάφορες τοπολογίες αντιστροφέα με μέτρο σύγκρισης το MTBF. Η μεθοδολογία παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5 Μεθοδολογία ανάλυσης αξιοπιστίας Φ/Β αντιστροφέων.

Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα, καταλήγει σε ένα εύρος σημείων λειτουργίας θερμοκρασίας και επίπεδων ηλιακής ακτινοβολίας σε ζεύγη ( $T_m$ ,  $G_m$ ). Κατόπιν, με τη βοήθεια των προδιαγραφών του συστήματος (τάση εξόδου και τοπολογία του αντιστροφέα) και των μαθηματικών μοντέλων στο [31], υπολογίζονται όλοι οι ηλεκτρικοί συντελεστές που χρησιμοποιούνται στο πρότυπο MIL-HDBK-217F κατά τον υπολογισμό των failure rates.

Ο MTBF υπολογίζεται με 5 διαφορετικούς τρόπους:

- σε κάθε σημείο λειτουργίας ( $T_m$ ,  $G_m$ ),
- στη χειρότερη περίπτωση όπου ο MTBF ελαχιστοποιείται,

- ο MTBF, που συμβαίνει στη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας και ακτινοβολίας,
- ο αριθμητικός μέσος των MTBF που υπολογίζεται ως εξής:

$$MTBF_{av} = \frac{1}{L} \left( \sum_{i=1}^L MTBF_i \right) \quad (40)$$

όπου  $MTBF_i$  ο MTBF του αντιστροφέα στο σημείο λειτουργίας  $i$  και  $L$  ο συνολικός αριθμός σημείων λειτουργίας.

Τέλος, δεδομένου ότι η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει τα failure rates όλων των εξαρτημάτων, η κατανομή της χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ενός σταθμισμένου (weighted) MTBF.

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής είναι το πιο ευάλωτο εξάρτημα, με το χαμηλότερο MTBF. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή προσφέρει μια ποσοτική εκτίμηση του MTBF στις αναμενόμενες λειτουργικές συνθήκες και όχι μόνο σε ένα σημείο λειτουργίας, το οποίο μπορεί να έχει μια μικρή πιθανότητα εμφάνισης.

## 4.

# Ανάλυση αλγορίθμου βελτιστοποίησης

---

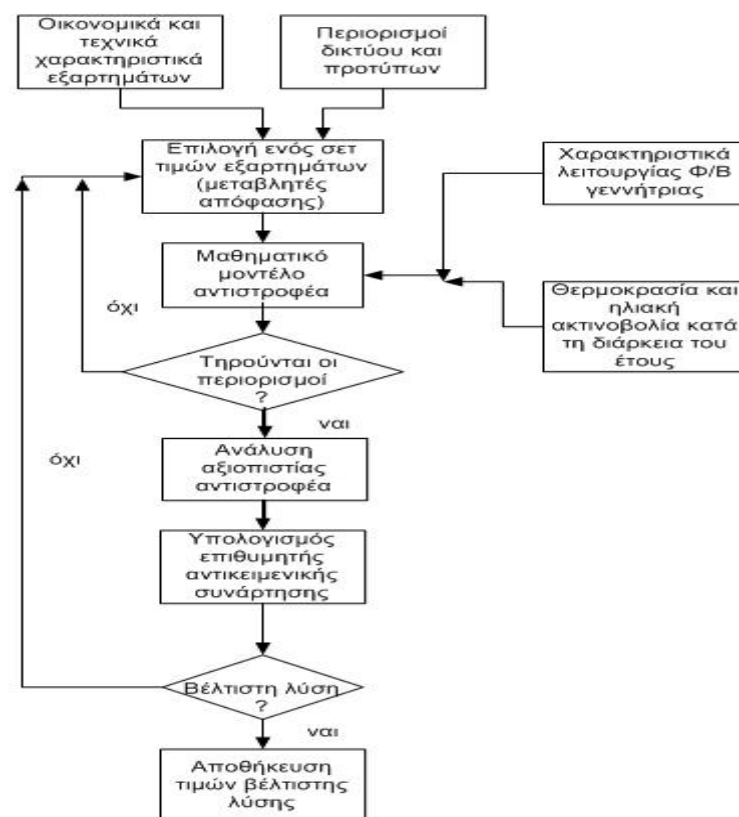
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη βέλτιστη σχεδίαση του αντιστροφέα λαμβάνοντας υπόψη την αξιοπιστία του. Αρχικά αναλύονται οι είσοδοι και οι έξοδοι του αλγορίθμου. Κατόπιν περιγράφονται το μαθηματικό μοντέλο του αντιστροφέα και οι περιορισμοί που λαμβάνονται υπόψη κατά την βελτιστοποίηση. Τέλος αναλύονται τα διάφορα εργαλεία από το Global Optimization Toolbox του Matlab, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν.

### 4.1 Είσοδοι και έξοδοι του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Ο στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης ενός Φ/Β αντιστροφέα είναι, δεδομένης της τοπολογίας του, ο καθορισμός των τιμών των εξαρτημάτων, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση, ανάλογα με τη φύση του προβλήματος) ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού (π.χ. κόστος, παραγόμενη ενέργεια κλπ.). Κατά τη βελτιστοποίηση πρέπει να πληρούνται και οι προδιαγραφές απόδοσης του συστήματος.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Η τοπολογία του αντιστροφέα που βελτιστοποιείται έχει περιγράψει στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι είσοδοι του αλγορίθμου είναι οι ακόλουθοι:

- τιμές και χαρακτηριστικά, που καθορίζουν τις ιδιότητες αγωγιμότητας (conducting) και μεταγωγής (switching) των ημιαγωγών ισχύος του αντιστροφέα,
- τιμές και χαρακτηριστικά των πυκνωτών και των μαγνητικών στοιχείων του LCL φίλτρου εξόδου,
- η τοπολογία και οι προδιαγραφές του Φ/Β αντιστροφέα (π.χ. ονομαστική ισχύς, η συχνότητα εξόδου, κ.λπ.),
- η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των αρμονικών του ρεύματος εξόδου όπως επιβάλλεται από τα διεθνή πρότυπα,
- τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της Φ/Β γεννήτριας που συνδέεται στη DC είσοδο του αντιστροφέα (π.χ. ονομαστική ισχύς, τάση ανοικτού κυκλώματος, κ.λπ.) και
- οι ωριαίες χρονοσειρές της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους.



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές της συχνότητας μεταγωγής  $f_s$  και τις τιμές των εξαρτημάτων του φίλτρου εξόδου LCL (δηλ.  $L$ ,  $L_g$  και  $C_f$  στην Εικόνα 3.3). Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται μεταβλητές απόφασης και αποθηκεύονται στο διάνυσμα  $X$  ( $X=[L \ L_g \ C_f \ f_s]$ ). Τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα που έχει στόχο να ελαχιστοποιήσει ή να μεγιστοποιήσει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις-objective functions ( $A/\Sigma$ ). Ως  $A/\Sigma$ , ο αλγόριθμος καλείται εναλλακτικά να ελαχιστοποιήσει είτε το κόστος, είτε το άθροισμα των μη-σταθερών ρυθμών βλαβών, είτε το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) του αντιστροφέα. Επίσης έχει εφαρμοστεί για να μεγιστοποιήσει την ενέργεια που παρέχει ο αντιστροφέας στο δίκτυο.

Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, νέα σύνολα τιμών των μεταβλητών απόφασης παράγονται επαναληπτικά. Στη συνέχεια, η  $A/\Sigma$  αξιολογείται χρησιμοποιώντας το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο της συγκεκριμένης τοπολογίας Φ/Β αντιστροφέων. Τα σύνολα των μεταβλητών απόφασης πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς που διέπουν τη λειτουργία του αντιστροφέα. Κατόπιν αναλύεται η αξιοπιστία του αντιστροφέα και η συνολική διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η καθολική βέλτιστη λύση της εκάστοτε  $A/\Sigma$ .

## 4.2 Μαθηματικό μοντέλο του αντιστροφέα

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία, η τάση και η ισχύς εξόδου της Φ/Β γεννήτριας υπολογίζονται σε ωριαία βάση για μια περίοδο ενός έτους. Θεωρείται, ότι με τη βοήθεια της μονάδας ελέγχου τροφοδοτείται στο Φ/Β αντιστροφέα η μέγιστη ισχύς της Φ/Β γεννήτριας. Η ισχύς εξόδου της Φ/Β γεννήτριας τη στιγμή  $t$  ( $1 \leq t \leq 8760$ ),  $P_{pv, t}(W)$ , υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναλύεται στο [33]. Οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται στις χρονοσειρές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, στις ηλεκτρικές προδιαγραφές των Φ/Β μονάδων και την τοπολογία τους (π.χ. σύνδεση σε σειρά ή παράλληλα).

Η ισχύς που παράγεται από τη Φ/Β γεννήτρια κάθε χρόνο λειτουργίας της είναι:

$$P_{pv}(t, y) = [1 - y \cdot r(y) \cdot P_{pv, t}(t)] \quad (41)$$

όπου  $y$  ο αριθμός του χρόνου λειτουργίας ( $1 \leq y \leq n$ ), και  $r(y)$  (%/χρόνο) είναι ο συντελεστής ετήσιας πτώσης της απόδοσης της Φ/Β γεννήτριας.

Το ρεύμα εξόδου  $I_{o,t}$ , τη στιγμή  $t$  ( $1 \leq t \leq 8760$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση ισορροπίας ισχύος:

$$P_{PV,t} = P_{tot,t} + V_n \cdot I_{o,t} \quad (42)$$

όπου  $P_{tot,t}$  είναι η συνολική απώλεια ισχύος του αντιστροφέα κατά τη στιγμή  $t$  ( $1 \leq t \leq 8760$ ). Η τιμή του  $I_{o,t}$  υπολογίζεται με μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης.

Σύμφωνα με το [34], το LCL φίλτρο σχεδιάζεται έτσι ώστε η κυμάτωση του ρεύματος RF (%), στην έξοδο του αντιστροφέα να είναι μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπτό όριο  $RF_{max}$  (%), όπως επιβάλλεται από τους κανονισμούς και τα πρότυπα του δικτύου:

$$RF \leq RF_{max} \quad (43)$$

Η συνολική τιμή της αυτεπαγωγής του φίλτρου LCL πρέπει να είναι μικρότερη από 0,1 pu προκειμένου να περιορίσει την πτώση τάσης AC:

$$L + L_g \leq 0.1 \cdot L_b \quad (44)$$

όπου  $L_b$  η τιμή της αυτεπαγωγής βάσης ( $L_b = E_n^2 / P_n 2\pi f$ ).

Προκειμένου να περιοριστεί η μείωση του συντελεστή ισχύος στην ονομαστική ισχύ, η τιμή του πυκνωτή φίλτρου,  $C_f$ , επιλέγεται ώστε η άεργος ισχύς του να είναι μικρότερη από 5% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα:

$$C_f \leq 0.05 \cdot C_b \quad (45)$$

Επιπροσθέτως, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι αποφεύγονται τα προβλήματα συντονισμού κατά τη λειτουργία του LCL φίλτρου, η συχνότητα συντονισμού  $f_{res}$  (Hz) του φίλτρου LCL επιλέγεται ως εξής:

$$10 \cdot f \leq f_{res} \leq \frac{f_s}{2} \quad (46)$$



όπου  $f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L+L_g}{L_g C_f L}}$ . Επιπλέον, η μέγιστη δυνατή τιμή του  $f_s$  υπαγορεύεται από τη μέγιστη ταχύτητα μεταγωγής των διακοπών ισχύος,  $f_{smax}$  (Hz), που καθορίζεται από τον κατασκευαστή τους:

$$f_s \leq f_{smax} \quad (47)$$

Η τιμή της αντίστασης απόσβεσης,  $R_{dr}$  ( $\Omega$ ), τίθεται ίση με τη σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή του φίλτρου στη συχνότητα συντονισμού του LCL φίλτρου:

$$R_{dr} = \frac{1}{C_f 2\pi f_{res}} \quad (48)$$

Η συνολική απώλεια ισχύος του αντιστροφέα,  $P_{tot}$  (W), είναι ίση με το άθροισμα των απωλειών αγωγιμότητας και μεταγωγής σε IGBTs και διόδους,  $P_{cond}$  (W) και  $P_{sw}$  (W), αντιστοίχως, των απωλειών ισχύος στην αντίσταση απόσβεσης του φίλτρου,  $P_d$  (W), των απωλειών ισχύος στο πηνίο LCL (core losses και winding losses),  $P_{L,c}$  (W) και  $P_{L,r}$  (W) και τέλος των απωλειών στην μονάδα ελέγχου,  $P_{cu}$  (W):

$$P_{tot} = P_{cond} + P_{sw} + P_d + P_{L,c} + P_{L,r} + P_{cu} \quad (49)$$

Οι τιμές των  $P_{cond}$  (W) και  $P_{sw}$  (W) υπολογίζονται σύμφωνα με το μοντέλο απωλειών ισχύος που παρουσιάζεται στο [27]:

$$P_{cond} = 4 \cdot (V_{s,on} I_{s,avg} + I_{s,rms}^2 R_{s,on} + V_d I_{d,avg} + I_{d,rms}^2 R_d) \quad (50)$$

Η συνολική ετήσια ενέργεια  $E_y$  [Wh], που παρέχεται από τον αντιστροφέα στο ηλεκτρικό δίκτυο υπολογίζεται ως εξής

$$E_y = \sum_{t=1}^{8760} V_n \cdot I_{0,t} \cdot \Delta t \quad (51)$$

όπου  $\Delta t$  είναι το βήμα της προσομοίωσης το οποίο έχει οριστεί σε μία ώρα.

Θεωρείται πως η λειτουργία του Φ/B αντιστροφέα επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα χρόνια λειτουργίας του,  $n$ , οπότε ισχύει το εξής για την συνολική ενέργεια σε  $n$  χρόνια:

$$E_y = \sum_{y=1}^n \sum_{t=1}^{8760} V_n \cdot I_{0,t,y} \cdot \Delta t \quad (52)$$

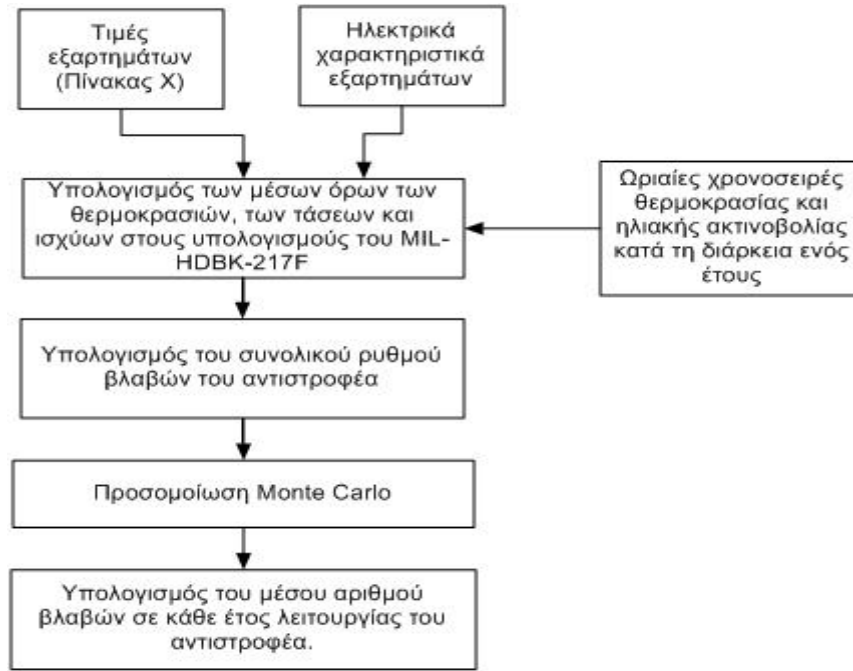
Το συνολικό κόστος κατασκευής  $C_t$  (€) του αντιστροφέα είναι:

$$C_t = c_{inv} P_n + c_{hs} + p \cdot (c_s + c_d) + c_i (L + L_g) \frac{P_n}{V_n} + C_c C_f + SF \cdot c_r R_{dr} P_{d,max} \quad (53)$$

όπου  $c_{inv}$  (€/W) είναι το κόστος κατασκευής του αντιστροφέα χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα κόστη της ψύκτρας, των IGBTs, των διόδων και των εξαρτημάτων του φίλτρου εξόδου,  $c_{hs}$  (€) είναι το κόστος της ψύκτρας,  $p$  είναι ο αριθμός των IGBTs και διόδων,  $c_s$  (€) και  $c_d$  (€) είναι το κόστος κάθε IGBT και διόδου, αντίστοιχα,  $c_i$  (€/H·A) είναι το κόστος ανά μονάδα αυτεπαγωγής του πηνίου του φίλτρου,  $c_c$  (€/F) είναι το κόστος ανά χωρητικότητα του πυκνωτή του φίλτρου,  $c_r$  (€/Ω·W) είναι το κόστος ανά μονάδα αντίστασης και ισχύος της αντίστασης του φίλτρου,  $SF$  (%) είναι ο συντελεστής αύξησης (oversizing factor) της αντίστασης απόσβεσης και τέλος  $P_{d,max}$  (W) είναι η μέγιστη ισχύς που καταναλώνεται στην αντίσταση απόσβεσης κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος.

### 4.3 Περιγραφή ανάλυσης αξιοπιστίας

Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας ανάλυσης αξιοπιστίας φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Σαν είσοδο έχουμε τις μέσες τιμές των χρονοσειρών θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη βοήθεια αυτών υπολογίζονται και οι μέσες τιμές όλων των συντελεστών από το [20] στις εξισώσεις υπολογισμού των ρυθμών βλαβών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Οι συντελεστές αυτοί, ανάλογα με το στοιχείο που εξετάζεται, είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, η τάση στα άκρα τους και η ισχύς που καταναλώνεται σε κάθε εξάρτημα. Ο τρόπος υπολογισμού των ρυθμών βλαβών αναλύθηκε στο μαθηματικό μοντέλο του αντιστροφέα. Κατόπιν, αφού έχει υπολογιστεί το συνολικό failure rate του αντιστροφέα, με τη βοήθεια της προσομοίωσης Monte Carlo με 10.000 δείγματα υπολογίζονται ο αριθμός βλαβών σε κάθε χρόνο λειτουργίας του αντιστροφέα. Η τιμή αυτή είναι αναγκαία για τον υπολογισμό των αντικειμενικών συναρτήσεων προς βελτιστοποίηση όπως αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα ροής της μεθόδου ανάλυσης αξιοπιστίας που εφαρμόστηκε.

Σύμφωνα με την αρχή της προσθετικότητας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο συνολικός ρυθμός βλαβών  $\lambda_{inv}$  (αστοχίες/ $10^6$  ώρες) του αντιστροφέα είναι ίσος με το άθροισμα των ρυθμών βλαβών των επιμέρους εξαρτημάτων του:

$$\lambda_{inv} = \lambda_c + 4 \cdot \lambda_{IGBT} + 4 \cdot \lambda_{diode} + \lambda_{inductor1} + \lambda_{inductor2} + \lambda_{resistor} + \lambda_{c2} + \lambda_{control} + \lambda_{fan} + \lambda_{ac} + \lambda_{dc} + 10 \cdot \lambda_{connector} + \lambda_{fuse} + \lambda_{pcb} \quad (54)$$

Η παρούσα τιμή του συνολικού κόστους του αντιστροφέα  $C_{inv}(X)$  είναι το άθροισμα του κόστους κατασκευής και του κόστους συντήρησης  $M_t(X)$  (€) το οποίο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας του αντιστροφέα.:

$$C_{inv}(X) = C_t(X) + M_t(X) \quad (55)$$

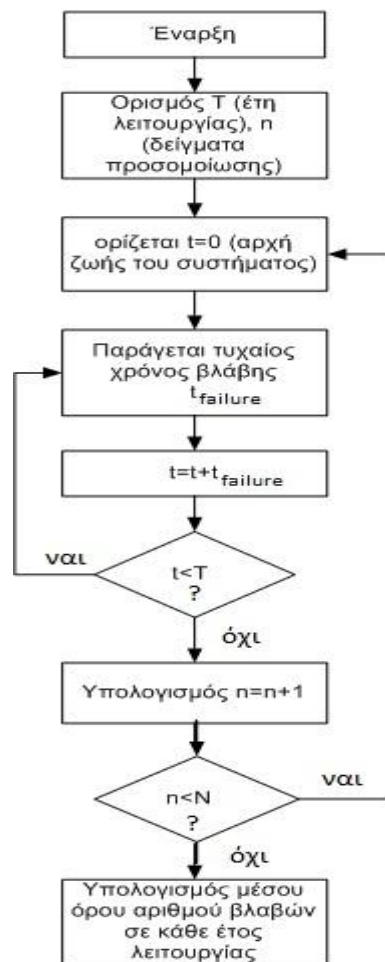
όπου  $X$  είναι το διάνυσμα με τις μεταβλητές απόφασης. Η τιμή του  $M_t(X)$  υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$M_t(X) = \sum_{j=1}^n N_j(X) \cdot M_{inv} \cdot \frac{(1+g)^j}{(1+d)^j} \quad (56)$$

όπου  $n$  είναι τα χρόνια λειτουργίας του συστήματος,  $N_j(X)$  ο μέσος αριθμός των βλαβών που αναμένεται να έχει ο αντιστροφέας κατά τη διάρκεια του  $j$  χρόνου ( $1 \leq j \leq n$ ),  $M_{inv}$  (€) είναι το κόστος επισκευής την παρούσα στιγμή,  $g$  (%) ο ετήσιος πληθωρισμός και  $d$  (%) το επιτόκιο αναγωγής. Το LCOE υπολογίζεται ως εξής:

$$LCOE(X) = \frac{C_{inv}(X)}{E_y(X)} \quad (57)$$

Το αναλυτικό διάγραμμα ροής της προσομοίωσης Monte Carlo για τον υπολογισμό των βλαβών σε κάθε χρόνο λειτουργίας φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 Διάγραμμα ροής προσομοίωσης Monte Carlo.

Η προσομοίωση Monte Carlo είναι μια ευέλικτη μέθοδος για την ανάλυση της συμπεριφοράς δραστηριοτήτων, προγραμμάτων ή διαδικασιών που αφορούν την αβεβαιότητα. Η μέθοδος αυτή εφευρέθηκε από επιστήμονες το 1944 περίπου, και ονομάστηκε έτσι από την Βελτιστοποίηση Αξιοπιστίας Φωτοβολταϊκών Μετατροπών DC/AC

ομοιότητα της με την καταγραφή αποτελεσμάτων τυχερών παιγνίων σε ένα πραγματικό καζίνο, όπως το διάσημο καζίνο του Μονακό.

Η μέθοδος Monte Carlo είναι μια κατηγορία υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται σε επαναλαμβανόμενες τυχαίες δειγματοληψίες για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων τους. Monte Carlo μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνά κατά την προσομοίωση φυσικών και μαθηματικών συστημάτων. Λόγω της εξάρτησης από τον επαναλαμβανόμενο υπολογισμό τυχαίων αριθμών, οι μέθοδοι Monte Carlo είναι οι πλέον κατάλληλες για τον υπολογισμό από ένα υπολογιστή. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν είναι αδύνατο να υπολογιστεί το ακριβές αποτέλεσμα με ντετερμινιστικό αλγόριθμο.

Στο σύστημά του Φ/Β αντιστροφέα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, με τα μοντέλα που αναλύθηκαν προηγουμένως καταλήγουμε σε ένα συνολικό ρυθμό βλαβών για τον αντιστροφέα  $\lambda_{inv}$ . Για να μετατραπεί αυτό το  $\lambda_{inv}$  από εκατομμύρια ώρες σε έτη διαιρείται με 114.079 (έτη ανά εκατομμύρια ώρες) οπότε προκύπτει το ετήσιο  $\lambda_{year}$ . Ο ετήσιος MTTF θα είναι  $MTTF_{year} = 1/\lambda_{year}$ .

Στην συνέχεια αρχίζει η προσομοίωση Monte Carlo (10000 δείγματα) για την 25ετία του συστήματός. Ο ρυθμός βλαβών είναι σταθερός, οπότε οι βλάβες ακολουθούν την εκθετική κατανομή. Με τη συνάρτηση του Matlab `exprnd(MTTFyear)` παράγονται τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν την εκθετική κατανομή με μέση τιμή  $MTTF_{year}$ . Οι αριθμοί αυτοί ουσιαστικά είναι χρόνοι βλάβης (failure times) σε έτη. Έτσι αν παρουσιαστεί μια βλάβη, προστίθεται ο χρόνος αυτός στις προηγούμενες χρονικές στιγμές που συνέβη βλάβη. Με την παραδοχή πως ο χρόνος επισκευής είναι μηδενικός, ισχύουν τα παρακάτω για τον χρόνο- $t$  από την αρχή της 25ετίας μέχρι την τελευταία βλάβη του αντιστροφέα:

$$t = t_{failure\_1} + t_{failure\_2} + \dots + t_{failure\_n}, \quad t < 25 \quad (58)$$

Ο έλεγχος πως η προσομοίωση δεν ξεπερνά τα 25 χρόνια του κύκλου ζωής γίνεται με ένα nested-while-loop. Αποθηκεύουμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα σε ξεχωριστά cell arrays του πίνακα results. Το κάθε cell array περιέχει τους χρόνους βλαβών του inverter στο κύκλο ζωής του.

Τέλος με την εντολή `cat` ενώνουμε όλα τα cell arrays σε ένα πίνακα και κατόπιν με την εντολή `hist` υπολογίζουμε τις βλάβες σε κάθε έτος. Τέλος, με την εξίσωση (56) υπολογίζεται το συνολικό κόστος συντήρησης.

