ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΟΜΗΣ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ GAMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΝΔΡΕΑΔΗ ΠΑΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ, Υποψ. Διδάκτωρ
ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Λέκτορας
ΔΟΥΛΑΜΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής
ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2008

στην οικογένεια

στους φίλους

στον έρωτα

και στα δικά σου αδελφούλα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν σύγγραμμα αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία, στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε τον Νοέμβρη του 2007 και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου και του υποψήφιου Διδάκτορα κ. Ιωάννη Κατσίγιαννη.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην προσπάθεια εκπλήρωσης της. Τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιλάκη Παύλο, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των υβριδικών συστημάτων ενέργειας και, κυρίως, για την γνωριμία μου με μία νέα γλώσσα προγραμματισμού, το GAMS. Η στήριξη του καθ' όλη τη πορεία της διπλωματικής υπήρξε καθοριστική. Συνεχίζοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως, τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ιωάννη Κατσίγιαννη. Ο κ. Κατσίγιαννης έδειξε, παρά το βαρύ πρόγραμμά του, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη διπλωματική, και υπήρξε ο βασικός αρωγός στην προσπάθειά μου. Εύχομαι αυτή να μην είναι η τελευταία μας συνεργασία. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον φίλο και συμφοιτητή μου, Δάκη Καραμπατζάκη για την συμβολή του, και ειδικότερα για την συνεργασία μας στην σύνταξη του Κεφαλαίου 2: "Το λογισμικό GAMS".

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ σε αυτούς που στάθηκαν κοντά μου, τη μακροχρόνια αυτή παραμονή στα Χανιά. Γιατί η ζωή αρχίζει σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναλύει τη διαδικασία βελτιστοποίησης ενός απομονωμένου υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ανεμογεννητριών – γεννήτριας diesel. Για το σκοπό αυτό γίνεται μια διερεύνηση των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την μοντελοποίηση τέτοιων προβλημάτων, ακολουθούμενη από την δημιουργία του μοντέλου. Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων βελτιστοποίησης δομής υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο GAMS. Εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια όσον αφορά την ανάγκη κάλυψης της ζήτησης και γίνεται μια σειρά αναλύσεων ευαισθησίας σε κρίσιμες και ευμετάβλητες παραμέτρους του προβλήματος.

Η εργασία περιλαμβάνει μία εισαγωγή στη γλώσσα προγραμματισμού GAMS, για την κατανόηση των δυνατοτήτων και ιδιαιτεροτήτων που αυτή παρουσιάζει. Η προσομοίωση του μοντέλου, που χρησιμοποιεί ετήσιες χρονοσειρές ωριαίου βήματος, γίνεται ταυτόχρονα με το GAMS και το λογισμικό HOMER. Η παράλληλη επίλυση του προβλήματος στα δύο συστήματα θέτει τη βάση της ανάλυσης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Απομονωμένα Υβριδικά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανεμογεννήτριες, Γεννήτριες Diesel, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, GAMS, HOMER, Κόστος Ενέργειας, Χρονοσειρές, Συνδυαστική Βελτιστοποίηση.

ABSTRACT

This thesis presents the optimization of a Wind/Diesel remote hybrid energy system. To that purpose, there is an investigation on what parameters need to be considered while modeling such problems, followed by the model itself. Its main objective is to investigate the possibilities of optimizing the configuration of hybrid energy systems by the use of GAMS software. Alternative load satisfaction scenarios are examined and a series of sensitivity analyses are implemented on crucial and sensitive problem parameters.

This thesis includes an introduction to the GAMS programming language, in an effort to show the possibilities it presents. The model is simulated using annual time series data with an hourly time step. This is done in GAMS as well as in HOMER software. The simultaneous problem solving in the two systems provides the foundation for the analysis.

KEYWORDS

Remote Hybrid Energy Systems, Wind Generators, Diesel Generators, Renewable Power Sources, GAMS, HOMER, Cost of Energy (COE), Time Series, Combinational Optimization.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας 1

1.2 Χρήση ανεμογεννητριών 1

1.3 Αλγεβρικές γλώσσες μοντελοποίησης 2

1.4 Σύντομη επισκόπηση περιεχομένων διπλωματικής 3

1.5 Προδιαγραφές συστήματος προσομοίωσης 3

1.6 Βιβλιογραφία 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

2.1 Εισαγωγή 5

2.2 Χαρακτηριστικά γλώσσας προγραμματισμού GAMS 5

2.2.1 Η εντολή Sets 7

2.2.2 Η εντολή Scalars 8

2.2.3 Οι εντολές Parameters και Tables 8

2.2.4 Κανόνες μαθηματικών παραστάσεων κατά την ανάθεση τιμών 9

2.2.5 Η εντολή Variables 10

2.2.6 Η εντολή Equations 11

2.2.7 Η εντολή Model 12

2.2.8 Η εντολή Solve 12

2.2.9 Η εντολή Display και τα αρχεία εξόδου του GAMS 13

2.2.10 Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές 13

2.3 Συμπεράσματα 14

2.4 Βιβλιογραφία 15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ - ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DIESEL

3.1 Εισαγωγή 17

3.2 Πηγές Ενέργειας 17

3.2.1 Αιολικά συστήματα 18

3.2.2 Καύσιμα - Πετρέλαιο diesel 20

3.3 Στοιχεία απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 22

3.3.1 Ανεμογεννήτρια 22

3.3.2 Γεννήτριες 22

3.4 Μοντελοποίηση απομονωμένου υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 23
3.4.1 Χρονική μεταβλητότητα 24
3.4.2 Επιλογή μεγέθους και πλήθους στοιχείων 24
3.4.3 Έλεγχος και λειτουργία συστήματος 25
3.4.4 Οικονομικό μοντέλο 25
3.4.5 Ανάλυση ευαισθησίας 25
3.5 Μοντέλα σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας 26
3.5.1 Στατιστικά μοντέλα 26
3.5.2 Μοντέλα χρονοσειρών 27
3.6 Συμπεράσματα 27
3.7 Βιβλιογραφία 29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Εισαγωγή 31
4.2 Πηγές ενέργειας 31
4.2.1 Αιολικό δυναμικό 31
4.2.2 Πετρέλαιο diesel 31
4.3 Ζήτηση 32
4.4 Ανεμογεννήτρια 33
4.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά 33
4.4.2 Κόστη 34
4.5 Γεννήτρια diesel 35
4.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά 35
4.5.2 Κόστη 35
4.6 Αντικειμενική συνάρτηση – Κόστος ενέργειας 36
4.6.1 Ορισμός χρηματοοικονομικών παραμέτρων 36
4.6.2 Ετησίως αναγόμενο κόστος γεννήτριας diesel 37
4.6.3 Ετησίως αναγόμενο κόστος ανεμογεννήτριας 37
4.6.4 Συνολικό ετησίως αναγόμενο κόστος 38
4.6.5 Κόστος ενέργειας (COE – Cost of Energy) 38
4.7 Περιορισμοί λειτουργίας συστήματος 38
4.7.1 Ικανοποίηση ζήτησης 38
4.7.2 Περιορισμοί παραγωγής ενέργειας από την γεννήτρια diesel 38
4.8 Κανονική μορφή μοντέλου υβριδικού συστήματος 38
4.9 Εναλλακτικό σενάριο Α’ (λειτουργία με εφεδρεία) 39
4.10 Εναλλακτικό σενάριο Β’ (ποινή ανικανοποίητης ζήτησης) 39
4.11 Ανάλυση ευαισθησίας 40
4.12 Συμπεράσματα 40

4.13 Βιβλιογραφία 42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ HOMER

5.1 Εισαγωγή 43
5.2 Το λογισμικό HOMER 43
5.3 Δημιουργία σχεδιαγράμματος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 43
5.3.1 Ζήτηση 45
5.3.2 Ανεμογεννήτριες 45
5.3.3 Γεννήτρια diesel 47
5.3.4 Ολοκλήρωση σχεδιαγράμματος 48
5.4 Πηγές ενέργειας 48
5.4.1 Αιολικό δυναμικό 48
5.4.2 Πετρέλαιο diesel 49
5.5 Περιορισμοί λειτουργίας 50
5.5.1 Οικονομικά 50
5.5.2 Έλεγχος συστήματος 51
5.5.3 Περιορισμοί 51
5.6 Επίλυση μοντέλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 51
5.7 Εναλλακτικό σενάριο Α' (λειτουργία με εφεδρεία) 53
5.8 Εναλλακτικό σενάριο Β' (ποινή ανικανοποίητης ζήτησης) 55
5.9 Συμπεράσματα 56
5.10 Βιβλιογραφία 57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ GAMS

6.1 Εισαγωγή 59
6.2 Δομή κώδικα 59
6.2.1 Ορισμός του μαθηματικού μοντέλου 59
6.2.2 Εισαγωγή δεδομένων από εξωτερικά αρχεία 61
6.2.3 Επίλυση μοντέλου 61
6.3 Εκτέλεση προγράμματος 62
6.4 Εναλλακτικό σενάριο Α' (λειτουργία με εφεδρεία) 64
6.5 Εναλλακτικό σενάριο Β' (ποινή ανικανοποίητης ζήτησης) 65
6.6 Συμπεράσματα 67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

7.1 Εισαγωγή 69

7.2 Ανάλυση ευαισθησίας 69

7.2.1 Ζήτηση 69

7.2.2 Ταχύτητα ανέμου 70

7.2.3 Τιμή πετρελαίου diesel 71

7.2.4 Επιτόκιο προεξόφλησης 73

7.3 Προέλευση και χρήση παραγόμενης ενέργειας 74

7.3.1 Ποσοστό ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας 75

7.3.2 Παραγωγή περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας 76

7.4 Οικονομική ανάλυση 77

7.5 Συμπεράσματα 77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική αναφέρεται στη βελτιστοποίηση δομής απομονωμένων υβριδικών συστημάτων ενέργειας. Στόχος της εργασίας είναι η διαπίστωση των δυνατοτήτων επίλυσης τέτοιων συστημάτων στο λογισμικό GAMS και των πιθανών προτερημάτων που παρουσιάζει αυτή η πρακτική. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται το μοντέλο ενός απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει ανεμογεννήτριες και γεννήτρια diesel. Η επίλυση του μοντέλου στα λογισμικά HOMER και GAMS συνιστά τη βάση της ανάλυσης.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο σύγχρονο περιβάλλον απελευθέρωσης της αγοράς και οικολογικής συνειδητοποίησης οι παραγωγοί ενέργειας στρέφονται ολοένα και περισσότερο στις ανανεώσιμες πηγές. Η εκθετική αύξηση της τεχνογνωσίας την τελευταία δεκαετία καθιστά τις ανανεώσιμες πηγές οικονομικά ανταγωνιστικές των συμβατικών. Το κίνητρο για την αξιοποίησή τους είναι πλέον σημαντικό. Όμως πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στερούνται της σταθερότητας που παρουσιάζουν οι συμβατικές γεννήτριες καυσίμων. Η εποχικές μεταβολές των φυσικών πόρων σε συνδυασμό με βραχυπρόθεσμες μεταβολές τις καθιστούν αναξιόπιστες. Η κυριότερη τάση στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι τα υβριδικά συστήματα. Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας συνδυάζουν τα προτερήματα διαφορετικών πηγών. Αξιοποιούν π.χ. την φθηνή ανανεώσιμη ενέργεια και συμπληρώνουν την έλλειψή της με συμβατικές πηγές όταν αυτή βρίσκεται σε έλλειψη. Άλλη λύση είναι ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών με διαφορετικές εποχικότητες, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους. Η διάθεση μεγάλης ποικιλίας εναλλακτικών λύσεων, σε συνδυασμό με τη πληθώρα των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, καθιστά τα μοντέλα υβριδικών συστημάτων γόνιμο έδαφος για βελτιστοποίηση. Η επίλυση μοντέλων υβριδικών συστημάτων ανάγεται στην επιλογή του καλύτερου από μια σειρά συνδυασμών συστημάτων ενέργειας. Προβλήματα τέτοιου είδους ανήκουν στο τομέα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Με την εργασία αυτή διερευνάται η αξιοποίηση του λογισμικού GAMS για την επίλυση των προβλημάτων αυτών.

1.2 ΧΡΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών (Α/Γ) σημειώνει σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Χαρακτηριστική είναι η αύξηση του μέγιστου ύψους πύργου Α/Γ και της μέγιστης διαμέτρου πτερυγίων που οδηγούν σε ολοένα και μεγαλύτερες ονομαστικές τιμές ισχύος. Συγκεκριμένα η μέση ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας σε Δανία και Γερμανία, έχει αυξηθεί από περίπου 200 kW που ήταν το 1990 σε σχεδόν 1.5 MW το 2002 [1.1]. Ταυτόχρονα η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε από περίπου 2.5 GW (1992) σε κάτι λιγότερο από 40 GW (2003) [1.2].

Το μέσο κόστος ανά kW εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύς κυμαίνεται από 900 €/kW έως 1150 €/kW, με την ίδια τη γεννήτρια να αποτελεί περίπου το 80% αυτού του ποσού [1.1]. Το υπόλοιπο ποσό προκύπτει κυρίως από τα θεμέλια, τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και

τη σύνδεση στο δίκτυο, εφόσον το σύστημα δεν είναι απομονωμένο. Το άλλο σημαντικό στοιχείο κόστους στην παραγωγή ηλεκτρισμού από ανεμογεννήτρια είναι η λειτουργία και συντήρηση. Το ποσό αυτό, για μια καινούρια εγκατάσταση, κυμαίνεται στο 20 έως 25 % του συνολικού κόστους του έργου. Οι κατασκευαστές στοχεύουν στη σημαντική μείωση αυτών των εξόδων μέσω της ανάπτυξης νέων σχεδίων ανεμογεννητριών οι οποίες θα απαιτούν λιγότερη τακτική συντήρηση, μειώνοντας έτσι και το χρόνο μη λειτουργίας. Παράλληλα, η τάση προς μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες μειώνει συνεχώς τα ανά kW έξοδα λειτουργίας και συντήρησης.

1.3 ΑΛΓΕΒΡΙΚΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης σε προβλήματα συστημάτων ενέργειας έχει ιστορία δεκαετιών και φαίνεται να υπάρχει ένας ανταγωνισμός μεταξύ της εκλέπτυνσης των αλγορίθμων βελτιστοποίησης και της αυξανόμενης πολυπλοκότητας του σχεδιασμού των συστημάτων ενέργειας και των προβλημάτων λειτουργικής φύσης. Η αύξηση της πολυπλοκότητας στη βελτιστοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι αποτέλεσμα τριών βασικών στόχων:

- Της βελτίωσης της ακρίβειας των μοντέλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τη καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

- Της μεγέθυνσης των συστημάτων λόγω της εφαρμογής τους σε μεγαλύτερες γεωγραφικές εκτάσεις για καλύτερη οικονομία και αξιοπιστία λειτουργίας.

- Της εμφάνισης νέων ζητημάτων όπως περιβαλλοντικά και νομοθετικά ζητήματα.

Συνεπώς, η έρευνα στο τομέα της βελτιστοποίησης συστημάτων ενέργειας είναι ένας ενεργός τομέας. Η εξέλιξη στις τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού και η βελτίωση στη διαχείριση των βάσεων δεδομένων επιτρέπει την αποδοτική δημιουργία και δοκιμή μοντέλων βελτιστοποίησης. Ένα σημαντικό τμήμα της προσπάθειας για ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης εντοπίζεται στην αποσφαλμάτωση μεγάλου μήκους κώδικα, την προετοιμασία και επεξεργασία των δεδομένων, και την τεκμηρίωση. Έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός αποτελεσματικών γλωσσών προγραμματισμού που κάνουν χρήση τόσο τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού, όσο και βελτιωμένης διαχείρισης βάσεων δεδομένων. Μία εκ των πιο δημοφιλών και ευέλικτων γλωσσών είναι το General Algebraic Modeling System (GAMS). Το GAMS αναπτύχθηκε αρχικά μέσω έρευνας που χρηματοδοτήθηκε από την Παγκόσμια Τράπεζα το 1988. Το κίνητρο για την ανάπτυξη του GAMS ήταν η εύρεση εναλλακτικής της FORTRAN μεθόδου προγραμματισμού οικονομικών μοντέλων. Η χρήση της τελευταίας ήταν μια επίπονη και κουραστική διαδικασία, επιρρεπής σε λάθη, τα οποία ήταν μάλιστα δύσκολο να εντοπιστούν και να διορθωθούν. Η παραπάνω πρόταση χαρακτηρίζει τους περισσότερους τομείς βελτιστοποίησης μέχρι και σήμερα. Λόγω αυτού, το GAMS, όπως και άλλες γλώσσες μοντελοποίησης, έχουν βρει εφαρμογή σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως τα δημοσιονομικά, τα οικονομικά, τη μηχανική, την ενέργεια και τα μαθηματικά. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα εμφανίζει χρήση σε συστήματα ενέργειας.

Το GAMS είναι μία γλώσσα υψηλού επιπέδου για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων με περιεκτικές αλγεβρικές δηλώσεις. Συνδυάζει τη θεωρία σχεσιακών βάσεων δεδομένων και το μαθηματικό προγραμματισμό για να καλύψει τις ανάγκες της μαθηματικής μοντελοποίησης. Μπορεί να χειριστεί μια μεγάλη ποικιλία προβλημάτων βελτιστοποίησης καθώς και ταυτόχρονα γραμμικά και μη-γραμμικά συστήματα εξισώσεων. Τα πιο αξιόλογα χαρακτηριστικά των γλωσσών μοντελοποίησης είναι:

- Ο διαχωρισμός του μαθηματικού προβλήματος από τη μέθοδο επίλυσης. Ο χρήστης μπορεί έτσι να εφαρμόζει διαφορετικούς αλγορίθμους επίλυσης χωρίς την αλλαγή της βασικής δομής του μοντέλου.

- Ο διαχωρισμός των δεδομένων από τη δομή. Η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου μπορεί να διατηρηθεί καθώς αυξομειώνεται το μέγεθος του προβλήματος.

1.4 ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση υβριδικών συστημάτων ενέργειας με τη χρήση του λογισμικού GAMS και η ανάλυση σκοπιμότητας αυτής. Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των απομονωμένων υβριδικών συστημάτων ανεμογεννητριών/ γεννήτριας diesel και αναλύονται οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την μοντελοποίησή τους. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ένα τέτοιο μοντέλο το οποίο προσομοιώνεται και επιλύεται στα λογισμικά HOMER και GAMS. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με την αξία χρήσης του GAMS σε τέτοια προβλήματα.

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εισαγωγή στο λογισμικό GAMS. Παρατίθενται οι βασικές εντολές ενός κώδικα σε GAMS και η φιλοσοφία προγραμματισμού σε αυτό. Μέσα από την ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του, γίνεται μια απόπειρα εξοικείωσης του αναγνώστη με το λογισμικό και τις ιδιαιτερότητές του.

Στο **Κεφάλαιο 3** εξηγούνται τα χαρακτηριστικά των απομονωμένων υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα ανεμογεννητριών/ γεννήτριας diesel. Αναλύονται στη συνέχεια οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος ενώ παρατίθενται οι γενικότερες κατηγορίες σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 4** αναπτύσσεται το μοντέλο βελτιστοποίησης του υβριδικού συστήματος. Εξηγούνται οι μεταβλητές του προβλήματος και δίνονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών λειτουργίας του συστήματος, καθώς και των εναλλακτικών σεναρίων ικανοποίησης ζήτησης.

Στο **Κεφάλαιο 5** δίνεται η βήμα προς βήμα επίλυση του μοντέλου στο λογισμικό HOMER, ενώ το **Κεφάλαιο 6** περιγράφει την δημιουργία και επίλυση του ίδιου μοντέλου στο GAMS. Στο **Κεφάλαιο 7** σχολιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου στα δύο συστήματα.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

1.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Το σύνολο των προσομοιώσεων που περιγράφονται στην εργασία αυτή έγιναν σε Η/Υ με τις παρακάτω προδιαγραφές:

AMD Athlon(tm) XP 2600+ 1.91 GHz, 512 MB RAM

Η έκδοση του HOMER που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 2.63 beta και του GAMS η 2.0.34.19.

1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1.1] The European Wind Energy Association (EWEA). WIND POWER ECONOMICS. [Online]. Available: www.ewea.org

[1.2] Poul Erik Morthorst. WIND ENERGY - THE FACTS, Volume 2 - COSTS & PRICES. The European Wind Energy Association (EWEA). [Online]. Available: www.ewea.org

[1.3] The British Wind Energy Association. (2005, Sep.). BWEA Briefing Sheet Wind Turbine Technology. [Online]. Available: www.bwea.com

[1.4] Ryan Wiser and Mark Bolinger. (2007, May). Annual Report on U.S. Wind Power Installation, Cost, and Performance Trends: 2006. Lawrence Berkeley National Laboratory. [Online]. Available: http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/

[1.5] Abreu, L.V.L.; Shahidehpour, M., "Wind energy and power system inertia," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 18-22 June 2006.

[1.6] Samir Succar, Jeffery B. Greenblatt, David Denkenberger, Robert H. Williams, "An Integrated Optimization Of Large-Scale Wind With Variable Rating Coupled To Compressed Air Energy Storage," in *Windpower 2006, June 4-7, Pittsburgh, PA – American Wind Energy Association*.

[1.7] Daming Xu, Longyun Kang, Liuchen Chang, Binggang Cao, "Optimal sizing of standalone hybrid wind/PV power systems using genetic algorithms," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 1722-1725, 1-4 May 2005.

[1.8] Yiannis A. Katsigiannis, Pavlos S. Georgilakis, "Optimal sizing of small isolated hybrid power systems using tabu search," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* (accepted).

[1.9] Ghali, F.M.A., Arafah, S.H., "Dynamic analysis of hybrid wind/diesel system with three-level inverter," *Proceedings of the Power Conversion Conference*, vol. 2, pp. 727-732, 2002.

[1.10] Bando, S.; Asano, H.; Tokumoto, T.; Tsukada, T.; Ogata, T., "Optimal Operation Planning of a Photovoltaic-Cogeneration-Battery Hybrid System," *International Conference on Power System Technology*, Oct. 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα περιβάλλον Η/Υ για τον καθορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια λιτή και ισχυρή γλώσσα που, αν και απαιτεί κάποιο διάστημα εξοικείωσης, μπορεί να αποτελέσει ένα ευέλικτο και δυνατό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού μόλις κατανοηθούν οι δομές της [2.1].

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το GAMS είναι:

1. Η ικανότητα επίλυσης προβλημάτων διαφόρων μεγεθών γράφοντας το ίδιο μήκος κώδικα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητα γραφής ενός πλήθους παρόμοιων περιορισμών με μία εντολή, χρησιμοποιώντας μία συμπαγή και αποδοτική μορφή δείκτη.

2. Ο διαχωρισμός της μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική επίλυσής του. Ο χρήστης καταγράφει το μοντέλο και το αναθέτει σε κάποιον από τους διαθέσιμους επιλυτές (solvers). Εστιάζεται έτσι, στην διαμόρφωση του μοντέλου του και όχι στις τεχνικές λεπτομέρειες κατασκευής του αλγορίθμου επίλυσης.

3. Το GAMS σχεδόν μιμείται τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο κώδικας του GAMS καθίσταται έτσι σχεδόν αυτεξήγητος για αναγνώστες με κάποιο υπόβαθρο στη βελτιστοποίηση.

4. Το GAMS επίσης παρέχει μηχανισμούς για την επίλυση συλλογών δομημένων προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές διάσπασης.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΛΩΣΣΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ GAMS

Ένα αρχείο του GAMS δομείται σε εντολές, η κάθε μία από τις οποίες αντιμετωπίζει διαφορετικό κομμάτι του μαθηματικού προβλήματος. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι βασικές εντολές του GAMS. Πριν τη χρησιμοποίηση του GAMS, κρίνεται απαραίτητο να δειχθούν ορισμένοι από τους βασικούς του κανόνες. Παρακάτω παρατίθενται οι σημαντικότεροι:

1. Στο GAMS, τα μικρά και τα κεφαλαία γράμματα είναι ισοδύναμα, οπότε ο χρήστης μπορεί τα επιλέξει τη μορφή της αρεσκείας του.

2. Κάθε εντολή πρέπει υποχρεωτικά να τερματίζει με το σύμβολο΄΄;΄΄.

3. Οι εντολές (commands) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με οποιαδήποτε σειρά, αρκεί κάθε στοιχείο τους να έχει οριστεί πριν χρησιμοποιηθεί.

4. Το GAMS, όπως και κάθε γλώσσα προγραμματισμού, διαθέτει μια λίστα λέξεων που έχουν δεσμευθεί για συγκεκριμένες λειτουργίες και πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση.

5. Υπάρχει μεγάλη ευελιξία στο τρόπο που παρουσιάζονται τυπογραφικά οι εντολές. Πολλαπλές γραμμές ανά εντολή, κενές γραμμές και πολλαπλές εντολές ανά γραμμή επιτρέπονται. Ο αριθμός των κενών είναι αδιάφορος στον μεταγλωττιστή του GAMS.

6. Ορισμένες εντολές αναγνωρίζονται από τα αρχικά τους γράμματα ανεξαρτήτως της προσθήκης ή μη ενός ΄΄s΄΄ στο τέλος. Για παράδειγμα το `Parameter` και `Parameters` είναι το ίδιο, διότι το GAMS δεν αναγνωρίζει καμία διαφορά μεταξύ τους.

7. Πολλαπλές δηλώσεις ή αναθέσεις στοιχείων ίδιου τύπου μπορούν να γίνουν με μία εντολή χωρίς να χρειάζεται επανάληψή της.

8. Το GAMS δίνει τη δυνατότητα τεκμηρίωσης του κώδικα, μια δυνατότητα που ο χρήστης θα πρέπει να εκμεταλλευτεί. Κάθε γραμμή που ξεκινάει με αστερίσκο, στην πρώτη στήλη, αγνοείται από τον μεταγλωττιστή και αναγνωρίζεται ως σχόλιο. Ορισμένες εντολές δήλωσης δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής επεξηγηματικών σχολίων.

9. Οι περισσότερες εντολές στο GAMS χρησιμοποιούνται για δηλώσεις στοιχείων και προαιρετικά για ανάθεση συγκεκριμένων τιμών σε αυτά. Ως δήλωση ενός στοιχείου νοείται η μετατροπή του σε στοιχείο έγκυρο για χρήση από το GAMS. Τα στοιχεία δηλώνονται με την απόδοση σε αυτά ενός ονόματος χρησιμοποιώντας κάποια από τις εντολές δήλωσης. Στη περίπτωση των εξισώσεων η δήλωση και η ανάθεση πρέπει να γίνει με ξεχωριστές εντολές. Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει για τα υπόλοιπα στοιχεία του κώδικα.

10. Τα αποδεκτά ονόματα στοιχείων στο GAMS ξεκινούν με γράμμα και ακολουθούνται από έως εννέα άλλα γράμματα ή ψηφία.

Πίνακας 2.1: Ορισμένες εντολές του GAMS.

Εντολή	**Λειτουργία**
`Set(s)`	Δήλωση δεικτών και των πιθανών τιμών τους.
`Scalar(s)`	Δήλωση ποσοτήτων/μεγεθών και ανάθεση τιμών σε αυτά.
`Parameter(s)`	Δήλωση διανυσμάτων και ανάθεση τιμών σε αυτά.
`Table(s)`	Δήλωση πινάκων και ανάθεση τιμών στα στοιχεία τους.
`Variable(s)`	Δήλωση μεταβλητών.
`Equation(s)`	Δήλωση αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση και των περιορισμών.
`Model`	Δήλωση του μοντέλου και καθορισμός των εξισώσεων που θα περιλαμβάνει.
`Solve`	Κλήση του solver για επίλυση του προβλήματος.
`Display`	Εμφάνιση στοιχείων στο αρχείο εξόδου.

2.2.1 Η εντολή Sets

Οι δεσμευμένες λέξεις `Set` και `Sets` χρησιμοποιούνται για τη δήλωση δεικτών και το εύρος τιμών τους (πράγμα που εξηγεί και την ονομασία της εντολής). Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης δύο συνόλων με μία εντολή `sets`:

```
Sets
      i  sxolio a     /a1, a2, a3, a4/
      j  sxolio b     /beta_1 * beta_3/;
```

Στο παράδειγμα αυτό ορίζονται οι δείκτες i και j. Οι λέξεις μετά τα ονόματα των δεικτών (sxolio a, sxolio b) είναι σχόλια και αγνοούνται από τον μεταγλωττιστή. Η ανάθεση εύρους γίνεται ανάμεσα στα δύο σύμβολα ΄΄/΄΄. Το σύμβολο ΄΄*΄΄ επιτρέπει τον ορισμό του συνόλου κατά ένα συμπαγή τρόπο. Έτσι στο παράδειγμα μας το `/beta_1 * beta_3/` είναι ισοδύναμο του `/beta_1, beta_2, beta_3/`. Το GAMS μεταχειρίζεται τις τιμές των συνόλων σαν αλφαριθμητικά. Η εντολή λήγει με τη χρήση του ΄΄;΄΄.

Σύνολα σαν τα παραπάνω είναι γνωστά ως **στατικά σύνολα** και τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι δυνατός ο ορισμός **δυναμικών συνόλων** που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου. Τα στοιχεία αυτών των συνόλων μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Τα δυναμικά σύνολα ορίζονται πάντα ως υποσύνολα ήδη ορισμένων συνόλων. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχηση στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά σύνολα. Για παράδειγμα, για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου με κόμβους K1 έως K4 μπορεί να ορισθεί ένα δυσδιάστατο σύνολο που να περιλαμβάνει όλες τις έγκυρες μεταβάσεις:

```
Sets
      K             Set komvon     / K1 * K4/
      Pairs(K, K)   Antistoixisi   /K1.K2,K1.K3,K2.K4,K3.K4/;
```

Αρκετές φορές παρουσιάζεται η ανάγκη ταυτόχρονης αναφοράς σε διαφορετικά στοιχεία του ίδιου συνόλου. Για το λόγο αυτό παρέχεται η εντολή `alias` η οποία ορίζει ένα εναλλακτικό όνομα για κάποιο ήδη ορισμένο σύνολο.

```
Alias(K,KP);
```

Το GAMS παρέχει έξι τελεστές για το χειρισμό διατεταγμένων συνόλων: `card`, `ord`, `+`, `-`, `++`, `--`. Ως διατεταγμένα ορίζονται μονοδιάστατα σύνολα που αποτελούνται από μια διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων. Τα στοιχεία ενός διατεταγμένου συνόλου είτε δεν ανήκουν σε κάποιο προηγουμένως ορισμένο σύνολο είτε ανήκουν αλλά διατηρούν ανέπαφη τη σχετική θέση τους.