### 4.3 Περιγραφή εργαλείων του matlab για βελτιστοποίηση.

Για την ελαχιστοποίηση και τη μεγιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων χρησιμοποιήθηκαν 3 εργαλεία του Matlab. Αυτά είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και το pattern search από το Global Optimization Toolbox και το `fmincon` από το Optimization Toolbox. Ακολουθεί μία περιγραφή αυτών των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

#### 4.3.1 Γενετικός αλγόριθμος

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Γ/Α) είναι μια μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης τόσο με περιορισμούς όσο και χωρίς περιορισμούς. Η λειτουργία τους βασίζεται στη φυσική επιλογή, τη διαδικασία που καθοδηγεί τη βιολογική εξέλιξη. Οι Γ/Α τροποποιούν επανειλημμένα τον πληθυσμό των μεμονωμένων λύσεων. Σε κάθε στάδιο, επιλέγουν τυχαία άτομα από τον εκάστοτε πληθυσμό ως γονείς και τα χρησιμοποιούν για την παραγωγή των παιδιών για την επόμενη γενιά. Κατά τη μετάβαση σε επόμενες γενιές, ο πληθυσμός εξελίσσεται προς μια βέλτιστη λύση. Οι Γ/Α μπορούν να εφαρμοστούν για τη λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης που δεν είναι κατάλληλα για τυπικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, όπως τα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι ασυνεχής, μη-παραγωγίσιμη, στοχαστική ή εξαιρετικά μη-γραμμική.

Οι Γ/Α χρησιμοποιούν τρεις βασικούς τύπους κανόνων σε κάθε βήμα για να δημιουργήσουν την επόμενη γενιά:

- Κανόνες επιλογής, για την επιλογή τα ατόμων, που ονομάζεται γονείς, που συμβάλλουν στην δημιουργία του πληθυσμού της επόμενης γενιάς.
- Κανόνες διασταύρωσης, για το πως θα συνδυαστούν δύο γονείς για το σχηματισμό των παιδιών της επόμενης γενιάς.

- Κανόνες μετάλλαξης, για την εφαρμογή τυχαίων αλλαγών σε μεμονωμένους γονείς για να σχηματίσουν τα παιδιά.

Η ακόλουθη περιγραφή συνοψίζει τη λειτουργία των Γ/Α:

- 1) Ο αλγόριθμος αρχίζει με τη δημιουργία ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού.
- 2) Στη συνέχεια δημιουργεί μια ακολουθία νέων πληθυσμών. Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα άτομα της τρέχουσας γενιάς για να δημιουργήσει τον επόμενο πληθυσμό. Για τη δημιουργία του νέου πληθυσμού, ο αλγόριθμος εκτελεί τα ακόλουθα βήματα:
  - α) Υπολογίζει την τιμή καταλληλότητας (fitness value) για κάθε μέλος του πληθυσμού.
  - β) Κλιμακώνει τις τιμές καταλληλότητας και τις μετατρέπει σε ένα πιο εύχρηστο εύρος τιμών.
  - γ) Επιλέγει τα μέλη, που ονομάζονται γονείς, με βάση την καταλληλότητά τους.
  - δ) Μερικά από τα άτομα του τρέχοντος πληθυσμού με τη χαμηλότερη τιμή καταλληλότητας επιλέγονται ως ελίτ. Αυτά τα άτομα περνάνε απευθείας στην επόμενη γενιά.
  - ε) Παράγει τα παιδιά από τους γονείς. Τα παιδιά παράγονται είτε πραγματοποιώντας τυχαίες αλλαγές σε ένα μόνο γονέα (μετάλλαξη-mutation) ή με συνδυασμό των καταχωρήσεων ενός ζεύγους γονέων (διασταύρωση-crossover).
  - στ) Αντικαθιστά τον τρέχοντα πληθυσμό με τα παιδιά για να σχηματιστεί η επόμενη γενιά.
- 3) Ο αλγόριθμος σταματά όταν ένα από τα κριτήρια τερματισμού πληρούνται. Ως κριτήρια τερματισμού μπορεί να εφαρμοστούν ο αριθμός γενεών, ο χρόνος εκτέλεσης, η τιμή καταλληλότητας κ.α.

### 4.3.2 Pattern search

Ο αλγόριθμος Pattern Search (P/S) αποτελεί μέθοδο επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και δεν απαιτεί καμία πληροφορία σχετικά με την πρώτη παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούν πληροφορίες σχετικά με παραγώγους, ο P/S αναζητά μια σειρά από σημεία γύρω από το τρέχον σημείο, ψάχνοντας για σημείο στο οποίο η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι χαμηλότερη από αυτή στο τρέχον. Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων, στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση δεν είναι παραγωγίσιμη ή δεν είναι συνεχής.

Ο P/S υπολογίζει μια ακολουθία σημείων που προσεγγίζουν ένα βέλτιστο. Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος ψάχνει ένα σύνολο σημείων, που ονομάζεται πλέγμα (mesh), γύρω από το τρέχον (που υπολογίζεται στο προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου). Το πλέγμα σχηματίζεται προσθέτοντας το τρέχον σημείο σε ένα πολλαπλάσιο ενός συνόλου διανυσμάτων που ονομάζεται πρότυπο (pattern). Εάν ο αλγόριθμος βρίσκει ένα σημείο στο πλέγμα που βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση σε σχέση με το τρέχον σημείο, το νέο σημείο γίνεται το τρέχον στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου.

Ακολουθούν περιγραφές των βασικών εννοιών που συναντώνται στον αλγόριθμο pattern search:

#### Πρότυπα (patterns)

Ένα πρότυπο είναι ένα σύνολο διανυσμάτων  $\{u_i\}$ , τα οποία χρησιμοποιεί ο P/S για να καθορίσει ποια σημεία ψάχνει σε κάθε επανάληψη. Το σύνολο  $\{u_i\}$  ορίζεται από τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών της αντικειμενικής συνάρτησης,  $N$ , και το θετικό βασικό σύνολο (basis set). Δύο θετικά βασικά σύνολα χρησιμοποιούνται συνήθως στον P/S. Η μέγιστη βάση, με  $2N$  πίνακες και η ελάχιστη βάση, με  $N+1$  πίνακες. Για παράδειγμα, εάν υπάρχουν τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές στο πρόβλημα, η προεπιλογή για  $2N$  θετική βάση αποτελείται από τα ακόλουθα διανύσματα:

$$u_1=[1 \ 0 \ 0] \quad u_2=[0 \ 1 \ 0] \quad u_3=[0 \ 0 \ 1] \quad u_4=[-1 \ 0 \ 0] \quad u_5=[0 \ -1 \ 0] \quad u_6=[0 \ 0 \ -1]$$

Μία  $N+1$  θετική βάση αποτελείται από τα ακόλουθα διανύσματα:

$$u_1=[1 \ 0 \ 0] \quad u_2=[0 \ 1 \ 0] \quad u_3=[0 \ 0 \ 1] \quad u_4=[-1 \ -1 \ -1]$$



### Πλέγματα (Meshes)

Σε κάθε βήμα, ο P/S πραγματοποιεί αναζήτηση σε ένα σύνολο σημείων, που ονομάζεται πλέγμα (mesh). Αναζητεί ένα σημείο που βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση. Ο σχηματισμός του πλέγματος γίνεται ως εξής:

1) Δημιουργεί ένα σύνολο διανυσμάτων  $\{d_i\}$  πολλαπλασιάζοντας κάθε διάνυσμα  $u_i$  με τον αριθμό  $\Delta^m$  ο οποίος ονομάζεται μέγεθος πλέγματος (mesh size). Το μέγεθος πλέγματος αναλύεται στην ενότητα επέκταση του αλγορίθμου.

2) Προσθέτει το  $\{d_i\}$  στο τρέχον σημείο (σημείο με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης από προηγούμενο βήμα).

Για παράδειγμα αν υποτεθεί ότι:

- Το τρέχον σημείο είναι [1.6 3.4]
- Το πρότυπο αποτελείται από τα διανύσματα  $u_1=[1 \ 0]$ ,  $u_2=[0 \ 1]$ ,  $u_3=[-1 \ 0]$ ,  $u_4=[0 \ -1]$
- Το τρέχον μέγεθος πλέγματος είναι  $\Delta^m=4$

Ο αλγόριθμος πολλαπλασιάζει τα πρότυπα διανύσματα με 4 και τα προσθέτει στο τρέχον σημείο για να ληφθεί το ακόλουθο πλέγμα:

$$[1.6 \ 3.4] + 4 \cdot [1 \ 0] = [5.6 \ 3.4]$$

$$[1.6 \ 3.4] + 4 \cdot [0 \ 1] = [1.6 \ 7.4]$$

$$[1.6 \ 3.4] + 4 \cdot [-1 \ 0] = [-2.4 \ 3.4]$$

$$[1.6 \ 3.4] + 4 \cdot [0 \ -1] = [1.6 \ -0.6]$$

Το πρότυπο διάνυσμα που παράγει σημεία πλέγματος ονομάζεται κατεύθυνση του αλγορίθμου.

### Βολιδοσκόπηση (Polling)

Σε κάθε στάδιο, ο P/S εκτελεί βολιδοσκόπηση των σημείων του τρέχοντος πλέγματος υπολογίζοντας την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στα σημεία αυτά. Εάν επιλεγεί να μην πραγματοποιείται πλήρης βολιδοσκόπηση, ο αλγόριθμος σταματά τη βολιδοσκόπηση σημείων του πλέγματος μόλις βρει κάποιο σημείο με χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από το τρέχον. Τότε, αυτό το σημείο γίνεται τρέχον και η βολιδοσκόπηση θεωρείται επιτυχημένη. Ο αλγόριθμος υπολογίζει μόνο τα σημεία του πλέγματος και τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι το τέλος της βολιδοσκόπησης. Αν ο αλγόριθμος αποτύχει να βρει ένα σημείο που βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση, η βολιδοσκόπηση ονομάζεται ανεπιτυχής και το τρέχον σημείο παραμένει ίδιο κατά την επόμενη επανάληψη.

Εάν επιλεγεί πλήρης βολιδοσκόπηση, ο αλγόριθμος υπολογίζει τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε όλα τα σημεία του πλέγματος. Στη συνέχεια συγκρίνει το σημείο με τη μικρότερη τιμή με το τρέχον. Αν έχει μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, η βολιδοσκόπηση είναι επιτυχής.

#### Επέκταση του αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος P/S ξεκινά τη λειτουργία του με ένα αρχικό σημείο που παίρνει σαν είσοδο. Στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου η τιμή του πλέγματος είναι 1. Μετά τη βολιδοσκόπηση, ο αλγόριθμος αλλάζει την τιμή του μεγέθους του πλέγματος. Η προεπιλογή είναι να το πολλαπλασιάσει με 2 μετά από μια επιτυχημένη βολιδοσκόπηση και με 0.5 μετά από μια ανεπιτυχή.

Τέλος, τα εναλλακτικά κριτήρια τερματισμού που μπορούν να εφαρμοστούν στον αλγόριθμο P/S είναι τα εξής:

- το μέγεθος του πλέγματος είναι μικρότερο από την προκαθορισμένη ανοχή στο μέγεθος του πλέγματος,
- ο αριθμός των επαναλήψεων ισούται με τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό επαναλήψεων,
- ο αριθμός των υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με τον μέγιστο επιτρεπτό,
- ο χρόνος, σε δευτερόλεπτα, ισούται με το ανώτατο επιτρεπτό όριο χρόνου,

- η απόσταση μεταξύ των σημείων δύο διαδοχικών επαναλήψεων και το μέγεθος του πλέγματος είναι μικρότερα από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ανοχή, ή
- η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων και το μέγεθος του πλέγματος είναι μικρότερα από τις μέγιστες επιτρεπτές ανοχές.

### 4.3.3 Fmincon εσωτερικών σημείων (interior point)

Ο αλγόριθμος fmincon εσωτερικών σημείων αντιμετωπίζει τα προβλήματα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς σαν μια σειρά από ελαχιστοποιήσεις κατά προσέγγιση. Το αρχικό πρόβλημα είναι:

$$\min f(x), \text{ με } h(x) = 0 \text{ και } g(x) \leq 0 \quad (59)$$

όπου  $x$  είναι ένα διάνυσμα που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση  $f(x)$ ,  $h(x)$  είναι η συνάρτηση των περιορισμών ισότητας και  $g(x)$  είναι η συνάρτηση των περιορισμών ανισότητας.

Για κάθε  $\mu > 0$  (αρχική παράμετρος φραγμού) το πρόβλημα κατά προσέγγιση είναι:

$$\min f_\mu(x, s) = \min f(x) - \mu \sum_i \ln(s_i), \text{ με } h(x) = 0 \text{ και } g(x) + s = 0 \quad (60)$$

όπου  $f_\mu(x, s)$  η προσεγγιστική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση και  $s$  οι μεταβλητές slack. Υπάρχουν τόσες slack μεταβλητές  $s_i$ , όσοι περιορισμοί ανισότητας  $g$ . Οι  $s_i$  είναι θετικοί ώστε το  $\ln(s_i)$  να είναι φραγμένο. Οι μεταβλητές slack προστίθενται σε περιορισμούς ανισότητας για να τους μετατρέψουν σε περιορισμούς ισότητας. Όσο το  $\mu$  πλησιάζει το μηδέν, το ελάχιστο της  $f_\mu$  προσεγγίζει το ελάχιστο της  $f$ . Η προεπιλογή για την τιμή της  $\mu$  είναι 0.1. Η προστιθέμενη λογαριθμική ποσότητα ονομάζεται συνάρτηση φράγματος (barrier function). Η εξίσωση (60) αποτελεί μια ακολουθία περιορισμών ισότητας. Είναι πιο εύκολο να λυθεί από την εξίσωση (59) (περιορισμοί ανισότητας). Για την επίλυση του προσεγγιστικού προβλήματος, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο κύριους τύπους βημάτων σε κάθε επανάληψη:

- άμεσο βήμα στο  $(x, s)$  ή

- ένα βήμα συζυγών κλίσεων (conjugate gradient-CG) το οποίο προσεγγίζει το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας μια περιοχή εμπιστοσύνης (trust region).

Η περιοχή εμπιστοσύνης είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στη μαθηματική βελτιστοποίηση για να υποδηλώσει το υποσύνολο της περιοχής της αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση η οποία προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας μια άλλη τετραγωνική συνάρτηση-μοντέλο. Εάν ένα επαρκές μοντέλο της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκεται εντός της περιοχής εμπιστοσύνης, τότε η περιοχή αυτή επεκτείνεται. Αντίθετα, αν η προσέγγιση είναι κακή, τότε η περιοχή συμπύκνεται. Η προεπιλογή του αλγορίθμου είναι να πραγματοποιηθεί άμεσο βήμα. Αν αυτό είναι αδύνατο, επιχειρεί ένα βήμα CG. Μια περίπτωση που δεν είναι δυνατόν το άμεσο βήμα είναι η προσεγγιστική συνάρτηση να μην είναι τοπικά κυρτή στην περιοχή της τρέχουσας επανάληψης. Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος μειώνει μια συνάρτηση αξίας (merit function):

$$f_{\mu}(x, s) + \nu \|h(x), g(x) + s\| \quad (61)$$

Η παράμετρος  $\nu$  (penalty factor) αυξάνεται με τον αριθμό επαναλήψεων, προκειμένου να αναγκάσει την λύση να είναι εφικτή (feasible). Εάν ένα βήμα δεν μειώνει τη συνάρτηση αξίας, ο αλγόριθμος το απορρίπτει, και επιχειρεί ένα νέο βήμα. Εάν είτε η αντικειμενική συνάρτηση ή μια μη-γραμμική συνάρτηση περιορισμού επιστρέφει μια σύνθετη τιμή, όχι αριθμό NaN, άπειρο (Inf), ή ένα λάθος σε μία επανάληψη  $j$ , τότε ο αλγόριθμος απορρίπτει τη λύση  $x_j$ . Η απόρριψη έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την περίπτωση που η συνάρτηση αξίας δεν μειώνεται επαρκώς: ο αλγόριθμος στη συνέχεια επιχειρεί ένα διαφορετικό, μικρότερο βήμα.

#### Άμεσο βήμα:

Οι ακόλουθες μεταβλητές χρησιμοποιούνται κατά τον ορισμό του άμεσου βήματος: η μεταβλητή  $H$  ορίζεται ως η Hessian της Lagrangian της  $f_{\mu}$ , η  $J_g$  είναι η Jacobian της συνάρτησης περιορισμών  $g$ , η  $J_h$  είναι η Jacobian της συνάρτησης περιορισμών  $h$ ,  $S = \text{diag}(s)$ ,  $\lambda$  είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange που σχετίζεται με την  $g$ ,  $\Lambda = \text{diag}(\lambda)$ ,  $\gamma$  είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange που σχετίζεται με την  $h$  και  $e$  είναι διάνυσμα ίδιας διάστασης με το  $g$  και όλα τα στοιχεία του ίσα 1. Επομένως για το άμεσο βήμα  $(\Delta x, \Delta s)$  ισχύει ότι:

$$\begin{pmatrix} H & 0 & J_h^T & J_g^T \\ 0 & S\Lambda & 0 & -S \\ J_h & 0 & I & 0 \\ J_g & -S & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta s \\ -\Delta y \\ -\Delta \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla f - J_h^T y - J_g^T \lambda \\ S\lambda - \mu e \\ h \\ g + s \end{pmatrix} \quad (62)$$

όπου  $\Delta x$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \lambda$  οι μετατοπίσεις στις τιμές των αντίστοιχων μεγεθών σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Η λύση της (62) είναι και το πιο απαιτητικό υπολογιστικά κομμάτι του αλγορίθμου `fmincon`.

#### Βήμα συζυγών κλίσεων:

Σε αυτήν την περίπτωση ο αλγόριθμος ρυθμίζει αμφότερα τα  $x$  και  $s$ , διατηρώντας τα  $s$  θετικά. Στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί η τετραγωνική προσέγγιση της εξίσωσης (60) σε μια περιοχή εμπιστοσύνης, τηρουμένων των γραμμικών περιορισμών του προβλήματος. Συγκεκριμένα, αν  $R$  αντιπροσωπεύει την ακτίνα της περιοχής εμπιστοσύνης, και οι άλλες μεταβλητές ορίζονται όπως στην περίπτωση του Άμεσου Βήματος, ο αλγόριθμος λαμβάνει πολλαπλασιαστές Lagrange από την προσεγγιστική επίλυση της εξίσωσης:

$$\nabla_x L = \nabla_x f(x) + \sum_i \lambda_i \nabla g_i(x) + \sum_j y_j \nabla h_j(x) = 0 \quad (63)$$

υπό την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων, με  $\lambda$  θετικά. Στη συνέχεια εφαρμόζει ένα βήμα ( $\Delta x$ ,  $\Delta s$ ) για να λύσει προσεγγιστικά το εξής πρόβλημα:

$$\min_{\Delta x, \Delta s} \nabla f^T \Delta x + \frac{1}{2} \Delta x^T \nabla^2_{xx} L \Delta x + \mu e^T S^{-1} \Delta s + \frac{1}{2} \Delta s^T S^{-1} \Lambda \Delta s \quad (64)$$

με τους εξής γραμμικούς περιορισμούς:

$$g(x) + J_g \Delta x + \Delta s = 0 \text{ και } h(x) + J_h \Delta x = 0 \quad (65)$$

Ο αλγόριθμος `fmincon` χρησιμοποιείται για τη γρήγορη εύρεση τοπικών ελαχίστων μιας συνάρτησης. Αντίθετα, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Γ/Α και Ρ/Σ) από το Global Optimization Toolbox του Matlab, χρησιμοποιούνται για την εύρεση του καθολικού ελάχιστου σημείου μιας συνάρτησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι πιο απαιτητικοί υπολογιστικά σε σχέση με τον `fmincon`.

# 5.

## Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης

---

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αρχικά γίνεται εφαρμογή του αλγορίθμου για διάφορες περιοχές εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος. Κατόπιν παρουσιάζονται τεχνικές για τον έλεγχο της σύγκλισης των εργαλείων του Matlab. Τέλος, συγκρίνεται ο βελτιστοποιημένος αντιστροφάς με μη-βελτιστοποιημένο για κάθε τύπο αντικειμενικής συνάρτησης που έχει εφαρμοστεί.

### 5.1 Εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Η μεθοδολογία σχεδίασης Φ/Β αντιστροφών που έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόζεται στον αντιστροφή της Εικόνας 3.3. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, πρόκειται για έναν 2 kW/220 V αντιστροφή, χωρίς μετασχηματιστή, τοπολογίας πλήρους γέφυρας, συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η Φ/Β γεννήτρια που συνδέεται στον αντιστροφή αποτελείται από 12 Φ/Β πλαίσια 175 W/35.4 V (σε Standard Test Conditions). Ο ετήσιος συντελεστής μείωσης ισχύος των Φ/Β πλαισίων έχει τεθεί ίσος με  $r(y) = 0,6\%$ . Η διάρκεια ζωής του συστήματος ορίζεται να είναι 25 έτη.

Ο αλγόριθμος σχεδίασης έχει εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση Φ/Β αντιστροφών σε 4 περιοχές της Ευρώπης: Αθήνα (Ελλάδα), Murcia (Ισπανία), Freiburg (Γερμανία) και Oslo (Νορβηγία). Τα αποτελέσματα είναι οι μεταβλητές απόφασης ( $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $f_s$ ) οι οποίες βελτιστοποιούν την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιούνται τα τρία εργαλεία του Matlab που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά υπολογίζεται ο μη-σταθερός ρυθμός βλαβών του αντιστροφέα και στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της αξιοπιστίας σε διαφορετικούς δείκτες απόδοσης όπως το LCOE, η συνολική παραγόμενη ενέργεια και το συνολικό κόστος. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές αντικειμενικές συναρτήσεις συμπληρωματικά με την αντικειμενική συνάρτηση του μη-σταθερού ρυθμού βλαβών.

Οι βελτιστοποιήσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Matlab R2013a 64 bit και λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows 7 64-bit. Ο επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Intel i5 2500k με 4 πυρήνες για να αξιοποιηθεί η δυνατότητα παραλληλίας που προσφέρει το matlab. Αρχικά, με την εντολή του Matlab `matlabpool('open',4)` ανοίγει το Parallel Computing Toolbox ώστε να τρέξει μέρος του προγράμματος παράλληλα. Το PC που χρησιμοποιήθηκε για τις βελτιστοποιήσεις έχει 4 πυρήνες για αυτό και η εντολή παίρνει την παραπάνω μορφή. Επιπροσθέτως χρησιμοποιήθηκαν `parfor` loops τα οποία υποστηρίζουν παραλληλία. Τέλος χρησιμοποιήθηκε η παραλληλία των αλγορίθμων  $\Gamma/A$ ,  $P/S$  και `fmincon` με την εντολή `'UseParallel','Always'` κατά την εκτέλεσή τους.

### **5.1.1 Αντικειμενική συνάρτηση: μη-σταθερός ρυθμός βλαβών**

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε περιοχή με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό ρυθμού βλαβών του αντιστροφέα [αφορά το άθροισμα των μη-σταθερών όρων της εξίσωσης (54)]. Το άθροισμα των σταθερών ρυθμών βλαβών είναι  $26.678 \text{ βλάβες}/10^6 \text{ ώρες}$ .

**Πίνακας 5.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το μη-σταθερό failure rate**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ ( $\mu$ F)	$f_s$ (kHz)	Μη σταθερός ρυθμός βλαβών (αστοχίες/ $10^6$ ώρες)
Athens	0.98	0.0821	5.23	22.3	0.590054
Murcia	0.99	0.0791	5.88	21.8	0.578371
Freiburg	1.05	0.0705	5.19	22.9	0.489538
Oslo	1.07	0.0709	5.34	23.1	0.452437

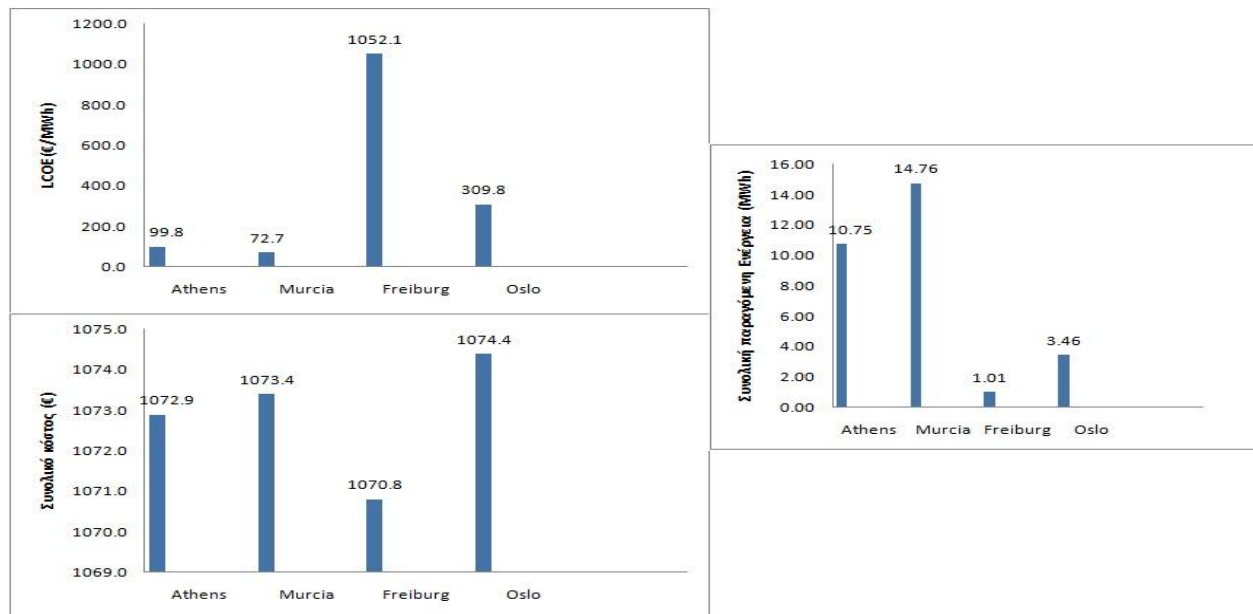
Το κόστος συντήρησης για κάθε περιοχή εγκατάστασης φαίνεται στον Πίνακα 5.2

**Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα κόστους συντήρησης βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το μη-σταθερό failure rate**

	Κόστος συντήρησης (€)
Athens	468.70
Murcia	470.68
Freiburg	467.52
Oslo	467.45

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.2, τα failure rates των  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $0.0016$ - $0.0017$ ,  $0.0350$ - $0.0467$ ,  $0.0027$ - $0.0042$ ,  $0.0173$ - $0.0235$  και  $0.3990$ - $0.5212$  βλάβες/ $10^6$  ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων LCOE, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.1.





Εικόνα 5.1 Τιμές  $LCOE$ , συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το μη σταθερό  $failure\ rate$ .

Παρατηρείται ότι η χαμηλότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης επιτυγχάνεται στο Oslo, διότι σε γενικές γραμμές η χαμηλή θερμοκρασία συντελεί στη μείωση του  $failure\ rate$ . Όλοι οι αλγόριθμοι καταλήγουν στα ίδια αποτελέσματα καθώς απουσιάζει η στοχαστική διαδικασία Monte Carlo. Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται ο χρόνος εκτέλεσης και ο αριθμός κλήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εργαλείο του Matlab.

**Πίνακας 5.3. Στατιστικά εργαλείων βελτιστοποίησης του Matlab με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό μη-σταθερό  $failure\ rate$**

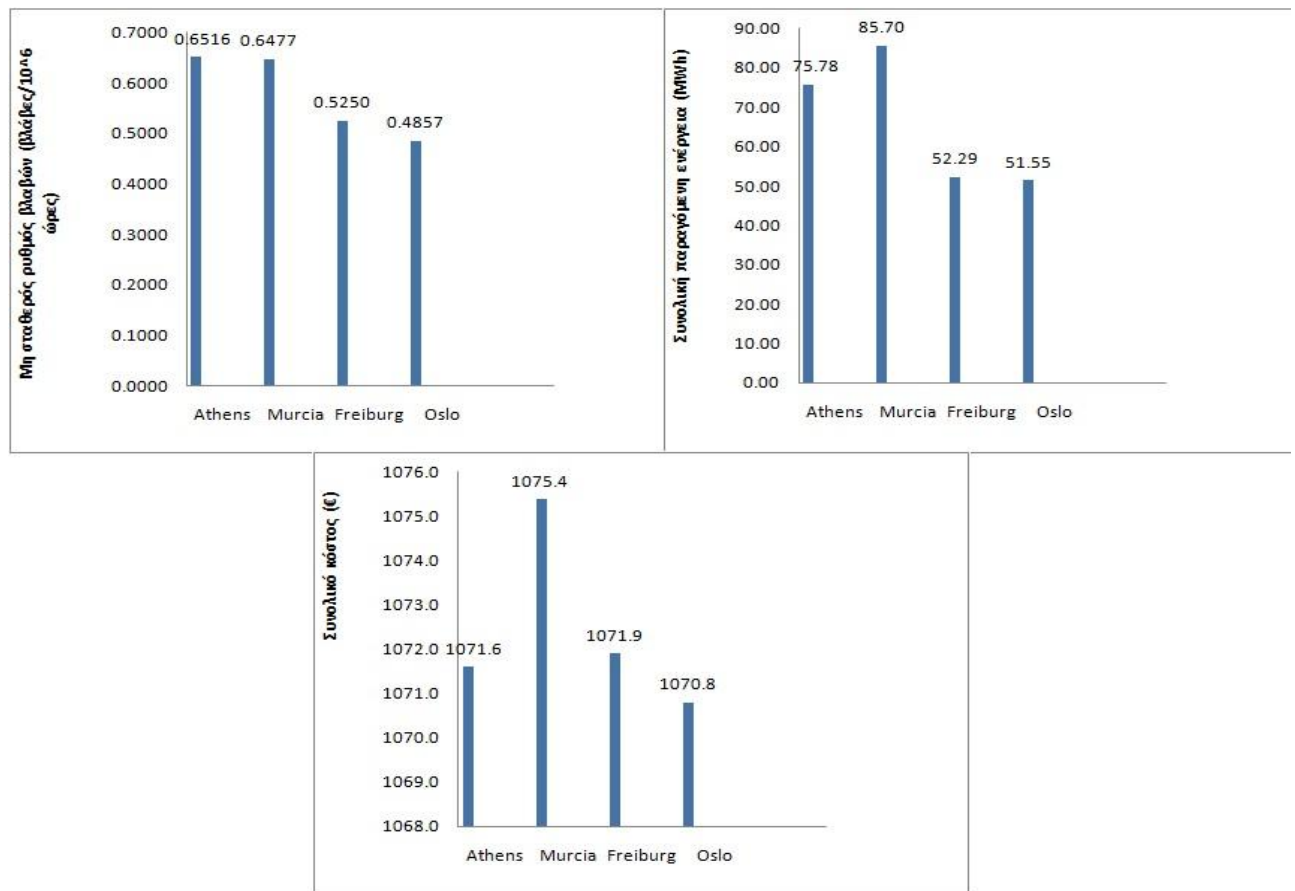
	Χρόνος εκτέλεσης (seconds)	Αριθμός κλήσεων αντικειμενικής συνάρτησης
Γ/Α	116.124219	6947
P/S	42.219940	228
fmincon	9.114151	72

### 5.1.2 Αντικειμενική συνάρτηση: LCOE

Στους πίνακες 5.4-5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε περιοχή και κάθε εργαλείο του Matlab με αντικειμενική συνάρτηση το LCOE.

<b>Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης LCOE με τον γενετικό αλγόριθμο</b>					
	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	$LCOE$ (€/MWh)
Athens	1.050	0.0705	5.19	29.7	14.1789
Murcia	1.060	0.0572	6.56	28,8	12.5231
Freiburg	0.927	0.1730	6.55	29.8	20.4361
Oslo	0.980	0.1420	5.36	28.9	20.7901

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.4, τα failure rates των  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.1000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.1000e-05$ ,  $0.0021$ - $0.0022$ ,  $0.0350$ - $0.0467$ ,  $0.0020$ - $0.0031$ ,  $0.0189$ - $0.0263$ ,  $0.4627$ - $0.5735$  βλάβες/ $10^6$  ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.3.

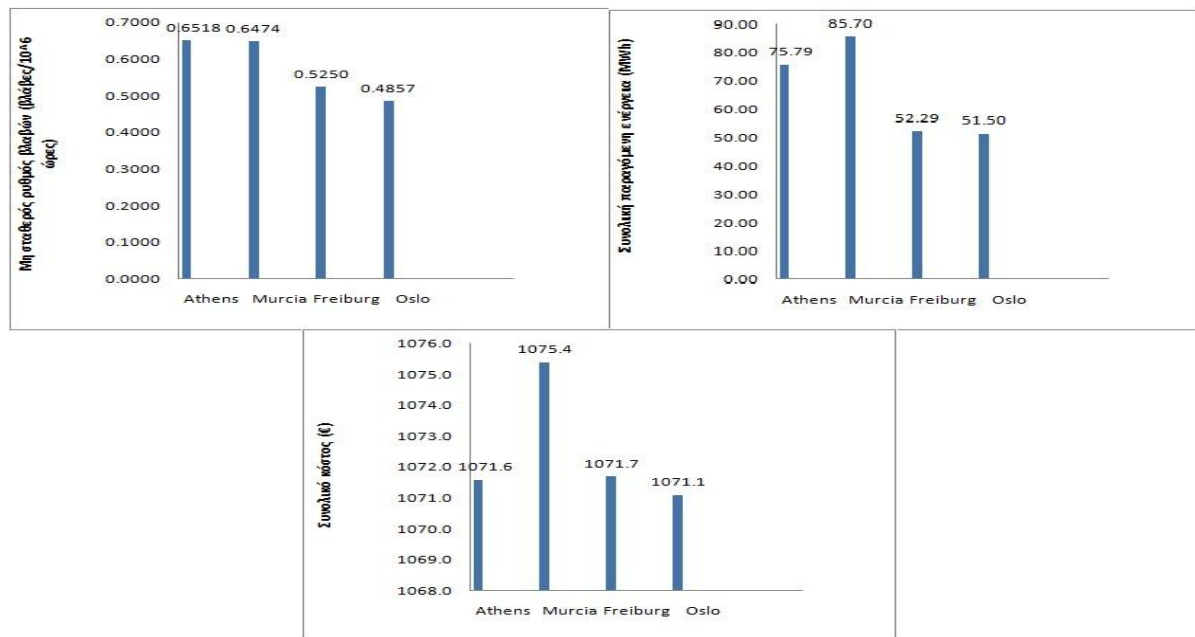


Εικόνα 5.2 Τιμές μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση LCOE για τον αλγόριθμο Γ/Α.

**Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης LCOE με τον αλγόριθμο pattern search**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	$LCOE$ (€/MWh)
Athens	1.050	0.0703	5.17	29.8	14.1739
Murcia	1.060	0.0574	6.58	28,5	12.5639
Freiburg	0.932	0.1790	6.45	29.8	20.4275
Oslo	0.990	0.1130	5.29	28.9	20.7892

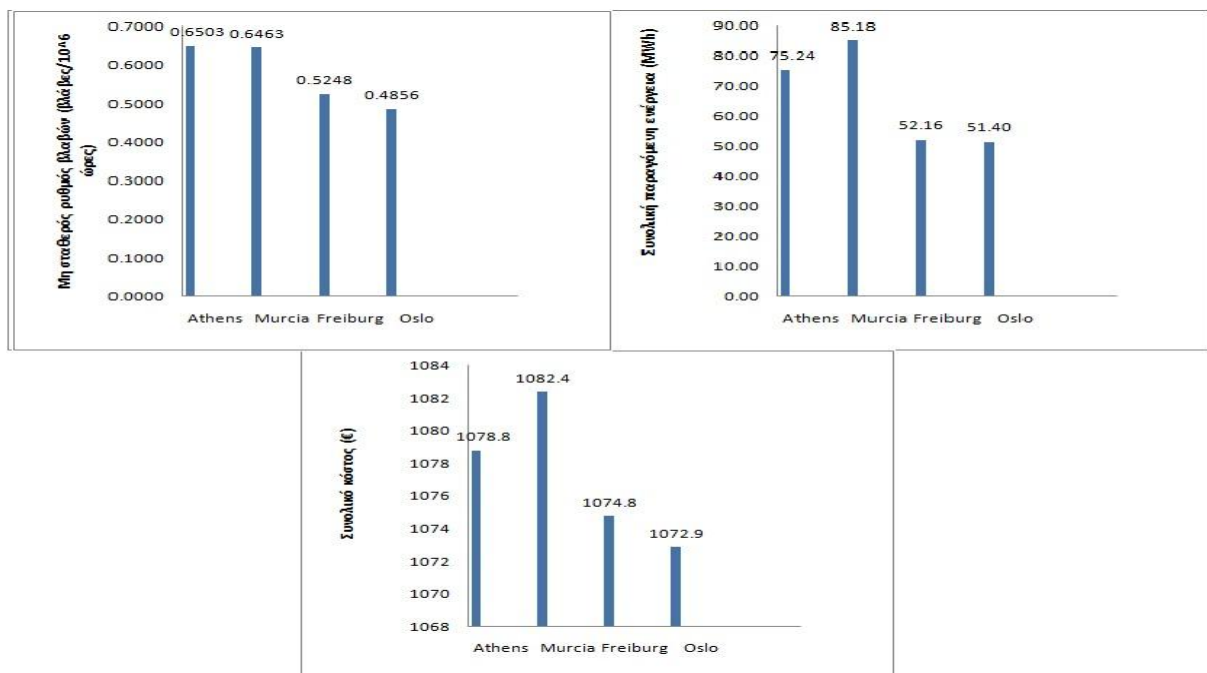
Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.5, τα failure rates των  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.1000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.0000e-05$ ,  $0.0021$ - $0.0022$ ,  $0.0350$ - $0.0465$ ,  $0.0020$ - $0.0031$ ,  $0.0168$ - $0.0260$ ,  $0.4297$ - $0.5733$  βλάβες/ $10^6$  ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 Τιμές μη σταθερού *failure rate*, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το *LCOE* για τον αλγόριθμο *P/S*.

Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης <i>LCOE</i> με τον αλγόριθμο <i>fmincon</i>					
	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	<i>LCOE</i> (€/MWh)
Athens	1.21	0.93	5.11	28.3	14.3354
Murcia	0.967	0.826	5.05	27.6	12.6210
Freiburg	0.948	0.315	6.53	29.4	20.5006
Oslo	0.970	0.139	5.31	28.7	20.8892

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.6, τα *failure rates*  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.1000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.1000e-05$ ,  $0.021$ - $0.022$ ,  $0.0350$ - $0.0467$ ,  $0.0020$ - $0.0031$ ,  $0.0168$ - $0.0263$ ,  $0.4295$ - $0.5722$  βλάβες/10<sup>6</sup> ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων μη σταθερού *failure rate*, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Τιμές μη σταθερού *failure rate*, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το *LCOE* για τον αλγόριθμο *fmincon*.

Παρατηρείται ότι η πιο χαμηλή τιμή του *LCOE* επιτυγχάνεται στη Murcia λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Ο Γ/Α και ο P/S συγκλίνουν στα ίδια σχεδόν αποτελέσματα ενώ ο *fmincon* δεν καταφέρνει να πετύχει τόσο χαμηλή τιμή *LCOE*. Στον Πίνακα 5.7 φαίνονται ο χρόνος εκτέλεσης και ο αριθμός κλήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εργαλείο του Matlab.

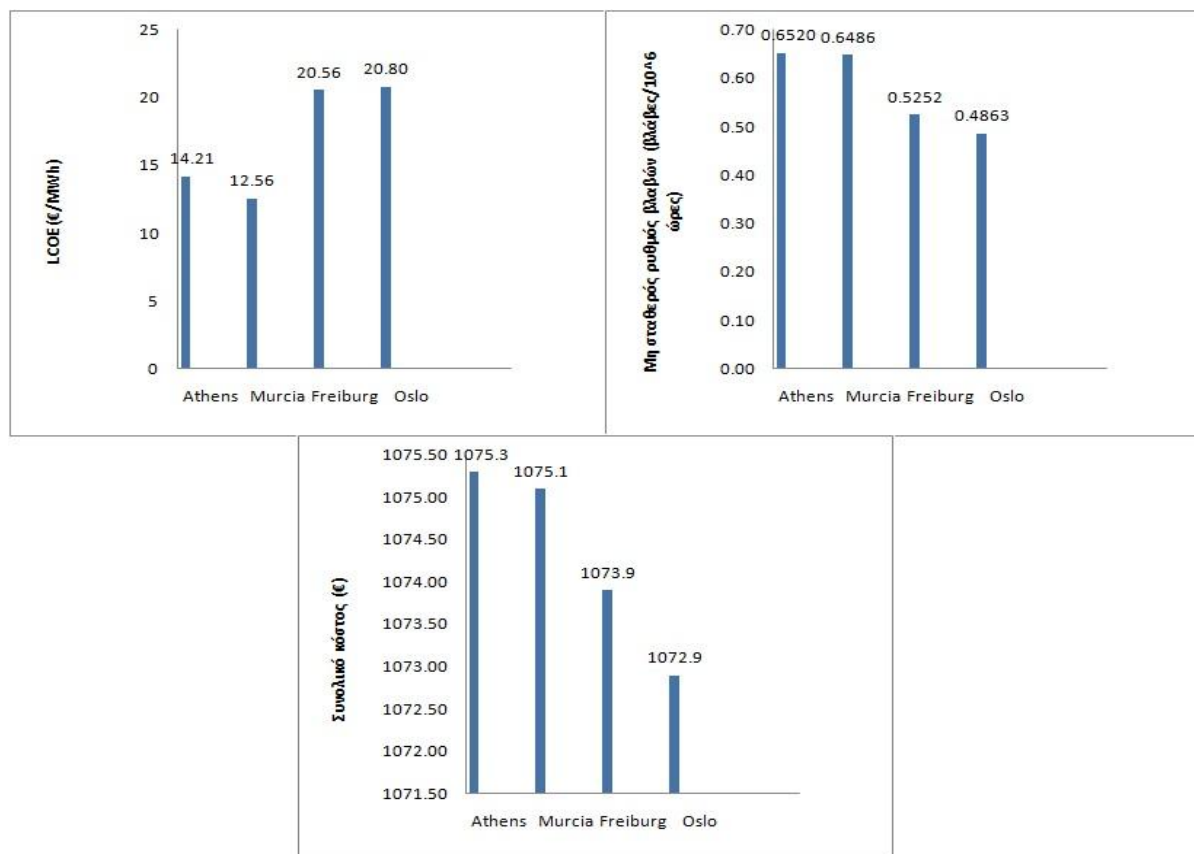
Πίνακας 5.7. Στατιστικά εργαλείων βελτιστοποίησης του Matlab με αντικειμενική συνάρτηση το <i>LCOE</i>		
	Χρόνος εκτέλεσης (seconds)	Αριθμός κλήσεων αντικειμενικής συνάρτησης
Γ/Α	216.223842	8947
P/S	82.071948	323
fmincon	13.335754	76

### 5.1.3 Αντικειμενική συνάρτηση: συνολική παραγόμενη ενέργεια.

Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε περιοχή με αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική ενέργεια που παράγει ο αντιστροφέας. Στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί η συγκεκριμένη ποσότητα, αλλά επειδή τα εργαλεία του Matlab πραγματοποιούν μόνο ελαχιστοποίηση, εκτελείται ελαχιστοποίηση της αντίθετης ποσότητας.

Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα μεγιστοποίησης της συνολικής παραγόμενης ενέργειας.					
	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	Ενέργεια (Wh)
Athens	0.89444	0.042674	6.2285	30	7.59097e+07
Murcia	0.89215	0.041941	6.5600	29.9	8.58300e+07
Freiburg	0.91756	0.068667	6.2825	30	5.24350e+07
Oslo	0.95907	0.046536	6.0957	30	5.17340e+07

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.8, τα failure rates των  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $0.0021$ - $0.0022$ ,  $0.0350$ - $0.0467$ ,  $0.0021$ - $0.0031$ ,  $0.0168$ - $0.0263$ ,  $0.4302$ - $0.5738$  βλάβες/ $10^6$  ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικού κόστους για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικού κόστους για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική ενέργεια.

Παρατηρείται πως η παραγόμενη ενέργεια ακολουθεί ανάλογη πορεία με το failure rate. Η υψηλότερη τιμή επιτυγχάνεται στη Murcia όπου η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλότερες. Όπως και στο failure rate, οι αλγόριθμοι του Matlab καταλήγουν στα ίδια αποτελέσματα αφού και στην περίπτωση αυτή απουσιάζει η στοχαστική διαδικασία Monte Carlo. Στον Πίνακα 5.9 φαίνονται ο χρόνος εκτέλεσης και ο αριθμός κλήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εργαλείο του Matlab.



**Πίνακας 5.9. Στατιστικά εργαλείων βελτιστοποίησης του Matlab με αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική παραγόμενη ενέργεια**

	Χρόνος εκτέλεσης (seconds)	Αριθμός κλήσεων αντικειμενικής συνάρτησης
Γ/Α	76.052739	3162
P/S	32.135926	178
fmincon	6.875124	61

#### 5.1.4 Αντικειμενική συνάρτηση: συνολικό κόστος αντιστροφεία

Στους πίνακες 5.10-5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε περιοχή και κάθε εργαλείο του Matlab με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος του αντιστροφεία. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, πρόκειται για το άθροισμα του κόστους κατασκευής και του κόστους συντήρησης λόγω βλαβών.

**Πίνακας 5.10. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τους αλγορίθμους Γ/Α και P/S**

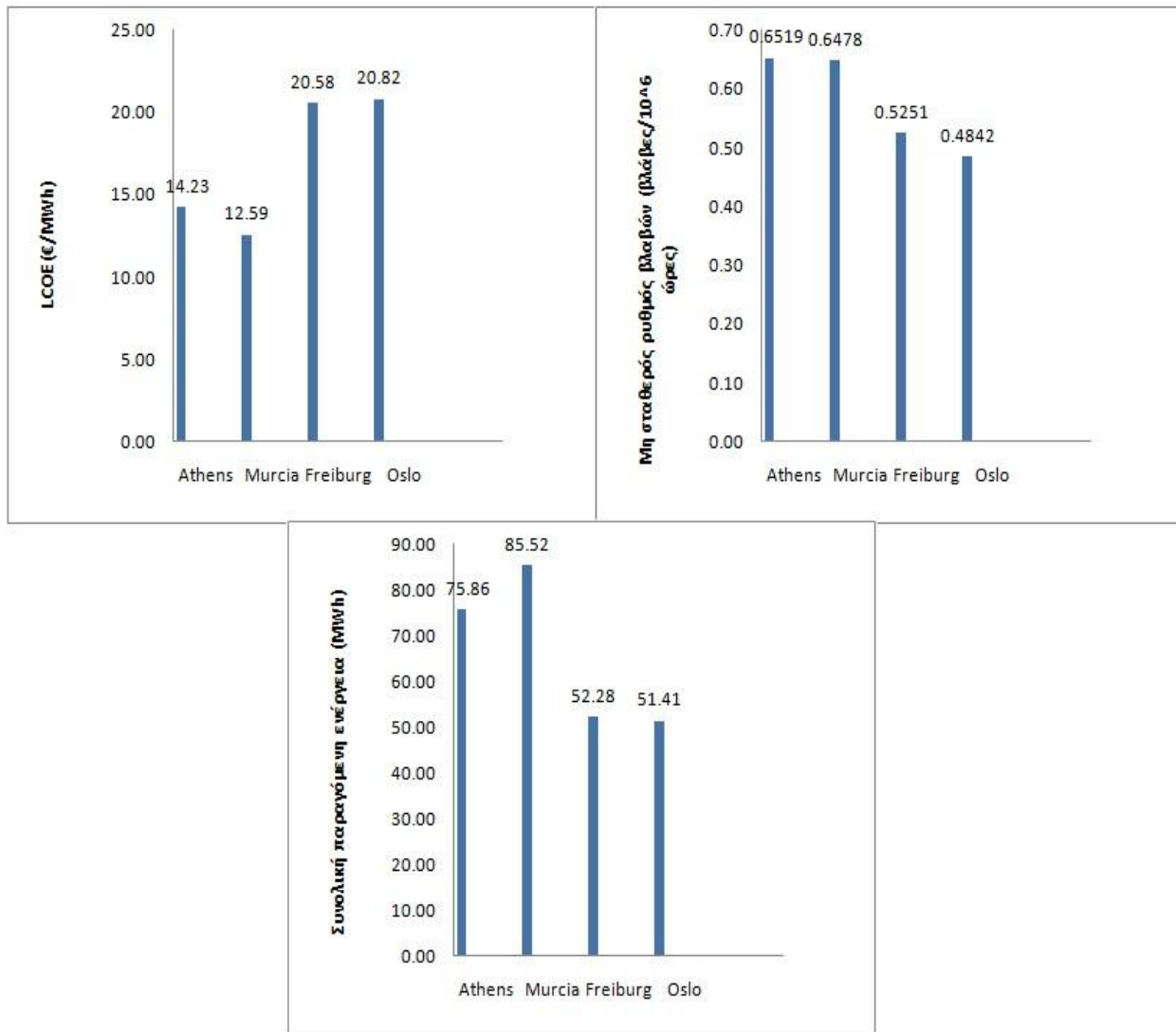
	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	κόστος (€)
Athens	0.90714	0.060017	5.3281	30	1069.2
Murcia	1.30022	0.081467	6.1244	29.1	1071.4
Freiburg	0.91645	0.185810	6.3395	30	1067.4
Oslo	1.20002	0.166300	6.0851	24.8	1069.9

Το κόστος συντήρησης για κάθε περιοχή εγκατάστασης φαίνεται στον Πίνακα 5.11.

**Πίνακας 5.11. Αποτελέσματα κόστους συντήρησης βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το failure rate**

	Κόστος συντήρησης (€)
Athens	473.09
Murcia	470.07
Freiburg	468.50
Oslo	465.86

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.10, τα failure rates των  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $0.0021$ - $0.0022$ ,  $0.0350$ - $0.0467$ ,  $0.0020$ - $0.0031$ ,  $0.0168$ - $0.0263$ ,  $0.4283$ - $0.5737$  βλάβες/ $10^6$  ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής παραγόμενης ενέργειας για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.6.