Η διαδικασία `card` επιστρέφει τον αριθμό στοιχείων που ανήκουν σε ένα σύνολο. Η διαδικασία `ord` επιστρέφει τη θέση του στοιχείου σε ένα σύνολο. Οι διαδικασίες ΄΄όνομα στοιχείου΄΄ +1 και ΄΄όνομα στοιχείου΄΄ −1 αναφέρονται στο αμέσως επόμενο και προηγούμενο στοιχείο του διατεταγμένου συνόλου αντίστοιχα. Αν αντί για τους τελεστές +, − χρησιμοποιήσουμε τους ++, −− μπορούμε να μεταχειριστούμε το διατεταγμένο σύνολο σαν μια κυκλική λίστα όπου το τελευταίο στοιχείο προηγείται του πρώτου.

2.2.2 Η εντολή Scalars

Με την εντολή `Scalar` ή `Scalars` ορίζονται και ανατίθενται τιμές σε παραμέτρους μηδενικών διαστάσεων. Παράμετροι δηλαδή που δεν εξαρτώνται από κανένα δείκτη. Μια εντολή έχει την παρακάτω μορφή:

```
Scalar  όνομα_παραμέτρου  κείμενο        /τιμή_παραμέτρου/;
```

Το όνομα της παραμέτρου ακολουθείται από προαιρετικά σχόλια. Η τιμή της παραμέτρου δίνεται εντός των συμβόλων ΄΄/΄΄ εντολή τερματίζει με ΄΄;΄΄.

2.2.3 Οι εντολές Parameters και Tables

Η δεσμευμένη λέξη `Parameter` ή `Parameters` χρησιμοποιείται για τον ορισμό διανυσμάτων δεδομένων. Η εντολή επιτρέπει την προαιρετική ανάθεση τιμών σε κάθε στοιχείο του διανύσματος, καθώς και την αναγραφή σχολίων:

```
Parameters
           a(i)  keimeno
                 /x1  10
                  x2  25/;
```

Στο παραπάνω παράδειγμα ορίζεται η παράμετρος ΄΄a΄΄ με δείκτη το σύνολο ΄΄i΄΄. Ανατίθενται τιμές 10, 25 στα στοιχεία x1, x2 του συνόλου αντίστοιχα μεταξύ των δύο συμβόλων ΄΄/΄΄ και η εντολή τερματίζεται με ΄΄;΄΄. Οι παρακάτω κανόνες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάθεση τιμών:

1. Η λίστα πρέπει να περιλαμβάνεται εντός των συμβόλων ΄΄/.../΄΄ και τα στοιχεία καθώς και οι τιμές τους να διαχωρίζονται μεταξύ τους με κόμμα ή αλλαγή γραμμής.

2. Τα ζευγάρια τιμή δείκτη, τιμή παραμέτρου μπορούν να γραφτούν με οποιαδήποτε σειρά.

3. Η εξ ορισμού τιμή μιας παραμέτρου είναι μηδέν και έτσι αρκεί η ανάθεση των μη μηδενικών τιμών.

4. Το GAMS ελέγχει αυτόματα αν οι τιμές του δείκτη αποτελούν έγκυρες τιμές του αντίστοιχου συνόλου και στέλνει σήμα σε περίπτωση σφάλματος.

Η εντολή `Parameters` δίνει επίσης τη δυνατότητα ορισμού και ανάθεσης για διανύσματα δύο ή περισσοτέρων διαστάσεων. Για ένα διάνυσμα δύο διαστάσεων τα στοιχεία θα είναι της μορφής ΄΄τιμή_πρώτου_δείκτη .τιμή_δεύτερου_δείκτη΄΄:

```
Parameters
           b(i, j)  keimeno
                    /x1.y1 20
                     x1.y2 15
                     x2.y1 10
                     x2.y2 5/;
```

Επίσης, για τον ορισμό στοιχείων ενός πίνακα (ή διανύσματος) ως συνάρτηση προηγούμενων ορισμένων στοιχείων, η εντολή `Parameters` μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως παρακάτω:

```
Parameter d(i,j) keimeno
          d(i,j)=5*b(i,j);
```

Η δεσμευμένη λέξη `table` ή `tables` χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός πίνακα. Οι πίνακες δηλώνονται με τη χρήση δύο ή περισσοτέρων δεικτών ενώ σχόλιο μπορεί προαιρετικά να ακολουθεί το όνομα του πίνακα όπως στο παράδειγμα:

```
Table z(i, j)  Keimeno
                  y1       y2       y3
               x1 3.5      2.4      2.9
               x2 1.9      1.7      3.1;
```

Στο παράδειγμα αυτό ο πίνακας z ορίζεται χρησιμοποιώντας τους δείκτες ΄΄i΄΄ και ΄΄j΄΄. Ανατίθεται μια τιμή σε κάθε ζευγάρι στοιχείων (`x1.y1, x1.y2, x1.y3, x2.y1, x2.y2, x3.y3`). Αν θεωρήσουμε τώρα ένα πίνακα τριών διαστάσεων, αυτός θα γραφεί όπως στο παρακάτω παράδειγμα:

```
Table (i,j,k)  Keimeno
                  k1       k2       K3
            x1.y1 3        2        2
            x1.y2 1        1        3
            X1.y3 5        2        9
            x2.y1 4        5        2
            x2.y2 8        7        3
            x2.y3 4        7        1;
```

Πίνακας 2.2: Ορισμένες συναρτήσεις του GAMS με μαθηματική λειτουργία.

Συνάρτηση	Περιγραφή
`abs(x)`	Απόλυτη τιμή του x
`exp(x)`	Εκθετική συνάρτηση του x
`log(x)`	Φυσικός λογάριθμος του x
`power(x,y)`	Δύναμη του x υψωμένο στην y (το y πρέπει να είναι ακέραιος)
`x**y`	Δύναμη του x υψωμένο στην y (το x πρέπει να είναι θετικός)
`sqrt(x)`	Τετραγωνική ρίζα του x
`uniform(x,y)`	Τυχαίος αριθμός από ομοιόμορφη κατανομή
`sin(x)`	Ημίτονο του x (σε rad)
`cos(x)`	Συνημίτονο του x (σε rad)

2.2.4 Κανόνες μαθηματικών παραστάσεων κατά την ανάθεση τιμών

Οι παρακάτω κανόνες ισχύουν για την ανάθεση τιμών σε παραμέτρους με τη χρήση μαθηματικών εκφράσεων:

1. Μπορεί να αποδοθεί μια συγκεκριμένη τιμή στο σύνολο των στοιχείων ενός διανύσματος με μία μόνο εντολή:

   ```
   Z(i,j)=3;
   ```

2. Η απόδοση τιμής σε συγκεκριμένο στοιχείο μπορεί να γίνει με την αναγραφή των τιμών του δείκτη σε εισαγωγικά:

   ```
   Z('x1', 'y1')=3.333;
   ```

3. Μπορεί να γίνει ανάθεση τιμών σε παράμετρο περισσότερες από μία φορές. Οι καινούριες τιμές αντικαθιστούν τις παλιές.

4. Οι μαθηματικές εκφράσεις μπορούν να ενσωματώνουν κάποιες μαθηματικές λειτουργίες και διαδικασίες, πχ:

```
Set I /I1*I10/; Parameter x(I);
x(I)=exp(6,7)*0,5;
```

Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει ορισμένες συναρτήσεις μαθηματικών λειτουργιών στο GAMS.

Πίνακας 2.3: Τύποι μεταβλητών του GAMS.

Λέξη Κώδικα	**Τύπος Μεταβλητής**	**Κατώτατο Όριο**	**Ανώτατο Όριο**	**Περιγραφή**
free	ελεύθερη	*- inf*	*+ inf*	Χωρίς περιορισμούς. Τα προκαθορισμένα όρια μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη.
positive	θετική	*0*	*+ inf*	Δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές. Το προκαθορισμένο ανώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη.
negative	αρνητική	*- inf*	0	Δεν επιτρέπονται θετικές τιμές. Το προκαθορισμένο κατώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη.
binary	δυαδική	0	1	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμή '0' ή '1'.
integer	ακέραιη	0	100	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ των ορίων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα προκαθορισμένα όρια.

2.2.5 Η εντολή Variables

Οι δεσμευμένες λέξεις `Variable` και `Variables` στο GAMS χρησιμοποιούνται για τη δήλωση μεταβλητών προς βελτιστοποίηση. Η εντολή δήλωσης μιας μεταβλητής έχει την ακόλουθη μορφή:

```
Variables όνομα_μεταβλητής(σύνολο δεικτών)  κείμενο;
```

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης μεταβλητών στο GAMS:

```
Variables
x(i,j)     keimeno
Z          keimeno;
```

Μία μεταβλητή μπορεί να ορισθεί χωρίς δείκτες. Αλλιώς, γίνεται αναφορά πλέον σε ένα διάνυσμα μεταβλητών. Μετά το όνομα της μεταβλητής ακολουθούν οι διαστάσεις της μεταβλητής και προαιρετικά σχόλια ενώ η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Τα προγράμματα σε GAMS πρέπει πάντα να διαθέτουν μια μεταβλητή για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το GAMS διαθέτει μια σειρά λέξεων για ορισμό του τύπου των μεταβλητών. Οι πέντε βασικότερες εξ αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Η μεταβλητή προς βελτιστοποίηση πρέπει να είναι μηδενικών διαστάσεων και του τύπου free. Άλλοι τύποι μεταβλητών με σπανιότερη χρήση είναι οι: `sos1`, `sos2`, `semicont` και `semiint`.

Κάθε μεταβλητή στο GAMS έχει επτά τιμές συσχετιζόμενες με κάθε συνδυασμό δεικτών. Ο χρήστης έχει πρόσβαση στις τιμές αυτές με την προσθήκη της κατάλληλης κατάληξης στο τέλος του ονόματος της μεταβλητής. Οι καταλήξεις καθώς και η τιμές στις οποίες αντιστοιχούν δίδονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Καταλήξεις για ειδική λειτουργία των μεταβλητών του GAMS.

Εντολή	Σκοπός
`.lo`	Το κατώτερο όριο της μεταβλητής.
`.up`	Το ανώτερο όριο της μεταβλητής.
`.fx`	Η καθορισμένη τιμή της μεταβλητής. Απόδοση τιμής στο .fx θέτει τα ανώτερα και κατώτερα όρια ίσα με αυτή τη τιμή.
`.l`	Η τρέχουσα τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα.
`.m`	Η οριακή τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα.
`.scale`	Ο συντελεστής κλίμακας της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα μη-γραμμικού προγραμματισμού.
`.prior`	Η σειρά προτεραιότητας διακλάδωσης της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται μόνο σε μοντέλα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού.

2.2.6 Η εντολή Equations

Οι δεσμευμένες λέξεις `Equation` και `Equations` στο GAMS αναφέρονται στις αλγεβρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των περιορισμών του μοντέλου. Ως εξίσωση στο GAMS νοείται ο ορισμός οποιουδήποτε είδους περιορισμού. Μία δήλωση εξίσωσης έχει την παρακάτω μορφή:

```
Equations όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών)   κείμενο;
```

Όπως και με άλλες δομές του GAMS η εξίσωση μπορεί να μη σχετίζεται με κάποιο δείκτη. Αλλιώς αναφερόμαστε πλέον σε διάνυσμα περιορισμών. Το όνομα ακολουθείται από το σύνολο δεικτών και προαιρετικό κείμενο ενώ η εντολή καταλήγει με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Ο ορισμός μιας εξίσωσης έπεται της δήλωσής του και έχει την παρακάτω μορφή:

```
όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών).. παράσταση τύπος_σχέσης παράσταση;
```

Οι δύο τελείες ΄΄**..**΄΄ μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της άλγεβρας είναι υποχρεωτικές. Οι παραστάσεις αποτελούν μαθηματικές εκφράσεις που μπορούν να περιλαμβάνουν παραμέτρους και μεταβλητές. Η εντολή τερματίζει με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Μεταξύ των δύο παραστάσεων παρεμβάλλεται ένα σύμβολο που δηλώνει τον τύπο της σχέσης μεταξύ τους και μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω:

`=e=`	Ισότητα: Οι δύο παραστάσεις πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους.

=g= Μεγαλύτερο από: Η αριστερή παράσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της δεξιάς.

=l= Μικρότερο από: Η αριστερή παράσταση πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της δεξιάς.

=n= Δεν εφαρμόζεται κανένας περιορισμός μεταξύ των παραστάσεων. Ένας τύπος εξίσωσης με σπάνια χρήση.

Δύο αλγεβρικές μορφές που χρησιμοποιούνται συχνά στην έκφραση περιορισμών είναι το άθροισμα και το γινόμενο, με τις αντίστοιχες δεσμευμένες λέξεις στο GAMS να είναι οι sum και prod. Παρακάτω δίνονται οι γενικές μορφές αναπαράστασής τους στο GAMS.

Sum(σύνολο δεικτών,παράσταση)	**Prod**(σύνολο δεικτών,παράσταση)
Sum(j,x(i,j))	Prod(j,x(i,j))

Αν το σύνολο δεικτών απαιτεί κόμμα για να εκφραστεί τότε το σύνολο θα πρέπει να είναι σε παρένθεση. Η παράσταση προς άθροιση ή πολλαπλασιασμό μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μαθηματική έκφραση.

2.2.7 Η εντολή Model

Οι δεσμευμένες λέξεις `model` και `models` χρησιμοποιούνται για τη δήλωση του μοντέλου προς επίλυση. Ως μοντέλο στο GAMS νοείται μια συλλογή εξισώσεων. Μια δήλωση μοντέλου έχει την παρακάτω μορφή:

```
Models      όνομα_μοντέλου   κείμενο     /σύνολο εξισώσεων/;
```

Το σύνολο εξισώσεων αποτελεί μια αναγραφή των ονομάτων των εξισώσεων που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, διαχωρισμένα με κόμμα ΄΄,΄΄. Αν στη θέση του συνόλου των εξισώσεων χρησιμοποιηθεί η λέξη `all`, το GAMS θα συμπεριλάβει όλες τις προηγουμένως ορισμένες εξισώσεις στο μοντέλο. Σχόλιο μπορεί να συμπεριληφθεί στη δήλωση μετά το όνομα του μοντέλου. Η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Πίνακας 2.5: Ορισμένα είδη διαδικασίας επίλυσης προβλημάτων (solvers) του GAMS.

Solver	Σκοπός
lp	Γραμμικός Προγραμματισμός
nlp	Μη-γραμμικός Προγραμματισμός
dnlp	Μη-γραμμικός Προγραμματισμός με ασυνεχείς παραγώγους
mip	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
rmip	΄΄Χαλαρός΄΄ Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
minlp	Μικτός Ακέραιος Μη-γραμμικός Προγραμματισμός
rminlp	΄΄Χαλαρός΄΄ Μικτός Ακέραιος Μη-γραμμικός
mcp	Μικτά Προβλήματα Αλληλοσυμπληρωμένων Περιορισμών
mpec	Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας
cns	Φραγμένα Μη-γραμμικά Συστήματα

2.2.8 Η εντολή Solve

Η δεσμευμένη λέξη `Solve` χρησιμοποιείται στο GAMS για την διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος που έχει μοντελοποιηθεί. Μια εντολή επίλυσης έχει την παρακάτω μορφή:

```
solve  όνομα_μοντέλου  using  είδος_solver
                       minimizing/maximizing όνομα_μεταβλητής;
```

Από την παραπάνω γραμμή εντολής γίνεται κατανοητό πως πρέπει να καθοριστούν:

1. Το όνομα του μοντέλου προς επίλυση.
2. Το είδος της διαδικασίας επίλυσης (Πίνακας 2.5)
3. Η λέξη `minimizing/maximizing` αναλόγως με το αν επιθυμούμε την ελαχιστοποίηση ή την μεγιστοποίηση της μεταβλητής που ακολουθεί.

2.2.9 Η εντολή Display και τα αρχεία εξόδου του GAMS

Για πληροφορίες σχετικά με την τιμή κάποιου στοιχείου ο χρήστης μπορεί να δώσει την εντολή `Display` που έχει την παρακάτω μορφή:

```
Display          όνομα_στοιχείου;
```

Για την προβολή κάποιας από τις επτά τιμές μιας μεταβλητής ο χρήστης πρέπει να προσθέσει στο τέλος του ονόματος την αντίστοιχη κατάληξη όπως αυτές δόθηκαν στο Πίνακα 2.4 παραπάνω. Η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Το GAMS παρέχει επίσης λεπτομερή αναφορά με το πέρας της εκτέλεσης του κώδικα. Πληροφορίες που παρέχονται είναι μεταξύ άλλων: αντίγραφο κώδικα, μηνύματα σφάλματος, πίνακες αναφοράς, στατιστικά μοντέλου, αναφορές κατάστασης και αναφορές λύσης.

Πίνακας 2.6: Παραδείγματα της αντιστοιχίας μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και της λειτουργίας ΄΄if – then – else΄΄.

Έκφραση ΄΄$΄΄	**Έκφραση ΄΄if – then – else΄΄**

`c('p2','m1')$(z.l >= 70)=0.01;`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`);`

`c('p2','m1') =0.01$(z.l >= 70)`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`else`
	`c('p2','m1')=0.0;`
	`);`

2.2.10 Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές

Το σύμβολο ΄΄$΄΄ έχει ιδιαίτερη σημασία στο GAMS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δηλώσεις υπό συνθήκη. Αν και το ΄΄$΄΄ έχει διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε είδος χρήσης, η λειτουργία του μπορεί να συνοψιστεί σε αυτήν ενός ΄΄εφόσον΄΄ ή ΄΄Αν΄΄. Για παράδειγμα μετά το σύνολο δεικτών στον ορισμό εξισώσεων ελέγχει τις τιμές των δεικτών δημιουργώντας εξισώσεις μόνο για τις τιμές εκείνες του δείκτη που ικανοποιούν τη συνθήκη. Η μορφή χρήσης του '$' είναι:

```
παράσταση $(παράσταση)
```

Η συνθήκη του ΄΄$΄΄ ικανοποιείται εφόσον η τιμή της παράστασης στην παρένθεση είναι μη μηδενική. Μια σχεσιακή παράσταση επιστρέφει ΄΄1΄΄ εφόσον ισχύει και ΄΄0΄΄ αλλιώς. Σε λειτουργίες του GAMS πέραν του ορισμού εξισώσεων η λειτουργία του ΄΄$΄΄ μπορεί να υποκατασταθεί από μια δήλωση ΄΄if – then – else΄΄. Αυτή έχει την μορφή:

```
if     (συνθήκη1,εντολές1
elseif  συνθήκη2, εντολές2
 ...
elseif συνθήκηN-1, εντολές N-1
else    εντολέςN);
```

Οι elseif και else είναι προαιρετικές. Κάθε εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Όλη η διαδικασία πέραν της if περιλαμβάνεται σε παρενθέσεις ενώ η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Ένα παράδειγμα της αντιστοιχίας μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και του ΄΄if – then – else΄΄ δίνεται στον Πίνακα 2.6.

Τυπικοί τελεστές άλλων γλωσσών προγραμματισμού που είναι επίσης έγκυροι στο GAMS είναι οι:

not, and, or, xor ως λογικοί τελεστές
<, <=, =, >, <>, >=, > ως σχεσιακοί τελεστές

Τέλος, το GAMS υποστηρίζει επίσης μια σειρά επαναληπτικών διαδικασιών όπως *loop*, *for* και *while*.

2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη παρουσίαση των βασικών λειτουργιών του GAMS. Το GAMS ως αλγεβρική γλώσσα μοντελοποίησης παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα απέναντι στις τυπικές γλώσσες προγραμματισμού. Αυτά εντοπίζονται πρώτον στην εξοικονόμηση χρόνου λόγω της δυνατότητας εκτέλεσης ενός συνόλου διαδικασιών με μία δήλωση. Δεύτερον στην αποδοτική ΄΄ανακύκλωση΄΄ του κώδικα λόγω της γενικότητας που από τη φύση τους παρέχουν οι αλγεβρικές διατυπώσεις ενός προβλήματος. Άλλο σημαντικό στοιχείο της γλώσσας είναι η αναγνωσιμότητα του κώδικα και ο σημαντικός έλεγχος που έχει ο χρήστης πάνω στις εξόδους του.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[2.1] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman. (2005, Dec.). GAMS: A Users Guide. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: www.gams.com

[2.2] Bruce A. Mc Carl. (2006, March). McCarl GAMS User Guide. Version 22.2. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: www.gams.com

[2.3] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo Garcia and Natalia Alguacil, "Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science," Wiley, 2002, pp. 285-364.

[2.4] Chattopadhyay, D., "Application of general algebraic modelling system to power system optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, Feb 1999.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ – ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ DIESEL

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης τις οποίες εξυπηρετεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [3.1].

Απομονωμένο ή **Αυτόνομο** σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και πιθανότατα θέρμανσης, με σκοπό την κάλυψη μιας κοντινής γεωγραφικά ζήτησης, μη συνδεδεμένης σε κάποιο κεντρικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που εκμεταλλεύεται περισσότερες από μία πηγές για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο όρος **ζήτηση** αναφέρεται σε μία ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια ή θέρμανση την οποία το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας καλείται να εξυπηρετήσει.

Με τον όρο **χρήσιμη** ηλεκτρική ενέργεια γίνεται αναφορά στη ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης. Αντιθέτως με τον όρο **περίσσεια** ηλεκτρική ενέργεια γίνεται αναφορά στη ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία αποβάλλεται από το σύστημα λόγω του ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της ζήτησης ή για την φόρτωση κάποιας μπαταρίας.

Ως **μη τροφοδοτούμενη** ενέργεια ορίζεται η διαφορά που προκύπτει μεταξύ της απαίτησης σε παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση αυτής της απαίτησης.

Για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής θα γίνει ανάλυση ενός Απομονωμένου Υβριδικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας Ανεμογεννητριών – Γεννήτριας Diesel.

3.2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με τον όρο **πηγή ενέργειας** γίνεται αναφορά σε οτιδήποτε εκτός του συστήματος παραγωγής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα για την παραγωγή ενέργειας. Αυτό περιλαμβάνει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και οποιοδήποτε καύσιμο χρησιμοποιείται από τα στοιχεία του συστήματος.

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι τα αιολικά, τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμου, η κυματική ενέργεια, η γεωθερμική ενέργεια και η βιομάζα. Οι πλέον ώριμες από τις πηγές αυτές σήμερα είναι τα αιολικά, τα μικρά υδροηλεκτρικά και τα φωτοβολταϊκά [3.1].

3.2.1 Αιολικά συστήματα

Τα αιολικά συστήματα χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η περιγραφή των στατιστικών χαρακτηριστικών του ανέμου σε μια περιοχή γίνεται με σκοπό την εκτίμηση της διαθέσιμης ισχύς του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή αυτή σε βάθος χρόνου. Η **πυκνότητα ισχύος του ανέμου P/A** (W/m^2) εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα $\boldsymbol{p}$ (kg/m^3) και την ταχύτητα του ανέμου $\boldsymbol{v}$ (m/s). Συγκεκριμένα:

$$P / A = (1/2)\,pv^3 . \tag{3.1}$$

Η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων. Η ατμοσφαιρική πίεση, συνεπώς και η πυκνότητα του αέρα, μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από το επίπεδο της θάλασσας αλλά δε μεταβάλλεται σημαντικά στο χρόνο. Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας που, σε κάποιες περιοχές, μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες μεταβολές στο χρόνο. Συμπεραίνεται ότι η χρήση ανεμογεννητριών συμφέρει να γίνεται σε χαμηλά υψόμετρα και με χαμηλές θερμοκρασίες. Επίσης, επειδή η πυκνότητα ισχύος του ανέμου μεταβάλλεται με το κύβο της ταχύτητας του ανέμου, ο σημαντικότερος παράγοντας μεταβολής της ισχύος στο χρόνο είναι η κυμαινόμενη ταχύτητα του ανέμου.

Οι ταχύτητες του ανέμου σε μια περιοχή παρουσιάζουν διακυμάνσεις σε εποχικό, ημερήσιο και βραχυπρόθεσμο επίπεδο. Βραχυπρόθεσμες μεταβολές, σε ρυθμούς δευτερολέπτων ή λεπτών, μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος των τάσεων στην κατασκευή καθώς και την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας αλλά δεν έχουν σημαντική επιρροή στη μακροπρόθεσμη παραγωγή και στα οικονομικά δεδομένα. Οι ημερήσιες και εποχικές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζουν μια δυσκολία στη πρόβλεψή τους, λόγω του ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν εξαρτάται από κάποιο ξεκάθαρα ορισμένο φαινόμενο. Ο έγκυρος υπολογισμός του τρόπου διακύμανσης του ανέμου σε εποχικό και ημερήσιο επίπεδο απαιτεί ακόμα και χρόνια μετρήσεων με ανεμόμετρα.

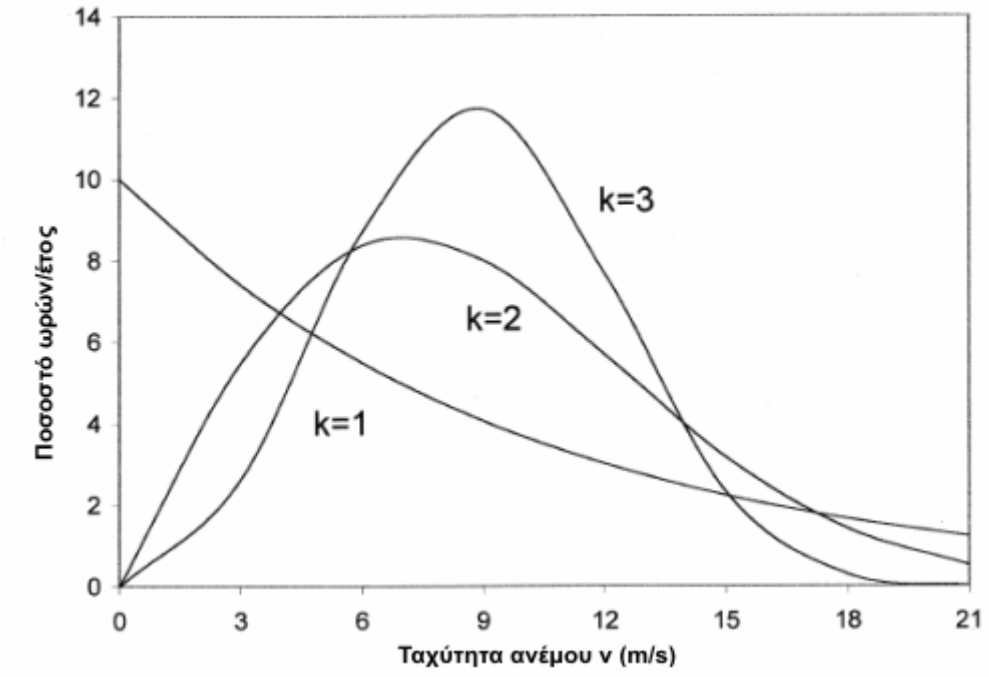
Ένα σημαντικό στοιχείο για τον καθορισμό των συνθηκών ανέμου που επικρατούν σε μια περιοχή είναι η μακροπρόθεσμη κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου. Μακροπρόθεσμες παρατηρήσεις μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η συχνότητα (πιθανότητα) εμφάνισής τους ακολουθεί γενικώς με καλή προσέγγιση την κατανομή Weibull:

$$f(v) = p(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{3.2}$$

όπου $\boldsymbol{v}$ η ταχύτητα του ανέμου, $\boldsymbol{c}$ η παράμετρος κλίμακας της κατανομής Weibull (σε ίδιες μονάδες με την $\boldsymbol{v}$) και $\boldsymbol{k}$ η αδιάστατη παράμετρος μορφής της κατανομής Weibull. Οι παράμετροι $\boldsymbol{c}$ και $\boldsymbol{k}$ σχετίζονται με την μέση ταχύτητα του ανέμου μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\overline{v} = c\Gamma\left(\frac{1}{k}+1\right) \tag{3.3}$$

όπου ***Γ*** η συνάρτηση Γάμα. Η συνάρτηση κατανομής Weibull χαρακτηρίζει ικανοποιητικά το αιολικό δυναμικό, απαιτώντας μόνο μία μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και την τιμή του συντελεστή ***k*** για την ποσοτικοποίησή του. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας Weibull για μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου ***6m/s*** και τιμές της παραμέτρου μορφής ***1***,***2*** και ***3***. Για ***k***=1 η συνάρτηση φθίνει εκθετικά, καθιστώντας περιοχές με τέτοιες τιμές της ταχύτητας μη ευνοϊκές για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Για ***k***=2 έχουμε σχετικά σταθερές ταχύτητες ανέμου αλλά με περιόδους πολύ ισχυρότερων ανέμων από το τυπικό. Για ***k***=3 οι ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζουν έντονη συσσώρευση γύρω από την μέση ταχύτητα. Στην τελευταία περίπτωση φυσούν σχεδόν πάντα άνεμοι σταθερής ταχύτητας καθιστώντας την περιοχή κατάλληλη για την εγκατάσταση ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.1: Κατανομή Weibull για μέση τιμή της ταχύτητας 10 m/s και τιμές του k 1,2 και 3.