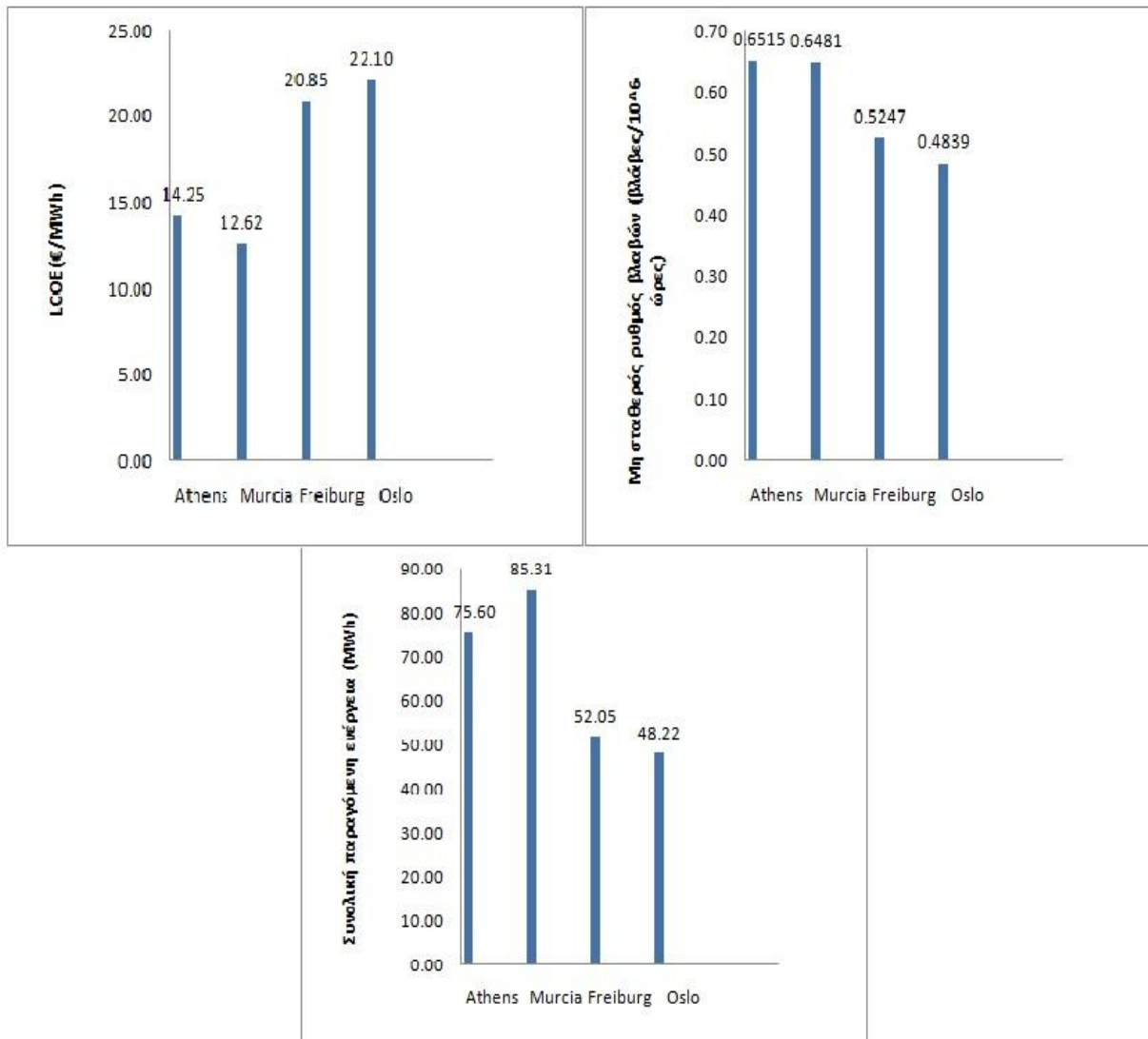


Εικόνα 5.6 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής παραγόμενης ενέργειας για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τους αλγορίθμους Γ/Α και P/S.

**Πίνακας 5.12. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τον αλγόριθμο fmincon**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	κόστος (€)
Athens	0.89511	0.25321	3.5810	30	1070.10
Murcia	1.22180	0.45890	6.4412	29.9	1072.13
Freiburg	1.12134	0.45101	6.0214	29.5	1069.91
Oslo	0.97912	0.03912	5.8579	30	1070.10

Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.12, τα failure rates  $L$ ,  $L_g$ ,  $C_f$ ,  $C_{in}$ ,  $R_{dr}$ , διόδων, IGBTs είναι  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $2.9000e-05$ - $3.000e-05$ ,  $0.0020$ - $0.0022$ ,  $0.0350$ - $0.0466$ ,  $0.0021$ - $0.0030$ ,  $0.0167$ - $0.0263$ ,  $0.4280$ - $0.5735$  βλάβες/ $10^6$  ώρες αντίστοιχα ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής παραγόμενης ενέργειας για όλες τις περιοχές εγκατάστασης φαίνονται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7 Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate και συνολικής παραγόμενης ενέργειας για τη βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος για τον αλγόριθμο fmincon.

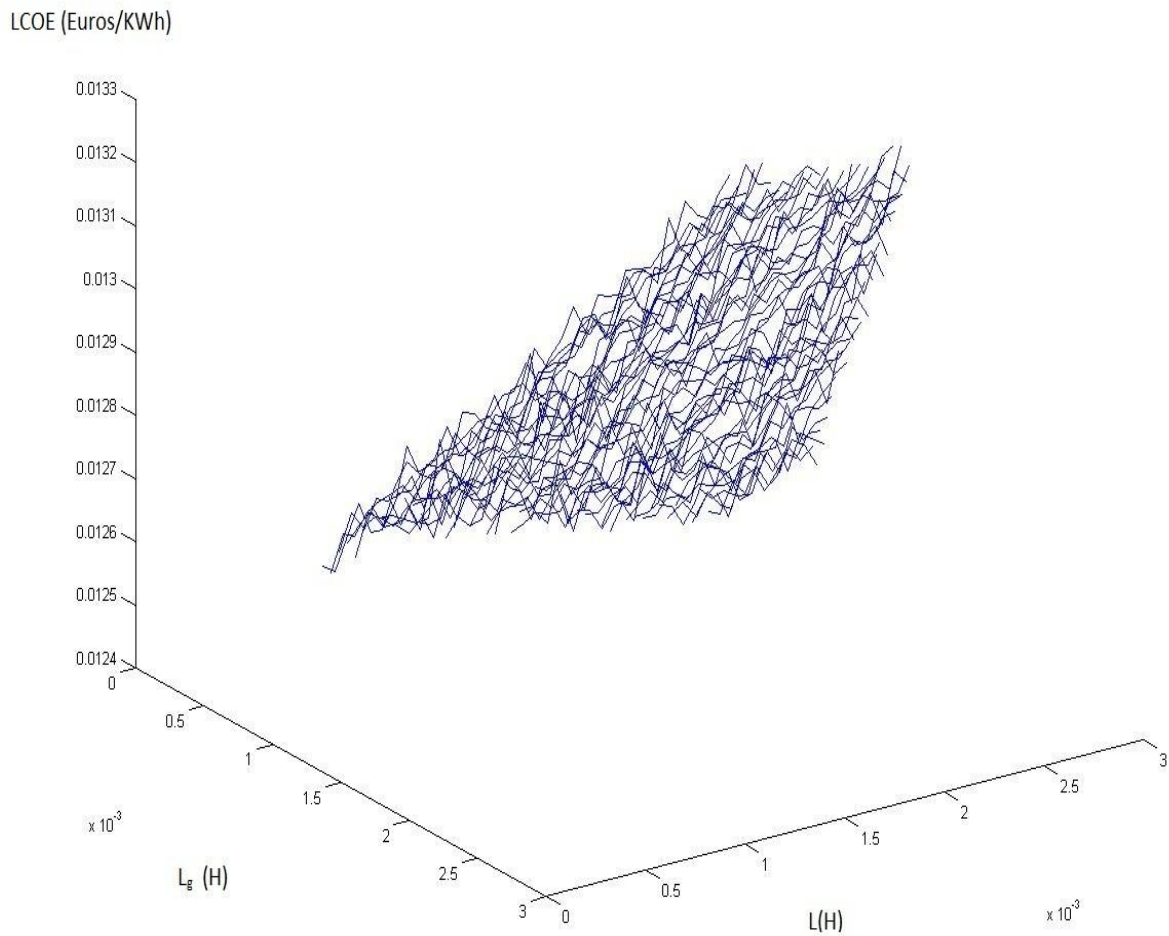
Στον πίνακα 5.13 φαίνονται ο χρόνος εκτέλεσης και οι κλήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε εργαλείο του Matlab

**Πίνακας 5.13. Στατιστικά εργαλείων βελτιστοποίησης του Matlab για αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος**

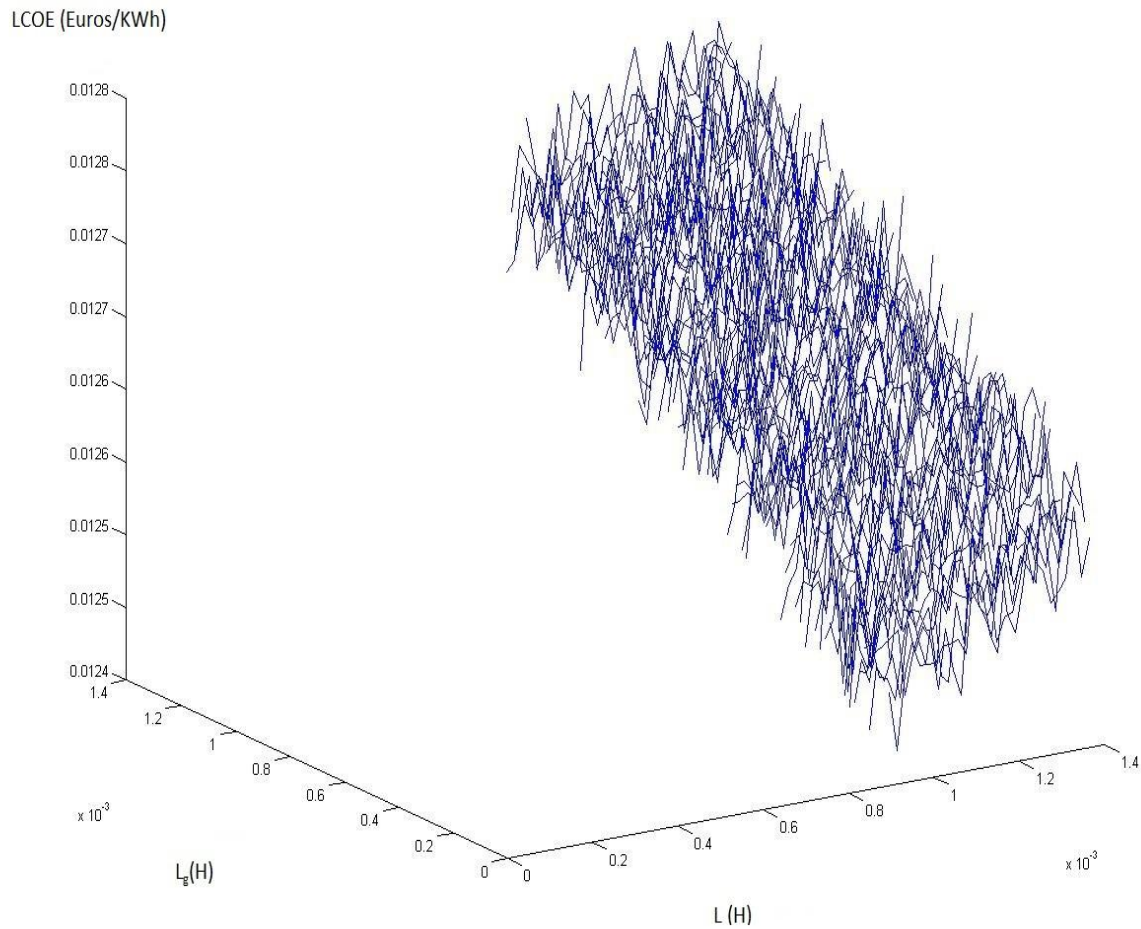
	Χρόνος εκτέλεσης (seconds)	Αριθμός κλήσεων αντικειμενικής συνάρτησης
Γ/A	114.129486	6929
P/S	40.374528	221
fmincon	12.121199	72

## 5.2 Έλεγχος αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Για τον έλεγχο της σύγκλισης των αλγορίθμων καθώς επίσης και για την εξαγωγή γραφικών παραστάσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων πραγματοποιήθηκε πλήρης αναζήτηση (exhaustive search). Οι γραφικές παραστάσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων για διαφορετικές περιοχές φαίνονται στις εικόνες 5.8-5.33. Αρχικά πραγματοποιείται exhaustive search με αραιό ποσοστιαίο βήμα (η ποσοστιαία διαφορά της επόμενης τιμής κάθε μεταβλητής απόφασης κατά την αναζήτηση) και κατόπιν στην περιοχή όπου βρίσκεται το βέλτιστο, πραγματοποιείται νέο exhaustive search με πιο πυκνό ποσοστιαίο βήμα.

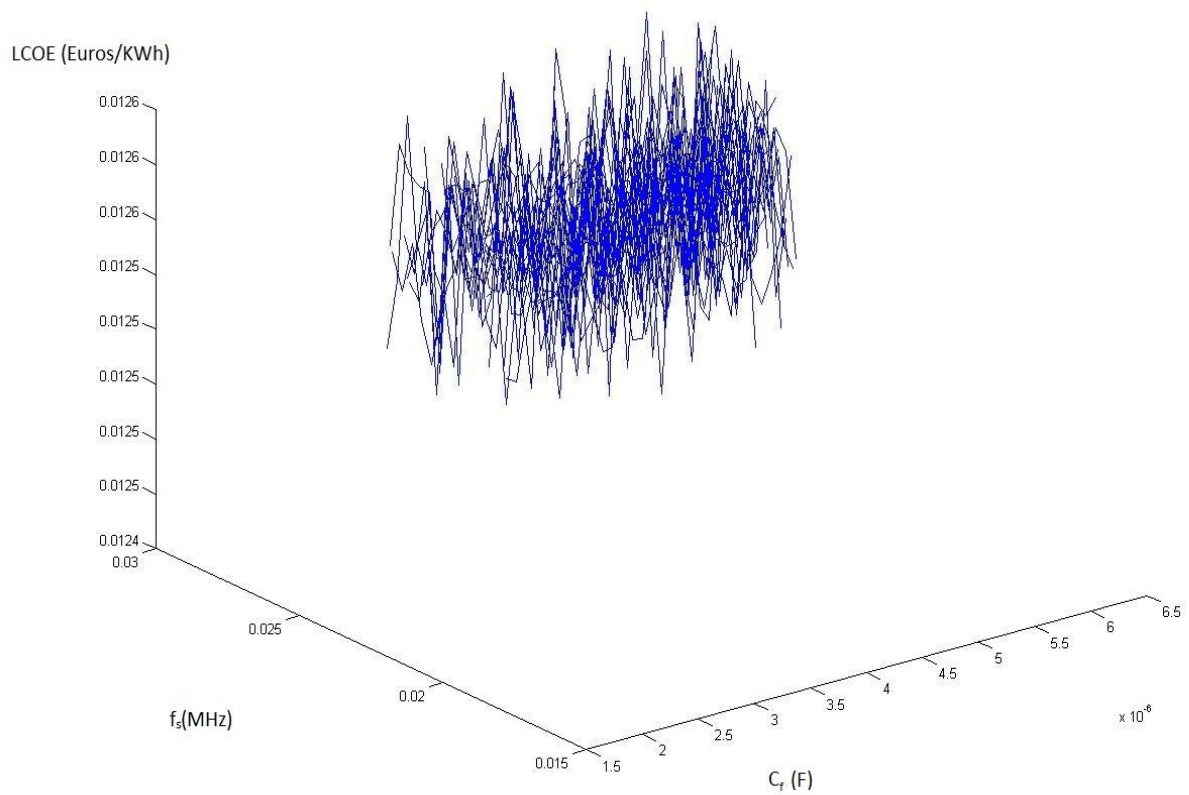


Εικόνα 5.8 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

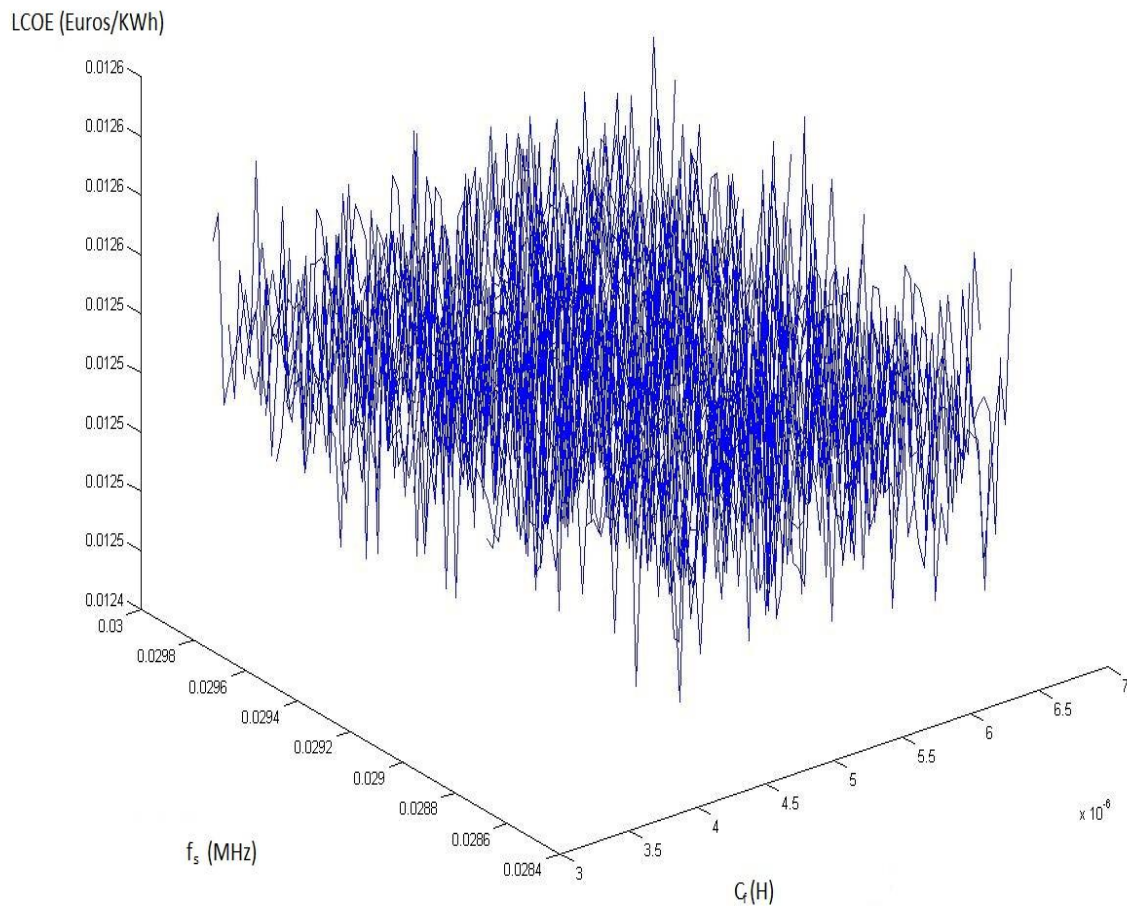


Εικόνα 5.9 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.

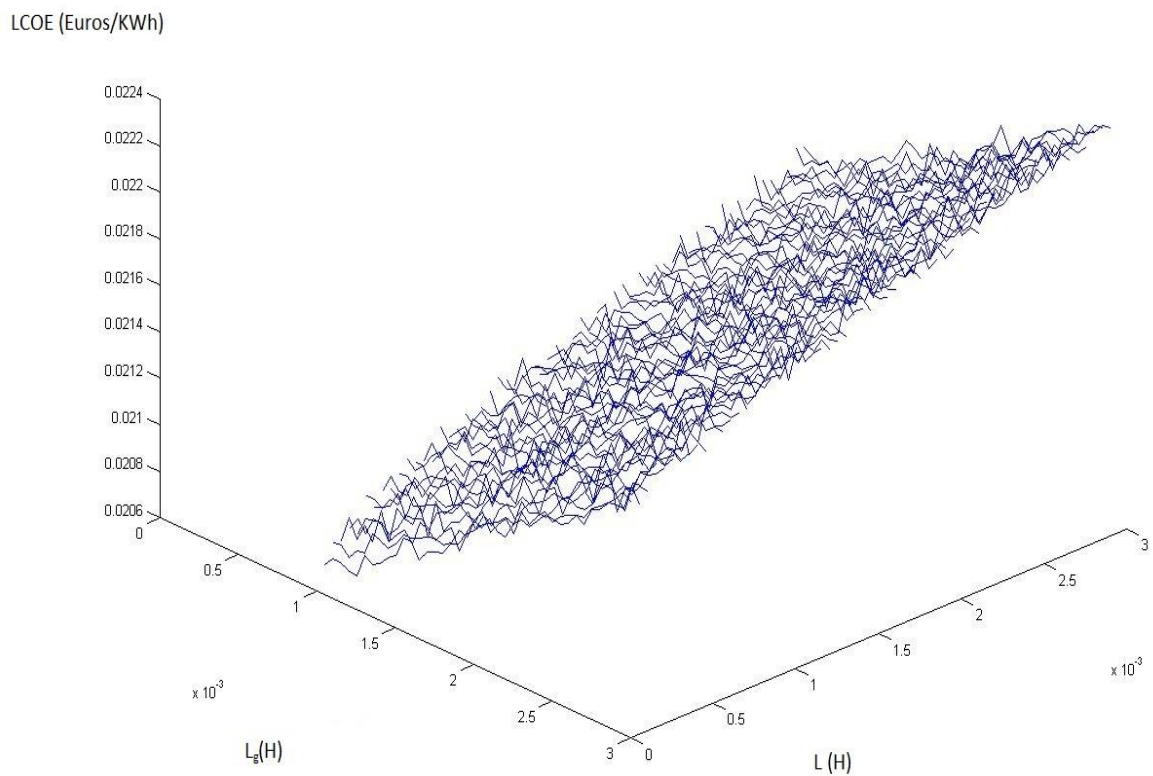




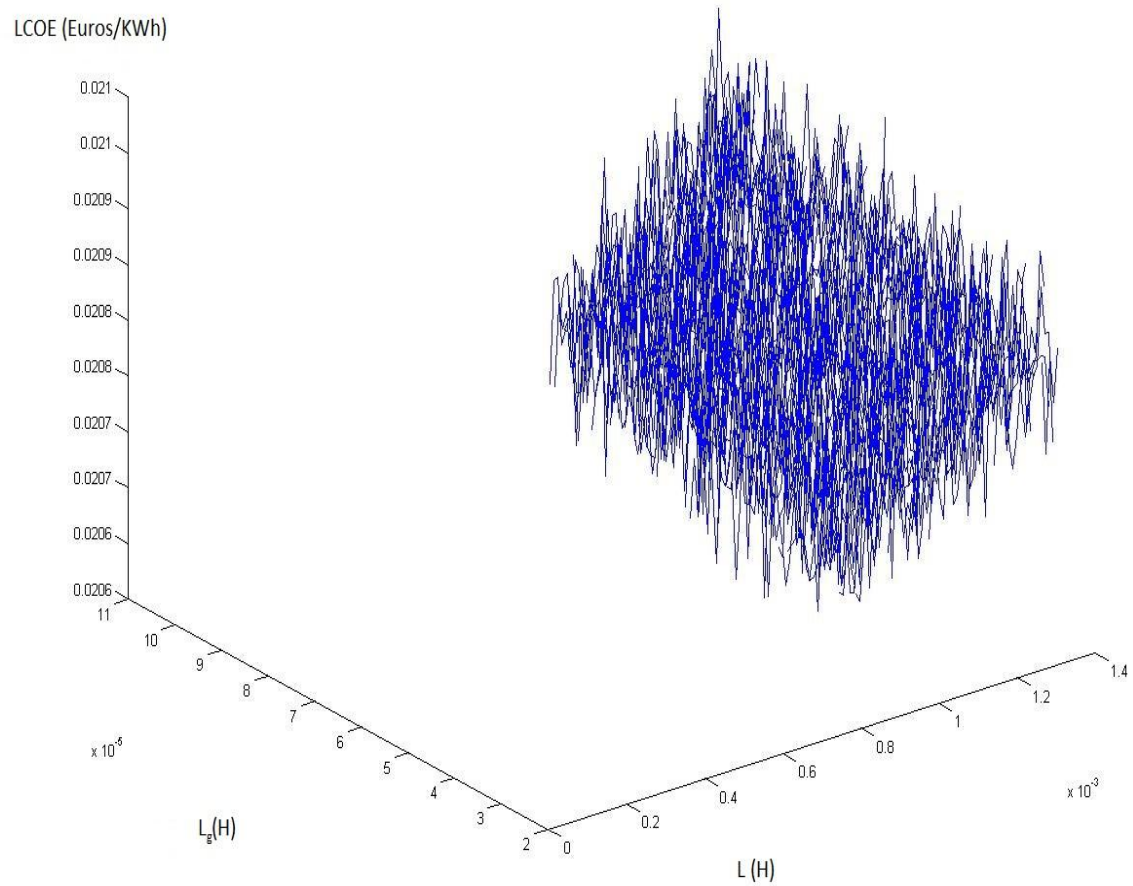
Εικόνα 5.10 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $C_f$ ,  $f_s$  για τη Murcia με τα  $L$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.



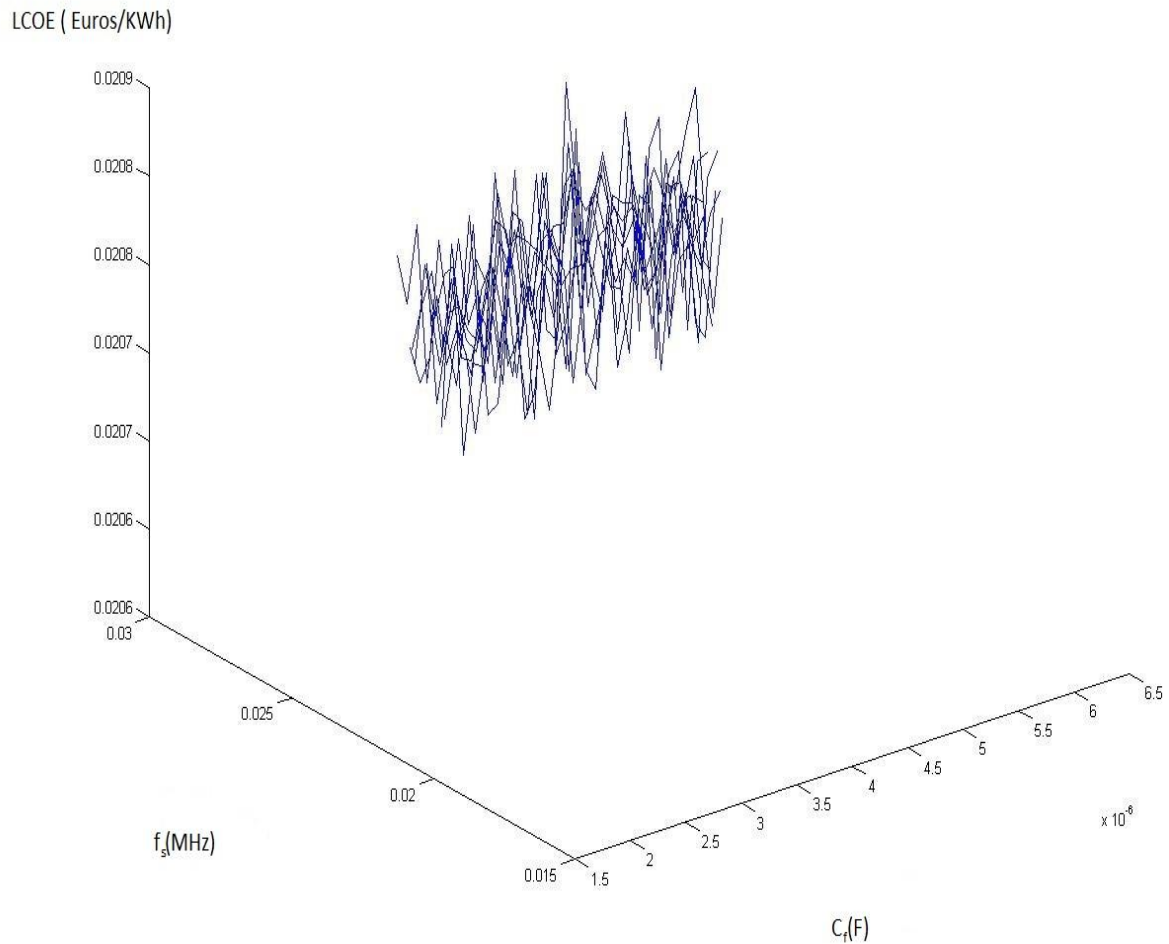
Εικόνα 5.11 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $C_f$ ,  $f_s$  για τη Murcia με τα  $L$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.



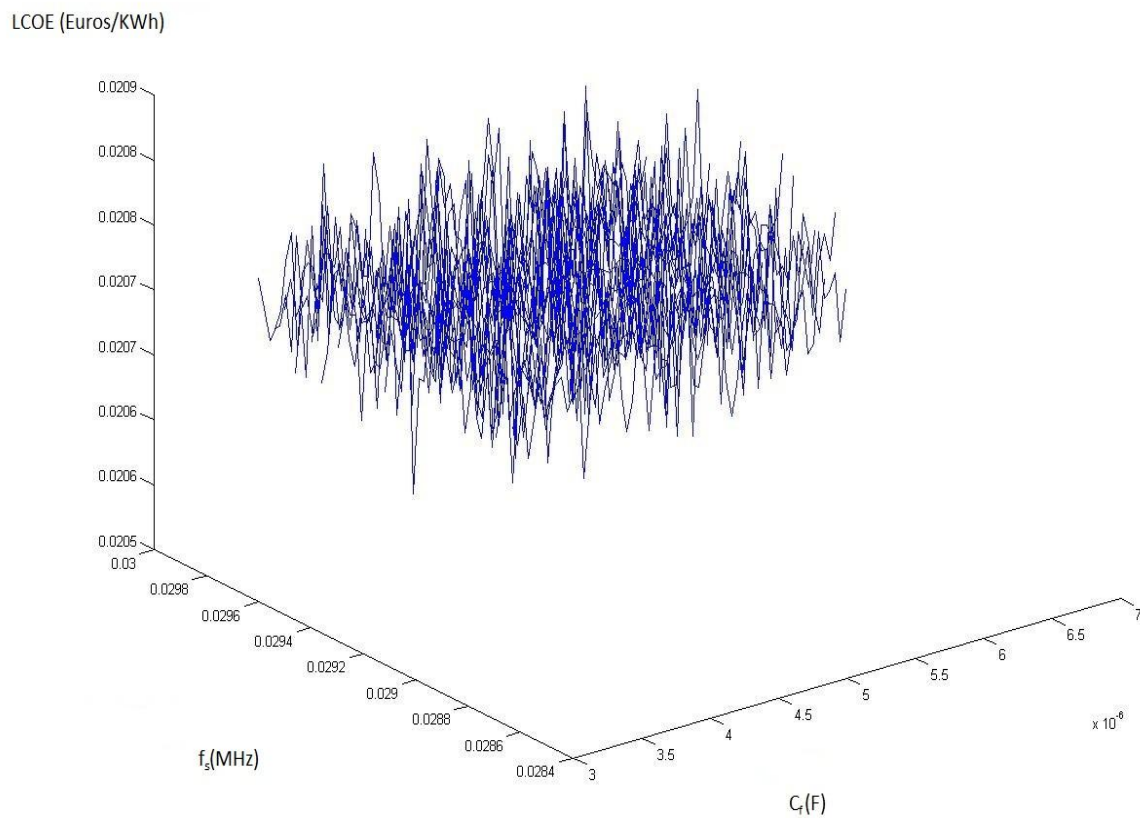
Εικόνα 5.12 Το διάγραμμα του  $LCOE$  ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.



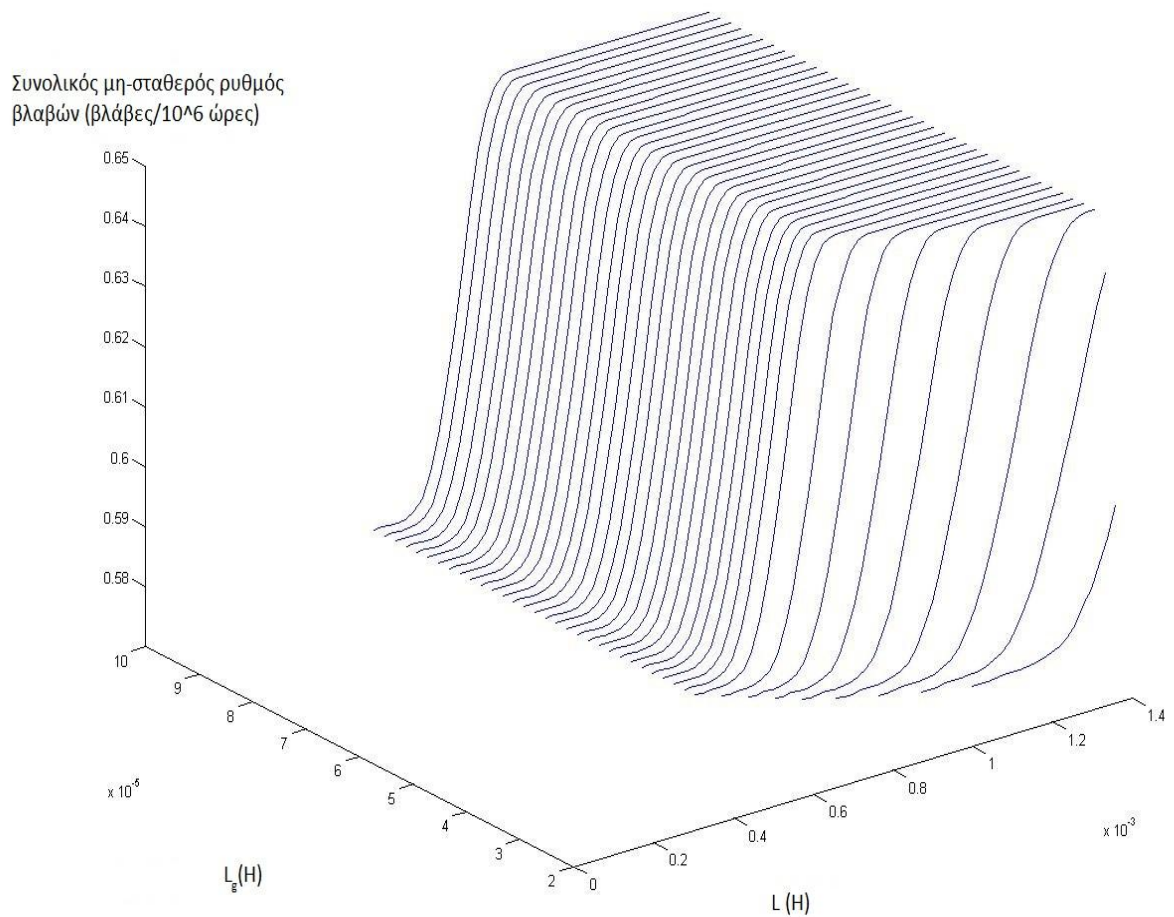
Εικόνα 5.13 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 4% και μικρότερο εύρος τιμών.



Εικόνα 5.14 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $C_f$ ,  $f_s$  για το Oslo με τα  $L$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

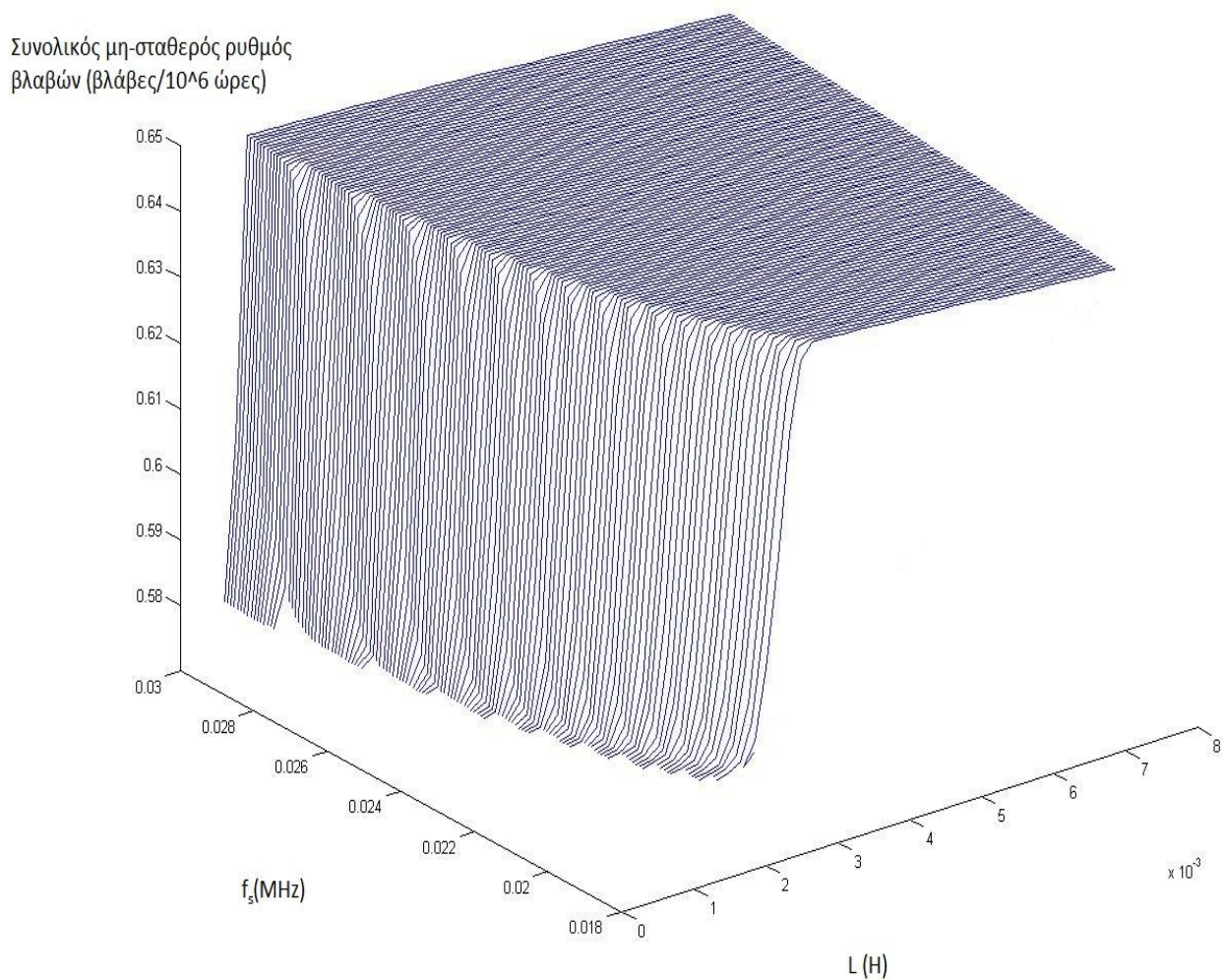


Εικόνα 5.15 Το διάγραμμα του LCOE ως προς τα  $C_f$ ,  $f_s$  για το Oslo με τα  $L$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους με βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.



Εικόνα 5.16 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

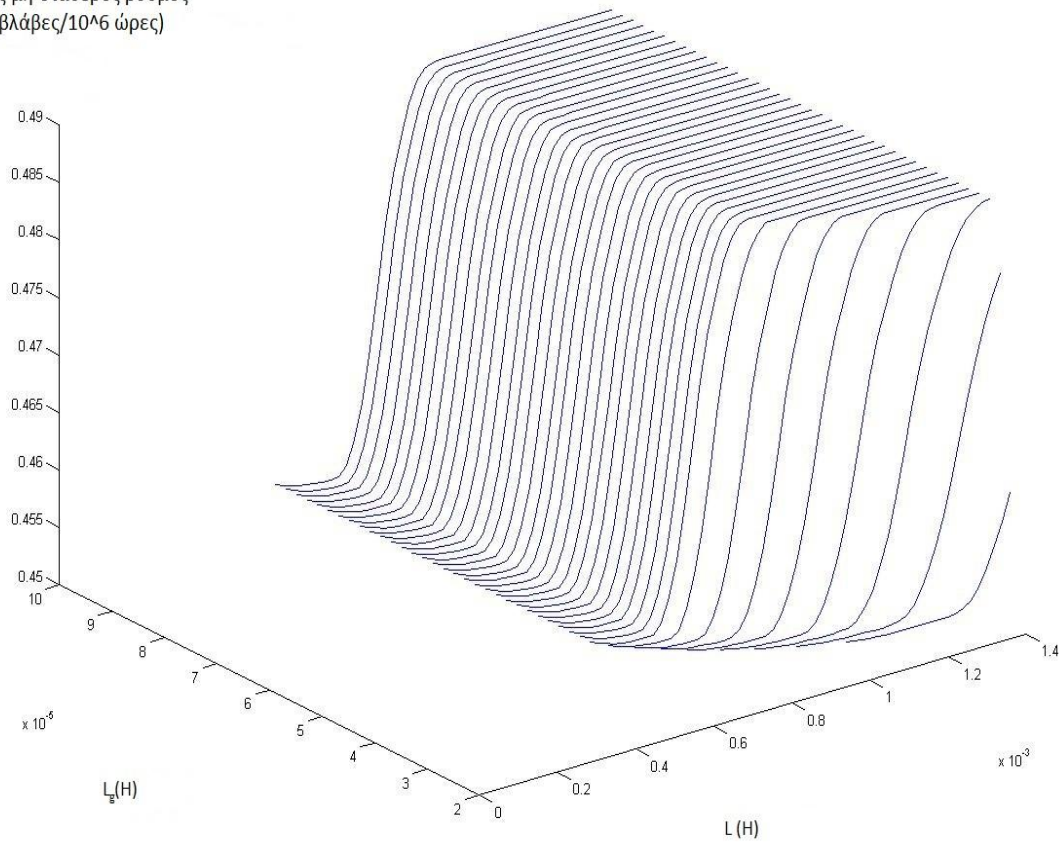




Εικόνα 5.17 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα  $L$ ,  $f_s$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

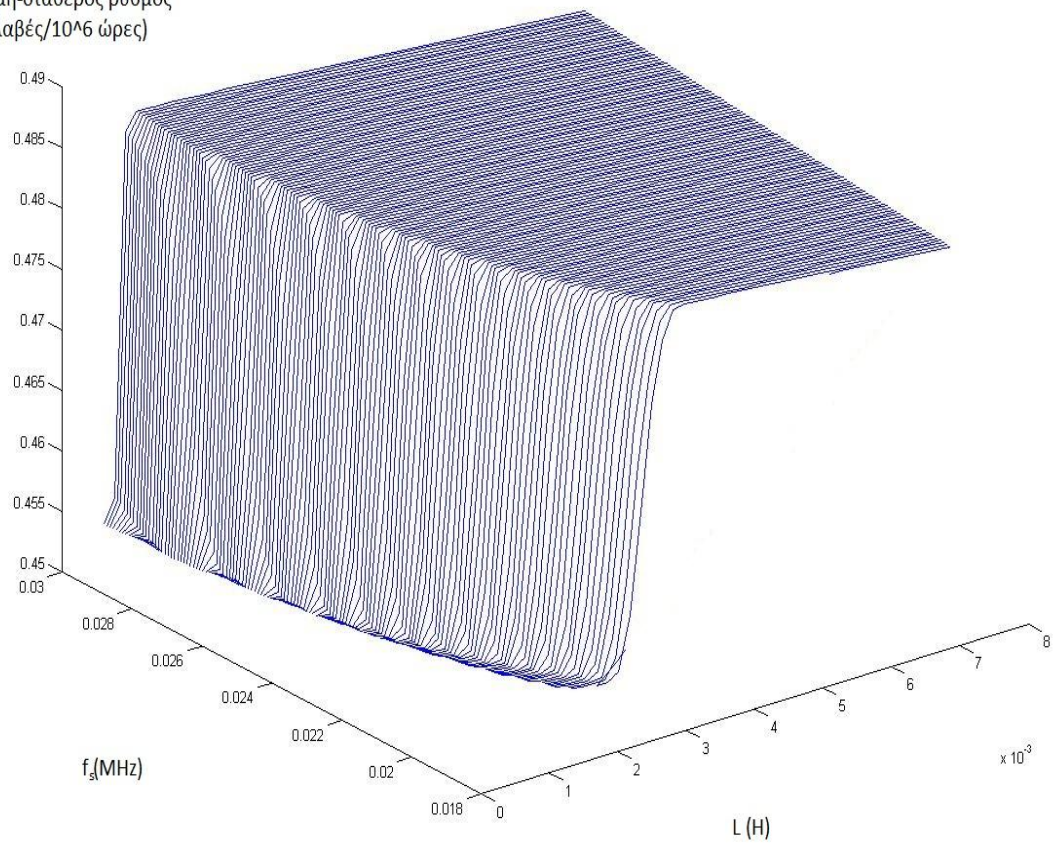


Συνολικός μη-σταθερός ρυθμός  
βλαβών (βλάβες/10<sup>6</sup> ώρες)

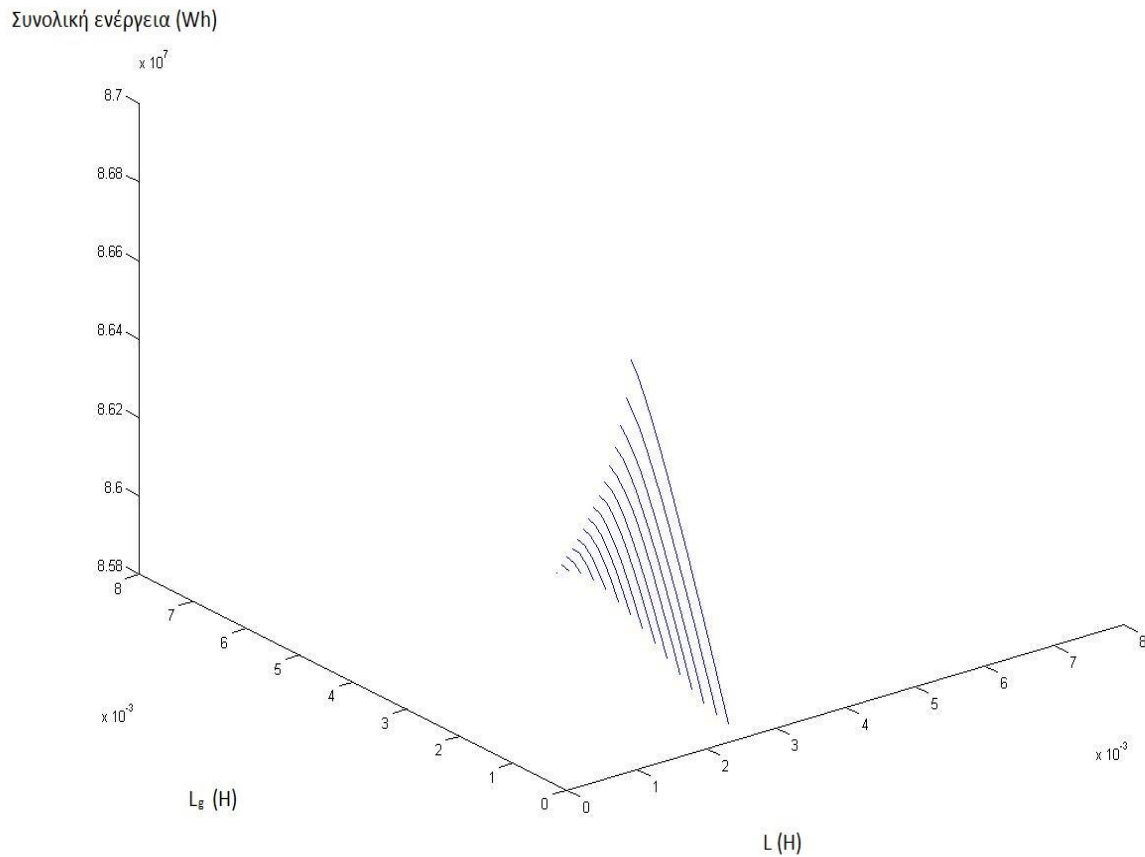


Εικόνα 5.18 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

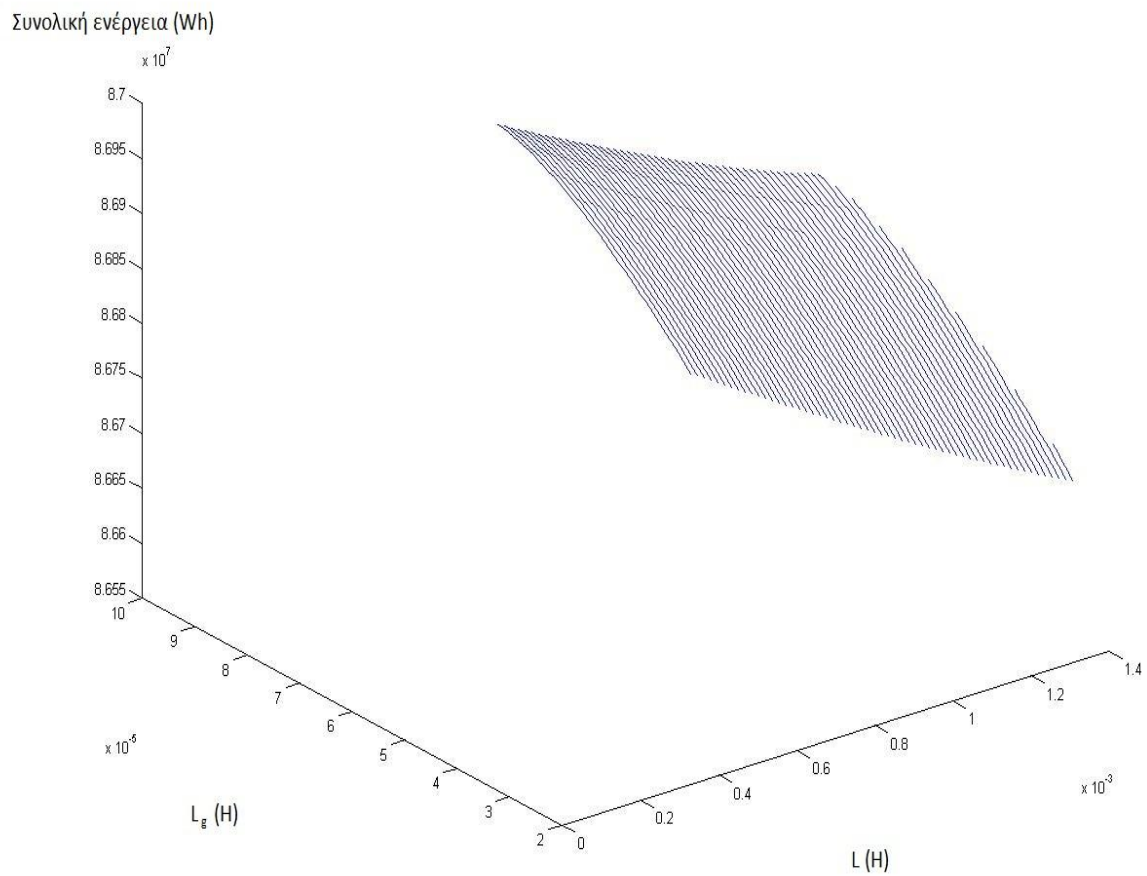
Συνολικός μη-σταθερός ρυθμός  
βλαβών (βλαβές/10<sup>6</sup> ώρες)



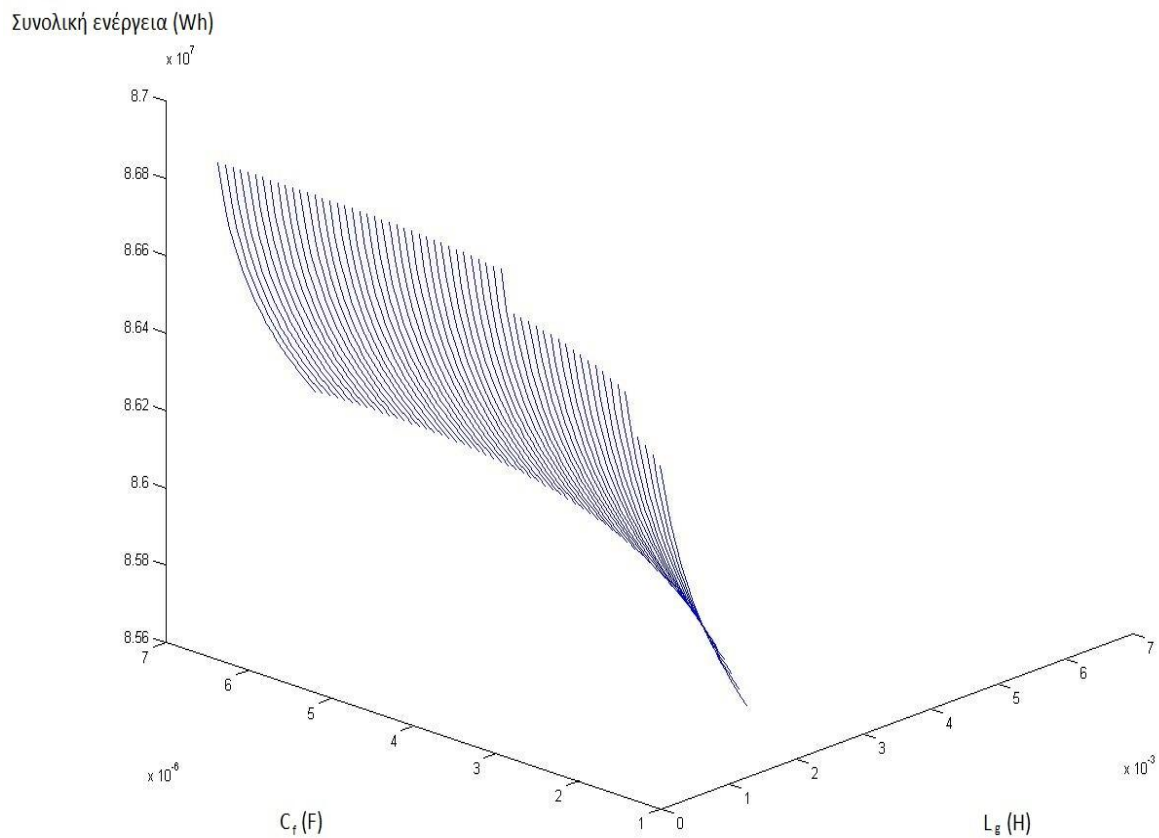
Εικόνα 5.19 Το διάγραμμα του συνολικού μη-σταθερού ρυθμού βλαβών ως προς τα  $L$ ,  $f_s$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.