Η ταχύτητα του ανέμου τείνει να αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το έδαφος. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, όταν η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου έχει γίνει σε διαφορετικό ύψος από αυτό της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Στα πρώτα εκατοντάδες μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους η τριβή του ανέμου, καθώς αυτός περνάει από το έδαφος, επηρεάζει αρνητικά την ταχύτητά του. Η μείωση της ταχύτητας καθώς πλησιάζουμε στο έδαφος εξαρτάται από την μορφολογία του εδάφους. Η αντίσταση που παρουσιάζει μια λεία επιφάνεια, όπως μια ήρεμη θάλασσα, είναι κατά πολύ μικρότερη αυτής που θα παρουσίαζε μια δασική έκταση. Τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί θεωρούν ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου κατά την απομάκρυνση από το έδαφος ακολουθεί λογαριθμικό ή εκθετικό προφίλ. Το λογαριθμικό προφίλ δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{v(z_1)}{v(z_2)} = \frac{\ln(z_1 / z_0)}{\ln(z_2 / z_0)} \tag{3.4}$$

Όπου $v(z_1)$, $v(z_2)$ είναι η ταχύτητα του ανέμου στα ύψη z_1, z_2 αντίστοιχα και z_0 είναι το μήκος τραχύτητας του εδάφους. Στον Πίνακα 3.1 δίνεται το μήκος τραχύτητας του εδάφους για διάφορες κατηγορίες εδαφών. Το εκθετικό προφίλ δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{v(z_1)}{v(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^a \tag{3.5}$$

όπου ***α*** ο συντελεστής τριβής. Ο Πίνακας 3.2 δίνει μερικές χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή τριβής για διάφορους τύπους εδαφών.

Πίνακας 3.1: Μήκος τραχύτητας για διάφορες κατηγορίες εδαφών.

Χαρακτηριστικά εδάφους	**Μήκος τραχύτητας z_0**
Επιφάνεια θάλασσας (νερού)	0.0002
Ανοικτές περιοχές με λίγα εμπόδια	0.03
Καλλιεργήσιμη γη με μερικά εμπόδια που απέχουν περισσότερο από 1 km	0.1
Αστικές περιοχές και καλλιεργήσιμη γη με πολλά εμπόδια	0.4
Πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή ή δάσος	1.6

Πίνακας 3.2: Συντελεστής τριβής για διάφορους τύπους εδαφών.

Χαρακτηριστικά εδάφους	**Συντελεστής τριβής α**
Λείο σκληρό έδαφος, ήρεμη θάλασσα	0.10
Ψηλό χορτάρι στην επιφάνεια του εδάφους	0.15
Ψηλοί σωροί, εμπόδια και θάμνοι	0.20
Δασώδης ύπαιθρος, πολλά δένδρα	0.25
Μικρή πόλη με δένδρα και θάμνους	0.30
Μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια	0.40

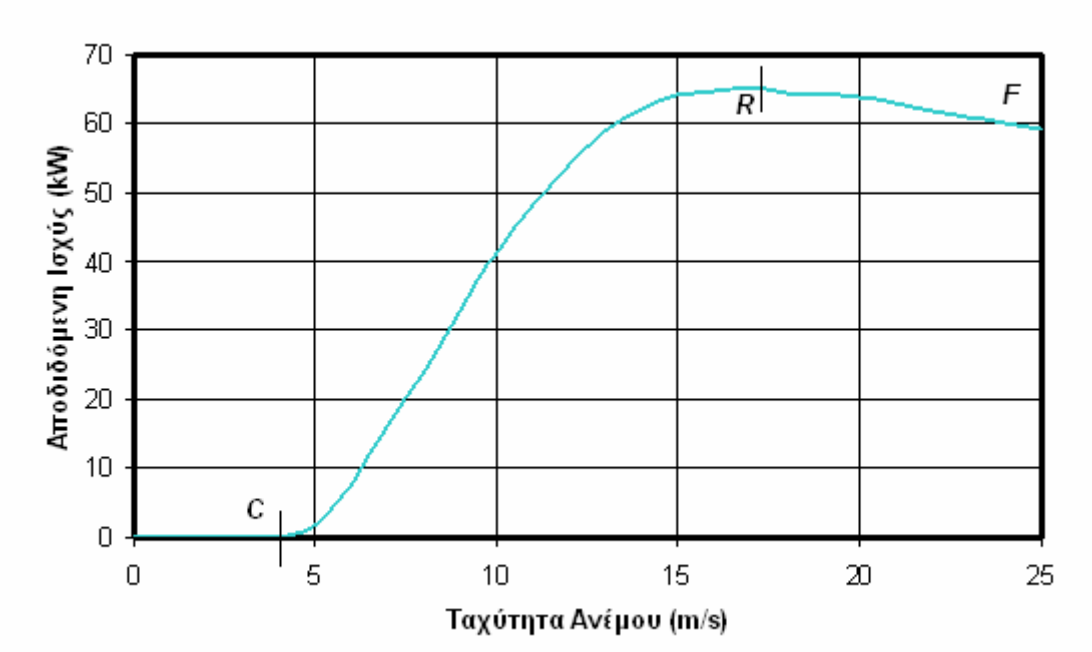
3.2.2 Καύσιμα – Πετρέλαιο diesel

Ως καύσιμο αναφέρεται η πρώτη ύλη με την κατανάλωση της οποίας παράγεται ενέργεια από μια γεννήτρια καυσίμων. Η τιμή του καυσίμου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ανάγκη αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κάτι που είναι εμφανέστερο σε έργα με μεγάλο βάθος χρόνου εφαρμογής.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό ενός καυσίμου, που λαμβάνεται συχνά υπόψη, είναι η περιεκτικότητά του σε στοιχεία που με τη πλήρη ή ατελή καύση τους απελευθερώνουν επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον ουσίες. Η περιεκτικότητα αυτή εκτιμάται σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) της μάζας του καυσίμου. Κρατικοί και διεθνείς φορείς έχουν θέσει όρια στις εκπομπές ορισμένων αερίων, με τη μορφή απαγορεύσεων ή προστίμων, ενώ εταιρίες που επιθυμούν την προβολή του οικολογικού τους προφίλ θέτουν παρόμοιους περιορισμούς. Οι πιο συχνά ελεγχόμενες περιεκτικότητες είναι αυτές του άνθρακα (*C*) και του θείου (*S*). Στο Πίνακα 3.3 αναφέρονται οι κύριοι ρύποι, μαζί με μια σύντομη περιγραφή και τις βασικές επιπτώσεις τους σε περιβάλλον και άνθρωπο. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας υποθέτουμε χρήση πετρελαίου diesel.

Πίνακας 3.3: Οι κυριότεροι ρύποι των καυσίμων και η περιγραφή τους.

Ρύπος	Περιγραφή
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	Μη τοξικό. Συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Δηλητηριώδες αέριο που παράγεται από την ατελή καύση του άνθρακα. Αποτρέπει την μεταφορά οξυγόνου στα όργανα και τους ιστούς του σώματος, προκαλώντας πονοκεφάλους, ζαλάδα, και εξασθένιση της οπτικής αντίληψης, της χειρονακτικής επιδεξιότητας και της ικανότητας μάθησης.
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (UHC)	Παράγωγα ατελούς καύσης υδρογονάνθρακα, συμπεριλαμβανομένων της φορμαλδεΰδης και των αλκενίων. Οδηγούν σε ατμοσφαιρικές αντιδράσεις που προκαλούν το φωτοχημικό νέφος.
Σωματίδια (PM)	Μίγμα καπνού, στάχτης, και σταγονιδίων που μπορούν να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα και να σχηματίσουν ατμοσφαιρική θόλωση.
Διοξείδιο του θείου (SO_2)	Διαβρωτικό αέριο που απελευθερώνεται με τη χρήση καυσίμων που περιλαμβάνουν θείο (όπως κάρβουνο και πετρέλαιο). Προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα, όξινη βροχή και ατμοσφαιρική θόλωση.
Οξείδια του αζώτου (NO_x)	Διάφορες ενώσεις του αζώτου που σχηματίζονται με τη καύση οποιουδήποτε καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες. Οδηγούν σε αναπνευστικά προβλήματα, αιθαλομίχλη, και όξινη βροχή.



Σχήμα 3.2: Γραφική παράσταση μιας τυπικής καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας.

3.3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.3.1 Ανεμογεννήτρια

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε συνεχές (DC) ή εναλλασσόμενο (AC) ρεύμα, σε τάξεις μεγέθους από μερικά watt μέχρι μερικά megawatt. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει την δική της χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος που περιγράφει την ισχύ εξόδου της συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της πλήμνης. Στο Σχήμα 3.2 δείχνεται ένα παράδειγμα. Μια τυπική καμπύλη ισχύος εμφανίζει μια ταχύτητα v_C στην οποία γίνεται η έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια δεν παράγει ισχύ για ταχύτητες που δεν υπερβαίνουν την v_C. Ακολουθεί μία εκθετική αύξηση της ισχύος με την ταχύτητα του ανέμου μέχρι η τελευταία να φτάσει την τιμή v_R όπου η καμπύλη παρουσιάζει μέγιστο. Τιμή που αντιστοιχεί θεωρητικά στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Στη συνέχεια η καμπύλη φθίνει λόγω περιορισμών στην κατασκευή της γεννήτριας μέχρι η ταχύτητα να πάρει την τιμή v_F οπότε και σταματάει η λειτουργία της.

Η καμπύλη ισχύος υποθέτει λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένη πυκνότητα του αέρα. Συνήθως $1.225\ kg/m^3$ που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία αέρα 15^oC και πίεση $1\ atm$. Για μια ανεμογεννήτρια που λειτουργεί σε διαφορετική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί η ισχύ εξόδου από την παρακάτω σχέση:

$$P = P_{pc}\left(\rho / \rho_{ref}\right) \tag{3.6}$$

όπου P_{pc} η ισχύς εξόδου όπως προβλέπεται από την χαρακτηριστική καμπύλη, ρ η πραγματική πυκνότητα του αέρα και ρ_{ref} η πυκνότητα στην οποία αναφέρεται η καμπύλη.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να ασκείται στον υπολογισμό της ισχύος εξόδου για μεγάλες χρονικές περιόδους λόγω της μη γραμμικής σχέσης της με την ταχύτητα του ανέμου και την μεταβλητότητα της τελευταίας. Η απευθείας χρήση χρονοσειρών για μέσο όρο διαστημάτων μεγαλύτερων της ώρας δεν ενδείκνυται. Στις περιπτώσεις αυτές συνίσταται η χρήση κατανομών συχνότητας των ταχυτήτων.

Τα έξοδα μιας ανεμογεννήτριας προέρχονται κυρίως από τα αρχικά κεφάλαια και συμπληρώνονται από πιθανά έξοδα αντικατάστασης και έξοδα συντήρησης και λειτουργίας. Η διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας κυμαίνεται συνήθως στα 15 με 25 χρόνια ενώ τα ετήσια έξοδα συντήρησης και λειτουργίας στο 1 με 3% του αρχικού κεφαλαίου.

3.3.2 Γεννήτριες

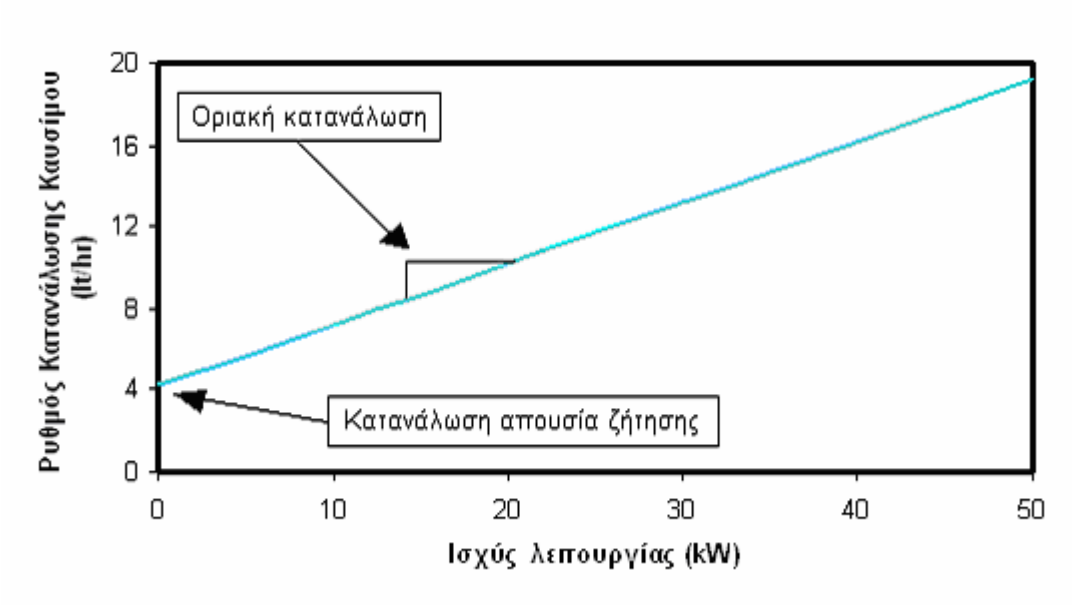
Κάθε γεννήτρια χαρακτηρίζεται από το μέγεθός της (**ονομαστική ισχύς**) που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύ. Η γεννήτρια diesel είναι μια ηλεκτρική γεννήτρια που στηρίζεται σε έναν παλινδρομικό κινητήρα diesel. Αποτελεί την πιο συνήθη λύση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές με μεγέθη που κυμαίνονται από μερικά kilowatt μέχρι ένα megawatt. Οι γεννήτριες προπανίου και οι γεννήτριες βενζίνης βρίσκουν επίσης συχνή χρήση σε μεγέθη κάτω των 25MW. Άλλες γεννήτριες καυσίμων είναι οι μικροτουρμπίνες [3.3], οι κυψέλες καυσίμων [3.4], οι θερμοφωτοβολταϊκές [3.5] και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες [3.6] κ.α.

Οι γεννήτριες έχουν την ικανότητα να παράγουν ισχύ και να ανταποκρίνονται άμεσα στη διακύμανση της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο κύριος ρόλος μιας γεννήτριας σε ένα υβριδικό σύστημα είναι να λειτουργεί εφεδρικά των συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας, παράγοντας ενέργεια όταν αυτά αδυνατούν να καλύψουν τη ζήτηση. Για γεννήτριες με

ανταποδοτικές μηχανές συνεχούς ταχύτητας, αλλά και μικροτουρμπίνες, ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου προσεγγίζεται επαρκώς από την παρακάτω εξίσωση:

$$F = F_0 + F_1 \cdot P \tag{3.7}$$

όπου F ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμων, F_0 και F_1 σταθερές (κατανάλωση απουσία ζήτησης και οριακή κατανάλωση αντίστοιχα) και P η ισχύς εξόδου. Ένα παράδειγμα τέτοιας καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Έχει αποδειχθεί ότι για γεννήτριες diesel η σταθερά F_0 είναι γραμμική συνάρτηση του μεγέθους της γεννήτριας [3.7]. Η κατανάλωση καυσίμου για γεννήτριες με ανταποδοτικές μηχανές μεταβαλλόμενης ταχύτητας προσεγγίζεται καλύτερα με συναρτήσεις μεγαλύτερης τάξης παρόλο που και αυτές παρουσιάζουν κατανάλωση απουσία ζήτησης.



Σχήμα 3.3: Γραφική παράσταση μιας τυπικής καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου.

Οι γεννήτριες καυσίμων έχουν διάρκεια ζωής που υπολογίζεται σε ώρες λειτουργίας, με το πέρας των οποίων η γεννήτρια θα χρειαστεί αντικατάσταση ή μεγάλης κλίμακας επιδιόρθωση. Για την αποφυγή ζημιάς στον κινητήρα οι γεννήτριες diesel σταθερής ταχύτητας δεν αποδίδουν ισχύ κάτω από ένα όριο που τυπικά αντιστοιχεί στο 30% της ονομαστικής ισχύος. Οι περισσότεροι άλλοι τύποι γεννητριών έχουν παρόμοιους περιορισμούς.

Σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι γεννήτριες απαιτούν χαμηλό αρχικό κεφάλαιο και έχουν υψηλό κόστος λειτουργίας. Σε αυτό συντελεί το κόστος του καυσίμου το οποίο συνήθως διαχωρίζεται στα διάφορα μοντέλα από τα υπόλοιπα έξοδα λειτουργίας. Τυπικά τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης παραμένουν σταθερά κάθε ώρα λειτουργίας ανεξαρτήτως της ισχύος εξόδου. Επίσης ο κινητήρας, λόγω της μορφής της καμπύλης κατανάλωσης, καταναλώνει λιγότερο καύσιμο ανά kWh καθώς αυξάνεται το μέγεθος της κατανάλωσης. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι γεννήτριες καυσίμων είναι οικονομικά αποτελεσματικότερες όταν αποδίδουν τη μέγιστη ισχύ, πράγμα που επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων ενέργειας.

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μη εξάρτηση των τεχνολογιών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας από κάποιο καύσιμο, καθιστά ιδανική τη χρήση τους σε απομονωμένες, εκτός δικτύου περιοχές. Η

χρονική μεταβλητότητα πάντως των ανανεώσιμων πόρων δημιουργεί συχνά την ανάγκη για συνδυασμό των ανανεώσιμων τεχνολογιών μεταξύ τους, με γεννήτριες, ή με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Η δημιουργία ενός μοντέλου του συστήματος διευκολύνει την προσομοίωσή του και συνεπώς την επιλογή της καταλληλότερης δομής του.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απαιτούν συνήθως υψηλό αρχικό κεφάλαιο και χαμηλό κόστος λειτουργίας. Αντιθέτως οι περισσότερες συμβατικές πηγές ενέργειας απαιτούν συγκριτικά χαμηλό αρχικό κεφάλαιο και υψηλό κόστος λειτουργίας. Οποιαδήποτε λοιπόν έγκυρη αποτίμηση του κόστους απαιτεί κάποιο συγκερασμό κόστους λειτουργίας και αρχικών εξόδων.

Ο σχεδιαστής ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να λάβει υπόψη του ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων, πολλά από τα οποία είναι από τη φύση τους αβέβαια. Η μοντελοποίηση του συστήματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μπορεί να δώσει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να εκτιμήσει την επιρροή της αβεβαιότητας αυτής στο σύστημά του.

3.4.1 Χρονική μεταβλητότητα

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές παρουσιάζουν δύο ειδών χρονικές μεταβλητότητες. Η περιοδική ή μακροπρόθεσμη μεταβλητότητα είναι αποτέλεσμα των εποχικών διακυμάνσεων στις ανανεώσιμες πηγές. Η βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα προκύπτει από τις στιγμιαίες ή από ώρα σε ώρα διακυμάνσεις των ανανεώσιμων πηγών και της ζήτησης. Το χαρακτηριστικό αυτό επηρεάζει σημαντικά τη σχεδίαση συστημάτων ενέργειας.

Η εποχική μεταβλητότητα αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή των στοιχείων του συστήματος. Για παράδειγμα, η έλλειψη μιας ανανεώσιμης πηγής κάποια εποχή του χρόνου μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη χρήσης μιας γεννήτριας καυσίμων. Ο βαθμός κατά τον οποίο αλληλοσυμπληρώνονται οι διάφοροι πόροι επηρεάζει το βέλτιστο συνδυασμό πηγών ενέργειας. Έτσι ένας συνδυασμός ανεμογεννήτριας και φωτοβολταϊκού θα έχει πιθανότατα καλύτερα αποτελέσματα αν η ταχύτητα του ανέμου φτάνει το μέγιστό της το χειμώνα (όταν το φωτοβολταϊκό έχει ελάχιστη απόδοση) αντί του καλοκαιριού (όταν το φωτοβολταϊκό έχει μέγιστη απόδοση).

Η βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα επηρεάζει το σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος. Είναι το σημαντικότερο κριτήριο για την επιλογή του μεγέθους της αποθηκευμένης ενέργειας ενώ λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στην επιλογή των μετατροπέων AC/DC. Τέλος, η βραχυπρόθεσμη μεταβλητότητα παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των εφεδρικών γεννητριών, που μεταβάλουν την αποδιδόμενη ισχύ τους βάση των διακυμάνσεων στις ανανεώσιμες πηγές και τη ζήτηση.

3.4.2 Επιλογή μεγέθους και πλήθους στοιχείων

Για τη σχεδίαση ενός συστήματος ενέργειας χρειάζεται να αποφασισθεί το είδος των πηγών ενέργειας του συστήματος, αν θα συμπεριληφθούν μέσα αποθήκευσης καθώς και τα μεγέθη και το πλήθος κάθε στοιχείου του συστήματος. Μια τέτοια επιλογή της καλύτερης διαμόρφωσης από μια μακρά σειρά δυνατών επιλογών, αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αρμόζει μοντελοποίησης στον υπολογιστή. Τυπικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους, που υπόκειται σε μια σειρά περιορισμών. Για τα περισσότερα απομονωμένα συστήματα, κύριος περιορισμός είναι η ικανοποίηση της ζήτησης. Άλλοι περιορισμοί μπορεί να προκύπτουν από την κατασκευή των στοιχείων, τις προδιαγραφές λειτουργίας τους ή εθνικά και κοινοτικά πλαίσια.

3.4.3 Έλεγχος και λειτουργία συστήματος

Ορισμένα συστήματα απαιτούν ενδελεχή μελέτη του τρόπου λειτουργίας τους. Για ένα μικρό σύστημα ανανεώσιμης πηγής/ μπαταρίας δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη διαδικασία ελέγχου, πέρα της φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Παρόμοια, απλός είναι ο έλεγχος μιας ανανεώσιμης πηγής συνδεδεμένης στο κεντρικό δίκτυο, και ενός συστήματος ανανεώσιμης πηγής/ γεννήτριας όπου η ανανεώσιμη ισχύ δεν ξεπερνά τη ζήτηση. Στις περιπτώσεις αυτές η ανανεώσιμη πηγή μειώνει απλά την κατανάλωση καυσίμου, με το δίκτυο ή τη γεννήτρια να παρέχουν συνεχώς ισχύ. Ένα σύστημα ανανεώσιμης πηγής/ γεννήτριας στο οποίο η ισχύς που παράγεται από την ανανεώσιμη πηγή ξεπερνά περιστασιακά τη ζήτηση, απαιτεί μια διαδικασία ελέγχου για το πότε μπορεί να γίνεται ασφαλής διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας. Ο τρόπος ελέγχου που επιλέγεται επηρεάζει τόσο τα οικονομικά όσο και τη βέλτιστη λύση του συστήματος.

Σημαντική είναι η ακολουθούμενη στρατηγική ελέγχου και στην περίπτωση ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων της μίας άμεσα ελεγχόμενων πηγών ενέργειας. Παράδειγμα αυτού είναι ένα απομονωμένο σύστημα που περιλαμβάνει μπαταρία και γεννήτρια diesel. Δύο συνήθεις πρακτικές λειτουργίας στην περίπτωση αυτή είναι η ακολουθία της ζήτησης και η κυκλική φόρτιση. Υπό τη στρατηγική ακολουθίας της ζήτησης, όποτε η γεννήτρια λειτουργεί, παράγει ακριβώς όση ενέργεια απαιτείται για την ικανοποίηση της ζήτησης. Οι μπαταρίες φορτίζονται μέσω της πλεονάζουσας ανανεώσιμης ενέργειας. Υπό τη στρατηγική κυκλικής φόρτισης, όποτε η γεννήτρια λειτουργεί, παράγει πλεονάζουσα ενέργεια για τη φόρτιση της μπαταρίας.

3.4.4 Οικονομικό μοντέλο

Σημαντικό τμήμα της μοντελοποίησης ενός συστήματος αποτελούν τα οικονομικά. Για τη σωστή μοντελοποίηση του κόστους ενός προγράμματος πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η αρχική επένδυση όσο και τα διάφορα έξοδα λειτουργίας. Καθίσταται έτσι απαραίτητη η εκτίμηση της χρονικής αξίας του χρήματος. Συνηθέστερος τρόπος προσέγγισης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο υπολογισμός του Κόστους Ενέργειας που αντιπροσωπεύει το μέσο παρόν κόστος παραγωγής της ενέργειας. Αυτό προκύπτει από την αναγωγή όλων των ταμειακών ροών σε ετήσια βάση και τη διαίρεση του αθροίσματός τους με την ετήσια καλυπτόμενη ζήτηση. Μία αντίστοιχη προσέγγιση είναι ο υπολογισμός της παρούσας αξίας όλων των ταμειακών ροών που παρουσιάζονται εντός της διάρκειας ζωής του προγράμματος. Έτσι προκύπτει το συνολικό κόστος του προγράμματος. Στη περίπτωση συστημάτων μετασκευής, όπου μία επένδυση σε ανανεώσιμες πηγές αναμένεται να μειώσει κάποια μελλοντικά έξοδα, είναι χρήσιμος ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής και του ρυθμού επιστροφών.

3.4.5 Ανάλυση ευαισθησίας

Ακόμα και η πιο προσεκτική σχεδίαση ενός μοντέλου συστήματος δεν μπορεί να αποκλείσει την εμφάνιση διαφορών μεταξύ πραγματικών και μοντελοποιημένων αποτελεσμάτων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αβεβαιότητα που παρουσιάζουν σημαντικά δεδομένα εισόδου. Για παράδειγμα, μία αισιόδοξη πρόβλεψη της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε ένα σύστημα ανεμογεννήτριας/ γεννήτριας diesel θα οδηγήσει πιθανότατα σε μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη κατανάλωση καυσίμου, ανεβάζοντας έτσι και το αναμενόμενο κόστος. Παρομοίως, η υποτίμηση της μελλοντικής αξίας του πετρελαίου diesel θα οδηγήσει στην υποτίμηση του συνολικού κόστους του προγράμματος.

Ο συνηθισμένος τρόπος αντιμετώπισης της αβεβαιότητας στα δεδομένα εισόδου είναι η προσομοίωση του συστήματος για διαφορετικές τιμές τους. Έτσι καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός των επιπτώσεων στα δεδομένα εξόδου, αλλά και στην επιλογή της βέλτιστης

σύνθεσης του συστήματος, για διάφορες αποκλίσεις των δεδομένων εισόδου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οπτικοποιούνται συνήθως με τη χρήση κάποιου διαγράμματος για την καλύτερη κατανόησή τους.

Ένας εναλλακτικός τρόπος για τον συνυπολογισμό της αβεβαιότητας των δεδομένων εισόδου σε ένα πρόβλημα είναι η χρήση τεχνικών ανάλυσης αποφάσεων. Σύμφωνα με την προσέγγιση της κανονικοποιημένης ανάλυσης αποφάσεων, αναθέτονται πιθανότητες σε πολλαπλά σενάρια δεδομένων εισόδου. Με τη χρήση των ποσοστών αυτών υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος των δεδομένων εξόδου, βάση των οποίων επιλέγεται η βέλτιστη σύνθεση του συστήματος.

3.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα μοντέλα σχεδιασμού συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: τα στατιστικά μοντέλα και τα μοντέλα χρονοσειρών. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος, κάτω από συνθήκες υψηλής μεταβλητότητας των δεδομένων ζήτησης και ανανεώσιμων πόρων. Τα στατιστικά μοντέλα θεωρούν μεγάλα χρονικά διαστήματα και βασίζονται σε στατιστικές μεθόδους για την πρόβλεψη της επιρροής της βραχυπρόθεσμης μεταβλητότητας σε κάθε διάστημα. Τα μοντέλα χρονοσειρών αντιμετωπίζουν το φαινόμενο της μεταβλητότητας με το διαχωρισμό του έτους σε ωριαία, ή μικρότερα, διαστήματα και προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε διάστημα.

3.5.1 Στατιστικά μοντέλα

Στα στατιστικά μοντέλα η εποχική μεταβλητότητα αντιμετωπίζεται συνήθως με την προσομοίωση του συστήματος χωριστά για κάθε μήνα του χρόνου. Για τη διαχείριση όμως της βραχυπρόθεσμης μεταβλητότητας εφαρμόζεται κάποια στατιστική τεχνική.

Συγκρινόμενα με τα μοντέλα χρονοσειρών, τα στατιστικά μοντέλα τείνουν να είναι απλούστερα και γρηγορότερα στην απόδοση αποτελεσμάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτά πηγάζουν κυρίως από την μειωμένη ανάγκη για δεδομένα εισόδου. Τα δεδομένα ζήτησης και ανανεώσιμων πόρων είναι σε μορφή ετήσιων ή μηνιαίων μέσων όρων, σε αντίθεση με τα ωριαία δεδομένα που απαιτούν τα περισσότερα μοντέλα χρονοσειρών. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στα στατιστικά μοντέλα είναι λιγότερο λεπτομερείς, απαιτώντας λιγότερα δεδομένα εισόδου. Το τελευταίο τα καθιστά και ευκολότερα στην εκμάθηση, διευκολύνοντας παράλληλα τη συλλογή δεδομένων για την ανάλυση ενός συγκεκριμένου συστήματος. Συνέπεια των παραπάνω είναι τα στατιστικά μοντέλα να είναι ιδανικά για γρήγορες συγκρίσεις συστημάτων ενέργειας και εκτιμήσεις κόστους.

Η απλότητα όμως των στατιστικών μοντέλων μειώνει και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους. Λόγω του ότι βασίζονται σε απλουστευμένες υποθέσεις, αδυνατούν συχνά να ενσωματώσουν κρίσιμες συμπεριφορές του πραγματικού συστήματος. Η αδυναμία τους αυτή είναι αποτρεπτικός παράγοντας για την αποτελεσματική μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων, όπως ένα σύστημα ανεμογεννήτριας/ γεννήτριας diesel με υψηλές ταχύτητες ανέμου. Σε τέτοια συστήματα, οι λεπτομέρειες τις οποίες το απλουστευμένο μοντέλο δεν μπορεί να λάβει υπόψη του, ίσως να επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία και το κόστος του προγράμματος.

Τα στατιστικά μοντέλα τείνουν επίσης να είναι λιγότερο ευέλικτα στη διαμόρφωση του συστήματος. Η αδυναμία τους στη προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων περιορίζει το σχεδιαστή όσον αφορά τους εφικτούς συνδυασμούς στοιχείων. Ένα άλλο αρνητικό

χαρακτηριστικό των στατιστικών μοντέλων είναι ότι παρά το μικρότερο όγκο απαιτούμενων δεδομένων, ορισμένα από αυτά μπορεί να είναι δύσκολα στην κατανόηση και τον υπολογισμό. Τέτοια δεδομένα μπορεί να είναι τιμές συσχέτισης μεταξύ ανανεώσιμων πόρων ή το ποσοστό μη ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας από μια πηγή.