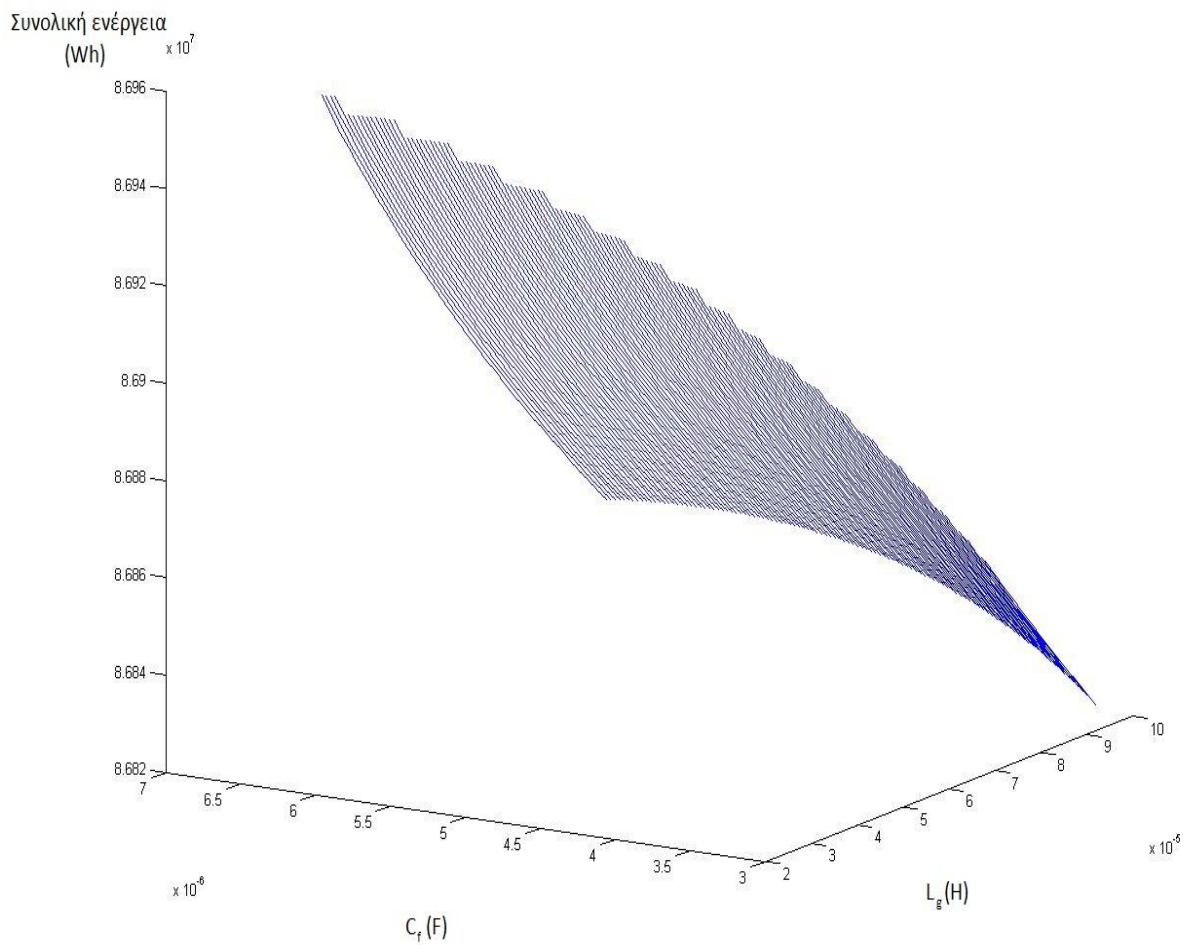
Εικόνα 5.20 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 15%.



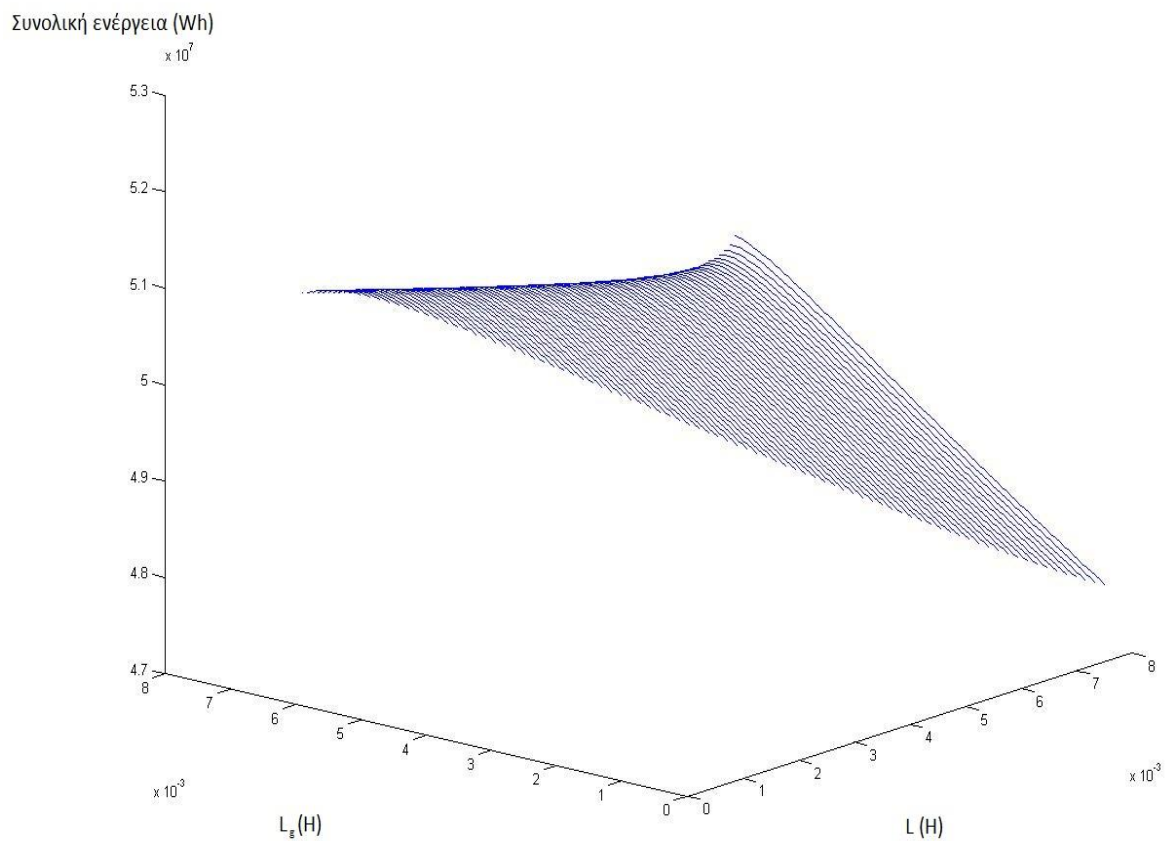
Εικόνα 5.21 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.



Εικόνα 5.22 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L_g$ ,  $C_f$  για τη Murcia με τα  $L$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.

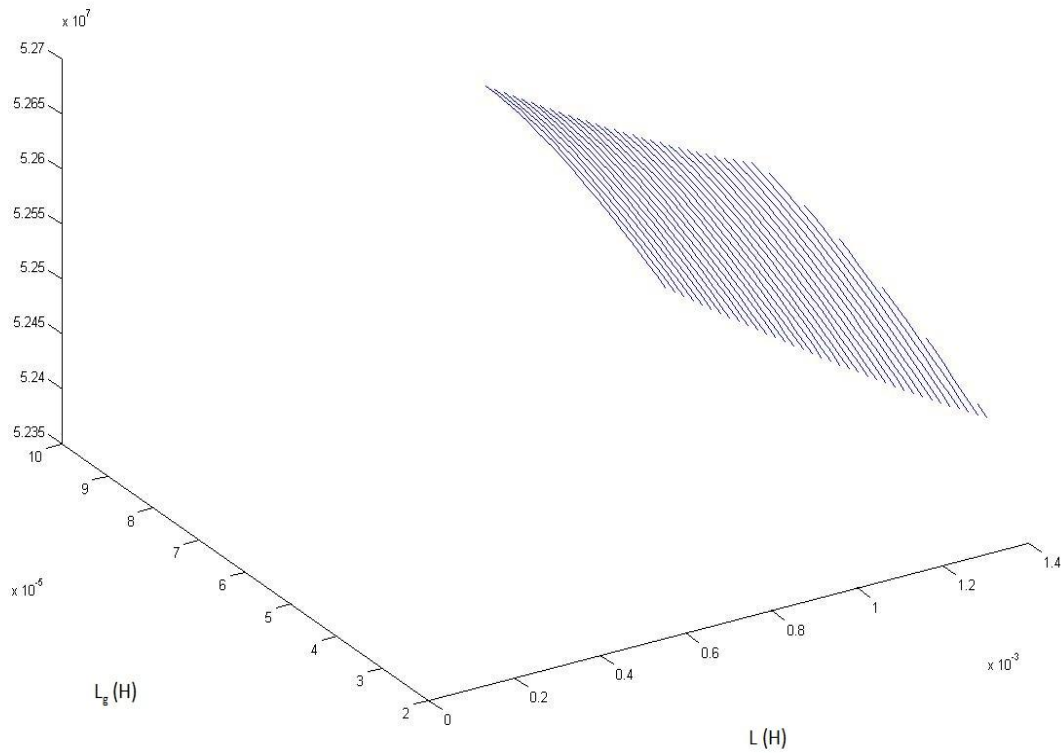


Εικόνα 5.23 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L_g$ ,  $C_f$  για τη Murcia με τα  $L$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.



Εικόνα 5.24 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους και βήμα προσομοίωσης 10%.

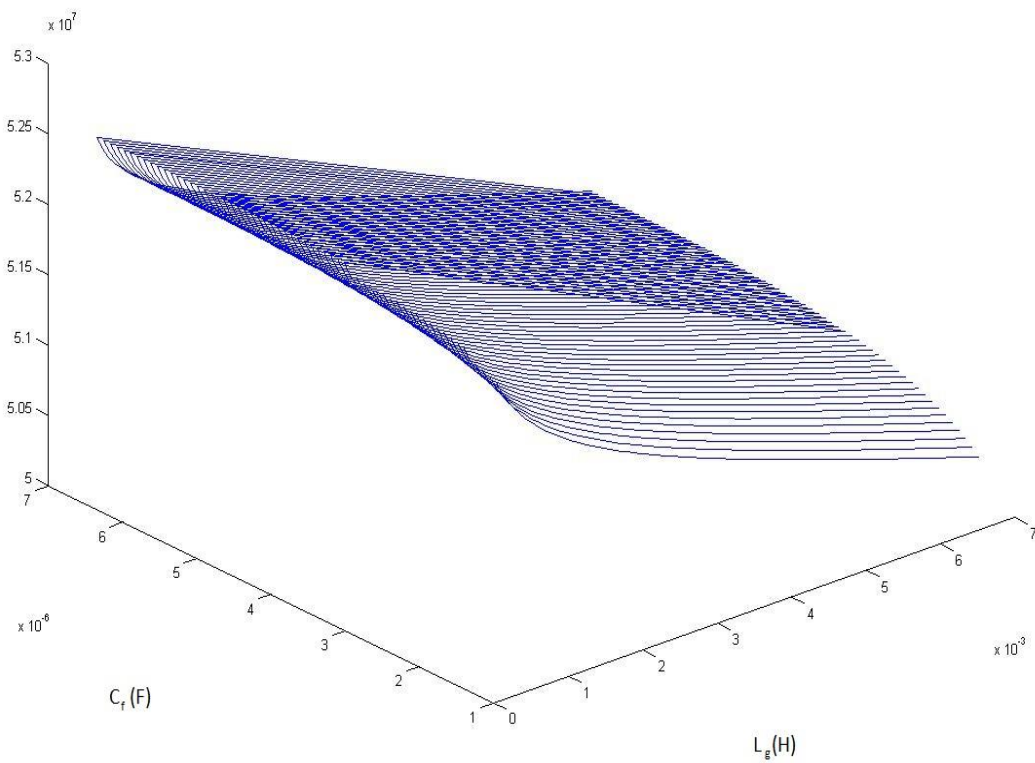
Συνολική ενέργεια (Wh)



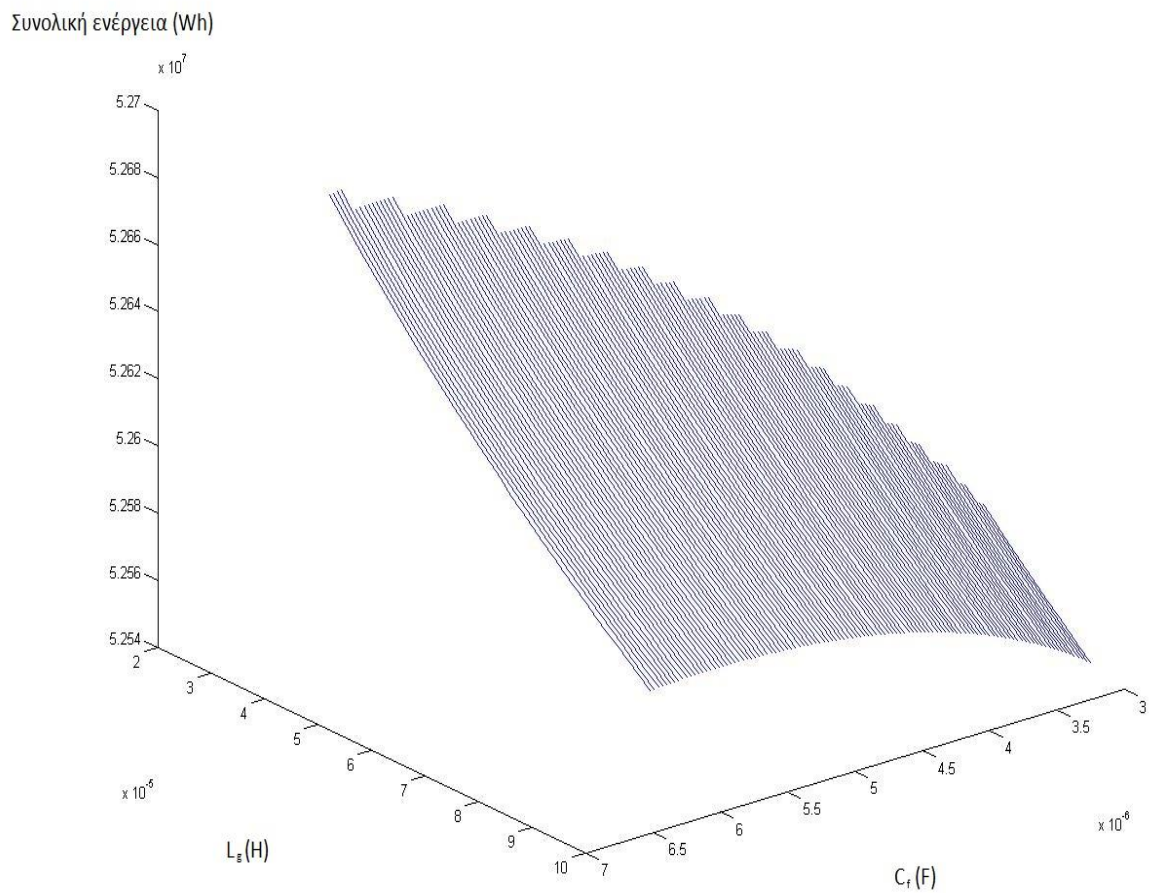
Εικόνα 5.25 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10% και μικρότερο εύρος τιμών.



Συνολική ενέργεια (Wh)

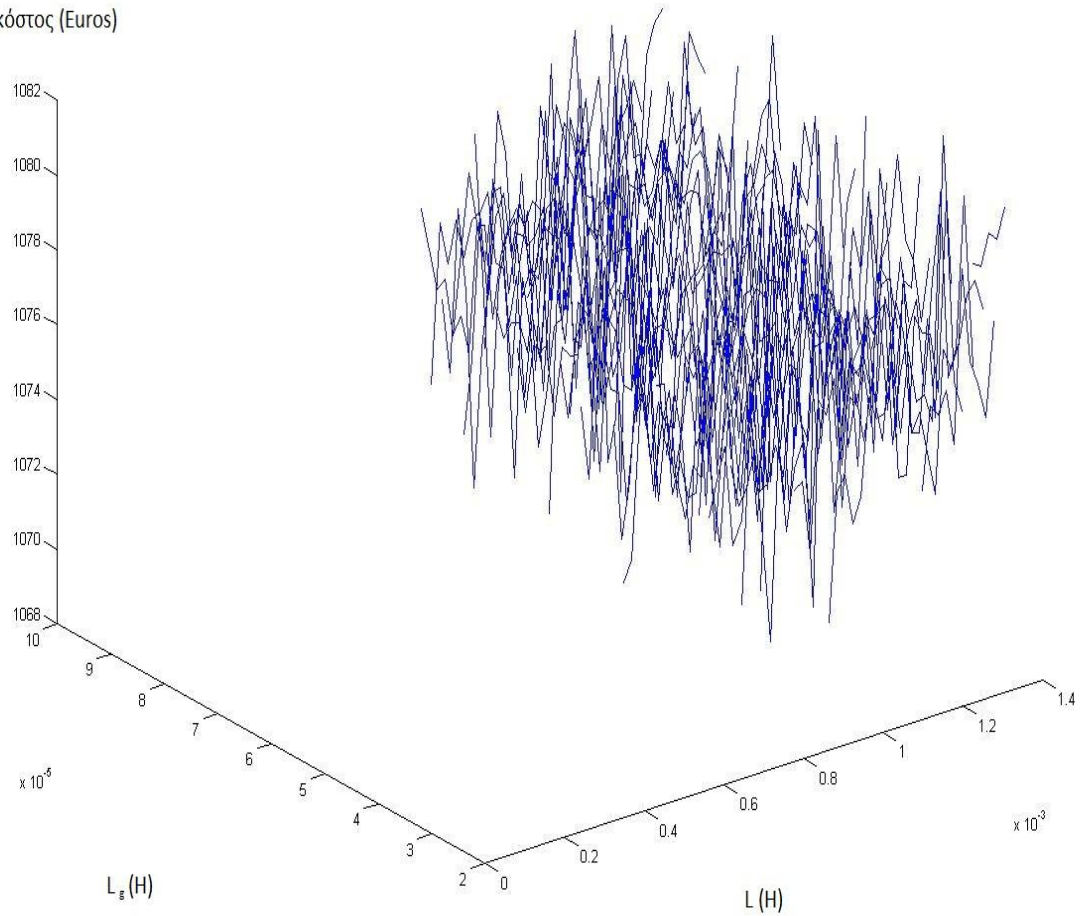


Εικόνα 5.26 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L_g$ ,  $C_f$  για το Oslo με τα  $L$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.

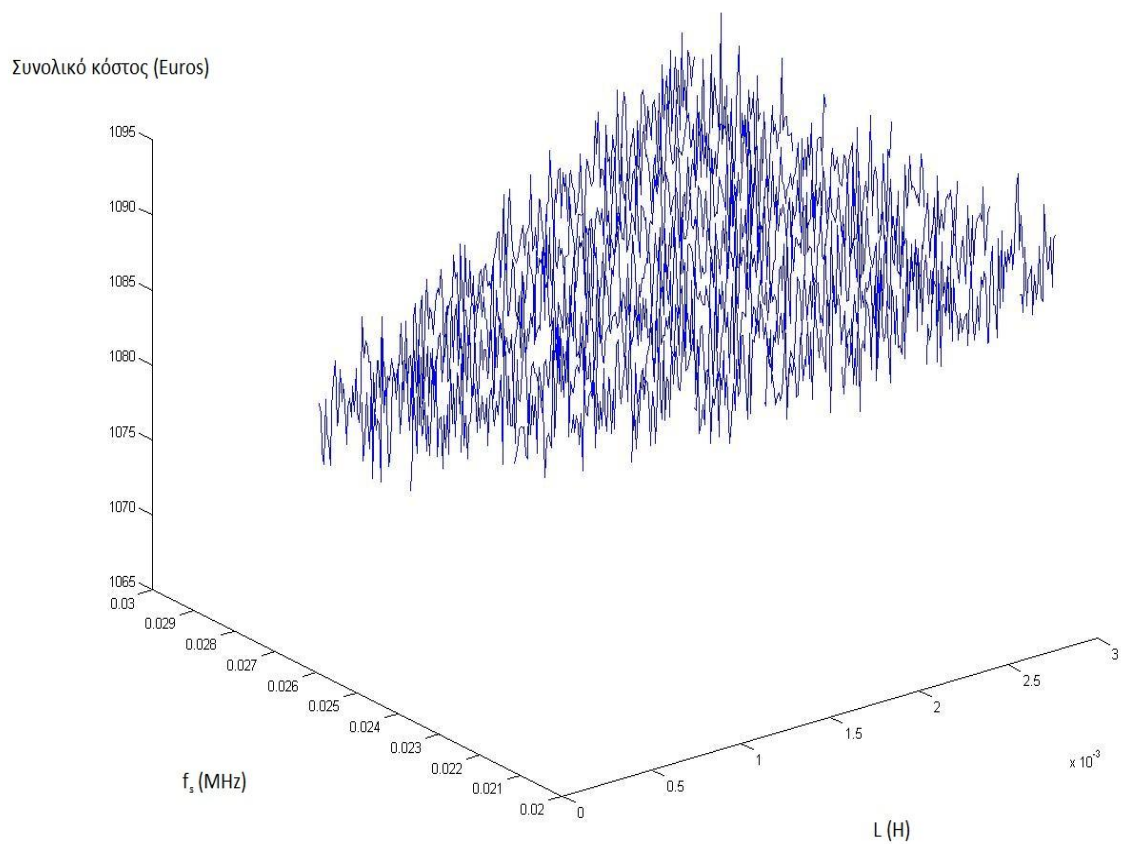


Εικόνα 5.27 Το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ως προς τα  $L_g$ ,  $C_f$  για το Oslo με τα  $L$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 5% και μικρότερο εύρος τιμών.