3.5.2 Μοντέλα χρονοσειρών

Τα μοντέλα χρονοσειρών στοχεύουν στην απευθείας μοντελοποίηση των αποτελεσμάτων της βραχυπρόθεσμης μεταβλητότητας, μέσω της προσομοίωσης του συστήματος σε ικανοποιητικώς μικρά χρονικά διαστήματα. Τυπικώς γίνονται ετήσιες προσομοιώσεις με τη χρήση ωριαίων διαστημάτων, οπότε και θεωρείται ότι οι χρονικά εξαρτώμενες μεταβλητές παραμένουν σταθερές εντός των διαστημάτων. Μειωμένα χρονικά διαστήματα συνεπάγονται αυξημένη ακρίβεια αλλά και χρόνο υπολογισμού. Το τελευταίο, σε συνδυασμό με τη δυσκολία απόκτησης αναλυτικότερων δεδομένων για τη ζήτηση και τους ανανεώσιμους πόρους, εξηγεί τη συνηθέστερη χρήση ωριαίων χρονικών διαστημάτων.

Η βασικότερη λειτουργία των μοντέλων χρονοσειρών είναι η διαχείριση του ισοζυγίου ενέργειας σε κάθε χρονικό διάστημα. Κατά αυτό, το μοντέλο υπολογίζει τη διαθέσιμη ανανεώσιμη ισχύ, τη συγκρίνει με τη ζήτηση και προσομοιώνει την αντίδραση του συστήματος στο πιθανό έλλειμμα ή πλεόνασμα ενέργειας. Στη περίπτωση απομονωμένων συστημάτων, πιθανό έλλειμμα μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση μίας ή περισσότερων γεννητριών, ή με την εκμετάλλευση κάποιας αποθηκευμένης ενέργειας. Στα ίδια συστήματα, η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να αποθηκεύεται, να απορρίπτεται, ή να τροφοδοτεί μια προαιρετική ζήτηση. Τα μη απομονωμένα συστήματα έχουν επιπλέον τη δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας με το κεντρικό δίκτυο.

Η διαίρεση του χρόνου σε μικρά διαστήματα επιτρέπει στα μοντέλα χρονοσειρών την ακριβή μοντελοποίηση ακόμα και πολύπλοκων συστημάτων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα μοντελοποίησης μιας μεγάλης ποικιλίας συνδυασμών στοιχείων. Η ευελιξία αυτή, καθιστά δυνατή την αξιολόγηση περισσότερων επιλογών σχεδίασης από ότι με τα στατιστικά μοντέλα.

Η περιορισμένη διάθεση ωριαίων δεδομένων ζήτησης και ανανεώσιμων πόρων, αποτελεί αποτρεπτικό παράγοντα για τη χρήση των μοντέλων χρονοσειρών. Παρόλα αυτά υπάρχουν διαθέσιμοι αλγόριθμοι για τη σύνθεση δεδομένων ταχύτητας ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και ζήτησης, από πιο διαδεδομένους μηνιαίους και ετήσιους μέσους όρους.

Ο χρόνος προσομοίωσης που απαιτεί ένα μοντέλο χρονοσειρών εξαρτάται άμεσα από το αν παρακολουθεί την ηλεκτρική τάση. Η προσομοίωση ενός συστήματος που παρακολουθεί την τάση είναι μία χρονοβόρα διαδικασία [3.8]. Μοντέλα τα οποία παρακολουθούν απλά τη ροή της ισχύος, δίχως να υπολογίζουν τάσεις, είναι συγκριτικά πολύ πιο γρήγορα.

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας εμφανίζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ασυνεχή μορφή των ανανεώσιμων πόρων, τους πολλούς δυνατούς συνδυασμούς στοιχείων, την αβεβαιότητα για σημαντικά δεδομένα και την ανάγκη εκτίμησης του κόστους σε βάθος χρόνου. Η μοντελοποίηση ενός συστήματος στον υπολογιστή διευκολύνει στην συνεκτίμηση των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία και το κόστος του. Καθίσταται έτσι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ μεγάλης ποικιλίας δυνατών σχεδιασμών και η εξέταση διαφορετικών περιπτώσεων δεδομένων εισόδου. Στις μέρες μας, υπάρχει μεγάλο εύρος διαθέσιμων μοντέλων σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων. Τα στατιστικά μοντέλα βρίσκουν κυρίως χρήση στα αρχικά στάδια μελέτης των

συστημάτων, λόγω της ταχύτητας αλλά και των περιορισμένων δυνατοτήτων τους. Η αναλυτικότερη προσομοίωση είναι συνήθως έδαφος των μοντέλων χρονοσειρών, χάρη στην ακρίβεια και την ευελιξία τους.

3.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[3.1] Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας," Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.

[3.2] Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, "Ηλεκτρική Οικονομία," Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006.

[3.3] Energy Nexus Group, "Technology Characterization: Microturbines," for the Environmental Protection Agency, Climate Protection Partnership Division Washington, DC, March 2002.

[3.4] EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, "Fuel Cell Handbook," 5th ed., under contract no. DE-AM26-99FT40575, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Oct. 2000.

[3.5] John Kassakian, Thomas Keim, David Perreault, Ivan Celanovic, Natalija Jovanovic, Francis O'Sullivan. 1D and 2D Photonic Crystals for Thermophotovoltaic Applications (Introduction). Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems Electronic. [Online]. Available: http://lees.mit.edu/lees/thermophotovoltaics_project01.htm

[3.6] D. M. Rowe, G. Min, "Design theory of thermoelectric modules for electrical power generation," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol*., vol. 143, no. 6, November 1996.

[3.7] O. Skarstein and K. Uhlen, "Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants," Wind Engineering 13 (1989), 72-87.

[3.8] Karlsson, P.; Svensson, J., "DC bus voltage control for a distributed power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1405-1412, Nov. 2003.

[3.9] Lilienthal PD, Lambert TW, Gilman P, "Computer modelling of renewable power systems," Cleveland CJ, editor-in-chief, *Encyclopedia of Energy*, Elsevier Inc., Volume 1, pp. 633-647, NREL Report No. CH-710-36771, 2004.

[3.10] Ελληνική έκδοση (2001, Aug.), "Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ," *Guide for the Training of Engineers in the Electricity Production Technologies from Renewable Energy Sources (TEPRESS)*, LEONARDO DA VINCI 1999, under contract no. EL/99/2/011015/PI/II.1.1.b/FPI, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ - Ελλάδα), ARMINES-Centre d' Energitique (Γαλλία), Zentrum fór rationelle Energieanwendung und Umwelt GmbH (ZREU – Γερμανία).

[3.11] Herzog, J.W., "Current and near-term emission control strategies for diesel powered generator sets," *Telecommunications Energy Conference*, 2002.

[3.12] Barley, C.D., Winn, C.B., "Optimal Dispatch Strategy in Remote Hybrid Power Systems," *Solar Energy*, Vol. 58, No. 4-6, pp. 165-179, 1996.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το μοντέλο βελτιστοποίησης του υβριδικού συστήματος. Η επιλογή και ανάλυση των στοιχείων του συστήματος σκοπεύει στην εύρεση των μεταβλητών, παραμέτρων και συναρτήσεων που καθορίζουν το πρόβλημα. Το σύστημα αποτελείται από μια γεννήτρια diesel και έναν αριθμό όμοιων ανεμογεννητριών ενώ δεν θα θεωρηθεί σύνδεση με κάποιο κεντρικό δίκτυο. Για την απλοποίηση του προβλήματος λαμβάνονται ως αμελητέες οι απώλειες φορτίου λόγω της μεταφοράς του ενώ δεν γίνεται μοντελοποίηση των υποσυστημάτων ελέγχου και διανομής.

Στόχος του μοντέλου είναι η εύρεση του συνδυασμού γεννήτριας diesel - αριθμού ανεμογεννητριών που θα ικανοποιεί μια δεδομένη ζήτηση ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος. Οι κύριες μεταβλητές του προβλήματος είναι:

- $\mathbf{P}_{max}$ η ονομαστική ισχύ της γεννήτριας diesel
- $\mathbf{n}_{WT}$ ο αριθμός των ανεμογεννητριών

Το πρόγραμμα έχει διάρκεια ζωής $\mathbf{R}_{proj}$ ίση με **25 έτη**. Για τη σύγκριση των δυνατών λύσεων χρησιμοποιείται ως αντικειμενική συνάρτηση το Κόστος Ενέργειας (**COE**, Cost of energy). Τα οικονομικά μεγέθη του μοντέλου θεωρείται ότι μεταβάλλονται στο χρόνο βάσει ετήσιου επιτοκίου προεξόφλησης $\boldsymbol{i}$ ίσο με **6%**.

4.2 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.2.1 Αιολικό δυναμικό

Για το σκοπό της Διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις ταχύτητας του ανέμου που έγιναν το έτος 2005 στην περιοχή των Χανίων της Κρήτης. Το ύψος του ανεμομέτρου $\mathbf{h}_{hub}$ είναι **10m**. Στο Πίνακα 4.1 δίνονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου για κάθε μήνα του έτους. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι κατά την ώρα μέγιστης ζήτησης η ταχύτητα του ανέμου είναι **4.9 m/s**. Στο Σχήμα 4.1 αναπαρίσταται η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του χρόνου. Η μέγιστη παρατηρούμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι 21.47 m/s και η ελάχιστη 0 m/s. Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης θα υπολογιστεί βάση του εκθετικού νόμου με συντελεστή τριβής $\boldsymbol{\alpha}$ ίσο με **0.1**, όπου έχει υποτεθεί λείο, σκληρό έδαφος.

4.2.2 Πετρέλαιο diesel

Θεωρείται ότι η τιμή **fc** του καυσίμου στην αρχή της επένδυσης είναι **0.7 €/lt** και ότι μεταβάλλεται μόνο βάση του ετήσιου επιτοκίου προεξόφλησης.

4.3 ΖΗΤΗΣΗ

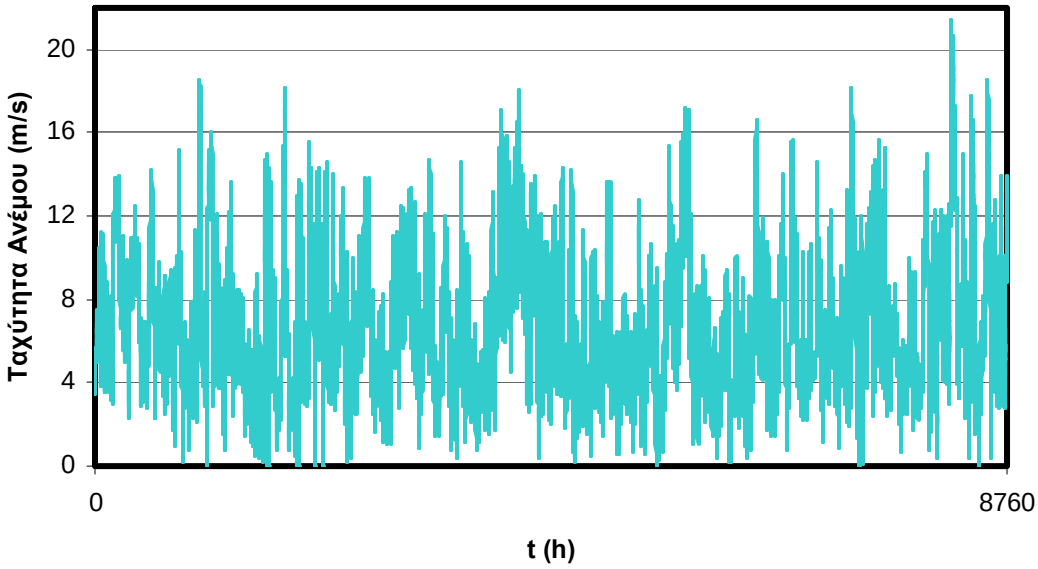
Ορίζεται $\mathbf{D_h}$ η ζήτηση κατά τη διάρκεια της ώρας **h**. Τα στοιχεία ζήτησης πάρθηκαν σε μορφή ωριαίων στοιχείων ζήτησης εκφρασμένα ως ποσοστά ενός ετήσιου μέγιστου. Τα στοιχεία αυτά αντιπροσωπεύουν την κατανομή της ζήτησης στην Κρήτη το 2005. Η ωριαία ζήτηση υπολογίζεται μέσω του πολλαπλασιασμού των στοιχείων αυτών με την ετήσια μέγιστη ζήτηση του απομονωμένου συστήματος που για τους σκοπούς της διπλωματικής λαμβάνεται στα **47.6 kW** με ετήσια ζήτηση στις 216810 kWh. Στο Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση τιμή της ζήτησης για κάθε μήνα του έτους. Στο Σχήμα 4.2 αναπαρίσταται η διακύμανση της ζήτησης κατά την διάρκεια του χρόνου. Η ελάχιστη παρατηρούμενη τιμή της ζήτησης είναι 8.04 kW.

Πίνακας 4.1: Στατιστικά στοιχεία ταχύτητας ανέμου σε m/s.

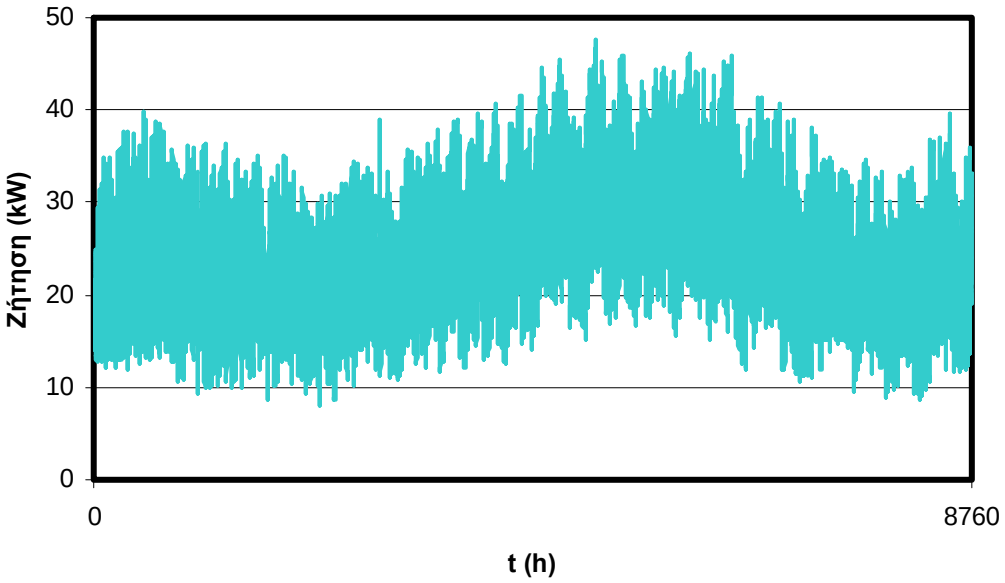
	Μέση Ταχύτητα	**Μέγιστη Ταχύτητα**	**Ελάχιστη Ταχύτητα**
Ιανουάριος	7,15	14,20	2,32
Φεβρουάριος	6,87	18,53	0,03
Μάρτιος	6,32	18,10	0,00
Απρίλιος	6,31	14,63	0,00
Μάιος	6,85	14,67	0,43
Ιούνιος	8,31	18,10	0,40
Ιούλιος	5,56	14,23	0,20
Αύγουστος	6,55	17,17	0,00
Σεπτέμβριος	5,33	16,63	0,17
Οκτώβριος	6,54	18,10	0,80
Νοέμβριος	6,69	15,67	0,00
Δεκέμβριος	8,15	21,47	0,00
Έτους	6,72	21,47	0,00

Πίνακας 4.2: Στατιστικά στοιχεία ζήτησης σε kW.

	Μέση Ζήτηση	**Μέγιστη Ζήτηση**	**Ελάχιστη Ζήτηση**
Ιανουάριος	23.11	39.82	11.98
Φεβρουάριος	22.14	36.43	9.28
Μάρτιος	21.09	35.05	8.68
Απρίλιος	21.1	39.04	8.04
Μάιος	23.84	38.88	10.73
Ιούνιος	27.04	41.61	12.07
Ιούλιος	30.71	47.6	14.17
Αύγουστος	29.37	45.87	15.56
Σεπτέμβριος	29.21	46.02	11.87
Οκτώβριος	24.41	41.42	10.71
Νοέμβριος	22.21	34.88	8.94
Δεκέμβριος	21.83	39.58	8.65
Έτους	24.67	47.6	8.04



Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της ταχύτητας του ανέμου σε m/s συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση της ζήτησης σε kW συναρτήσει του χρόνου.

4.4 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

4.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Ορίζεται $\mathbf{P}_{WT,h}$ η παραγόμενη ισχύς μίας ανεμογεννήτριας την ώρα **h**. Θεωρείται ύψος πύργου $\mathbf{h}_{WT}$ ίσο με **25 m** και διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας $\mathbf{R}_{WT}$ τα **15 χρόνια**. Η μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται με τη χρήση καμπύλης ισχύος βασισμένης στα δεδομένα του HOMER. Η επιλεγμένη ανεμογεννήτρια (Generic 20kW) έχει ονομαστική ισχύ $\mathbf{P}_R$ ίση με **20 kW**, ταχύτητα έναρξης λειτουργίας $\mathbf{V}_{in}$ ίση με **3m/s**, και ταχύτητα διακοπής λειτουργίας $\mathbf{V}_{out}$ ίση με **24 m/s**. Για τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος

χρησιμοποιήθηκε πολυώνυμο παρεμβολής έβδομης τάξης, Αυτό παρέχει ακριβή συσχέτιση με τα πραγματικά δεδομένα (R^2 = 99,87%) ενώ εμφανίζει αποκλειστικά θετικές τιμές της παραγόμενης ισχύος στο διάστημα [$\mathbf{V}_{in}$, $\mathbf{V}_{out}$]. Η παραγόμενη εξίσωση δίνεται παρακάτω:

$$P_{WT}(V) = 1.07\times10^{-6}\times V^7 - 1.20\times10^{-4}\times V^6 + 5.36\times10^{-3}\times V^5$$
$$-0.12\times V^4 + 1.42\times V^3 - 8.46\times V^2 + 24.24\times V - 26.36 \qquad (4.1)$$
$$\text{για} \quad V_{in} \le V \le V_{out}$$

Η καμπύλη ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.

4.4.2 Κόστη

Το κεφάλαιο $\mathbf{C}_{cap_WT}$ για την απόκτηση μιας ανεμογεννήτριας ανέρχεται στα **30 χιλιάδες €** ενώ το κόστος αντικατάστασης της $\mathbf{C}_{rep_WT}$ στα **20 χιλιάδες €**. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης της ανεμογεννήτριας $\mathbf{C}_{O\&M_WT}$ ανέρχονται στα **500 € ανά έτος**. Στο τέλος του προγράμματος θεωρείται αξία εκποίησης της ανεμογεννήτριας $\mathbf{S}_{WT}$ ανάλογη της εναπομένουσας ζωής της. Έτσι η αξία εκποίησης θα είναι:

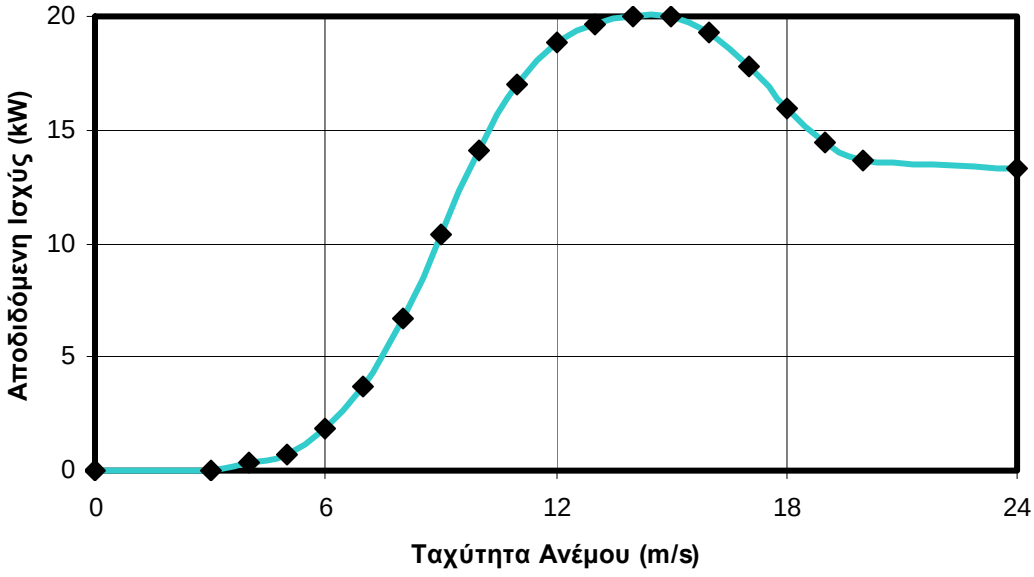
$$S_{WT} = C_{rep_WT} \cdot \frac{R_{rem_WT}}{R_{WT}} \qquad (4.2)$$

όπου $\mathbf{R}_{rem_WT}$ η εναπομένουσα ζωή της ανεμογεννήτριας στο τέλος του προγράμματος:

$$R_{rem_WT} = R_{WT} - \left(R_{proj} - R_{rep_WT}\right) \qquad (4.3)$$

με τη διάρκεια του κόστους αντικατάστασης $\mathbf{R}_{rep_WT}$ να ισούται με:

$$R_{rep_WT} = R_{WT} \cdot \mathrm{INT}\left(\frac{R_{proj}}{R_{WT}}\right) \qquad (4.4)$$



Σχήμα 4.3: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας και συσχετιζόμενες τιμές.

4.5 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ DIESEL

4.5.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Ορίζεται $\mathbf{P_{D,h}}$ η ισχύς λειτουργίας της γεννήτριας diesel την ώρα **h**. Η επιλεγμένη γεννήτρια έχει διάρκεια ζωής $\mathbf{R_{D,h}}$ **20 χιλ. ώρες λειτουργίας**. Η διάρκεια ζωής $\mathbf{R_D}$ της γεννήτριας σε έτη αποτελεί δεδομένο εξόδου του μοντέλου σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_D = \frac{R_{D,h}}{N_D} \tag{4.5}$$

όπου $\mathbf{N_D}$ ο αριθμός των ωρών λειτουργίας της γεννήτριας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Κύριο χαρακτηριστικό της γεννήτριας diesel είναι η ονομαστική της ισχύς $\mathbf{P_{max}}$ που αποτελεί και την μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύ. Η $\mathbf{P_{max}}$ αποτελεί και μια από τις μεταβλητές του προβλήματός μας. Συναρτήσει αυτής δίνεται η εξίσωση κατανάλωσης καυσίμων:

$$F_h = F_0 + F_1 \cdot P_{D,h} \tag{4.6}$$

όπου $\mathbf{F_h}$ η κατανάλωση καυσίμου την **h** ώρα. Η οριακή κατανάλωση $\mathbf{F_1}$ ισούται με **0.246 λίτρα ανά kW, ανά ώρα λειτουργίας** ενώ η κατανάλωση μη-ζήτησης $\mathbf{F_0}$ δίνεται συναρτήσει της $\boldsymbol{P_{max}}$:

$$F_0 = m_f \cdot P_{\max} \tag{4.7}$$

όπου ο συντελεστής $\boldsymbol{m_f}$ ισούται με **0.08415 λίτρα ανά ώρα, ανά kW**.

4.5.2 Κόστη

Το κεφάλαιο $\mathbf{C_{cap_D}}$ για την απόκτηση της γεννήτριας diesel είναι συνάρτηση της ονομαστικής της ισχύος σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_{cap_D} = m_{cap_D} \cdot P_{\max} \tag{4.8}$$

όπου ο συντελεστής $\mathbf{m_{cap_D}}$ ισούται με 2**00 € ανά kW**.

Το κόστος αντικατάστασης $\mathbf{C_{rep_D}}$ της γεννήτριας diesel είναι συνάρτηση της ονομαστικής της ισχύος σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_{rep_D} = m_{rep_D} \cdot P_{\max} \tag{4.9}$$

όπου ο συντελεστής $\mathbf{m_{rep_D}}$ ισούται με **200 € ανά kW**.

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της γεννήτριας diesel $\mathbf{C_{O\&M_D}}$ είναι συνάρτηση της ονομαστικής της ισχύος σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_{O\&M_D} = m_{O\&M_D} \cdot P_{\max} \cdot N_D \tag{4.10}$$

όπου ο συντελεστής $\mathbf{m_{O\&M_D}}$ ισούται με **0.01 € ανά kW, ανά ώρα λειτουργίας**.

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης καυσίμου $\mathbf{C_{Fuel_D}}$ είναι το γινόμενο της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου με τη τιμή του καυσίμου:

$$C_{Fuel_D} = fc \cdot \sum_h F_h, \text{ για } P_h \neq 0. \tag{4.11}$$

Στο τέλος του προγράμματος θεωρείται αξία εκποίησης της ανεμογεννήτριας $\mathbf{S_D}$ ανάλογη της εναπομένουσας ζωής της. Έτσι η αξία εκποίησης θα είναι:

$$S_D = C_{rep_D} \cdot \frac{R_{rem_D}}{R_D} \tag{4.12}$$

όπου η εναπομένουσα ζωή της γεννήτριας σε έτη $\mathbf{R_{rem_D}}$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{rem_D} = R_D - \left(R_{proj} - R_{rep_D}\right) \tag{4.13}$$

με τη διάρκεια του κόστους αντικατάστασης $\mathbf{R_{rep_D}}$ να ισούται με:

$$R_{rep_D} = R_D \cdot \mathrm{INT}\left(\frac{R_{proj}}{R_D}\right). \tag{4.14}$$

4.6 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ – ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.6.1 Ορισμός χρηματοοικονομικών παραμέτρων

Ο **συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου** (**CRF**, Capital Recovery Factor) [4.2] είναι ένας λόγος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τωρινής αξίας μιας σειράς ίσων περιοδικών ταμειακών ροών. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathrm{CRF}(i,N) = \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \tag{4.15}$$

όπου **i** το επιτόκιο και **N** ο αριθμός περιόδων.

Ο **συντελεστής χρεολυσίου** (**SFF**, Sinking Fund Factor) [4.2] είναι ένας λόγος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μελλοντικής αξίας μιας σειράς ίσων περιοδικών ταμειακών ροών. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathrm{SFF}(i,N) = \frac{i}{(1+i)^N - 1} \tag{4.16}$$

όπου **i** το επιτόκιο και **N** ο αριθμός περιόδων.

Το **ετησίως αναγόμενο κόστος** ενός στοιχείου αποτελείται από:

- το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης
- το ετήσιο κόστος καυσίμων (αν υφίσταται)
- το ετησίως αναγόμενο κεφάλαιο αγοράς
- το ετησίως αναγόμενο κόστος αντικατάστασης
- την ετησίως αναγόμενη αξία εκποίησης

4.6.2 Ετησίως αναγόμενο κόστος γεννήτριας diesel

Το ετησίως αναγόμενο κόστος της γεννήτριας diesel $\mathbf{C_{a_D}}$ ισούται με:

$$C_{a_D} = C_{O\&M_D} + C_{Fuel_D} + C_{a_cap_D} + C_{a_rep_D} - S_{a_D} \tag{4.17}$$

όπου $\mathbf{C_{a_cap_D}}$ το ετησίως αναγόμενο κόστος κεφαλαίου της γεννήτριας diesel:

$$C_{a_cap_D} = C_{cap_D} \cdot \mathrm{CRF}\left(i, R_{proj}\right) \tag{4.18}$$

ενώ $\mathbf{C_{a_rep_D}}$ είναι το ετησίως αναγόμενο κόστος αντικατάστασης της γεννήτριας diesel:

$$C_{a_rep_D} = C_{rep_D} \cdot f_{rep_D} \cdot \mathrm{SFF}\left(i, R_D\right). \tag{4.19}$$

Η συνάρτηση $\mathbf{f_{rep_D}}$ υπολογίζεται από:

$$f_{rep_D} = \begin{cases} \mathrm{CRF}\left(i, R_{proj}\right) / \mathrm{CRF}\left(i, R_{rep_D}\right), & \text{αν } R_{rep_D} > 0 \\ 0 \quad , & \text{αν } R_{rep_D} = 0 \end{cases} \tag{4.20}$$

ενώ $\mathbf{S_{a_D}}$ είναι η ετησίως αναγόμενη αξία εκποίησης της γεννήτριας diesel:

$$S_{a_D} = S_D \cdot \mathrm{SFF}\left(i, R_{proj}\right). \tag{4.21}$$

4.6.3 Ετησίως αναγόμενο κόστος ανεμογεννήτριας

Το ετησίως αναγόμενο κόστος μιας ανεμογεννήτριας $\mathbf{C_{a_WT}}$ ισούται με:

$$C_{a_WT} = C_{O\&M_WT} + C_{a_cap_WT} + C_{a_rep_WT} - S_{a_WT} \tag{4.22}$$

όπου $\mathbf{C_{a_cap_WT}}$ το ετησίως αναγόμενο κόστος κεφαλαίου μιας ανεμογεννήτριας:

$$C_{a_cap_WT} = C_{cap_WT} \cdot \mathrm{CRF}\left(i, R_{proj}\right) \tag{4.23}$$

ενώ $\mathbf{C_{a_rep_WT}}$ είναι το ετησίως αναγόμενο κόστος αντικατάστασης μιας ανεμογεννήτριας:

$$C_{a_rep_WT} = C_{rep_WT} \cdot f_{rep_WT} \cdot \mathrm{SFF}\left(i, R_{WT}\right). \tag{4.24}$$

Η συνάρτηση $\mathbf{f_{rep_WT}}$ υπολογίζεται από:

$$f_{rep_WT} = \begin{cases} \mathrm{CRF}\left(i, R_{proj}\right) / \mathrm{CRF}\left(i, R_{rep_WT}\right), & \text{αν } R_{rep_WT} > 0 \\ 0 \quad , & \text{αν } R_{rep_WT} = 0 \end{cases} \tag{4.25}$$

ενώ $\mathbf{S_{a_WT}}$ είναι η ετησίως αναγόμενη αξία εκποίησης μιας ανεμογεννήτριας:

$$S_{a_WT} = S_{WT} \cdot \mathrm{SFF}\left(i, R_{proj}\right). \tag{4.26}$$

4.6.4 Συνολικό ετησίως αναγόμενο κόστος

Το **συνολικό,** σε ετήσια βάση**, αναγόμενο κόστος** $\mathbf{C}_{a_tot}$ προκύπτει αθροίζοντας τα ετησίως αναγόμενα κόστη των στοιχείων του συστήματος:

$$C_{a_tot} = C_{a_D} + n_{WT} \cdot C_{a_WT} . \tag{4.27}$$

4.6.5 Κόστος ενέργειας (COE – Cost of Energy)

Το κόστος ενέργειας **COE** ορίζεται ως το μέσο κόστος ανά kWh χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από το σύστημα. Για το συγκεκριμένο μοντέλο το COE υπολογίζεται ως εξής:

$$COE = \frac{C_{a_tot}}{E_{load}} \tag{4.28}$$

όπου $\mathbf{E}_{load}$ η συνολική χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα σε ένα έτος.