Συνολικό κόστος (Euros)

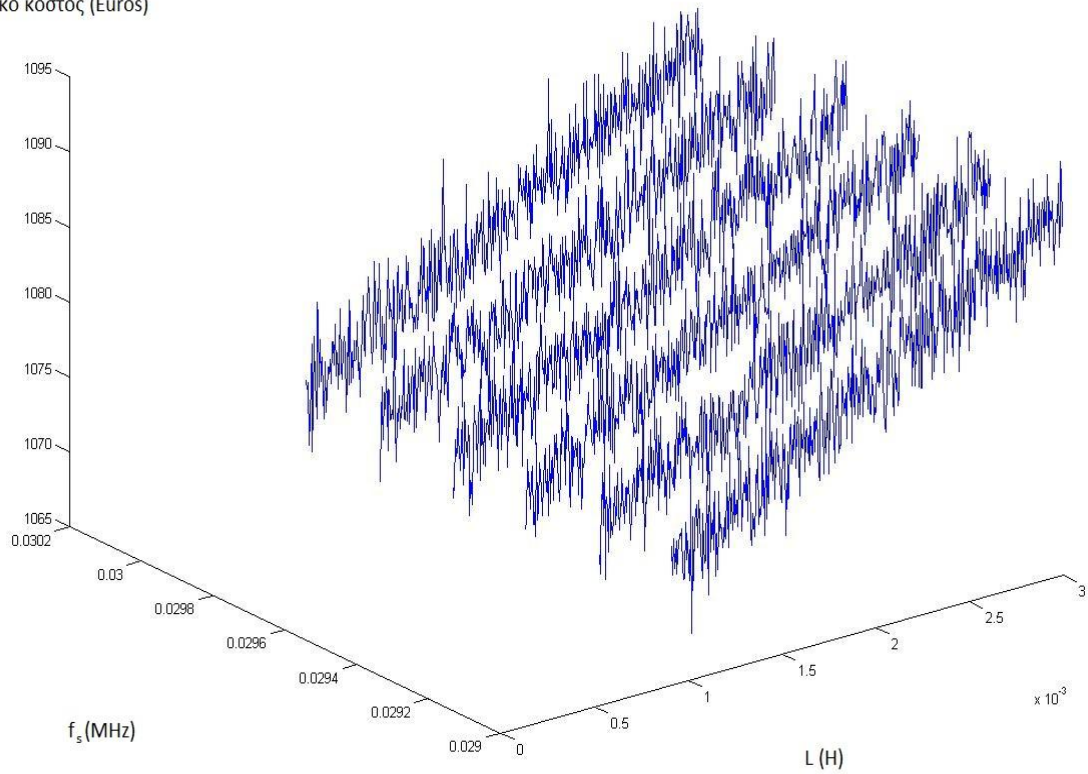


Εικόνα 5.28 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.

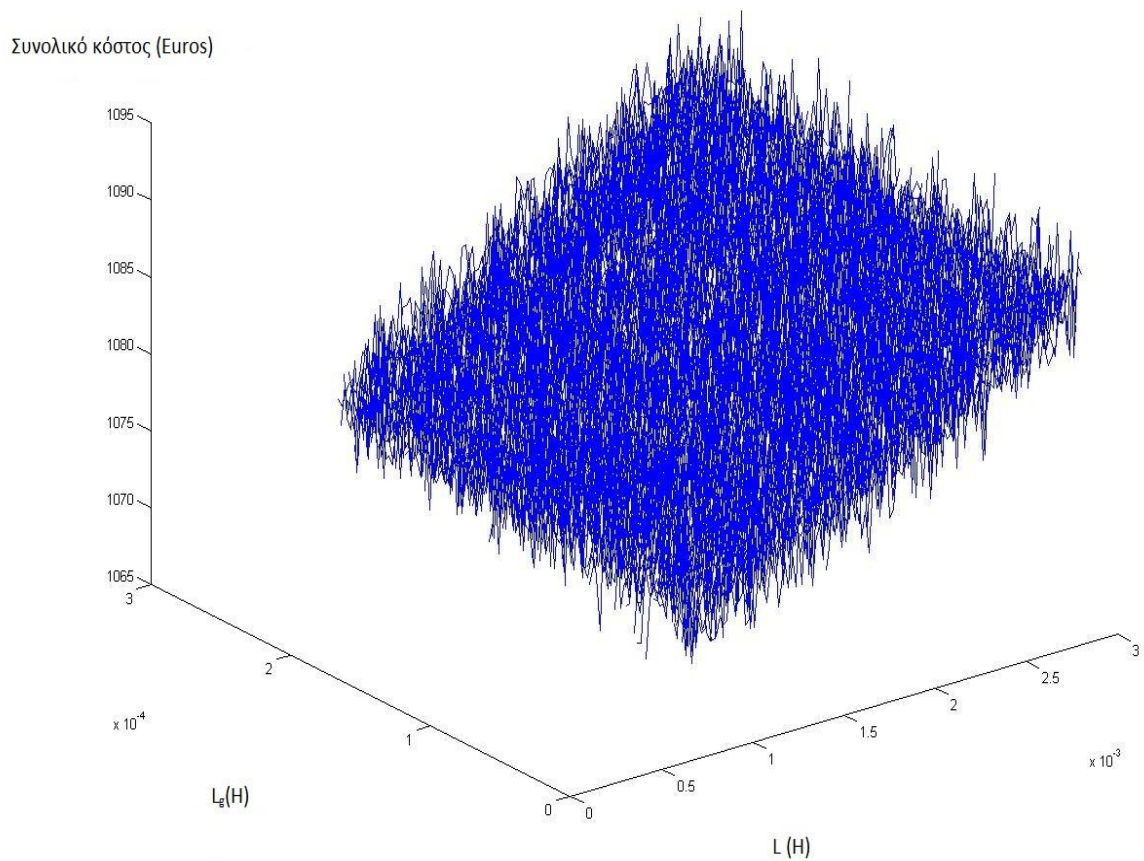


Εικόνα 5.29 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L$ ,  $f_s$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.

Συνολικό κόστος (Euros)



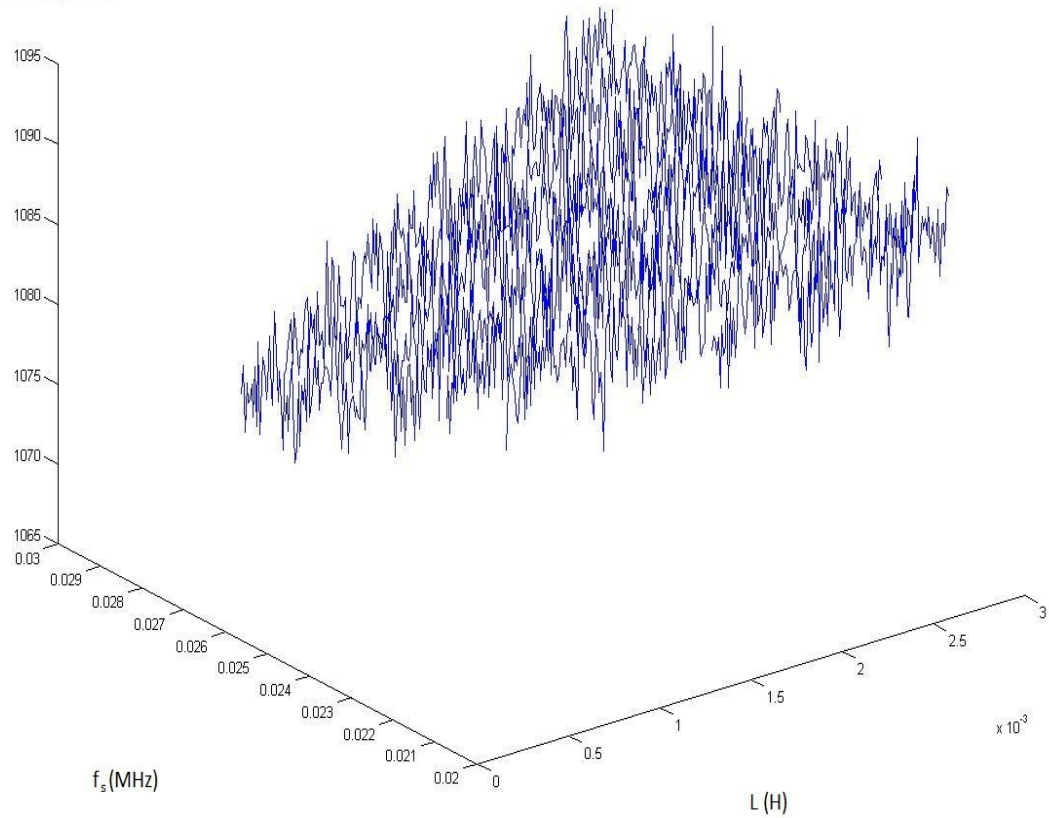
Εικόνα 5.30 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L$ ,  $f_s$  για τη Murcia με τα  $C_f$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 8% και μικρότερο εύρος τιμών.



Εικόνα 5.31 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L$ ,  $L_g$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $f_s$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 3%.

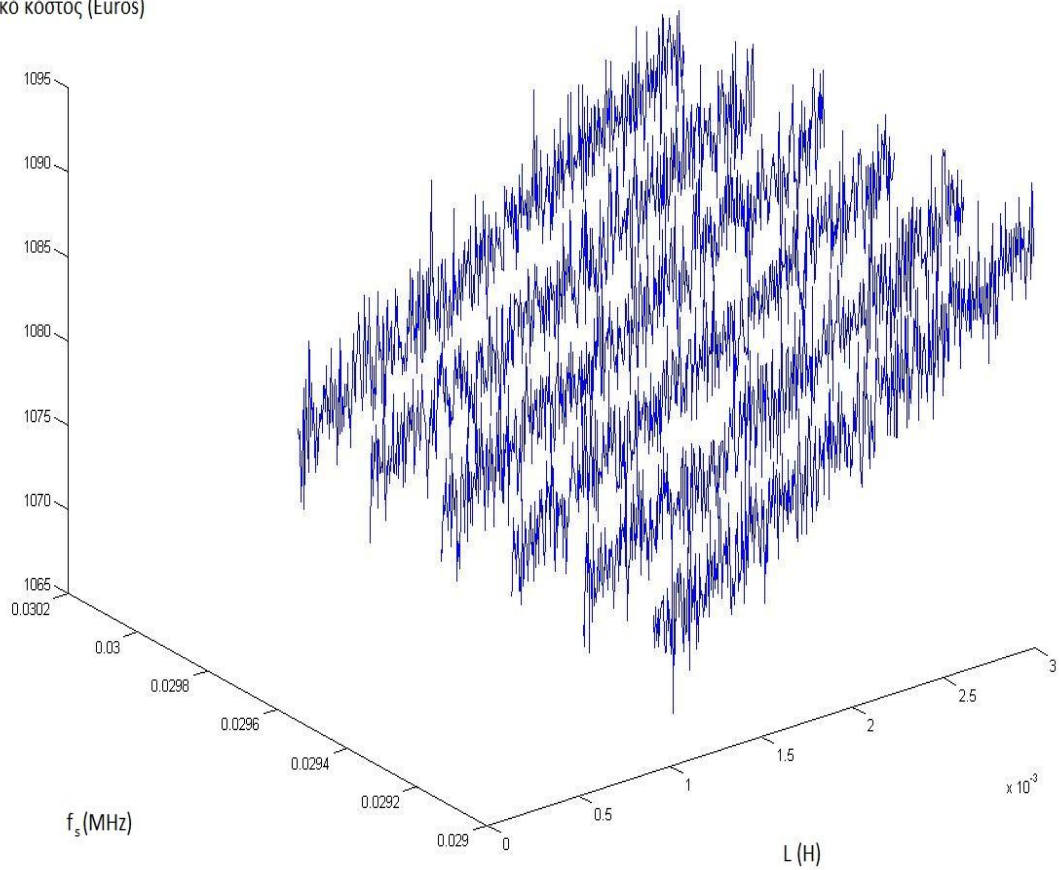


Συνολικό κόστος (Euros)



Εικόνα 5.32 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L, f_s$  για το Oslo με τα  $C_f, L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 10%.

Συνολικό κόστος (Euros)



Εικόνα 5.33 Το διάγραμμα του συνολικού κόστους ως προς τα  $L$ ,  $f_s$  για το Oslo με τα  $C_f$ ,  $L_g$  σταθερά στις βέλτιστες τιμές τους για βήμα προσομοίωσης 8% και μικρότερο εύρος τιμών.



Οι προηγούμενες γραφικές παραστάσεις δείχνουν την έντονη μη-γραμμικότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων. Επιπροσθέτως, φαίνεται η αβεβαιότητα στην έξοδο κατά τον υπολογισμό του LCOE και του συνολικού κόστους σε σχέση με τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις. Αυτό προκαλείται από τη στοχαστική διαδικασία Monte Carlo κατά τον υπολογισμό των βλαβών σε κάθε έτος λειτουργίας. Η πλήρης αναζήτηση κατέληξε σε βέλτιστα αποτελέσματα πολύ κοντά σε εκείνα που κατέληξαν τα εργαλεία του Matlab αλλά απαιτεί πολλαπλάσιο χρόνο για να ολοκληρωθεί. Στους Πίνακες 5.14-5.17 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αντίστοιχων παραδειγμάτων.

**Πίνακας 5.14. Σύγκριση βέλτιστων αποτελεσμάτων (Murcia, με αντικειμενική συνάρτηση το LCOE)**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ ( $\mu$ F)	$f_s$ (kHz)	$LCOE$ (€/MWh)
Matlab (Γ/A και P/S)	1.06	0.0574	6.58	28,5	12.5639
Exhaustive search	0.99	0.0487	6.24	29.3	12.4877

**Πίνακας 5.15. Σύγκριση βέλτιστων αποτελεσμάτων (Oslo, με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό μη σταθερό failure rate)**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ ( $\mu$ F)	$f_s$ (kHz)	<i>Ρυθμός βλαβών (αριθμός βλαβών/10<sup>6</sup> ώρες)</i>
Matlab (Γ/A,P/S και fmincon)	1.07	0.0709	5.34	23.1	0.452437
Exhaustive search	1.12	0.0601	5.89	23.2	0.452312

**Πίνακας 5.16. Σύγκριση βέλτιστων αποτελεσμάτων (Oslo, με αντικειμενική συνάρτηση τη συνολική ενέργεια)**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ ( $\mu$ F)	$f_s$ (kHz)	ενέργεια (Wh)
Matlab (Γ/A,P/S και fmincon)	0.95907	0.046536	6.0957	30	5.17340e+07
Exhaustive search	0.96012	0.041235	6.1245	29.9	5.17470e+07

**Πίνακας 5.17. Σύγκριση βέλτιστων αποτελεσμάτων (Murcia, με αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος)**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ ( $\mu$ F)	$f_s$ (kHz)	κόστος (€)
Matlab (Γ/A και P/S)	1.30	0.081467	6.1244	29.1	1071.4
Exhaustive search	1.21	0.079123	6.2133	29.4	1069.5

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, οι ετήσιες χρονοσειρές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας θεωρείται ότι επαναλαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο σε όλο τον χρόνο ζωής του συστήματός μας. Για την περαιτέρω ανάλυση του αλγορίθμου, γίνεται η υπόθεση ότι η ηλιακή ακτινοβολία έχει μία τυχαία μεταβολή από το ένα έτος στο άλλο με μέγιστη τιμή +/- 10%. Τα αποτελέσματα για τις αντικειμενικές συναρτήσεις συνολικής παραγόμενης ενέργειας και συνολικού μη σταθερού ρυθμού βλαβών φαίνονται στους Πίνακες 5.18-5.19.

**Πίνακας 5.18. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας(με τυχαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από χρόνο σε χρόνο).**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	Ενέργεια (Wh)
Athens	0.8750	0.0411	6.54	30	7.72415e+07
Murcia	0.9041	0.0578	4.57	29.8	8.69424e+07
Freiburg	0.9210	0.0547	4.60	29.8	5.18276e+07
Oslo	0.9592	0.0616	4.43	29.9	5.11300e+07

**Πίνακας 5.19. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συνολικού μη σταθερού ρυθμού βλαβών(με τυχαία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από χρόνο σε χρόνο).**

	$L$ (mH)	$L_g$ (mH)	$C_f$ (μF)	$f_s$ (kHz)	Ρυθμό βλαβών (αστοχίες/10 <sup>6</sup> ώρες)
Athens	1.01	0.07812	6.19	19.2	0.631948
Murcia	0.99	0.06821	6.04	20	0.575816
Freiburg	1.15	0.0851	5.29	22.7	0.489639
Oslo	1.25	0.0905	5.19	22.1	0.483990

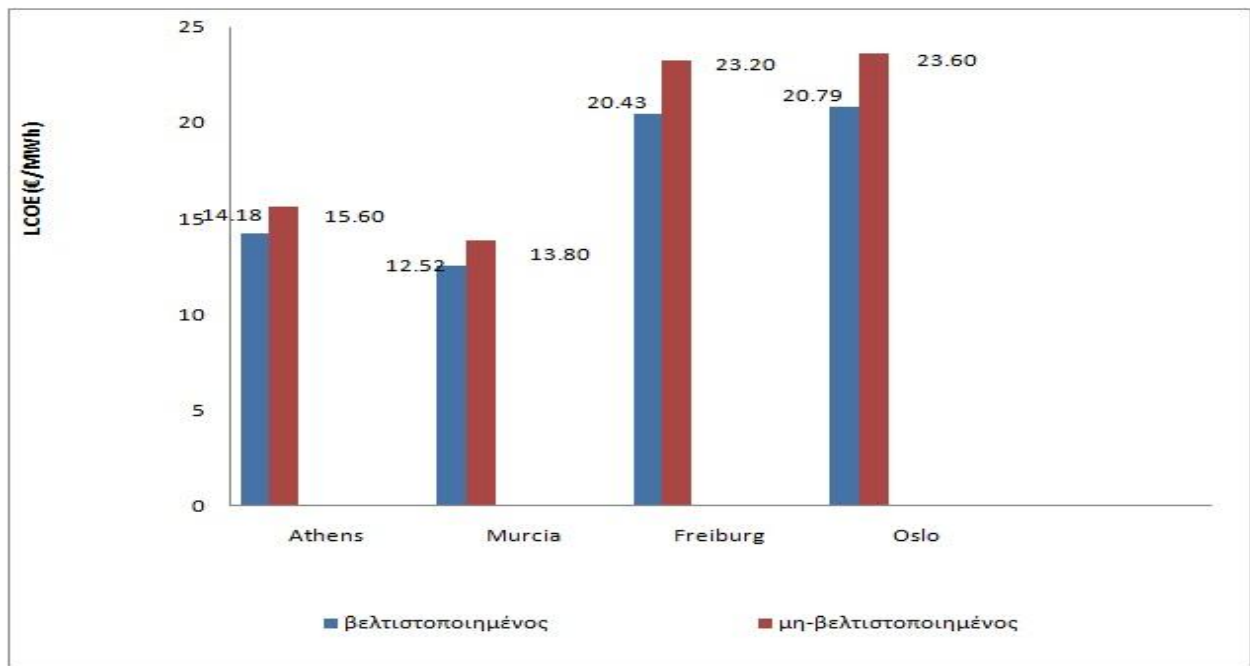
Παρατηρούνται διαφορές 1.2-1.7% στις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες βελτιστοποιήσεις στους Πίνακες 5.1 και 5.8.

### 5.3 Σύγκριση με μη βελτιστοποιημένο αντιστροφέα

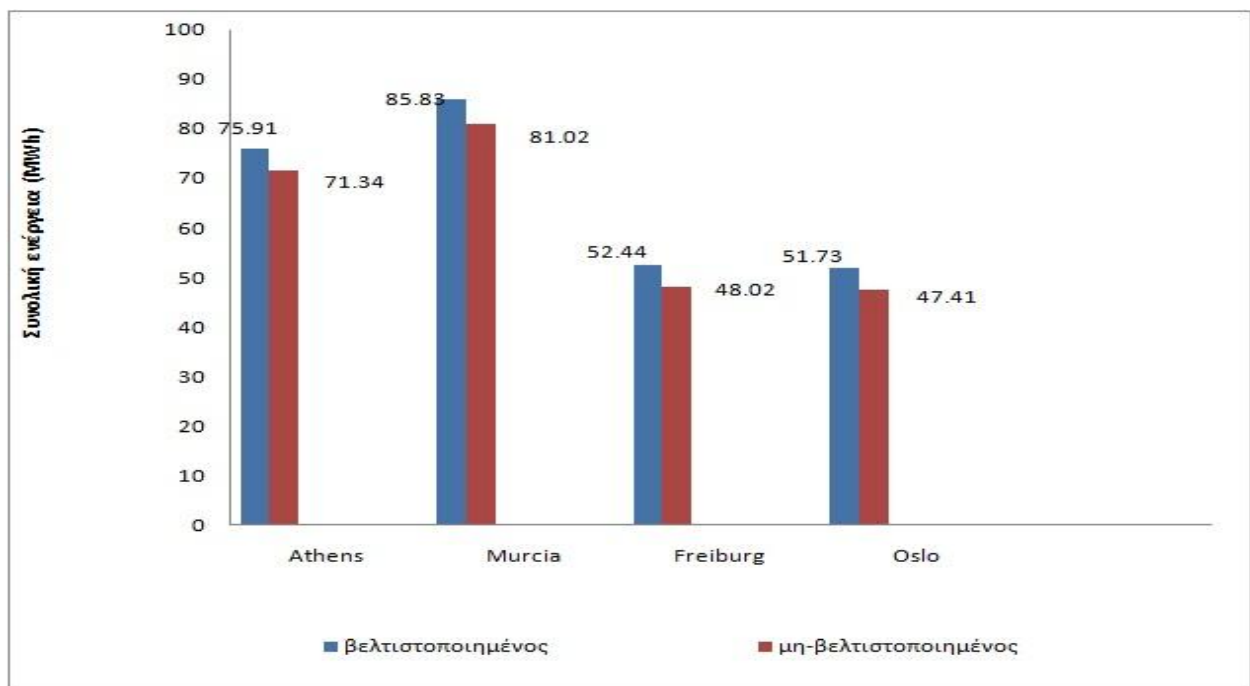
Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε σύγκριση του βελτιστοποιημένου αντιστροφέα με ένα αντιστροφέα με τα εξής στοιχεία:  $f_s=8$  kHz,  $L=5.65$  mH,  $L_g=1.09$  mH και  $C_f=3.29$   $\mu$ F. Οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων για τη μη-βελτιστοποιημένη λύση φαίνονται στον Πίνακα 5.20.

Πίνακας 5.20. Τιμές LCOE, συνολικής παραγόμενης ενέργειας, συνολικού κόστους και μη σταθερού ρυθμού βλαβών για μη-βελτιστοποιημένο αντιστροφέα				
	<i>LCOE</i>	Μη σταθερός ρυθμός βλαβών (αριθμός βλαβών/10 <sup>6</sup> ώρες)	Ενέργεια (Wh)	κόστος (€)
Athens	15.6	0.6348	7.1336e+07	1115.7
Murcia	13.8	0.6293	8.1021e+07	1118.5
Freiburg	23.2	0.5141	4.8023e+07	1111.6
Oslo	23.6	0.4758	4.7413e+07	1112.2

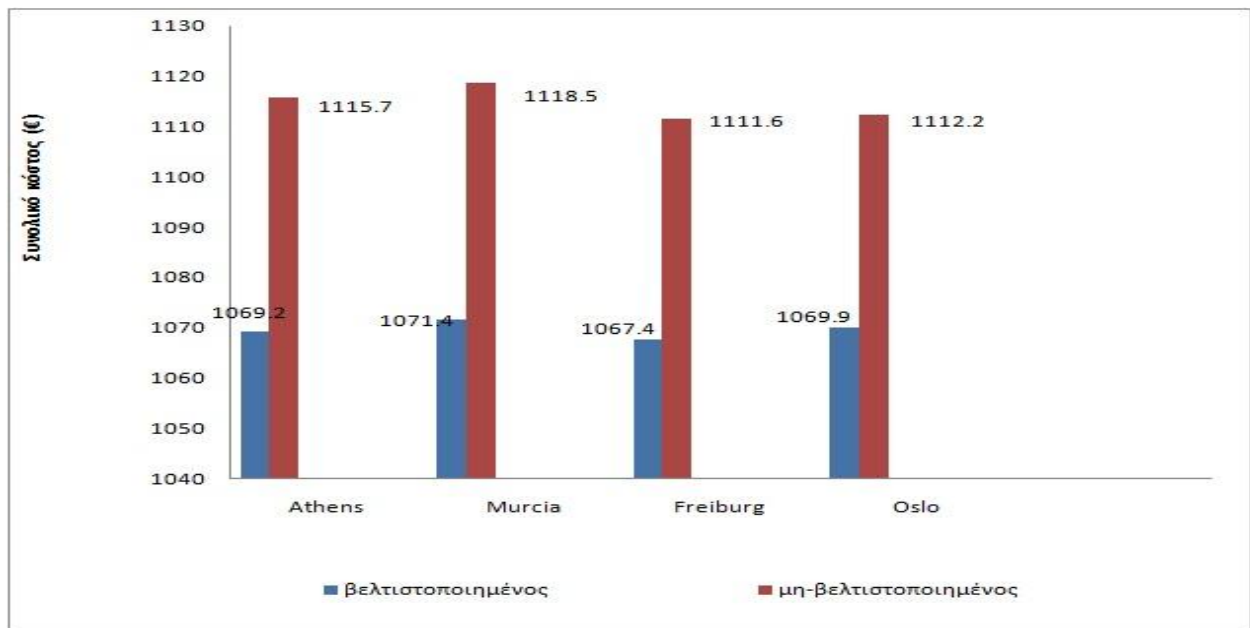
Στις Εικόνες 5.34-5.37 φαίνονται οι τιμές των βελτιστοποιημένων και των μη-βελτιστοποιημένων αντιστροφέων για κάθε περιοχή και αντικειμενική συνάρτηση.



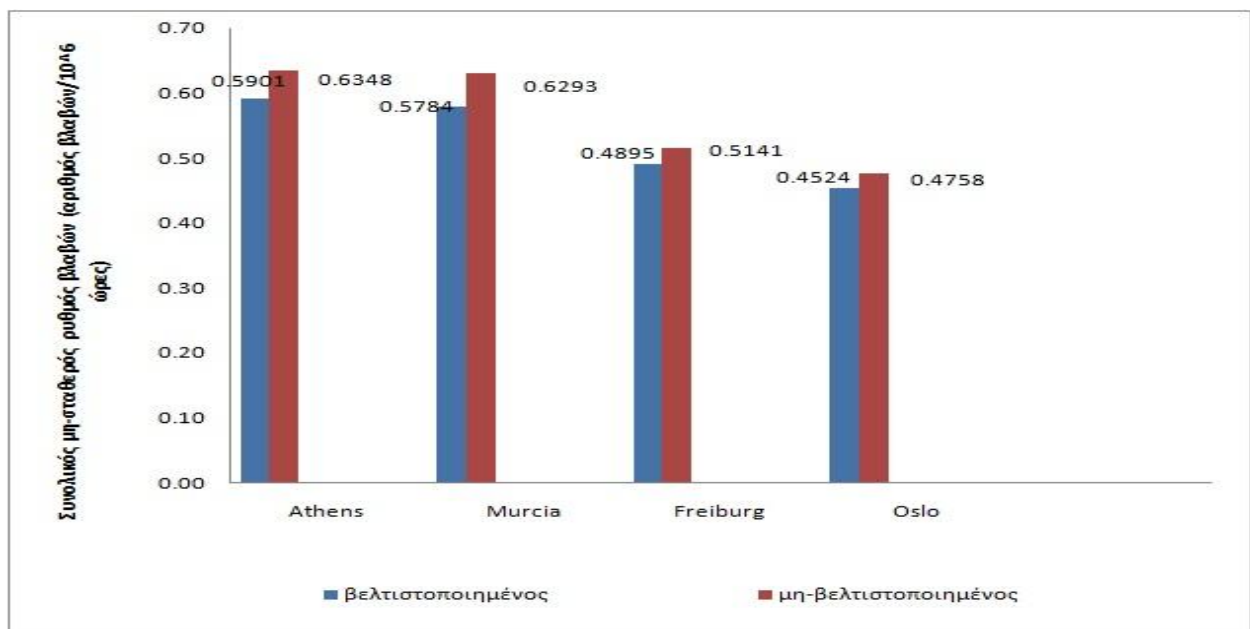
Εικόνα 5.34 Σύγκριση τιμών LCOE βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.



Εικόνα 5.35 Σύγκριση τιμών συνολικής ενέργειας βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα .



Εικόνα 5.36 Σύγκριση τιμών συνολικού κόστους βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.

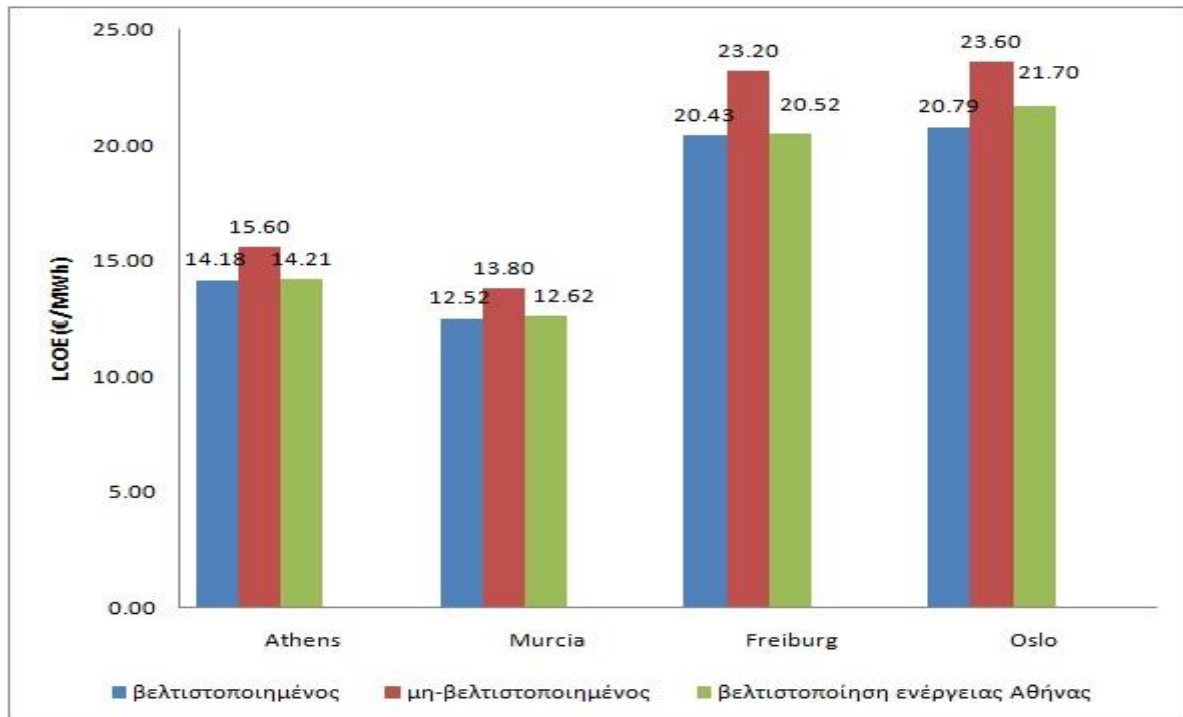


Εικόνα 5.37 Σύγκριση τιμών μη σταθερού failure rate βελτιστοποιημένου και μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.

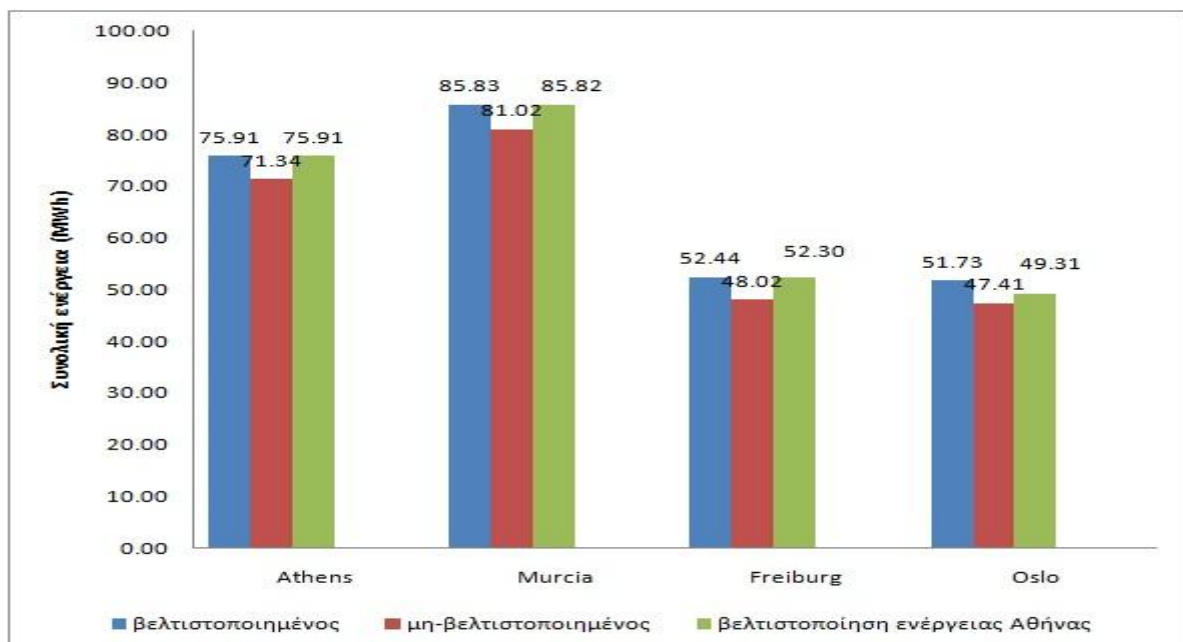
Παρατηρείται πως επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση με την εφαρμογή του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται μικρότερο LCOE κατά 10-13.5%, υψηλότερη παραγόμενη ενέργεια κατά 6.4-9.1%, μικρότερο συνολικό κόστος κατά 3.9-4.3% και μικρότερος μη σταθερός ρυθμός βλαβών κατά 5-7.5%. Για περαιτέρω αξιολόγηση του αλγορίθμου, έγινε επιλογή ενός από του βελτιστοποιημένους αντιστροφείς από μια περιοχή (συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση συνολικής ενέργειας στην Αθήνα) και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τον μη-βελτιστοποιημένο αντιστροφέα του πίνακα 5.20. Οι τιμές των LCOE, μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για κάθε περιοχή για τη βελτιστοποίηση συνολικής ενέργειας στην Αθήνα φαίνονται στον πίνακα 5.21.

<b>Πίνακας 5.21. Τιμές LCOE, μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για την βελτιστοποίηση συνολικής ενέργειας στην Αθήνα</b>				
	<i>LCOE</i>	Ρυθμός βλαβών (αριθμός βλαβών/10 <sup>6</sup> ώρες)	Ενέργεια (Wh)	Συνολικό κόστος (€)
Athens	14.21	0.6520	7.5910e+07	1072.5
Murcia	12.62	0.6486	8.5827e+07	1072.4
Freiburg	20.52	0.5251	5.2307e+07	1071.2
Oslo	21.70	0.4847	4.9312e+07	1071.8

Στις Εικόνες 5.38-5.41 φαίνονται οι τιμές των α των LCOE, μη σταθερού failure rate, συνολικής ενέργειας και συνολικού κόστους για κάθε περιοχή (για τη βελτιστοποίηση συνολικής ενέργειας στην Αθήνα) σε αντιδιαστολή με τις αντίστοιχες τιμές του βελτιστοποιημένου και του μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.

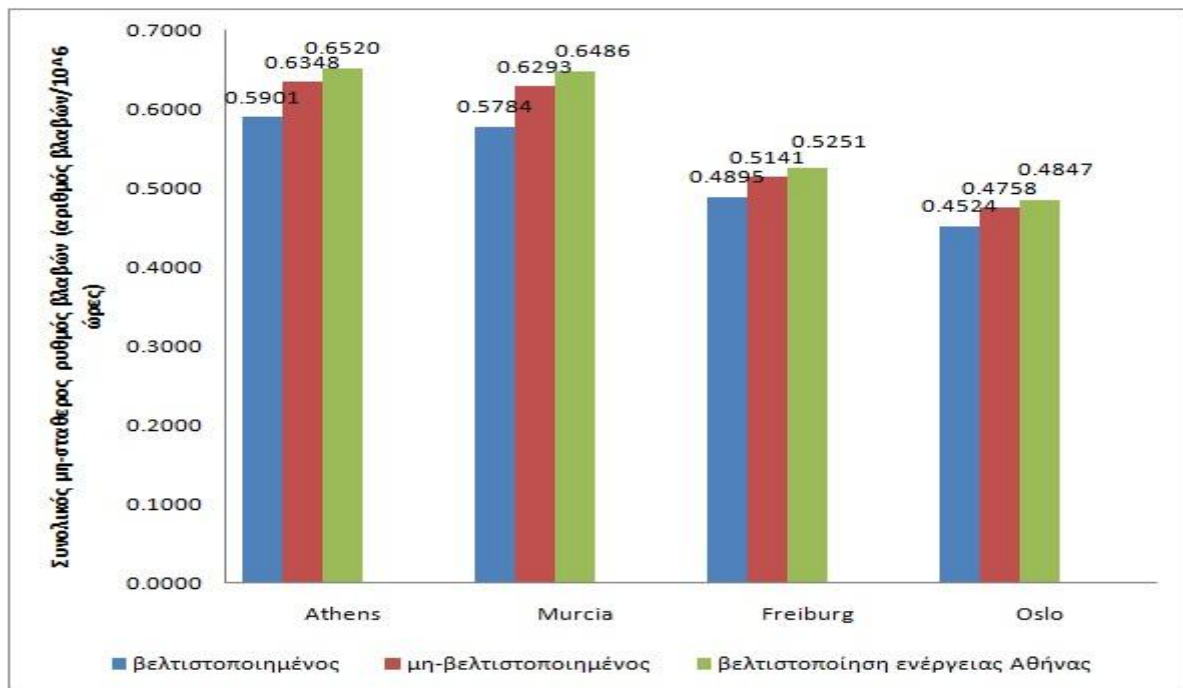


Εικόνα 5.38 Σύγκριση τιμών LCOE βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.

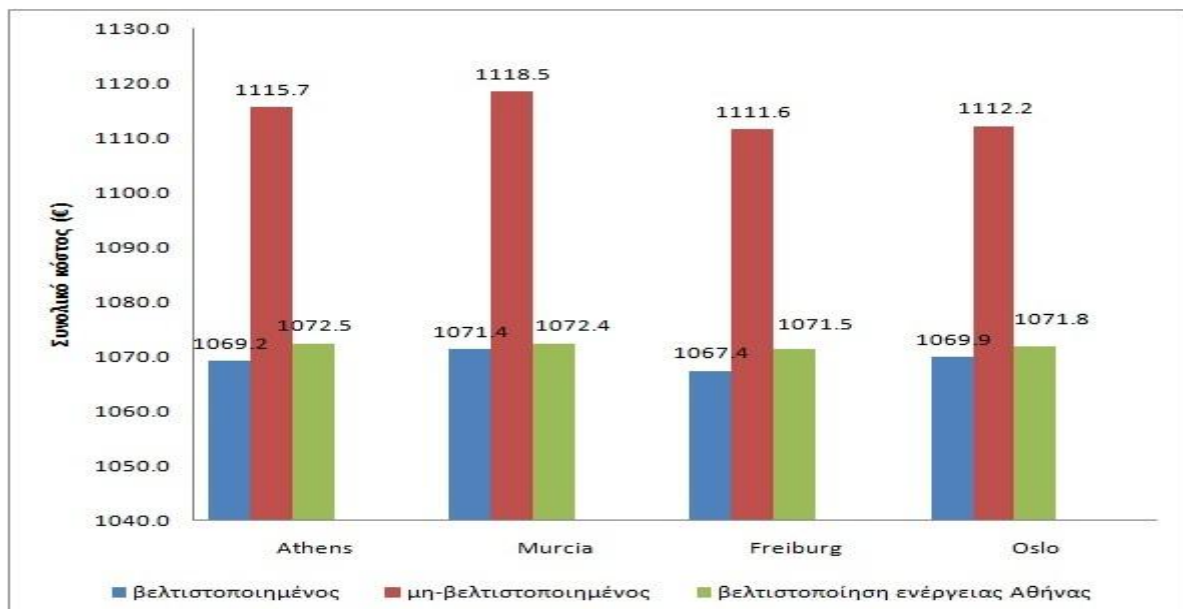


Εικόνα 5.39 Σύγκριση τιμών συνολικής ενέργειας βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.





Εικόνα 5.40 Σύγκριση τιμών μη σταθερού failure rate βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.



Εικόνα 5.41 Σύγκριση τιμών συνολικού κόστους βελτιστοποιημένου, μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα και βελτιστοποίησης συνολικής ενέργειας στην Αθήνα.

Παρατηρείται πως ακόμα και με τη λύση για μια περιοχή, επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση συγκριτικά με τον μη-βελτιστοποιημένο αντιστροφέα. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται χαμηλότερο LCOE κατά 8.7-13%, υψηλότερη παραγόμενη ενέργεια κατά 4-8.9% και χαμηλότερο συνολικό κόστος κατά 3.7-4%. Μόνο στην περίπτωση του μη-σταθερού ρυθμού βλαβών παρατηρείται μία αύξηση 1.8-2.9%. Μια βέλτιστη λύση με αντικειμενική συνάρτηση τον ρυθμό βλαβών ακόμα και από διαφορετική περιοχή θα κατέληγε σε καλύτερα αποτελέσματα από αυτά του μη-βελτιστοποιημένου αντιστροφέα.

# 6.

## Συμπεράσματα.

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μια μέθοδος για τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των εξαρτημάτων ενός Φ/Β αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή διασυνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η βελτιστοποίηση αυτή επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση χαρακτηριστικών όπως το LCOE, το συνολικό κόστος και ο ρυθμός βλαβών και τη μεγιστοποίηση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Σε αντίθεση με άλλες μεθοδολογίες λαμβάνει υπόψη την αξιοπιστία των εξαρτημάτων, καθώς επίσης και τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά κάθε γεωγραφικής θέσης.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση τον συνολικό μη-σταθερό ρυθμό βλαβών και στη συνέχεια με το LCOE, συνολική ενέργεια και συνολικό κόστος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αντικειμενική συνάρτηση του ρυθμού βλαβών δεν εγγυάται ελάχιστα LCOE, συνολικό κόστος ή μέγιστη παραγόμενη ενέργεια, οπότε το LCOE είναι προτιμότερο κριτήριο για τη βελτιστοποίηση και έμμεσα περιέχει και την αξιοπιστία.

Η βελτίωση που επιτυγχάνεται σε σχέση με τη μη-βελτιστοποιημένη λύση είναι σημαντική. Επιπλέον, εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για την επιλογή της γεωγραφικής θέσης της εγκατάστασης ενός Φ/Β συστήματος. Περιοχές με υψηλή θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία όπως η Αθήνα και η Murcia παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια και υψηλότερο LCOE. Αντίθετα περιοχές με χαμηλότερη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζουν χαμηλότερο ρυθμό βλαβών.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προσφέρει ένα εργαλείο στους σχεδιαστές αντιστροφών για Φ/Β συστήματα. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα που επιθυμείται να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν αλλάζουν και οι τιμές που παράγει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Στη μέθοδο που περιγράφεται στο [28] υπολογίζονται διάφορες τιμές του MTBF για ένα συγκεκριμένο σύνολο τιμών των εξαρτημάτων του αντιστροφέα. Αντίθετα, στην παρούσα διπλωματική εργασία αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές των εξαρτημάτων του αντιστροφέα οι οποίες ελαχιστοποιούν το LCOE, το συνολικό κόστος και τον ρυθμό βλαβών και μεγιστοποιούν την παραγόμενη ενέργεια. Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη η αξιοπιστία του συστήματος στις συνθήκες που επικρατούν σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος και όχι σε μεμονωμένες περιόδους.

Πιθανή μελλοντική επέκταση αυτής της εργασίας είναι η χρήση ενός διαφορετικού μοντέλου για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των εξαρτημάτων. Υπάρχουν διάφορα εναλλακτικά πρότυπα αξιοπιστίας όπως το Bellcore/Telcordia, το RDF 2000 και το China 299B. Μία μέθοδος που κερδίζει έδαφος στην ανάλυση αξιοπιστίας είναι η Φυσική της αστοχίας (Physics of failure-PoF). Πρόκειται για μια τεχνική σχεδιασμού με σκοπό την εκτίμηση της αξιοπιστίας που αξιοποιεί τη γνώση και την κατανόηση των φυσικών διαδικασιών και μηχανισμών που προκαλούν βλάβες. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να ενσωματώσει και διαφορετικά μοντέλα αξιοπιστίας από το MIL-HDBK-217F.

Τέλος θα μπορούσε να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου στο Matlab. Αν και χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές όπως η παράλληλη επεξεργασία, περαιτέρω βελτιστοποιήσεις όπως χρήση κάρτας γραφικών για υπολογισμούς (CUDA), διαφορετική παραμετροποίηση των εργαλείων του Matlab κ.α. θα βελτίωναν ακόμα περισσότερο τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

---

## Βιβλιογραφία.

---

- [1] “Solar Photovoltaics: Status, Costs, and Trends”, EPRI, Palo Alto, 1015804, 2009,  
<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=0000000000001015804>.
- [2] “Renewables 2012: Global Status Report”, REN21, 2012,  
[http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012\\_low.pdf](http://www.map.ren21.net/GSR/GSR2012_low.pdf).
- [3] Roger A. Messenger and Jerry Ventre, “Photovoltaic Systems Engineering”, CRC press, 2010.
- [4] A. Maish, “Defining requirements for improved photovoltaic system reliability”, Progress in Photovoltaics Research Applications, vol. 7, no. 3, pp. 165–173, 1999.
- [5] W. Bower, “Inverters—Critical photovoltaic balance-of-system components: Status, issues, and new-millennium opportunities”, Progress in Photovoltaics Research Applications, vol. 8, no. 1, pp. 113–126, 2000.
- [6] T. Erge, V. U. Hoffmann, and K. Kiefer, “The German experience with grid-connected PV-systems”, Solar Energy, vol. 70, no. 6, pp. 479–487, 2001.
- [7] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. PortilloGuisado, M. A. M. Prats, J. I. León, and N. Moreno-Alfonso, “Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, Jun. 2006.
- [8] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, “Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, Oct. 2006.

- [9] S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J. Gago, D. Gonzalez, and J. Balcells, “Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 5, pp. 1504–1511, Oct. 2006.
- [10] A. Ristow, M. Begović, A. Pregelj and A. Rohatgi, Fellow, “Development of a Methodology for Improving Photovoltaic Inverter Reliability”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.7, pp.2581,2592, July 2008.
- [11] B. Gnedenko, I. Pavlov, and I. Ushakov, “Statistical Reliability Engineering”, Ed. New York: Wiley, 1999.
- [12] J. Endrenyi, “Reliability Modeling in Electric Power Systems”, Wiley, 1978.
- [13] B. Dodson, “Weibull Analysis”, WI: ASQ Quality Press, 1994.
- [14] H. Häberlin; “Evolution of inverters for grid connected PV-systems from 1989 to 2000”, 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 22-26 Oct. 2002.
- [15] B. Burger; “Auslegung und Dimensionierung von Wechselrichtern für netzgekoppelte PV-Anlagen”, 20<sup>th</sup> Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 11 Mar. 2005.
- [16] H. Häberlin, Ch. Liebi, and Ch. Beutler; “Inverters for grid connected PV-Systems: Test results of some new inverters and latest reliability data of the most popular inverters in Switzerland”, 14<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 30 Jun. - 4 Jul. 1997.
- [17] H. Häberlin, L. Borgna, M. Kaempfer, and U. Zwahlen; “New tests at grid connected PV inverters: Overview over test results and measured values of total efficiency”, 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 Sep. 2006.
- [18] H. Cha and T.-K. Vu, “Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter”, 25<sup>th</sup> Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1659–1665, 2010
- [19] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, “Design and control of an LCL filter-based three-phase active rectifier”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, Sep. 2005.

- [20] “Military Handbook MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment”, U.S. Dept. Defense, Washington DC, Dec. 2, 1991.
- [21] A. Goel and R. J. Graves, “Electronic system reliability: Collating prediction models”, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 6, no. 2, pp. 258–265, Jun. 2006.
- [22] M. Aten, G. Towers, C. Whitley, P. Wheeler, J. Clare, and K. Bradley, “Reliability comparison of matrix and other converter topologies”, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 42, no. 3, pp. 867–875, Jul. 2006.
- [23] Navesink Res. Eng. Center, “Reliability prediction procedure for electronic equipment”, Telcordia Technol., Inc., Red Bank, NJ, Special Rep. SR-332, Issue 2, Sep. 2006.
- [24] IEEE Std. 493-2007 “Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems”, 2007
- [25] A. Maish, “Defining requirements for improved photovoltaic system reliability”, Progress in Photovoltaics Research and Applications., vol. 7, no. 3, pp. 165–173, 1999.
- [26] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, “Techniques for the optimal design of photovoltaic inverters interconnected with the electric grid”, 14<sup>th</sup> European Conference of Power Electronics Applications, pp. 1–10, 2011
- [27] S. K. Pattnaik and K. K. Mahapatra, “Power loss estimation for PWM and soft-switching inverter using RDCLF”, Proc. Int. MultiConf. Eng. Comput. Sci., pp. 1401–1406, 2010
- [28] Harb, S.; Balog, R.S., “Reliability of Candidate Photovoltaic Module-Integrated-Inverter (PV-MII) Topologies—A Usage Model Approach”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.6, pp.3019,3027, June 2013
- [29] Gabriele Zini, Christophe Mangeant, Jens Merten Institut National de l’Energie Solaire, “Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic systems”, Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives, 50 Av. du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac, France, 2011, <http://www-liten.cea.fr/fr/publications/docs/PV-Systems.pdf>.
- [30] <http://www.copleycontrols.com/motion/pdf/MTBF-JSP.pdf>.

- [31] J. A. Gow and C. D. Manning, “Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies”, Electric Power Applications, IEE Proceedings, vol.146, no.2, pp.193,200, Mar 1999.
- [32] E. Koutroulis and F. Blaabjerg, Fellow, IEEE , “Design Optimization of Transformerless Grid-Connected PV Inverters Including Reliability”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, January 2013.
- [33] Lorenzo E.: “Solar electricity - Engineering of photovoltaic systems”, Progensa, 1<sup>st</sup> Edition, 1994.
- [34] M. Liserre, F. Blaabjerg, S. Hansen: “Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, 2005.
- [35] <http://www.mathworks.com/help/gads/index.html>.