4.7 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η συνολικά παραγόμενη ισχύς $\mathbf{P}_h$ κατά τη διάρκεια της ώρας **h** του έτους είναι:

$$P_h = n_{WT} \cdot P_{WT,h} + P_{D,h} \tag{4.29}$$

4.7.1 Ικανοποίηση ζήτησης

Τίθεται ως βασικό κριτήριο για την εφικτότητα μιας λύσης η πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης, δηλαδή:

$$P_h \geq D_h, \qquad \forall\ h \in [0 \quad 8760] \tag{4.30}$$

4.7.2 Περιορισμοί παραγωγής ενέργειας από τη γεννήτρια diesel

Η γεννήτρια diesel δεν μπορεί να λειτουργήσει σε ισχύ μεγαλύτερη της ονομαστικής. Επίσης για την αποφυγή ζημιάς στη μηχανή το κατώτερο όριο λειτουργίας τίθεται ίσο με το 30 % της ονομαστικής ισχύος. Οπότε:

$$0.3 \cdot P_{\max} \leq P_{D,h} \leq P_{\max}, \qquad \forall\ h \in [0 \quad 8760] \tag{4.31}$$

4.8 ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το μοντέλο προς μελέτη του απομονωμένου υβριδικού συστήματος γεννήτριας diesel – ανεμογεννητριών συνοψίζεται παρακάτω:

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

- $\mathbf{P}_{max}$ η ονομαστική ισχύ της γεννήτριας diesel
- $\mathbf{n}_{WT}$ ο αριθμός των ανεμογεννητριών
- $\mathbf{P}_{D,h}$ η ισχύ της γεννήτριας diesel την ώρα **h** $\forall\ h \in [0 \quad 8760]$

Επιθυμητή είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας:

$$\min \quad COE$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} D_h &\le P_h, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \\ 0.3 \cdot P_{\max} \le\ & P_{D,h} \le P_{\max}, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \\ 2 \cdot P_{\max} &\in ¥ \\ n_{WT} &\in ¥ \\ P_{D,h} &\ge 0, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \end{aligned}$$

4.9 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Α' (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΕΦΕΔΡΕΙΑ)

Στη περίπτωση λειτουργίας με εφεδρεία, αν θεωρηθεί παράγοντας εφεδρείας $\mathbf{m}_{res}$, ο περιορισμός ικανοποίησης ζήτησης γίνεται:

$$P_h \ge (1 + m_{res}) D_h, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \tag{4.32}$$

Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο του προβλήματος γίνεται:

$$\min \quad COE$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} (1 + m_{res}) D_h &\le P_h, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \\ 0.3 \cdot P_{\max} \le\ & P_{D,h} \le P_{\max}, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \\ 2 \cdot P_{\max} &\in ¥ \\ n_{WT} &\in ¥ \\ P_{D,h} &\ge 0, \quad \forall\ h \in [0 \ \ 8760] \end{aligned}$$

Για τους σκοπούς της διπλωματικής θεωρούμε $\mathbf{m}_{res}$ ίσο με **10%**.

4.10 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β' (ΠΟΙΝΗ ΑΝΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ)

Στη περίπτωση που επιτραπεί η ύπαρξη ανικανοποίητης ζήτησης στο μοντέλο, ο περιορισμός ικανοποίησης ζήτησης αντικαθίσταται με την προσθήκη ενός επιπρόσθετου όρου στη αντικειμενική συνάρτηση. Συγκεκριμένα το συνολικό ετησίως αναγόμενο κόστος γίνεται:

$$C_{a_tot2} = C_{a_D} + n_{WT} \cdot C_{a_WT} + C_{cs} \tag{4.33}$$

όπου $\mathbf{C}_{cs}$ το ετήσιο κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας:

$$C_{cs} = c_{cs} \cdot E_{cs} \tag{4.34}$$

ενώ $\mathbf{c}_{cs}$ η ποινή ανικανοποίητης ζήτησης που θεωρείται ίση με 0.5 €/kWh, και $\mathbf{E}_{cs}$ η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια σε kWh/έτος. Η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια αποτελεί δεδομένο εξόδου του μοντέλου. Το μέσο κόστος ενέργειας γίνεται:

$$COE_2 = \frac{C_{a_tot2}}{E_{load}} \tag{4.35}$$

Θεωρείται επίσης ότι, για συγκεκριμένη σύνθεση του συστήματος ενέργειας, η γεννήτρια diesel παράγει τόση ισχύ ώστε να καλύψει καλύτερα τη ζήτηση, ανεξαρτήτως αν αυτό αυξάνει το κόστος ενέργειας. Η ισχύ λειτουργίας της γεννήτριας diesel δηλαδή θα είναι:

$$P_{D,h} = \begin{cases} P_{\max} & , \text{αν } n_{WT} \cdot P_{WT,h} + \quad P_{\max} < D_h \\ D_h - n_{WT} \cdot P_{WT,h} & , \text{αν } n_{WT} \cdot P_{WT,h} + 0.3 \cdot P_{\max} < D_h < n_{WT} \cdot P_{WT,h} + \quad P_{\max} \\ 0.3 \cdot P_{\max} & , \text{αν } n_{WT} \cdot P_{WT,h} \quad < D_h < n_{WT} \cdot P_{WT,h} + 0.3 \cdot P_{\max} \\ 0 & , \text{αν} \quad D_h < n_{WT} \cdot P_{WT,h} \end{cases} \tag{4.36}$$

Το μοντέλο του προβλήματος γίνεται:

min $\quad COE_2$

υπό τους περιορισμούς:

$(4.36), \quad \forall\, h \in [0 \quad 8760]$

$2 \cdot P_{\max} \in ¥$

$n_{WT} \in ¥$

4.11 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Για την περαιτέρω εξέταση του προβλήματος διεξάγεται μία σειρά αναλύσεων ευαισθησίας. Για την ζήτηση και την ταχύτητα του ανέμου θα μελετηθούν σενάρια με τιμές στο 80 %, 90 %, 100 %, 110 % και 120 % των αρχικών τιμών. Θέτονται επίσης τιμές στο πετρέλαιο diesel ίσες με 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1 και 1.2 €/lt. Τέλος θέτονται τιμές στο ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης ίσες με 5 %, 6 %, 7 %, 8 %, 9 % και 10 %.

4.12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα της εκτέλεσης της προσομοίωσης σε ωριαία διαστήματα, η οποία καθιστά ταυτόσημες τις αριθμητικές τιμές της ισχύος και της ενέργειας. Επιπλέον, η μέγιστη ζήτηση παρουσιάζεται σε ώρα με παραγωγή ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες. Αποφεύγεται έτσι ο προκαθορισμός του $\mathbf{P}_{max}$ στη τιμή μέγιστης ζήτησης. Ο αριθμός των ανεμογεννητριών θα επηρεάζει άμεσα την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας diesel βάση της μέγιστης διαφοράς ζήτησης και της συνολικής παραγωγής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια.

Μία εναλλακτική επιλογή για την αντικειμενική συνάρτηση, με συχνή χρήση στη βιβλιογραφία, ήταν το συνολικό κόστος του έργου. Παρόλα αυτά προτιμήθηκε η χρήση του κόστους ενέργειας, δεδομένης της παραστατικότητάς του και της άμεσης συγκρισιμότητάς του με τη τιμή ενέργειας του δικτύου.

4.13 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[4.1] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson, "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model," *Technical Report* NREL/TP-500-40566, December 2006.

[4.2] Watts, John M., Jr. and Robert E. Chapman, "Engineering Economics", Section 5, Chapter 7, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, NFPA, Quincy MA, 2002.

[4.3] Antonio J. Conejo, Enrique Castillo, Roberto Minguez, Raquel Garcia-Bertrand, "Decomposition Techniques in Mathematical Programming: Engineering and Science Applications," Springer Publishing Company, 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ HOMER

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η βήμα προς βήμα επίλυση του μοντέλου που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4, με τη χρήση του προγράμματος HOMER. Η επόμενη ενότητα αποτελεί μία σύντομη εισαγωγή στο HOMER. Οι ενότητες 5.3 έως 5.6 δίνουν λεπτομερώς τη διαδικασία εισαγωγής και επίλυσης του βασικού μοντέλου στο λογισμικό καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στις ενότητες 5.7 και 5.8 γίνεται η επίλυση των εναλλακτικών μοντέλων.

5.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HOMER

Το HOMER Micropower Optimization Model, όπως είναι ο πλήρης τίτλος του, είναι ένα μοντέλο χρονοσειρών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που έχει αναπτυχθεί από την U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Σκοπός του είναι να βοηθήσει στο σχεδιασμό μικρών συστημάτων ενέργειας και να διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Για τη προσομοίωση ενός συστήματος ενέργειας στο HOMER, ο χρήστης δημιουργεί σε πρώτη φάση ένα σχεδιάγραμμα του συστήματος. Στη συνέχεια εισάγει τα δεδομένα ανανεώσιμων πόρων και ζήτησης, μεταβάλει τις παραμέτρους των στοιχείων, και θέτει κατάλληλους περιορισμούς. Η ανάλυση ευαισθησίας επίσης γίνεται με εύκολο και κατανοητό τρόπο. Μετά την εκτέλεση των προσομοιώσεων εμφανίζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα, συνοδευμένα από κατάλληλα γραφήματα.

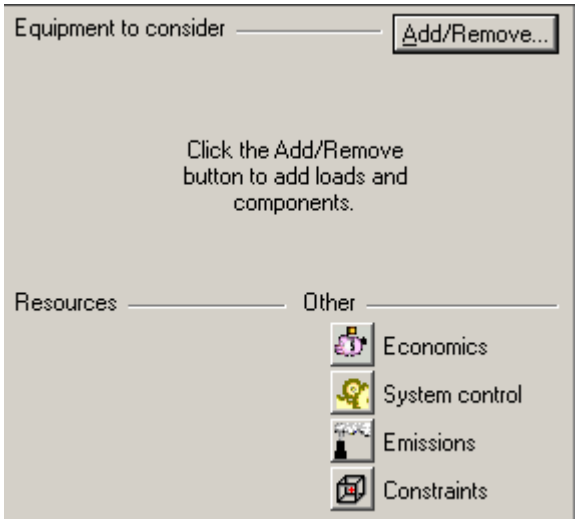
Το HOMER χρησιμοποιεί ως αντικειμενική συνάρτηση το καθαρό παρόν κόστος του συστήματος, ενώ εμφανίζει στα αποτελέσματα και το μέσο κόστος ενέργειας.

5.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

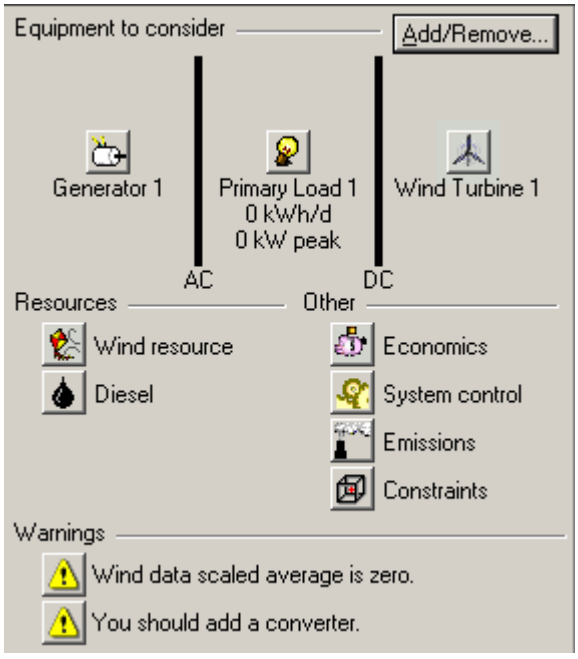
Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η δημιουργία του σχεδιαγράμματος του συστήματος, εισάγοντας τα στοιχεία που το αποτελούν και τη ζήτηση. Σε κάθε υποενότητα δίνεται αναλυτικά η διαδικασία ορισμού και παραμετροποίησης της ζήτησης ή του αντιστοίχου στοιχείου. Αρχικά θα δημιουργηθεί ένα καινούργιο αρχείο, είτε επιλέγοντας File -> New, είτε πατώντας το εικονίδιο . Έπειτα πατώντας το πλήκτρο "*Add/Remove*" στο κυρίως παράθυρο ανοίγει το μενού καθορισμού εξοπλισμού.

Εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 5.3. Από εκεί επιλέγονται τα "*Primary Load 1*", για τη ζήτηση, "*Wind turbine 1*", για τις ανεμογεννήτριες, και "*Generator 1*" για τη γεννήτρια diesel. Βεβαιώνεται ότι είναι επιλεγμένο το "*Do not model grid*", έτσι ώστε το σύστημα να θεωρηθεί ότι δεν συνδέεται στο δίκτυο διανομής ενέργειας. Είναι δηλαδή απομονωμένο. Πατώντας "*OK* " το σχεδιάγραμμα παίρνει τη μορφή του Σχήματος 5.2.

Παρατηρείται ότι το σχεδιάγραμμα περιέχει τα επιλεγμένα στοιχεία. Στο κέντρο, το εικονίδιο  αντιπροσωπεύει τη ζήτηση. Αριστερά της καθέτου "*AC* " βρίσκεται η περιοχή με τα στοιχεία εναλλασσόμενου ρεύματος. Προς το παρών περιέχει μόνο το εικονίδιο  που αντιπροσωπεύει τη γεννήτρια καυσίμων. Δεξιά της καθέτου "*DC* ", στην περιοχή των στοιχείων συνεχούς ρεύματος, βρίσκεται το εικονίδιο  που αντιστοιχεί σε σύνολο όμοιων ανεμογεννητριών.



Σχήμα 5.1: Κενό σχεδιάγραμμα.



Σχήμα 5.2: Αρχική μορφή σχεδιαγράμματος.

Στο κυρίως παράθυρο, κάτω από τη σήμανση "*Warnings*", αναφέρεται ότι:

- Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι μηδέν.
- Απαιτείται μετατροπέας AC/DC.

Η πρώτη σήμανση προκύπτει από το ότι δεν έχουν εισαχθεί ακόμα τα δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου. Η δεύτερη σήμανση μπορεί να αγνοηθεί. Προκύπτει από τον αυτόματο ορισμό των ανεμογεννητριών ως DC, χαρακτηριστικό που θα αλλαχθεί στη συνέχεια.

Στο κυρίως παράθυρο, κάτω από τη σήμανση "*Resources*", έχουν προστεθεί τα εικονίδια  και  που αντιστοιχούν στο αιολικό και στο καύσιμο της γεννήτριας. Το τελευταίο έχει ορισθεί αυτομάτως ως πετρέλαιο diesel.

5.3.1 Ζήτηση

Στην υποπαράγραφο αυτή θα γίνει η εισαγωγή των δεδομένων ζήτησης. Αρχικά πατιέται το εικονίδιο της ζήτησης στο σχεδιάγραμμα. Στο παράθυρο που ανοίγει θα διατηρηθεί η επιλογή "*Load type: AC* ", ώστε η ζήτηση να είναι σε μορφή AC, και επιλέγεται "*Data source: Import time series data file*" (Σχήμα 5.4). Πατώντας "Import File…" εμφανίζεται το παράθυρο ανοίγματος αρχείου από το οποίο ανοίγεται το αρχείο με τα δεδομένα της ζήτησης.

Το HOMER παραθέτει μια σειρά γραφημάτων που χαρακτηρίζουν τη μορφή της ζήτησης (Σχήμα 5.5). Στο γράφημα "*Daily Profile*" δίνεται η μέση τιμή της ζήτησης για κάθε ώρα της μέρας. Στο "*Seasonal Profile*" έχουμε τη μέγιστη, ελάχιστη και μέση τιμή της ζήτησης για κάθε μήνα και το σύνολο του έτους. Τέλος στο "*DMap*" δίνεται παραστατικά η εξέλιξη της ζήτησης στο χρόνο.

Στο κάτω αριστερό τμήμα του παραθύρου παρατηρείται η τιμή "*Scaled annual average (kWh/d): 594* " που δίνει ότι η μέση ημερήσια ζήτηση είναι 594 kWh. Δεξιά της τιμής υπάρχει ένα πλήκτρο . Πατώντας το εμφανίζεται το παράθυρο για την εισαγωγή των τιμών ευαισθησίας. Εισάγονται στην εμφανιζόμενη στήλη οι τιμές:

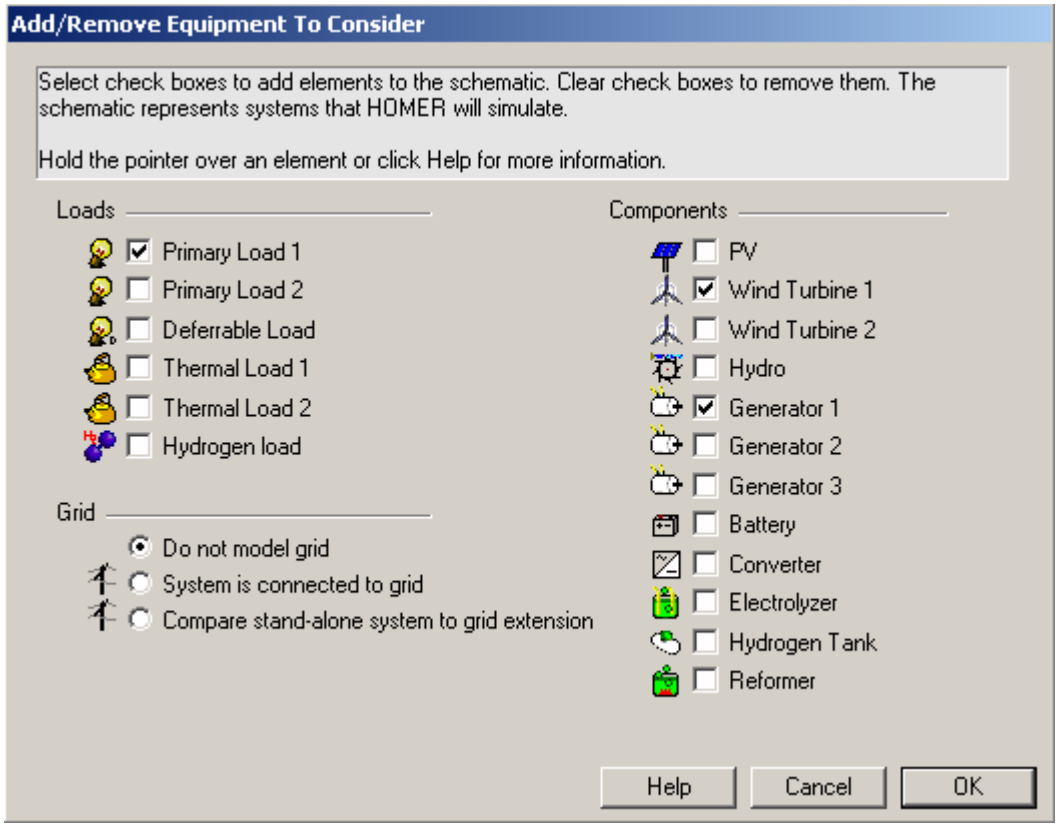
- 475.2
- 534.6
- 653.4
- 712.8

Που αντιστοιχούν στο 80%, 90% 110% και στο 120% της αρχικής μέσης τιμής των 594 kWh/d αντίστοιχα. Πατώντας "*OK* " γίνεται η επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο.

Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο. Παρατηρείται ότι κάτω από το εικονίδιο της ζήτησης αναγράφονται προσεγγιστικά η μέση ημερήσια ζήτηση και η μέγιστη τιμή της ζήτησης.

5.3.2 Ανεμογεννήτριες

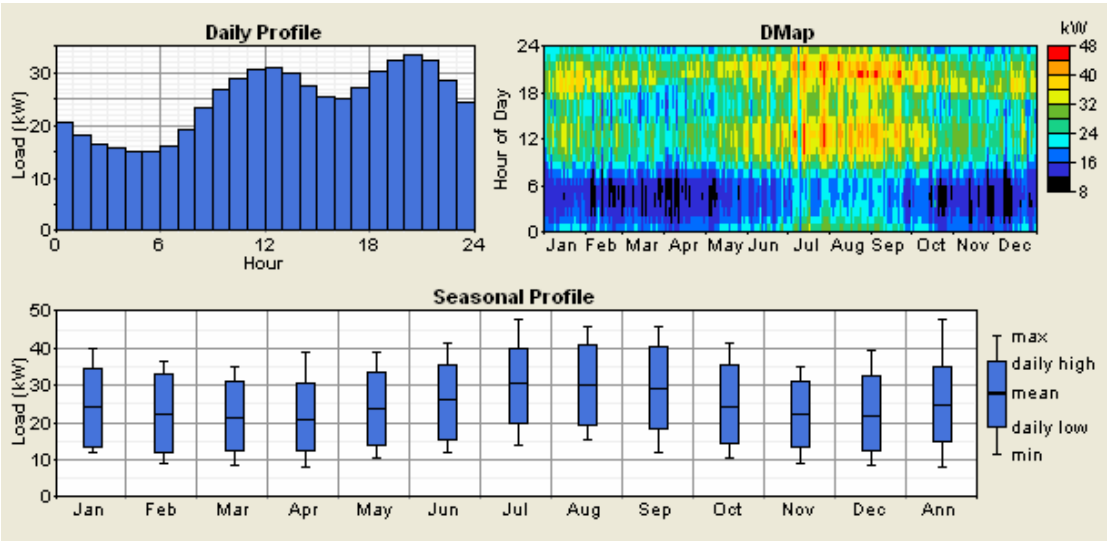
Στην ενότητα αυτή θα γίνει ο καθορισμός της καμπύλης ισχύος των ανεμογεννητριών ενώ θα εισαχθούν και τα στοιχεία κόστους τους. Αρχικά πατιέται το εικονίδιο της ανεμογεννήτριας στο σχεδιάγραμμα. Από τη λίστα "*Turbine type*" επιλέγεται η ανεμογεννήτρια "*Generic 20kW* ". Κάτω από τη σήμανση "*Turbine properties*" εμφανίζεται η ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, που επιβεβαιώνει ότι είναι AC, και ένα γράφημα με την καμπύλη ισχύος της. Κάτω από τη σήμανση "*Costs*" εισάγονται στις αντίστοιχες στήλες οι τιμές:



Σχήμα 5.3: Παράθυρο προσθαφαίρεσης εξοπλισμού.



Σχήμα 5.4: Εισαγωγή αρχείου ζήτησης.



Σχήμα 5.5: Γραφήματα αναπαράστασης της ζήτησης.

- Quantity = 1
- Capital ($) = 30000
- Replacement ($) = 20000
- O&M ($/yr) = 500

Τα δεδομένα αυτά ορίζουν ότι ανά 1 ανεμογεννήτρια το αρχικό κεφάλαιο αγοράς της είναι 30000 $, το κόστος αντικατάστασης 20000 $ και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 500 $ ανά έτος. Παρατηρούμε ότι στα δεξιά έχουν σχηματιστεί οι καμπύλες κεφαλαίου και αντικατάστασης.

Κάτω από τη σήμανση "*Other* " δίνεται:

- Lifetime (yrs) = 15
- Hub height (m) = 25

Εδώ ορίζεται η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας στα 15 έτη και το ύψος της πλήμνης στα 25 μέτρα. Κάτω από τη σήμανση "*Sizes to consider* " εισάγονται οι τιμές 0 έως 10 που ορίζουν τους πιθανούς αριθμούς ανεμογεννητριών για τους οποίους θα γίνει προσομοίωση του συστήματος. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο. Παρατηρείται ότι το εικονίδιο της ανεμογεννήτριας έχει μεταφερθεί στην περιοχή AC ενώ ο τίτλος του έχει αλλάξει σε "*Generic 20kW* ".

5.3.3 Γεννήτρια diesel

Στη υποπαράγραφο αυτή θα ορισθούν η καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου, τα κόστη της γεννήτριας diesel καθώς και οι περιορισμοί λειτουργίας και προσομοίωσής της. Αρχικά πατιέται το εικονίδιο της γεννήτριας στο σχεδιάγραμμα. Στο στηλοθέτη "*Cost* " και κάτω από τη σήμανση "*Costs*" εισάγονται στις αντίστοιχες στήλες οι τιμές:

- Size (kW) = 1
- Capital ($) = 200
- Replacement ($) = 200
- O&M ($/hr) = 0.01

Τα δεδομένα αυτά ορίζουν ότι ανά 1 kW ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας, το αρχικό κεφάλαιο για την αγορά της είναι 200 $, το κόστος αντικατάστασης 200 $ και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης 0.01 $ ανά ώρα λειτουργίας. Παρατηρείται ότι στα δεξιά έχουν σχηματιστεί οι καμπύλες κεφαλαίου και αντικατάστασης. Κάτω από τη σήμανση "*Properties*" δίνεται:

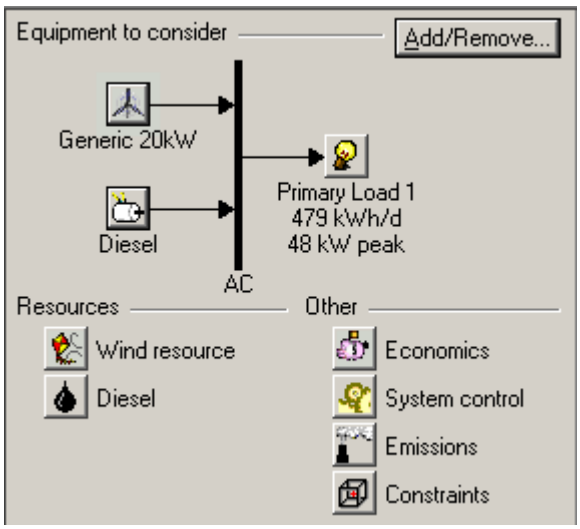
- Lifetime (operating hours) = 20000
- Minimum load ratio (%) = 30

Εδώ ορίζεται η διάρκεια ζωής της γεννήτριας στις 20000 ώρες λειτουργίας και κατώτερο όριο λειτουργίας της γεννήτριας στο 30 % της ονομαστικής ισχύος. Επιβεβαιώνεται τέλος η επιλογή "*Type: AC* ", ώστε η γεννήτρια να παράγει AC ρεύμα. Κάτω από τη σήμανση "*Sizes to consider* " εισάγονται οι τιμές 0 και 37 έως 57, με βήμα 0.5, που ορίζουν τις πιθανές τιμές της ονομαστικής ισχύς για τις οποίες θα γίνει προσομοίωση του συστήματος.

Πατώντας το στηλοθέτη "*Fuel* " ανοίγει η σελίδα παραμέτρων καυσίμου. Κάτω από τη σήμανση "*Fuel curve* " ελέγχεται η προεπιλογή "*Fuel: Diesel* ", που ορίζει το πετρέλαιο diesel ως καύσιμο της γεννήτριας. Έπειτα θέτεται:

- Intercept coeff. (L/hr/kW rated) = 0.08415
- Slope (L/hr/kW output) = 0.246

Δίνονται έτσι οι συντελεστές m_f και F_1 αντίστοιχα που ορίζουν την καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου. Στα δεξιά εμφανίζεται το διάγραμμα "*Efficiency Curve*" που δίνει παραστατικά την αύξηση της αποδοτικότητας της γεννήτριας καθώς αυξάνει η παραγόμενη ισχύς. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.



Σχήμα 5.6: Μορφή του σχεδιαγράμματος μετά τον ορισμό του εξοπλισμού.

5.3.4 Ολοκλήρωση σχεδιαγράμματος

Το σχεδιάγραμμα έχει πλέον τη μορφή του Σχήματος 5.6. Τα βέλη που εμφανίζονται υποδηλώνουν τη μεταφορά της ενέργειας. Συγκεκριμένα οι ανεμογεννήτριες και η γεννήτρια diesel μεταφέρουν ενέργεια υπό τη μορφή AC ρεύματος στο δίκτυο διανομής AC. Από εκεί η ενέργεια μεταφέρεται προς τη ζήτηση.

5.4 ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

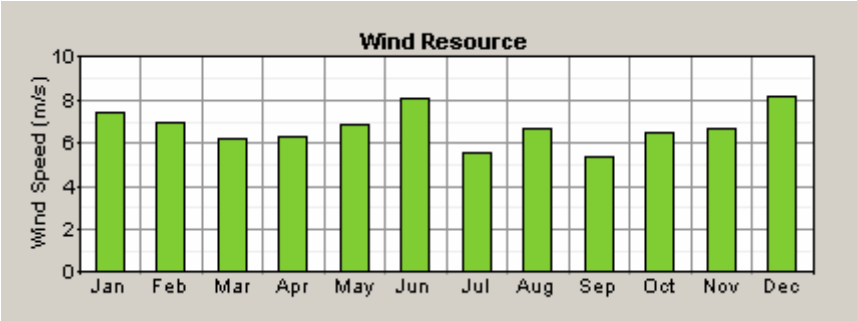
Παρακάτω εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν τις πηγές ενέργειας του συστήματος. Κάτω από τη σήμανση "*Resources*" πρέπει να βρίσκονται τα εικονίδια  "*Wind resource*"και  "*Diesel* " που αντιστοιχούν στο αιολικό και στο πετρέλαιο diesel.

5.4.1 Αιολικό δυναμικό

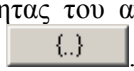
Στην ενότητα αυτή θα ορισθεί το αιολικό δυναμικό. Αρχικά, πατώντας το εικονίδιο του αιολικού δυναμικού επιλέγεται στο παράθυρο που ανοίγει "*Data source: Import time series data file*" και πατιέται το πλήκτρο "*Import File…*" (Σχήμα 5.7). Εμφανίζεται το παράθυρο ανοίγματος αρχείου από το οποίο εισάγεται το αρχείο με τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου. Κάτω από τη σήμανση "*Baseline data*" εμφανίζονται η ετήσια και οι μηνιαίες μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Οι μηνιαίες μέσες τιμές παριστάνονται και στο διάγραμμα με τίτλο "*Wind Resource*" (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.7: Εισαγωγή αρχείου ταχύτητας ανέμου.



Σχήμα 5.8: Γράφημα μέσων τιμών της ταχύτητας του ανέμου.

Στο κάτω αριστερό τμήμα του παραθύρου εμφανίζεται η τιμή "*Scaled annual average (m/s): 6.74* " που δίνει ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 6.74 m/s. Η τιμή αυτή αποτελεί στρογγύλευση της πραγματικής στο δεύτερο δεκαδικό. Αφού διαιρεθεί με τη πραγματική μέση τιμή πολλαπλασιάζεται με τις ωριαίες τιμές της ταχύτητας. Η αλλαγή αυτή στα δεδομένα εισόδου επηρεάζει σημαντικά τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Για την αποφυγή του τελευταίου θέτεται "*Scaled annual average (m/s): 6.744* " που ταυτίζεται με τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου όπως το HOMER την υπολόγισε. Δεξιά της τιμής υπάρχει ένα πλήκτρο 

. Πατώντας το εμφανίζεται το παράθυρο για την εισαγωγή των τιμών ευαισθησίας. Εισάγονται στην εμφανιζόμενη στήλη οι τιμές:

- 5.395
- 6.070
- 7.418
- 8.093

οι οποίες αντιστοιχούν στο 80 %, 90 %, 110 % και στο 120 % της αρχικής μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου αντίστοιχα. Πατώντας "*OK* " γίνεται η επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο.

Κάτω από τη σήμανση "*Other Parameters*" δίνονται οι τιμές:

- Altitude (m above sea level) = 0
- Anemometer height (m) = 10

όπου θέτεται το υψόμετρο στα 0 μέτρα και το ύψος του ανεμομέτρου στα 10 μέτρα. Πατώντας το πλήκτρο "Variation With Height…" εμφανίζεται το παράθυρο καθορισμού της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους. Επιλέγεται "*Wind speed profile: Power law* " για τον ορισμό εκθετικού προφίλ του ανέμου. Ο συντελεστής τριβής θέτεται ίσος με 0.1 δίνοντας "*Power law exponent: 0.1*". Το προφίλ εμφανίζεται στο διάγραμμα με τίτλο " *Wind speed profile* ". Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας 2 φορές "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

5.4.2 Πετρέλαιο diesel

Στην υποπαράγραφο αυτή θα ορισθεί η τιμή του πετρελαίου diesel. Πατώντας το εικονίδιο του πετρελαίου diesel, δίνεται στο παράθυρο που ανοίγει "*Price ($/L): 0.7* " ώστε

να ορισθεί η τιμή του πετρελαίου στα 0.7 $ ανά λίτρο. Δεξιά της τιμής υπάρχει ένα πλήκτρο {..}. Πατώντας το εμφανίζεται το παράθυρο για την εισαγωγή των τιμών ευαισθησίας. Εισάγουμε στην εμφανιζόμενη στήλη οι τιμές:

- 0.60
- 0.80
- 0.90
- 1.00
- 1.10
- 1.20

Η επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο γίνεται πατώντας "*OK* ".

Βεβαιώνεται ότι δεν είναι ενεργοποιημένη η εντολή "*Limit usage to (L/yr)*", ώστε να μην ορισθεί όριο κατανάλωσης στο πετρέλαιο diesel. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

5.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα τεθούν οι περιορισμοί λειτουργίας και θα ορισθούν κάποια οικονομικά μεγέθη. Κάτω από τη σήμανση "*Other* " βρίσκονται τα εικονίδια:

- "*Economics*", Οικονομικά
- "System control", Έλεγχος συστήματος
- "Emissions", Ρύποι
- "Constraints", Περιορισμοί

Στις παρακάτω παραγράφους δίνεται αναλυτικά ο ορισμός των παραμέτρων της αντίστοιχης κατηγορίας.

5.5.1 Οικονομικά

Αρχικά πατιέται το εικονίδιο των οικονομικών. Στο παράθυρο που εμφανίζεται δίνονται οι τιμές:

- Annual real interest rate (%) = 6
- Project lifetime (years) = 25

όπου θέτεται ετήσιο επιτόκιο προεξόφλησης 6 % και διάρκεια ζωής προγράμματος τα 25 έτη. Δεξιά της τιμής του επιτοκίου υπάρχει ένα πλήκτρο {..}. Πατώντας το εμφανίζεται το παράθυρο για την εισαγωγή των τιμών ευαισθησίας. Εισάγονται στην εμφανιζόμενη στήλη τις τιμές:

- 5.0 %
- 7.0 %
- 8.0 %
- 9.0 %
- 10.0 %

Η επιστροφή στο προηγούμενο παράθυρο γίνεται πατώντας "*OK* ".

Βεβαιώνεται ότι είναι ορισμένες οι παρακάτω τιμές:

- System fixed capital cost ($) = 0
- System fixed O&M cost ($/yr) = 0

Ορίζεται έτσι μηδενικό σταθερό αρχικό κόστος και μηδενικό σταθερό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας αντίστοιχα. Η παράμετρος "*Capacity shortage penalty ($/kWh)*" ορίζει τη ποινή μη τροφοδοτούμενης ενέργειας μετρημένη σε $ ανά kWh. Δεδομένου ότι απαιτείται μηδενικό έλλειμμα δε θα αποτελέσει κριτήριο προς στιγμή. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

5.5.2 Έλεγχος συστήματος

Αρχικά, πατώντας το εικονίδιο του ελέγχου συστήματος ανοίγει το αντίστοιχο παράθυρο. Βεβαιώνεται ότι η παράμετρος "*Simulation time step (minutes)*" κάτω από τη σήμανση "*Simulation*" είναι ίση με 60. Η προσομοίωση δηλαδή γίνεται σε ωριαία διαστήματα. Κάτω από τη σήμανση "*Generator control*" ενεργοποιείται η επιλογή "*Allow systems with generator capacity less than peak load*". Το HOMER θα αποδεχθεί έτσι λύσεις με ονομαστική ισχύ γεννήτριας μικρότερη της μέγιστης ζήτησης. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

5.5.3 Περιορισμοί

Αρχικά πατιέται το εικονίδιο των περιορισμών και στο παράθυρο που ανοίγει βεβαιώνεται ότι ισχύει:

- Maximum annual capacity shortage (%) = 0
- Minimum renewable fraction (%) = 0

Θεωρείται έτσι μηδενικό έλλειμμα παραγωγής ενέργειας και ελάχιστο ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας το 0 %. Κάτω από το στηλοθέτη "*Operating Reserve*" δίνεται:

As percent of load
- Hourly load (%) = 0
- Annual peak load (%) = 0

As percent of renewable output
- Wind power output (%) = 0

Τίθεται έτσι λειτουργικό απόθεμα ισχύος ίσο με το άθροισμα του 0 % της ωριαίας ζήτησης, του 0 % της ετήσιας μέγιστης ζήτησης και του 0 % της αποδιδόμενης ανανεώσιμης ισχύος. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας "*OK* " και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

5.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή του μοντέλου αρκεί να δοθεί η εντολή έναρξης της προσομοίωσης πατώντας "*Calculate*". Προτείνεται να γίνουν ξεχωριστές εκτελέσεις του προγράμματος για κάθε ανάλυση ευαισθησίας. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης είναι σαφέστατα μικρότερος και τα αποτελέσματα έρχονται φιλτραρισμένα από περιττή, στη συγκεκριμένη περίπτωση, πληροφορία. Εκτελείται μία σειρά προσομοιώσεων για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Οι προσομοιώσεις ολοκληρώνονται σε συνολικό χρόνο 3.5 λεπτών. Στο χρόνο αυτό εκτελούνται 23 σύνολα των 451 προσομοιώσεων, δηλαδή περίπου 49 προσομοιώσεις το δευτερόλεπτο. Το HOMER δίνει μια αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και πατώντας το εικονίδιο  στο κάτω μέρος του παραθύρου εμφανίζονται στατιστικά της προσομοίωσης. Κάτω από το στηλοθέτη "*Sensitivity Results*" εμφανίζεται η βέλτιστη λύση για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Κάτω από το στηλοθέτη "*Optimization Results*" εμφανίζεται το σύνολο των δυνατών λύσεων για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας.

Η αρχική λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 40 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.226 €/kWh. Παρατηρείται όμως ότι, παρά την απαίτηση για πλήρη κάλυψη της ζήτησης, εμφανίζεται μη τροφοδοτούμενη ενέργεια 208 kWh/έτος ή 0.1% της ετήσιας παραγωγής. Πιθανότατα αυτό οφείλεται στις στρογγυλοποιήσεις που πραγματοποιεί το HOMER.

Για τη διόρθωση του παραπάνω προβλήματος, εκτελούνται ξανά οι προσομοιώσεις ορίζοντας μια υπερβολικά μεγάλη ποινή ανικανοποίητης ζήτησης. Για το σκοπό αυτό τίθεται στο παράθυρο των οικονομικών:

- Capacity shortage penalty ($/kWh) = 1e+008

Το HOMER περιορίζει έτσι την μη τροφοδοτούμενη ενέργεια. Ορισμοί μεγαλύτερων τιμών στη παραπάνω παράμετρο τείνουν να παρουσιάζουν μη λογικά αποτελέσματα. Η νέα λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 47 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.243 €/kWh. Παρόλα αυτά παρουσιάζεται έλλειμμα της τάξης του 10^{-3} kWh/έτος. Τιμή που, λόγω της διαδικασίας που ακολουθήσαμε, αυξάνει το μέσο κόστος ενέργειας. Στους Πίνακες 5.1 έως 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Από τον Πίνακα 5.2 προκύπτει ότι το κόστος της ενέργειας (COE) αυξάνεται όταν μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου. Από τον Πίνακα 5.3 προκύπτει ότι το κόστος της ενέργειας (COE) αυξάνεται όταν αυξάνεται η τιμή του πετρελαίου diesel. Από τον Πίνακα 5.4 προκύπτει ότι το κόστος της ενέργειας (COE) αυξάνεται όταν αυξάνεται το επιτόκιο προεξόφλησης.

Πίνακας 5.1: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας (Σ. Ε.) ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**
0.8	3	37.5	0.243
0.9	3	42.5	0.243
1.0	3	47.0	0.243
1.1	4	51.5	0.243
1.2	4	56.5	0.243

Πίνακας 5.2: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**
0.8	3	47.0	0.287
0.9	3	47.0	0.264
1.0	3	47.0	0.243
1.1	3	47.0	0.225
1.2	3	46.5	0.206

Πίνακας 5.3: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Τιμή diesel (€/lt)	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.60	3	47.0	0.219
0.70	3	47.0	0.243
0.80	4	47.0	0.267
0.90	4	47.0	0.289
1.00	4	47.0	0.312
1.10	5	47.0	0.333
1.20	5	47.0	0.354

Πίνακας 5.4: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
5.0 %	3	47.0	0.240
6.0 %	3	47.0	0.243
7.0 %	3	47.0	0.246
8.0 %	3	47.0	0.249
9.0 %	3	47.0	0.253
10.0 %	3	47.0	0.256

5.7 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Α' (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΕΦΕΔΡΕΙΑ)

Τροποποιείται το μοντέλο των προηγούμενων παραγράφων με χρήση του εικονιδίου των περιορισμών. Κάτω από το στηλοθέτη "*Operating Reserve*" δίνεται:

As percent of load

- Hourly load (%) = 10

Ορίζεται έτσι η λειτουργία του συστήματος με 10 % εφεδρεία. Θα αυξηθεί επίσης το εύρος των δυνατών τιμών του $\mathbf{P}_{max}$ προσθέτοντας τις τιμές 57.5 έως 63 με βήμα 0.5.

Εκτελείται μία σειρά προσομοιώσεων για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Οι προσομοιώσεις ολοκληρώνονται σε συνολικό χρόνο 4 λεπτών. Στο χρόνο αυτό εκτελούνται 23 σύνολα των 581 προσομοιώσεων, ρυθμός που αντιστοιχεί σε 56 προσομοιώσεις το δευτερόλεπτο.

Η επίλυση του μοντέλου παρουσιάζει παρόμοιες δυσκολίες με την προηγούμενη ενότητα. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με προηγουμένως. Η λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 51.5. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.259 €/kWh. Η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια είναι της τάξης του 10^{-4} kWh/έτος. Στους Πίνακες 5.5 έως 5.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πίνακας 5.5: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.8	3	41.5	0.260
0.9	3	46.5	0.258
1.0	3	51.5	0.259
1.1	4	57.0	0.259
1.2	4	62.0	0.258

Πίνακας 5.6: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.8	3	51.5	0.305
0.9	4	51.5	0.281
1.0	3	51.5	0.259
1.1	4	51.5	0.239
1.2	4	51.5	0.220

Πίνακας 5.7: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Τιμή diesel (€/lt)	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.60	3	51.5	0.233
0.70	3	51.5	0.259
0.80	4	51.5	0.283
0.90	4	51.5	0.308
1.00	5	51.5	0.331
1.10	5	51.5	0.354
1.20	5	51.5	0.377

Πίνακας 5.8: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
5.0 %	4	51.5	0.255
6.0 %	3	51.5	0.259
7.0 %	3	51.5	0.262
8.0 %	3	51.5	0.266
9.0 %	3	51.5	0.269
10.0 %	3	51.5	0.273

5.8 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β' (ΠΟΙΝΗ ΑΝΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ)

Αρχικά ανοίγεται το αρχείο του βασικού προβλήματος και πατιέται το εικονίδιο των περιορισμών για να ανοίξει το αντίστοιχο παράθυρο. Τίθεται *"Maximum annual capacity shortage (%): 100"*, ώστε να μην τεθεί όριο στο ποσοστό ελλείμματος σε παραγόμενη ενέργεια. Στη συνέχεια ανοίγεται το παράθυρο των οικονομικών και θέτεται *"Capacity shortage penalty ($/kWh): 0.5"*. Ορίζεται έτσι η ποινή ανικανοποίητης ζήτησης στο 0.5 $/kWh.

Ορίζεται το εύρος των δυνατών τιμών του $\mathbf{P}_{max}$ στις τιμές 10 έως 40 με βήμα 0.5. Εκτελούνται 23 σύνολα των 671 προσομοιώσεων σε 6 λεπτά, δηλαδή γύρω στις 43 προσομοιώσεις το δευτερόλεπτο.

Η λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 26.5 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.215 €/kWh και η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια στο 4 % της ζήτησης ή 8287 kWh/έτος. Στους Πίνακες 5.9 έως 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πίνακας 5.9: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
0.8	2	21.0	0.2170	4 %
0.9	3	23.5	0.2160	4 %
1.0	3	26.5	0.2150	4 %
1.1	3	29.0	0.2160	4 %
1.2	4	31.5	0.2160	4 %

Πίνακας 5.10: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
0.8	3	27.0	0.258	5 %
0.9	3	27.0	0.235	4 %
1.0	3	26.5	0.215	4 %
1.1	3	26.0	0.198	4 %
1.2	3	25.5	0.181	3 %

Πίνακας 5.11: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Τιμή diesel (€/lt)	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
0.60	3	28.0	0.194	3 %
0.70	3	26.5	0.215	4 %
0.80	3	25.0	0.236	5 %
0.90	3	23.5	0.258	6 %
1.00	4	21.0	0.280	8 %
1.10	4	19.0	0.302	11 %
1.20	4	16.0	0.332	15 %

Πίνακας 5.12: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
5.0 %	3	26.5	0.212	4 %
6.0 %	3	26.5	0.215	4 %
7.0 %	3	26.5	0.218	4 %
8.0 %	3	26.5	0.222	4 %
9.0 %	3	26.5	0.225	4 %
10.0 %	3	26.5	0.228	4 %

5.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό δόθηκε αναλυτικά η εισαγωγή και επίλυση του μοντέλου του Κεφαλαίου 4 στο HOMER. Η όλη διαδικασία είναι εύκολη στην εκμάθηση και την υλοποίηση. Παράλληλα, η πρακτικότητα του προγράμματος επιτρέπει την ενστικτώδη αναζήτηση αναφορών και γραφημάτων. Η γενικότερη απλότητα του HOMER οφείλεται στον καλό σχεδιασμό του γραφικού περιβάλλοντος και, κυρίως, στην εξειδίκευσή του στην επίλυση μικρών συστημάτων ενέργειας.

Παρόλα αυτά όμως το HOMER παρουσιάζεται ιδιαίτερα ανακριβές στα αποτελέσματά του, πιθανότατα λόγω των στρογγυλοποιήσεων που πραγματοποιεί. Ιδιαίτερα ο περιορισμός του ελλείμματος παραγωγής στο 0 %, δεν διαχειρίζεται σωστά από το πρόγραμμα. Χαρακτηριστικές οι τιμές ελλείμματος που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Αν και ελλείμματα παραγωγής της τάξης του 0.1 % δεν φαντάζουν ιδιαίτερα μεγάλα, στην πραγματικότητα επηρεάζουν σημαντικά τόσο τη σύνθεση της βέλτιστης λύσης, όσο και το μέσο κόστος ενέργειας. Ιδιαίτερα αν παρατηρήσουμε ότι το έλλειμμα αυτό προκύπτει από εξομάλυνση των αιχμών ζήτησης. Το αποτέλεσμα είναι μια ψευδής αναπαράσταση της βέλτιστης λύσης, με σαφώς υποτιμημένο κόστος ενέργειας. Παρόλα αυτά, η χρήση ενός τεχνάσματος διορθώνει αρκετά το πρόβλημα αυτό, αν και οι τιμές εξακολουθούν να είναι εσφαλμένες. Σημειώνεται επίσης ότι, σύμφωνα με το αρχείο βοήθειας του HOMER, η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δοθέντων σημείων.

Για μία σειρά παραδειγμάτων εφαρμογής μοντέλων τα οποία επιλύονται με το HOMER γίνεται παραπομπή στη βιβλιογραφία [5.3] έως [5.5].

5.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[5.1] Lambert T, Gilman P, Lilienthal P, "Micropower system modelling with HOMER," *Integration of Alternative Sources of Energy*, Farret FA, Simões MG, John Wiley & Sons, December 2005, ISBN 0471712329

[5.2] www.nrel.gov/homer, National Renewable Energy laboratory (NREL).

[5.3] T. Givler and P. Lilienthal, "Using HOMER® Software, NREL's Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems", Case Study: Sri Lanka, Technical Report NREL/TP-710-36774, May 2005.

[5.4] Britt-Mari Langåsen, "Rural Electrification in Uganda, Powering the Masindi district," Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, Spring 2004.

[5.5] S. Rehman, I.M. El-Amin, F. Ahmad, S.M. Shaahid, A.M. Al-Shehri, J.M. Bakhashwain and A. Shash, "Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant," *Renewable and Sustainable Energy Reviews v*ol. 11, Issue 4, May 2007, Pages 635-653.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ GAMS

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό εξηγείται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος, που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, στο GAMS. Αρχικά περιγράφεται η δομή του κώδικα με αναφορά στις σημαντικότερες διαδικασίες που εκτελούνται και τις απαραίτητες παραμέτρους. Στη συνέχεια αναλύεται η εκτέλεση του προγράμματος για το βασικό πρόβλημα και τα δύο εναλλακτικά σενάρια ικανοποίησης ζήτησης δίνοντας παράλληλα τις κατάλληλες αλλαγές στον κώδικα.

6.2 ΔΟΜΗ ΚΩΔΙΚΑ

Ο Κώδικας δομείται σε τρία βασικά τμήματα:

- Τον ορισμό του μαθηματικού μοντέλου,
- την εισαγωγή δεδομένων από εξωτερικά αρχεία και
- την επίλυση του μοντέλου.

Στο τελευταίο τμήμα περιλαμβάνεται και η διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

6.2.1 Ορισμός του μαθηματικού μοντέλου

Αρχικά δηλώνονται σύνολα για την απαρίθμηση των γραμμών και στηλών των διανυσμάτων ωριαίων δεδομένων και του πίνακα αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια δημιουργούνται διανύσματα για την αποθήκευση των ωριαίων τιμών της ζήτησης, της ταχύτητας του ανέμου και της παραγωγής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια. Επίσης ορίζεται πίνακας αποθήκευσης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Τέλος δημιουργούνται διανύσματα για την αποθήκευση των ωριαίων δεδομένων ζήτησης και ταχύτητας του ανέμου αφού αυτά πολλαπλασιαστούν με τους αντίστοιχους συντελεστές ευαισθησίας.

Εισάγονται οι γενικές παράμετροι του προβλήματος:

- Διάρκεια ζωής του έργου $\mathbf{R_{proj}}$ = **25 έτη**
- Ύψος του ανεμομέτρου $\mathbf{h_{hub}}$ = **10m**
- Ύψος του πύργου της ανεμογεννήτριας $\mathbf{h_{WT}}$ = **25 m**
- Συντελεστής τριβής εδάφους $\boldsymbol{\alpha}$ = **0.1**

Εισάγονται επίσης οι οικονομικές παράμετροι:

- Συντελεστής εξίσωσης κεφαλαίου γεννήτριας diesel $\mathbf{m_{cap_D}}$ = **200 €/kW**
- Κεφάλαιο απόκτησης ανεμογεννήτριας $\mathbf{C_{cap_WT}}$ = **30000 €**

- Συντελεστής κόστους λειτουργίας και συντήρησης γεννήτριας diesel $\mathbf{m_{O\&M_D}}$ = **0.01 €/kW, ανά ώρα λειτουργίας**
- Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανεμογεννήτριας $\mathbf{C_{O\&M_WT}}$ = **500 €**
- Συντελεστής κόστους αντικατάστασης γεννήτριας diesel $\mathbf{m_{rep_D}}$ = **200 €/kW ονομ. ισχύος**
- Διάρκεια ζωής γεννήτριας diesel $\mathbf{R_{D,h}}$ = **20 χιλιάδες ώρες λειτουργίας**
- Κόστος αντικατάστασης ανεμογεννήτριας $\mathbf{C_{rep_WT}}$ = **20 χιλιάδες €**
- Διάρκεια ζωής ανεμογεννήτριας $\mathbf{R_{WT}}$ = **15 χρόνια**

Στις παρακάτω παραμέτρους αποδίδονται τιμές κατά την εκτέλεση του προγράμματος εξαιτίας της εξάρτησής τους από τις παραμέτρους ευαισθησίας:

- Συνολική παραγωγή ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας $\mathbf{E_{load}}$ (kWh/έτος)
- Συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου της διάρκειας ζωής του έργου $\mathrm{CRF}\left(i, R_{proj}\right)$
- Συντελεστής χρεολυσίου της διάρκειας ζωής του έργου $\mathrm{SFF}\left(i, R_{proj}\right)$
- Το ετησίως αναγόμενο κόστος αντικατάστασης μιας ανεμογεννήτριας $\mathbf{C_{a_rep_WT}}$ (€)
- Διάρκεια του κόστους αντικατάστασης $\mathbf{R_{rep_D}}$ (έτη)
- Αξία εκποίησης μιας ανεμογεννήτριας $\mathbf{S_D}$ (€)
- Συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου της διάρκειας κόστους αντικατάστασης μιας ανεμογεννήτριας $\mathrm{CRF}\left(i, R_{rep_D}\right)$
- Συντελεστής χρεολυσίου της διάρκειας ζωής μιας ανεμογεννήτριας $\mathrm{SFF}\left(i, R_{WT}\right)$

Ορίζονται οι παράμετροι ανάλυσης ευαισθησίας. Οι παράμετροι αυτές λαμβάνουν μια σειρά διαφορετικών τιμών κατά την εκτέλεση του προγράμματος, δημιουργώντας έτσι το σύνολο των συνδυασμών τιμών ευαισθησίας. Συγκεκριμένα είναι:

- Ο συντελεστής ευαισθησίας ζήτησης
- Ο συντελεστής ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου
- Η τιμή του πετρελαίου diesel (€/lt)
- Το ετήσιο επιτόκιο

Οι συντελεστές ευαισθησίας πολλαπλασιάζονται με το αντίστοιχο διάνυσμα για τον υπολογισμό ενός νέου συνόλου δεδομένων προς προσομοίωση.

Οι κύριες μεταβλητές του προβλήματος $\mathbf{P_{max}}$, η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας Diesel, και $\mathbf{n_{WT}}$, ο αριθμός των ανεμογεννητριών, εισάγονται στον κώδικα σε μορφή παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές θα δέχονται τιμές μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να συγκρίνονται μεταξύ τους για την επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού. Για την προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων της τρέχουσας προσομοίωσης ορίζεται μια σειρά παραμέτρων. Συγκεκριμένα αποθηκεύονται προσωρινά ο αριθμός των ανεμογεννητριών, η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας diesel και το διάνυσμα με τις ωριαίες τιμές λειτουργίας της, καθώς και το κόστος ενέργειας της έως τώρα βέλτιστης λύσης.

Στο πρόγραμμα δηλώνονται δύο μεταβλητές, Πρώτον το διάνυσμα $\mathbf{P_{d,h}}$ με την ισχύ λειτουργίας της γεννήτριας Diesel την κάθε ώρα (h). Ορίζονται τα στοιχεία του διανύσματος ως θετικά. Δεύτερον η **COE** που αντιστοιχεί στο μέσο κόστος ενέργειας, ως μεταβλητή προς βελτιστοποίηση. Όπως απαιτεί ο προγραμματισμός σε GAMS δε θέτουμε περιορισμούς στην τιμή της.

Η ολοκλήρωση του μοντέλου απαιτεί τον ορισμό των παρακάτω εξισώσεων:

- Ικανοποίηση ζήτησης $P_h \geq D_h, \forall\ h \in [0 \quad 8760]$
- Περιορισμός ελάχιστης παραγωγής γεννήτριας diesel $P_{D,h} \geq 0.3 \cdot P_{\max}, \forall\ h \in [0 \quad 8760]$
- Περιορισμός μέγιστης παραγωγής γεννήτριας diesel $P_{D,h} \leq P_{\max}, \forall\ h \in [0 \quad 8760]$
- Αντικειμενική συνάρτηση (Εξίσωση κόστους ενέργειας) $COE = \frac{C_{a_tot}}{E_{load}}$

Σημειώνεται, ότι λόγω της εξάρτησης της διάρκειας ζωής της γεννήτριας $\mathbf{R_D}$ από τις ώρες λειτουργίας της, ο υπολογισμός του κόστους αντικατάστασης και της αξίας εκποίησης της γεννήτριας γίνεται εντός της αντικειμενικής συνάρτησης.

Όπως δείχθηκε στο Κεφάλαιο 4, τα κόστη που προκύπτουν από τη χρήση της γεννήτριας diesel εξαρτώνται από τις ώρες λειτουργίας της. Αυτό απαιτεί σε πρώτη προσέγγιση την εισαγωγή ενός συνόλου ταυτόσημων εντολών " **if** " στην αντικειμενική συνάρτηση, με τη μορφή συνθήκης "**$**". Με τις συνθήκες αυτές θα ελεγχόταν για κάθε ώρα αν υπήρχε παραγωγή ενέργειας από τη γεννήτρια diesel εξετάζοντας απευθείας την μεταβλητής $\mathbf{P_{D,h}}$. Να σημειωθεί ότι η συνθήκη "**$**" θα μπορούσε να αντικατασταθεί και με μια βοηθητική δυαδική μεταβλητή. Ανεξαρτήτως επιλογής όμως επέρχεται σημαντική αλλαγή στην διαδικασία επίλυσης με το πρόβλημα να γίνεται ουσιαστικά άλυτο, λόγω υπεραυξημένου χρόνου προσομοίωσης. Αιτία αυτού, είναι ότι η επίλυση του μοντέλου, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα 6.2.3, γίνεται κατά την εκτέλεση της προεπίλυσης. Έτσι δεν απαιτείται η εκτέλεση του βασικού αλγορίθμου προσομοίωσης, ο οποίος δεν συνίσταται στην προκειμένη περίπτωση. Η χρήση όμως των παραπάνω περιορισμών αναιρεί το χαρακτηριστικό αυτό.

Για τη λύση του παραπάνω προβλήματος, παρατηρείται ότι η γεννήτρια diesel θα παράγει ισχύ μόνο όταν οι ανεμογεννήτριες δεν είναι σε θέση να καλύψουν τη ζήτηση. Δύναται έτσι εντός της συνθήκης "**$**", αντί να ελέγχεται η μεταβλητή $\mathbf{P_{D,h}}$, να επαληθεύεται η παρακάτω συνθήκη:

$$n_{WT} \cdot P_{WT,h} < D_h$$

Η γεννήτρια diesel λειτουργεί για κάθε ώρα **h** που επαληθεύει την παραπάνω ανισότητα. Μετά τον ορισμό τον εξισώσεων δηλώνεται το μοντέλο συμπεριλαμβάνοντας το σύνολο των εξισώσεων σε αυτό.

6.2.2 Εισαγωγή δεδομένων από εξωτερικά αρχεία

Αρχικά ορίζονται τα στοιχεία των συνόλων που προηγουμένως δηλώθηκαν. Στη συνέχεια γίνεται η ανάγνωση των δεδομένων ζήτησης και ταχύτητας του ανέμου από αρχεία .xls (του Excel) και η μεταγραφή τους σε αρχεία τύπου .gdx τα οποία είναι άμεσα αναγνώσιμα από το GAMS IDE. Αυτό επιτυγχάνεται με την κλήση της λειτουργίας GDXXRW, που παρέχει τη δυνατότητα μετεγγραφής αρχείων .xls σε .gdx και αντίστροφα. Τα δεδομένα ζήτησης και ταχύτητας του ανέμου διαβάζονται από τα αρχεία .gdx και αποθηκεύονται στα αντίστοιχα διανύσματα.

Χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο και με δεδομένα το ύψος του ανεμομέτρου, το ύψος του πύργου και το συντελεστή τριβής εδάφους επαναϋπολογίζονται τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της πλήμνης.

6.2.3 Επίλυση μοντέλου

Ο αλγόριθμος επιλύει το μοντέλο μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που εκτελεί μια σειρά προσομοιώσεων για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Για το σκοπό αυτό εκτελούνται τέσσερις εντολές **for**. Στη πρώτη λαμβάνει τιμή ο συντελεστής ευαισθησίας ζήτησης. Ακολούθως αποδίδονται τιμές στο συντελεστή ευαισθησίας της ταχύτητας του ανέμου, στην τιμή του πετρελαίου diesel και στο επιτόκιο. Η ανάθεση τιμής στα περισσότερα μεγέθη που έχουν τεθεί για ανάλυση ευαισθησίας ακολουθείται από τον υπολογισμό μιας σειράς παραμέτρων που εξαρτώνται από αυτά:

- Την ανάθεση τιμής στο **συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης** ακολουθεί ο επαναϋπολογισμός του διανύσματος ωριαίων τιμών ζήτησης και της ετήσιας ωφέλιμης παραγωγής ενέργειας.

- Την ανάθεση τιμής στο **συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας** του ανέμου ακολουθεί ο επαναϋπολογισμός του διανύσματος ωριαίων τιμών της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Έπειτα γίνεται ο υπολογισμός του διανύσματος ωριαίας παραγωγής ενέργειας μίας ανεμογεννήτριας.

- Την ανάθεση τιμής στο **επιτόκιο** ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή απόσβεσης κεφαλαίου της διάρκειας ζωής του έργου και του ετησίως αναγόμενου κόστους αντικατάστασης μίας ανεμογεννήτριας.

Με τη χρήση δύο εντολών **for** γίνεται η ανάθεση τιμών στις παραμέτρους $\mathbf{P}_{max}$ και $\mathbf{n}_{WT}$. Εντός της επαναληπτικής αυτής διαδικασίας δίνεται η εντολή επίλυσης του μοντέλου, ελαχιστοποιώντας το **COE** και χρησιμοποιώντας μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού. Η επιλογή μεθόδου επίλυσης είναι πάντως ελάχιστης σημασίας, δεδομένου ότι κάθε προσομοίωση είναι ουσιαστικά μια σειρά ελαχιστοποιήσεων της παραγωγής ενέργειας από την γεννήτρια diesel. Το μοντέλο έτσι επιλύεται κατά τη διάρκεια της προεπεξεργασίας του από το solver. Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε ο solver CoinGlpk που παρουσίαζε μικρότερους χρόνους προεπεξεργασίας.

Καθώς εκτελούνται οι προσομοιώσεις, τα αποτελέσματά τους συγκρίνονται με τα έως τώρα βέλτιστα, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση για κάθε συνδυασμό τιμών ευαισθησίας. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο .gdx και αντιγράφονται σε ένα αρχείο .xls με τη κλήση της λειτουργίας GDXXRW.

Για τον περιορισμό των εκτελούμενων προσομοιώσεων, και αξιοποιώντας τις ιδιαιτερότητες του μοντέλου, μπορεί να εισαχθεί ένα σύνολο ελέγχων εντός των βρόγχων. Για συγκεκριμένο αριθμό ανεμογεννητριών, η βέλτιστη τιμή του $\mathbf{P}_{max}$ είναι η ελάχιστη τιμή για την οποία ικανοποιούνται οι περιορισμοί του μοντέλου. Έτσι το πρόγραμμα μπορεί να εξέρχεται από το βρόγχο επιλογής τιμών του $\mathbf{P}_{max}$ με την πρώτη δυνατή λύση. Επίσης, αν η προσθήκη μιας ανεμογεννήτριας στη σύνθεση του συστήματος δεν επιφέρει μείωση του **COE,** τότε η έως τώρα βέλτιστη λύση αποτελεί και τη συνολικά βέλτιστη λύση. Το πρόγραμμα μπορεί δηλαδή να εξέλθει από το βρόγχο επιλογής $\mathbf{n}_{WT}$ και να ξεκινήσει τις προσομοιώσεις για τον επόμενο συνδυασμό τιμών ευαισθησίας.

6.3 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Αρχικά το μοντέλο προσομοιώνεται για $n_{WT} \in [0\ \ 10]$ και $P_{\max} \in [30\ \ 60]$. Γίνονται τέσσερις εκτελέσεις του κώδικα, μία για κάθε ανάλυση ευαισθησίας. Μετά από την πρώτη εκτέλεση για την ανάλυση ευαισθησίας στη ζήτηση, επαναπροσδιορίζονται εμπειρικά τα όρια αυτά σε $n_{WT} \in [2\ \ 6]$ και $P_{\max} \in [40\ \ 50]$. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης μειώνεται

έτσι στα 16 λεπτά. Στο χρόνο αυτό εξετάζονται συνολικά $(61\times11\times5)+(21\times5\times18)$ ή **5245** συνδυασμοί τιμών, που αντιστοιχούν σε πλασματικό ρυθμό περίπου 5.5 προσομοιώσεων το δευτερόλεπτο.

Η λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 47 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.2425 €/kWh. Στους Πίνακες 6.1 έως 6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πίνακας 6.1: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας (Σ. Ε.) ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**
0.8	3	37.5	0.2429
0.9	3	42.5	0.2431
1.0	3	47.0	0.2425
1.1	4	51.5	0.2425
1.2	4	56.5	0.2428

Πίνακας 6.2: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**
0.8	3	47.0	0.2868
0.9	3	47.0	0.2635
1.0	3	47.0	0.2425
1.1	3	47.0	0.2246
1.2	3	46.5	0.2058

Πίνακας 6.3: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Fuel cost (€/lt)	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**
0.60	3	47.0	0.2182
0.70	3	47.0	0.2425
0.80	4	47.0	0.2661
0.90	4	47.0	0.2885
1.00	4	47.0	0.3109
1.10	5	47.0	0.3327
1.20	5	47.0	0.3537

Πίνακας 6.4: Λύση του βασικού προβλήματος για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
5.0 %	3	47.0	0.2393
6.0 %	3	47.0	0.2425
7.0 %	3	47.0	0.2457
8.0 %	3	47.0	0.2490
9.0 %	3	47.0	0.2524
10.0 %	3	47.0	0.2559

6.4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Α' (ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΕΦΕΔΡΕΙΑ)

Για την επίλυση του προβλήματος θεωρώντας $\mathbf{m_{hyst}}$ = **10%** λειτουργικής εφεδρείας αντικαθίσταται ο περιορισμός ικανοποίησης ζήτησης με τον περιορισμό ικανοποίησης ζήτησης και λειτουργικής εφεδρείας $P_h \geq D_h(1+m_{hyst}), \forall\ h \in [0\ \ 8760]$.

Αρχικά το μοντέλο προσομοιώνεται για $n_{WT} \in [2\ \ 8]$ και $P_{\max} \in [35\ \ 65]$. Γίνονται τέσσερις εκτελέσεις του κώδικα, μία για κάθε ανάλυση ευαισθησίας. Μετά από την πρώτη εκτέλεση για την ανάλυση ευαισθησίας στη ζήτηση, επαναπροσδιορίζονται εμπειρικά τα όρια αυτά σε $n_{WT} \in [2\ \ 6]$ και $P_{\max} \in [45\ \ 55]$. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης μειώνεται έτσι στα 15 λεπτά. Στο χρόνο αυτό εξετάζονται συνολικά $(61\times 7\times 5)+(21\times 5\times 18)$ ή **4025** συνδυασμοί τιμών, που αντιστοιχούν σε πλασματικό ρυθμό περίπου 4.5 προσομοιώσεων το δευτερόλεπτο.

Η λύση του προβλήματος είναι η χρήση 4 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 51.5 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.2667 €/kWh. Στους Πίνακες 6.5 έως 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πίνακας 6.5: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.8	3	41.5	0.2675
0.9	3	46.5	0.2666
1.0	4	51.5	0.2667
1.1	4	57.0	0.2670
1.2	4	62.0	0.2666

Πίνακας 6.6: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.8	3	51.5	0.3158
0.9	4	51.5	0.2892
1.0	4	51.5	0.2667
1.1	4	51.5	0.2455
1.2	4	51.0	0.2251

Πίνακας 6.7: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Fuel cost (€/lt)	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
0.60	3	51.5	0.2403
0.70	4	51.5	0.2667
0.80	4	51.5	0.2920
0.90	4	51.5	0.3173
1.00	5	51.5	0.3417
1.10	5	51.5	0.3655
1.20	5	51.5	0.3893

Πίνακας 6.8: Λύση του Α' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)
5.0 %	4	51.5	0.2626
6.0 %	4	51.5	0.2667
7.0 %	3	51.5	0.2709
8.0 %	3	51.5	0.2743
9.0 %	3	51.5	0.2777
10.0 %	3	51.5	0.2812

6.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β' (ΠΟΙΝΗ ΑΝΙΚΑΝΟΠΟΙΗΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ)

Για την επίλυση του μοντέλου θεωρώντας ποινή ανικανοποίητης ζήτησης ορίζεται ένα νέο σύνολο εξισώσεων. Αρχικά δίνεται η εξίσωση ορισμού της αποδιδόμενης ισχύος από τη γεννήτρια diesel εισάγοντας την συνάρτηση (4.36). Ορίζεται επίσης η παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της ανικανοποίητης ζήτησης:

$$E_{cs} = \begin{cases} D_h - n_{WT} \cdot P_{WT,h} - P_{D,h}, & D_h > n_{WT} \cdot P_{WT,h} + P_{\max} \\ 0 & , \text{ αλλού.} \end{cases}$$

Ορίζεται η παράμετρος $\mathbf{c}_{cs}$ ίση με 0.5 €/kWh και αντικαθίσταται η αντικειμενική συνάρτηση με την εξίσωση συνολικού ετησίως αναγόμενου κόστους $C_{a_tot2} = C_{a_D} + n_{WT} \cdot C_{a_WT} + C_{cs}$. Πριν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης διαιρείται το $\mathbf{C}_{a_tot2}$ με τη συνολική

ετήσια ωφέλιμη παραγωγή ενέργειας $\mathbf{E}_{load}$ για τον υπολογισμό του κόστους ενέργειας. Αποφεύγεται έτσι εντός της αντικειμενικής συνάρτησης η διαίρεση με παράσταση που περιέχει μεταβλητές. Η διαίρεση εντός εξίσωσης του μοντέλου με ενδογενή, όπως είναι στην ορολογία του GAMS, όρο καθιστά το μοντέλο άλυτο κατά την διάρκεια της προεπεξεργασίας από το solver.

Η αφαίρεση του περιορισμού ικανοποίησης ζήτησης αποκλείει τη χρήση ελέγχων εντός των βρόγχων επιλογής $\mathbf{n}_{WT}$ και $\mathbf{P}_{max}$ για τη μείωση των εκτελούμενων προσομοιώσεων όπως έγινε στις προηγούμενες παραγράφους.

Αρχικά το μοντέλο προσομοιώνεται για $n_{WT} \in [0\ \ 6]$ και $P_{\max} \in [10\ \ 40]$. Γίνονται τέσσερις εκτελέσεις του κώδικα, μία για κάθε ανάλυση ευαισθησίας. Μετά από την πρώτη εκτέλεση για την ανάλυση ευαισθησίας στη ζήτηση, επαναπροσδιορίζονται εμπειρικά τα όρια αυτά σε $n_{WT} \in [2\ \ 6]$ και $P_{\max} \in [25\ \ 35]$. Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης μειώνεται έτσι στα 38 λεπτά. Στο χρόνο αυτό εξετάζονται συνολικά $(61\times 7\times 5)+(21\times 5\times 18)$ ή **4025** συνδυασμοί τιμών, που αντιστοιχούν σε ρυθμό περίπου 1.8 προσομοιώσεων το δευτερόλεπτο.

Η λύση του προβλήματος είναι η χρήση 3 ανεμογεννητριών και γεννήτριας diesel με ονομαστική ισχύ 30 kW. Το μέσο κόστος ενέργειας υπολογίστηκε στα 0.2129 €/kWh με μη τροφοδοτούμενη ενέργεια στο 1.99 % ή 4314.5 kWh/έτος. Στους Πίνακες 6.9 έως 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πίνακας 6.9: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης.

Σ. Ε. Ζήτησης	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**	**Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια**
0.8	2	24.0	0.2146	2.10 %
0.9	3	27.0	0.2136	1.93 %
1.0	3	30.0	0.2129	1.99 %
1.1	3	33.0	0.2134	2.05 %
1.2	4	36.0	0.2136	1.93 %

Πίνακας 6.10: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές συντελεστή ευαισθησίας ταχύτητας ανέμου.

Σ. Ε. Ταχύτητας ανέμου	**n_{WT}**	**P_{max} (kW)**	**COE (€/kWh)**	**Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια**
0.8	3	31.0	0.2541	2.09 %
0.9	3	30.5	0.2324	2.04 %
1.0	3	30.0	0.2129	1.99 %
1.1	3	29.5	0.1961	1.93 %
1.2	3	29.0	0.1800	1.85 %

Πίνακας 6.11: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές πετρελαίου diesel.

Τιμή diesel (€/lt)	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
0.60	3	31.0	0.1930	1.60 %
0.70	3	30.0	0.2129	1.99 %
0.80	3	29.5	0.2325	2.22 %
0.90	4	28.5	0.2520	2.48 %
1.00	4	28.0	0.2697	2.73 %
1.10	4	27.5	0.2872	3.00 %
1.20	4	26.5	0.3046	3.60 %

Πίνακας 6.12: Λύση του Β' εναλλακτικού σεναρίου για διαφορετικές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

i	n_{WT}	P_{max} (kW)	COE (€/kWh)	Μη τροφοδοτούμενη ενέργεια
5.0 %	3	30.0	0.2098	1.99 %
6.0 %	3	30.0	0.2129	1.99 %
7.0 %	3	30.0	0.2161	1.99 %
8.0 %	3	30.0	0.2193	1.99 %
9.0 %	3	30.0	0.2227	1.99 %
10.0 %	3	30.0	0.2262	1.99 %

6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό εξηγήθηκε η διαδικασία επίλυσης του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 στο GAMS. Έγεινε απόπειρα να δειχθεί η χρήση των δυνατοτήτων που το λογισμικό προσφέρει και το διαφοροποιούν από μία τυπική γλώσσα προγραμματισμού. Εξαιρώντας τον χρόνο εκμάθησης του GAMS, η συγγραφή του κώδικα ήταν μια σχετικά εύκολη διαδικασία. Πράγμα που οφείλεται κυρίως στην αλγεβρική διατύπωση του προβλήματος και την ποιοτική τεκμηρίωση.

Η επίλυση του προβλήματος παρουσίασε αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Εκμεταλλευόμενοι μάλιστα τις ιδιαιτερότητες του μοντέλου μας μειώσαμε το χρόνο επίλυσης, φέρνοντάς τον σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές του HOMER.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου του κεφαλαίου 4 στα συστήματα GAMS και HOMER. Η έμφαση δίνεται στην περιγραφή των χαρακτηριστικών του μοντέλου αλλά και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα δύο συστήματα. Στην επόμενη ενότητα γίνεται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου ενώ στην ενότητα 7.3 εξετάζονται η χρήση και η προέλευση της παραγόμενης ενέργειας. Στην ενότητα 7.4 εξετάζεται η σύνθεση του κόστους του έργου.

7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

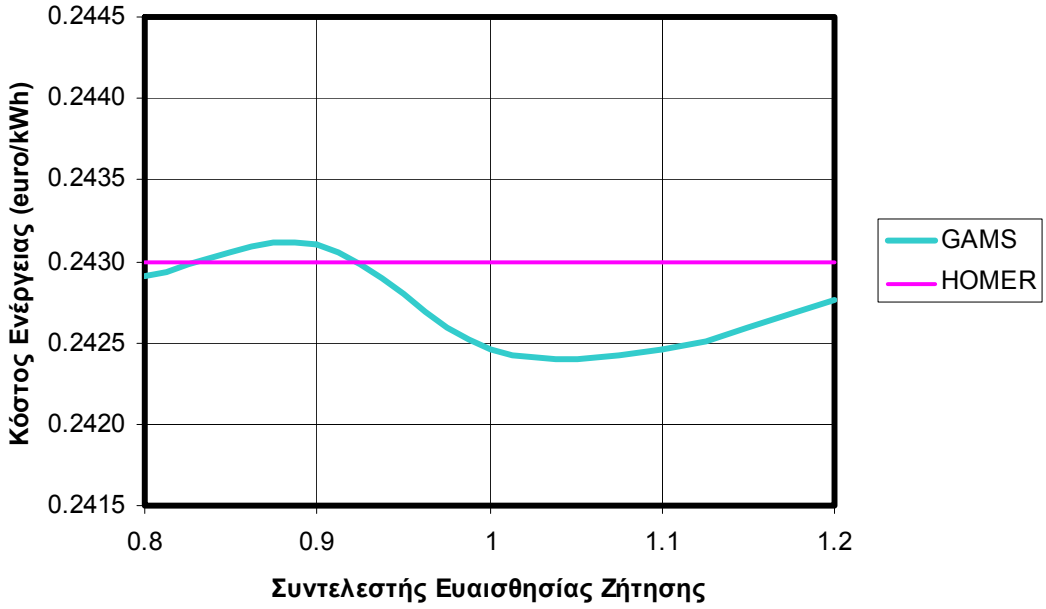
Παρακάτω δίνεται παραστατικά η μεταβολή του κόστους ενέργειας συναρτήσει των διαφόρων τιμών ευαισθησίας. Η ανάλυση γίνεται βάση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, όπως αυτά δόθηκαν στις ενότητες 5.6 έως 5.8 και 6.3 έως 6.5, των κεφαλαίων 5 και 6 αντίστοιχα. Κάθε ενότητα συνοδεύεται από τρία γραφήματα, ένα για κάθε σενάριο του μοντέλου. Παρατηρείται ότι για το βασικό σενάριο, οι λύσεις που προτείνει το HOMER έχουν γενικώς μεγαλύτερο κόστος ενέργειας, της τάξης του 10^{-4}, από αυτές του GAMS. Δεδομένου όμως της στρογγυλοποίησης των αποτελεσμάτων από το HOMER στο $3^{ο}$ δεκαδικό, οι επιπτώσεις του τεχνάσματος που υιοθετήθηκε κατά την επίλυση του μοντέλου στο HOMER ήταν αμελητέες (ενότητα 5.6). Αυξημένο κόστος παρουσιάζει το HOMER για το Β' εναλλακτικό σενάριο, με διαφορά της τάξης του 10^{-2} έως 10^{-3} και με μία εξαίρεση για τιμή του πετρελαίου diesel στο 1.2. Αντιθέτως, για το Α' εναλλακτικό σενάριο το κόστος ενέργειας για επίλυση στο HOMER είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στο GAMS, με διαφορά της τάξης του 10^{-2}. Διαφορά που υποδηλώνει ότι πιθανότατα το HOMER συνυπολογίζει την παραγωγή ενέργειας για εφεδρεία στη συνολική ωφέλιμη ενέργεια.

7.2.1 Ζήτηση

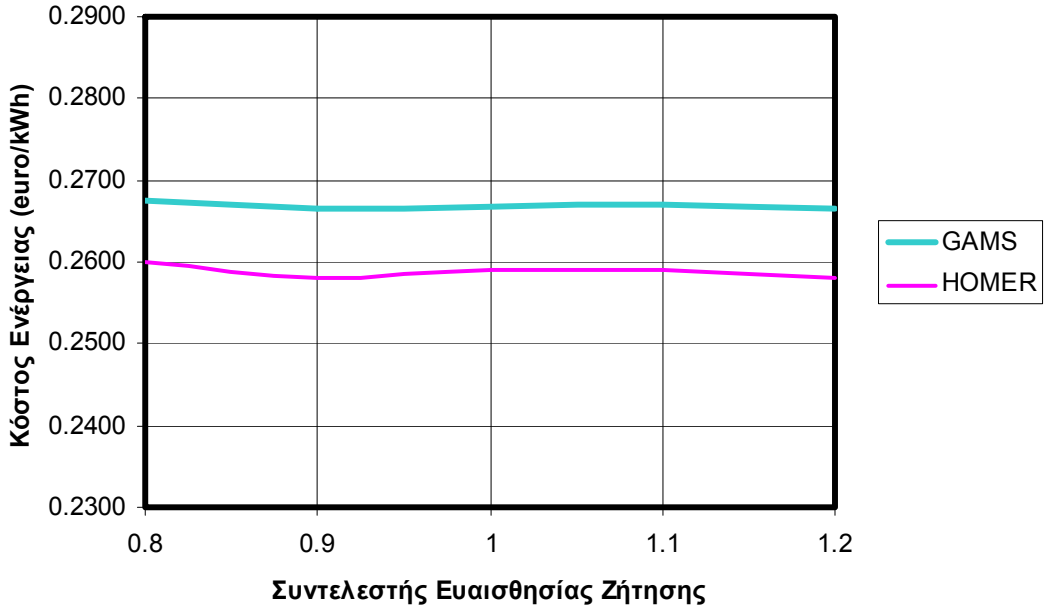
Η μεταβολή του συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης δεν προκαλεί κάποια τάση αυξομείωσης του κόστους ενέργειας στα όρια που έχουν τεθεί. Το τελευταίο μεταβάλλεται σε όλες τις περιπτώσεις γύρω από μια μέση τιμή με διαφορετικό κάθε φορά εύρος. Το εύρος αυτό στο βασικό πρόβλημα είναι μεγέθους 0.0016 €/kWh και 0.001 €/kWh για προσομοίωση στο GAMS και το HOMER αντίστοιχα. Παρουσιάζεται μάλιστα μία κορύφωση του κόστους ενέργειας για συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης 0.9. Στο Α' εναλλακτικό σενάριο το εύρος διακύμανσης είναι στα 0.002 €/kWh ενώ στο Β' εναλλακτικό σενάριο στο 0.002 €/kWh και 0.001 €/kWh για HOMER και GAMS αντίστοιχα. Η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια για επίλυση σε GAMS και HOMER. Η μεταβολή της ζήτησης επηρεάζει άμεσα την ονομαστική τιμή της γεννήτριας diesel και σε μικρότερο βαθμό τον αριθμό των ανεμογεννητριών.

7.2.2 Ταχύτητα ανέμου

Η αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου αυξάνει την απόδοση των ανεμογεννητριών, μειώνοντας έτσι την απαίτηση για μη ανανεώσιμη ενέργεια και ταυτόχρονα το μέσο κόστος ενέργειας. Είναι αναμενόμενη λοιπόν η μείωση του κόστους ενέργειας με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου (ισοδύναμα με αύξηση του συντελεστή ευαισθησίας της ταχύτητας του ανέμου). Η καμπύλη φθίνει με κλίση περίπου 1/4 για το βασικό και το εναλλακτικό σενάριο Α' και με κλίση 0.15 για το εναλλακτικό σενάριο Β' παρουσιάζοντας παρόμοια μορφή για επίλυση στο GAMS και στο HOMER.



Σχήμα 7.1: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης για το βασικό πρόβλημα.

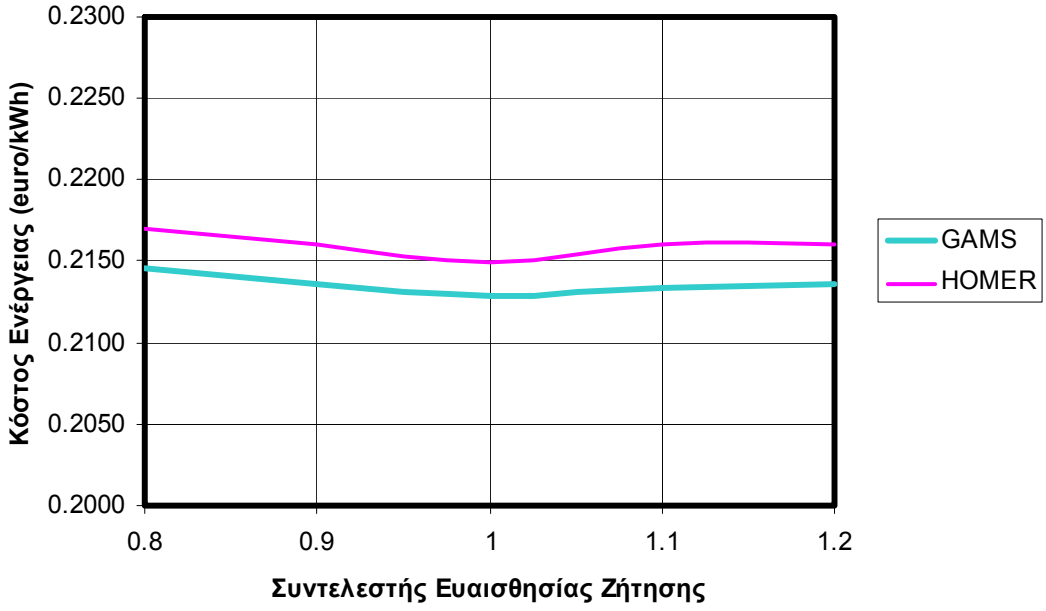


Σχήμα 7.2: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης για το Α' εναλλακτικό σενάριο.

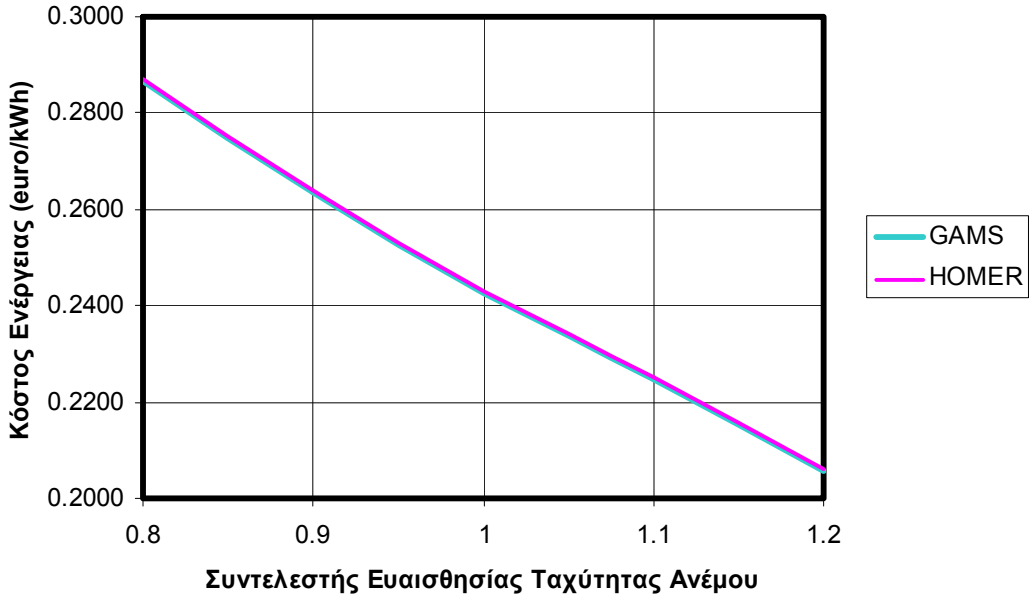
Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου έχει μικρή επιρροή στη βέλτιστη σύνθεση και ιδιαίτερα στο βασικό σενάριο δεν επηρεάζει καθόλου τον αριθμό των ανεμογεννητριών.

7.2.3 Τιμή πετρελαίου diesel

Το κόστος ενέργειας αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της τιμής του πετρελαίου diesel παρουσιάζοντας κλίση γύρω στο 0.4. Εξαίρεση αποτελεί το Β' εναλλακτικό σενάριο όπου παρουσιάζεται κλίση 1/6 με την επίλυση στο HOMER να παρουσιάζει μία απότομη αύξηση για τιμή πετρελαίου στα 1.2 €/lt. Στο βασικό σενάριο, η αύξηση της τιμής του

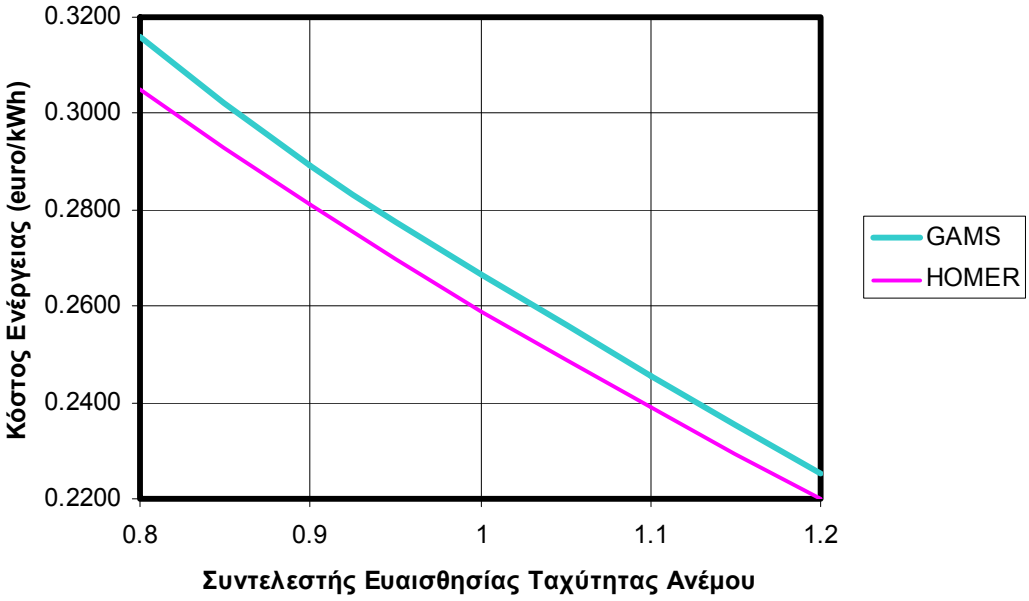


Σχήμα 7.3: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας ζήτησης για το Β' εναλλακτικό σενάριο.

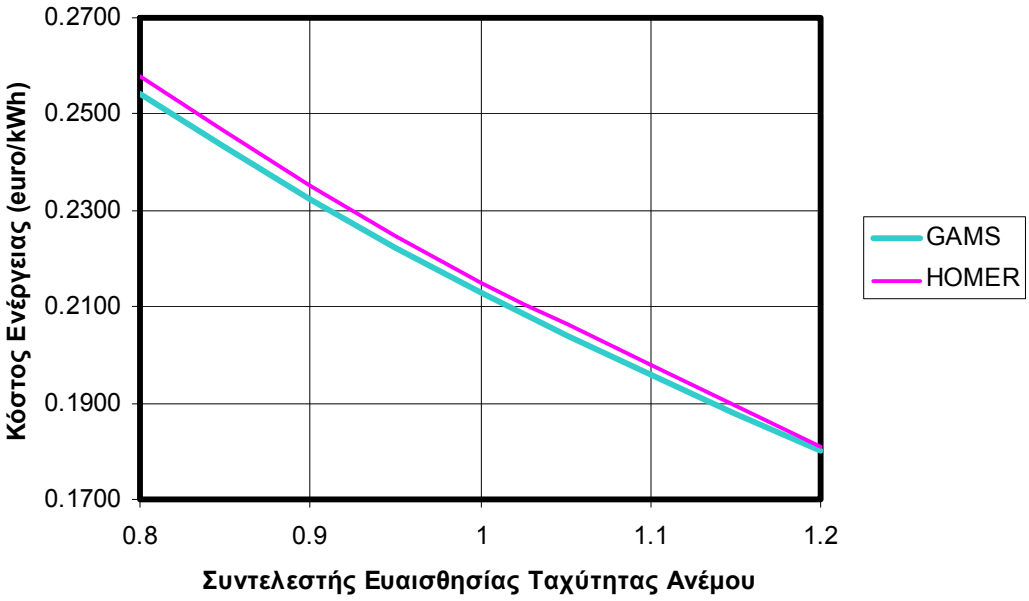


Σχήμα 7.4: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας της ταχύτητας του ανέμου για το βασικό πρόβλημα.

πετρελαίου στα 0.80 € και μετέπειτα στα 1.10 € δικαιολογεί την προσθήκη μίας ανεμογεννήτριας. Το όριο αυτό πέφτει στα 0.70 € και 1.00 € ή στα 0.80 € και 1.00 € με την προσθήκη εφεδρείας, για επίλυση στο GAMS και στο HOMER αντίστοιχα. Στο Β' εναλλακτικό σενάριο συμφέρει η προσθήκη μίας ανεμογεννήτριας στα 0.90 € ή στο 1.00 € για επίλυση στο GAMS και στο HOMER αντίστοιχα. Η μορφή της καμπύλης είναι σχεδόν ταυτόσημη για επίλυση στο GAMS και το HOMER, με την τελευταία να παρουσιάζει μικρή απόκλιση από την γραμμικότητα.



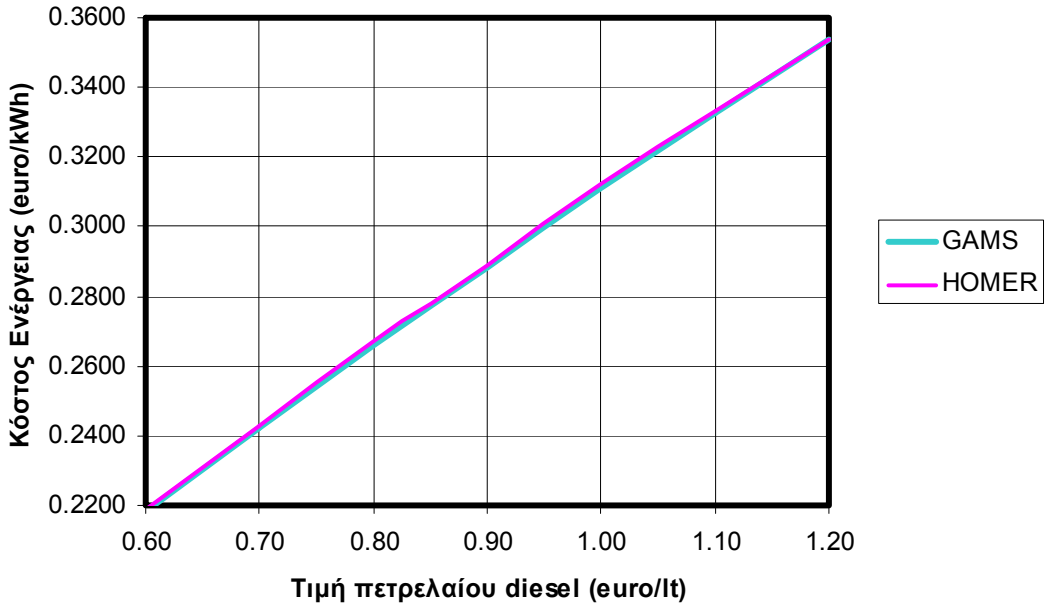
Σχήμα 7.5: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας της ταχύτητας του ανέμου για το Α' εναλλακτικό σενάριο.



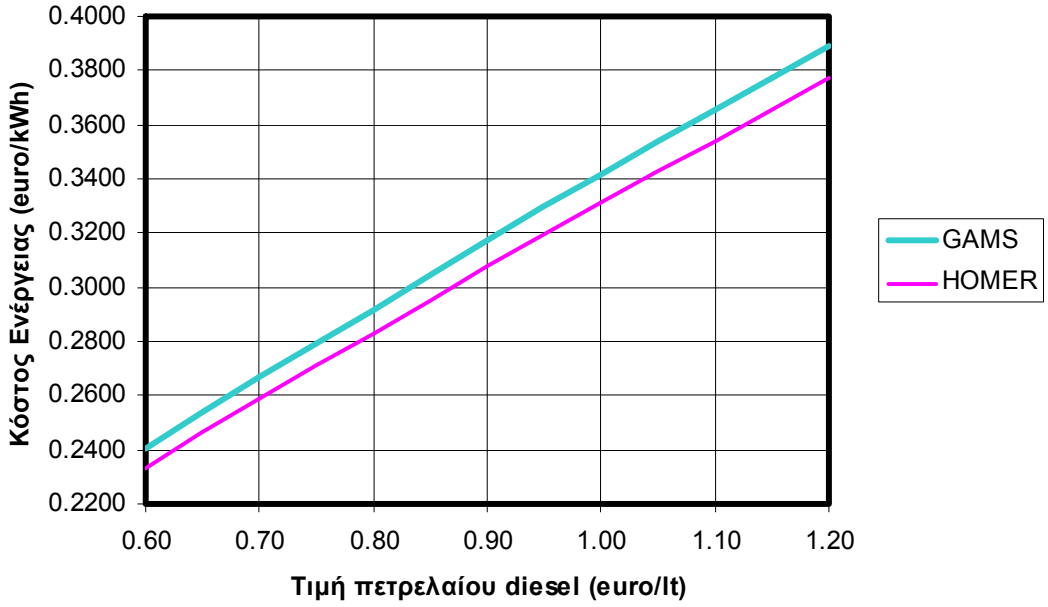
Σχήμα 7.6: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του συντελεστή ευαισθησίας της ταχύτητας του ανέμου για το Β' εναλλακτικό σενάριο.

7.2.4 Επιτόκιο προεξόφλησης

Παρουσιάζεται γραμμική αύξηση του κόστους ενέργειας συναρτήσει του επιτοκίου προεξόφλησης με κλίση κοντά στο 1/3 για το βασικό και το Β' εναλλακτικό σενάριο και στο 1/2 για το εναλλακτικό σενάριο Α'. Η βέλτιστη σύνθεση του συστήματος δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα βάσει του επιτοκίου προεξόφλησης. Εξαίρεση αποτελεί η επίλυση του μοντέλου με θεώρηση εφεδρείας και για επιτόκιο 5 % και 6 % στο GAMS και 5 % στο HOMER, όπου η βέλτιστη σύνθεση διαφοροποιείται με τη χρήση 4 ανεμογεννητριών αντί 3. Οι καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια μορφή για επίλυση στο GAMS και το HOMER με τις τελευταίες να αποκλίνουν ελαφρά από τη γραμμικότητα.



Σχήμα 7.7: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει της τιμής του πετρελαίου diesel (€/lt) για το βασικό πρόβλημα.



Σχήμα 7.8: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει της τιμής του πετρελαίου diesel (€/lt) για το Α' εναλλακτικό σενάριο.

7.3 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

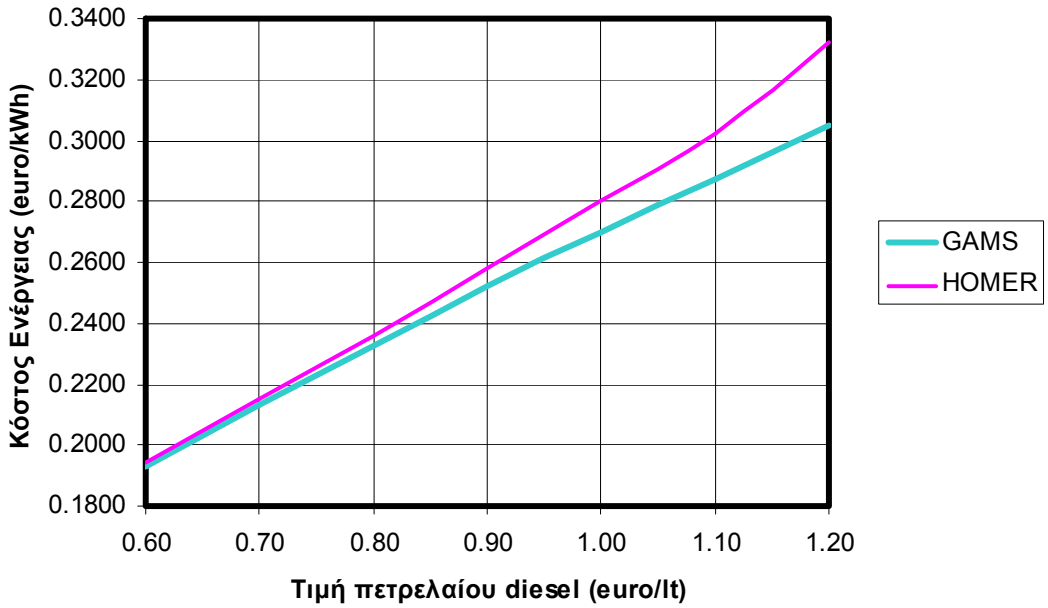
Παρακάτω αναλύεται στατιστικά η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα για τα διάφορα σενάρια ικανοποίησης ζήτησης. Εξετάζεται το ποσοστό παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας από το σύστημα καθώς και το μέγεθος και η προέλευση περίσσειας ηλεκτρικής ισχύος.

Πίνακας 7.1: Ποσοστό ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής παραγωγής ενέργειας για κάθε σενάριο και για επίλυση σε GAMS και HOMER.

	Βασικό σενάριο	**Α' εναλλακτικό σενάριο**	**Β' εναλλακτικό σενάριο**
GAMS	58.84%	64.60%	60.95%
HOMER	58.94%	58.01%	62.09%

Πίνακας 7.2: Ποσοστό ανανεώσιμης ωφέλιμης ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής ωφέλιμης ενέργειας για κάθε σενάριο και για επίλυση σε GAMS και HOMER.

	Βασικό σενάριο	**Α' εναλλακτικό σενάριο**	**Β' εναλλακτικό σενάριο**
GAMS	47.60%	51.72%	48.39%
HOMER	47.76%	47.76%	49.66%



Σχήμα 7.9: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει της τιμής του πετρελαίου diesel (€/lt) για το Β' εναλλακτικό σενάριο.

7.3.1 Ποσοστό ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας

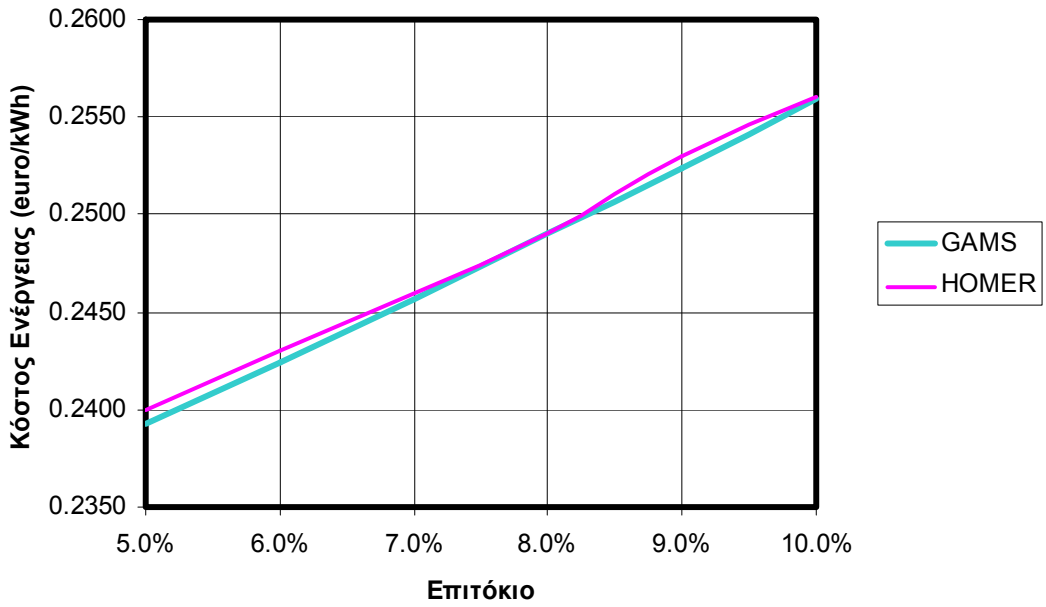
Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει μια ικανοποιητική παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, με το 60 % περίπου της παραγόμενης ενέργειας να προέρχεται από τον άνεμο, αγγίζοντας μάλιστα το 65 % για χρήση εφεδρείας. Εστιάζοντας όμως αποκλειστικά στην ωφέλιμη ενέργεια παρατηρούμε ότι το ποσοστό αυτό μειώνεται αρκετά. Ο Πίνακας 7.2 μας δίνει ότι το ποσοστό ωφέλιμης ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες κυμαίνεται μόλις στο 48 % της συνολικής ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας ή 52 % για χρήση εφεδρείας.

Πίνακας 7.3: Ποσοστό περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής παραγωγής ενέργειας για κάθε σενάριο και για επίλυση σε GAMS και HOMER.

	Βασικό σενάριο	**Α' εναλλακτικό σενάριο**	**Β' εναλλακτικό σενάριο**
GAMS	27.12%	39.98%	25.73%
HOMER	27.20%	28.35%	26.24%

Πίνακας 7.4: Ποσοστό περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες επί της συνολικής παραγωγής περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε σενάριο και για επίλυση σε GAMS και HOMER.

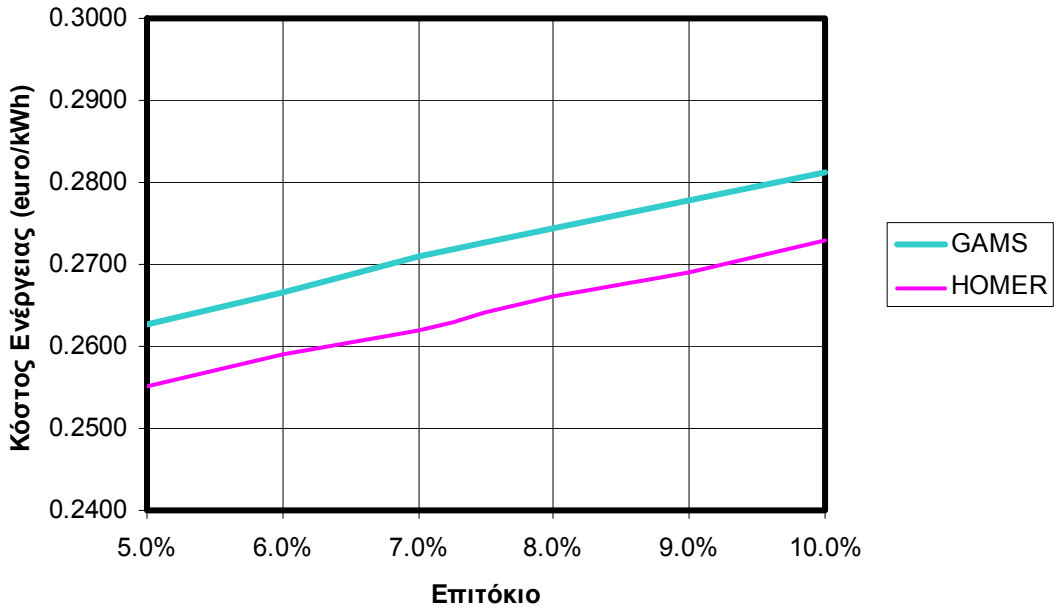
	Βασικό σενάριο	**Α' εναλλακτικό σενάριο**	**Β' εναλλακτικό σενάριο**
GAMS	89.04%	83.94%	97.20%
HOMER	88.83%	83.89%	97.03%



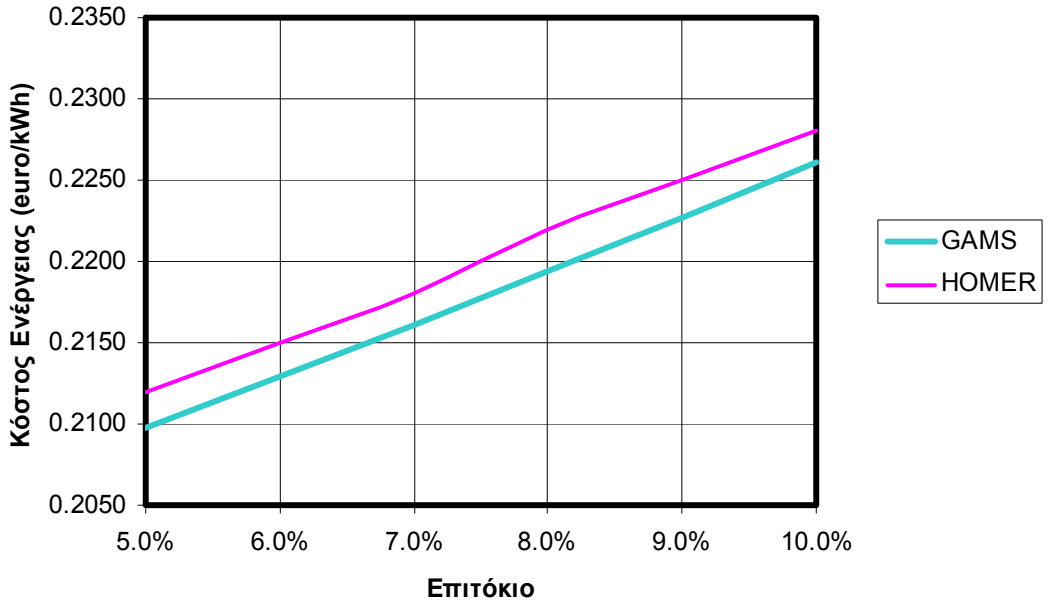
Σχήμα 7.10: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του επιτοκίου προεξόφλησης για το βασικό πρόβλημα.

7.3.2 Παραγωγή περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.3, ένα μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης από το σύστημα ενέργειας παραμένει ανεκμετάλλευτο. Αν υπήρχε δυνατότητα σύνδεσης του συστήματος με το κεντρικό δίκτυο, η ενέργεια αυτή θα μπορούσε να πουληθεί, μειώνοντας έτσι σημαντικά το μέσο κόστος ενέργειας. Μάλιστα, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 7.4, σχεδόν το σύνολο της περίσσειας ενέργειας παράγεται από τις ανεμογεννήτριες. Δεδομένου ότι η παραγωγή της ενέργειας αυτής δεν ελέγχεται άμεσα από το χρήστη του συστήματος, ένας καλός τρόπος αξιοποίησής της θα ήταν η προσθήκη κάποιου μέσου αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα 7.11: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του επιτοκίου προεξόφλησης για το Α' εναλλακτικό σενάριο.

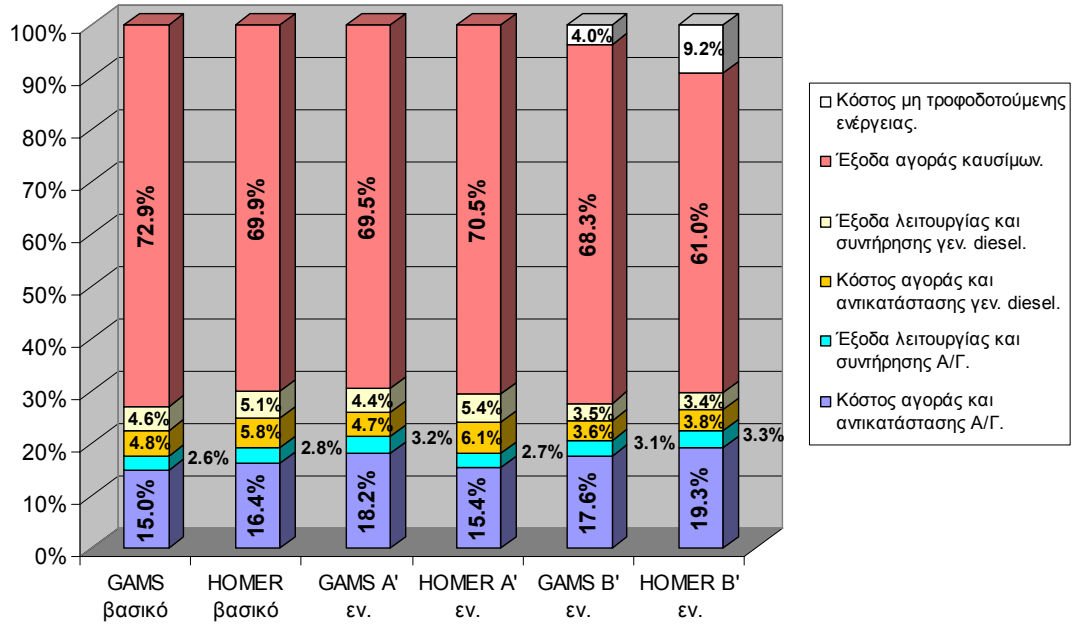


Σχήμα 7.12: Γραφική παράσταση του Κόστους Ενέργειας (€/kWh) συναρτήσει του επιτοκίου προεξόφλησης για το Β' εναλλακτικό σενάριο.

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 7.3 το ποσοστό της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα είναι μεγαλύτερο όταν απαιτούμε εφεδρεία ενέργειας. Κάτι το αναμενόμενο, δεδομένου ότι η εφεδρεία συνυπολογίζεται στην περίσσεια ενέργεια. Το μικρότερο ποσοστό περίσσειας ενέργειας παρατηρείται για το Β' εναλλακτικό σενάριο λόγω του ότι επιτρέπεται η ανικανοποίητη ζήτηση. Για το σενάριο αυτό μάλιστα παρατηρείται και το μεγαλύτερο ποσοστό περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας.

7.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το γράφημα στηλών του Σχήματος 7.13 δίνει την κατανομή κόστους της βέλτιστης λύσης για κάθε σενάριο ικανοποίησης ζήτησης, όπως αυτή υπολογίστηκε στο GAMS και το HOMER. Από τα κόστη αγοράς και αντικατάστασης αφαιρείται η αξία εκποίησης στο τέλος του έργου. Χαρακτηριστικό όλων των σεναρίων είναι η μεγάλη συμβολή των εξόδων για την γεννήτρια diesel στο συνολικό κόστος. Ένα 70 % με 80 % του συνολικών εξόδων προκύπτει από την γεννήτρια diesel. Μάλιστα, άνω του 60 % του συνολικού κόστους οφείλεται σταθερά στα έξοδα αγοράς καυσίμων για την γεννήτρια diesel. Ταυτόχρονα τα συνολικά έξοδα προερχόμενα από τις ανεμογεννήτριες ξεπερνούν οριακά το 20 % του συνολικού κόστους, και μόνο στο βασικό σενάριο. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι ενώ μόλις το 20 % του συνολικού κόστους προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες, αυτές συμβάλουν γύρω στο 50 % της παραγόμενης ωφέλιμης ενέργειας.



Σχήμα 7.13: Γράφημα στηλών με τα ποσοστά συμμετοχής κόστους για κάθε σενάριο ικανοποίησης ζήτησης.

7.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύθηκαν τα αποτελέσματα προσομοίωσης του μοντέλου του απομονωμένου υβριδικού συστήματος ενέργειας, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4. Η εκτέλεση της προσομοίωσης σε GAMS και HOMER παρουσίασε συμβατά αποτελέσματα, αν και παρουσιάστηκαν ορισμένες αποκλίσεις, κυρίως στα εναλλακτικά σενάρια ικανοποίησης ζήτησης. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο μεγαλύτερο βαθμό σε κακούς υπολογισμούς από το λογισμικό HOMER.

Από την ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε ότι ο μεγαλύτερος παράγοντας όσον αφορά τη σύνθεση της βέλτιστης λύσης είναι το μέγεθος της ζήτησης, χωρίς όμως να επηρεάζεται

ιδιαίτερα το μέσο κόστος ενέργειας. Ο σημαντικότερος παράγοντας αύξησης του κόστους είναι η μείωση της ταχύτητας του ανέμου, με την αύξηση της τιμής του πετρελαίου diesel και την αύξηση του επιτοκίου να ακολουθούν.

Η βελτιστοποίηση της δομής του μοντέλου έδωσε λύσεις με μεγάλα ποσοστά περίσσειας ενέργειας και την μισή περίπου ενέργεια να προέρχεται από τις ανεμογεννήτριες. Παρόλα αυτά οι ανεμογεννήτριες συντελούν στο 1/5 μόλις των συνολικών εξόδων με τη μεγαλύτερη δαπάνη να πηγάζει από την ανάγκη αγοράς καυσίμων για τη γεννήτρια diesel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα απομονωμένο υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από μία γεννήτρια diesel και ένα σύνολο ανεμογεννητριών. Κύριος σκοπός της εργασίας ήταν η βελτιστοποίηση της δομής του συστήματος αυτού με τη χρησιμοποίηση του λογισμικού GAMS. Εξετάστηκαν τρία σενάρια ικανοποίησης ζήτησης:

- Η πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης.
- Η πλήρης ικανοποίηση της ζήτησης και η διατήρηση εφεδρείας.
- Η μερική ικανοποίηση της ζήτησης με την εφαρμογή ποινής ανικανοποίητης ζήτησης.

Η δομή του μοντέλου βελτιστοποιήθηκε στο GAMS μέσω της απαρίθμησης των δυνατών λύσεων και της παράλληλης χρήσης κάποιων συνθηκών για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Το πρόβλημα επιλύθηκε επίσης στο HOMER έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Για την περαιτέρω εξέταση του προβλήματος έγινε ανάλυση ευαισθησίας στο μέγεθος της ζήτησης και της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και στην τιμή του πετρελαίου diesel και στο επιτόκιο προεξόφλησης.

Η προσομοίωση του μοντέλου στα δύο λογισμικά έδωσε παρόμοια αποτελέσματα, με τις αποκλίσεις που παρουσιάζονται να οφείλονται σε ανακριβείς υπολογισμούς από το λογισμικό HOMER. Ανακριβείς υπολογισμοί που προκύπτουν κυρίως λόγω κάποιων αυθαίρετων στρογγυλοποιήσεων αλλά και τον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος ανεμογεννήτριας με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής.

Η βέλτιστη σύνθεση του συστήματος περιλαμβάνει σε όλες τις περιπτώσεις έναν αριθμό ανεμογεννητριών υποστηριζόμενο από μία γεννήτρια diesel. Οι ανεμογεννήτριες, αν και αναλογούν μόλις στο 1/5 των συνολικών εξόδων, αποδίδουν περίπου το μισό της συνολικά παραγόμενης ωφέλιμης ενέργειας. Η ανάλυση ευαισθησίας έδωσε ότι ο μεγαλύτερος παράγοντας όσον αφορά τη σύνθεση της βέλτιστης λύσης είναι το μέγεθος της ζήτησης, η μεταβολή της οποίας επηρεάζει άμεσα την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας diesel και σε μικρότερο βαθμό τον αριθμό των ανεμογεννητριών. Παράλληλα, ο σημαντικότερος παράγοντας αύξησης του κόστους είναι η μείωση της απόδοσης των ανεμογεννητριών λόγω της πτώσης της ταχύτητας του ανέμου.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση μίας γλώσσας προγραμματισμού σε σχέση με ένα ειδικευμένο πρόγραμμα όπως το HOMER είναι ο χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση του προβλήματος και τη σύνταξη του κώδικα. Το GAMS όμως, ως αλγεβρική γλώσσα προγραμματισμού, διευκολύνει ιδιαίτερα αυτή τη διαδικασία αφού το εισαγόμενο μοντέλο πλησιάζει σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική του περιγραφή. Αυτό είναι άλλωστε και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του GAMS σε σχέση με μια τυπική γλώσσα μαθηματικού προγραμματισμού. Η αποτελεσματική τεκμηρίωση και η δομή του κώδικα έκαναν σαφή το διαχωρισμό μεταξύ των επιμέρους τμημάτων του. Αυτό διευκόλυνε

σε μεγάλο βαθμό την αλλαγή του για την προσομοίωση των εναλλακτικών σεναρίων ικανοποίησης ζήτησης αφού το μεγαλύτερο τμήμα του παρέμεινε αμετάβλητο. Τα παραπάνω οδήγησαν επίσης στο να μην παρουσιαστούν δυσκολίες στον έλεγχο των αποτελεσμάτων ή την αλλαγή των δεδομένων εισόδου, παρά την απουσία ενός ειδικευμένου γραφικού περιβάλλοντος.

Ο προγραμματισμός ενός μοντέλου υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί σε μεγάλο βαθμό την κατανόηση από τον προγραμματιστή της δομής και λειτουργίας του μοντέλου. Το ίδιο δεν ισχύει για την χρήση ενός εξειδικευμένου λογισμικού όπως το HOMER, όπου ο χρήστης μπορεί εύκολα να εξάγει αποτελέσματα χωρίς να διαθέτει ιδιαίτερη γνώση για το μοντέλο που επιλύει. Η διαπίστωση αυτή φαντάζει ως επιχείρημα κατά της χρήσης αλγεβρικών γλωσσών προγραμματισμού. Στην πραγματικότητα, η βελτιστοποίηση της δομής του μοντέλου στο GAMS, σε συνδυασμό με την κατάλληλη τεκμηρίωση και την δυνατότητα επέμβασης στον κώδικα, αποτελεί ασφάλεια για την εγκυρότητα της λύσης.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι το GAMS αν και δεν προσφέρει κάτι το καινοτομικό στην επίλυση της δομής των υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ωστόσο διευκολύνει ιδιαίτερα την διαδικασία σε σχέση με μια τυπική γλώσσα μαθηματικού προγραμματισμού. Ταυτόχρονα παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και ακρίβεια από ένα συχνά χρησιμοποιούμενο λογισμικό βελτιστοποίησης μικρών συστημάτων ενέργειας, το HOMER. Ο χρόνος βελτιστοποίησης του μοντέλου στο GAMS είναι συγκρίσιμος με αυτόν στο HOMER αν και σταθερά μεγαλύτερος.

Για την περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου της εργασίας προτείνεται η διερεύνηση της χρήσης μεθευρετικών μεθόδων, είτε μέσω του προγραμματισμού τους στο GAMS είτε με τη δημιουργία εξειδικευμένων επιλυτών.