



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

# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HOMER-ΜΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ι. Παπαϊωάννου

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

# ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ HOMER-ΜΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ι. Παπαϊωάννου

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 2015.

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....  
Δημήτριος Ι. Παπαϊωάννου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Ι. Παπαϊωάννου 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μια τεχνοοικονομική μελέτη δυο μικροδικτύων που είναι εγκατεστημένα στην περιοχή της κατασκήνωσης «Μελτέμι», η οποία είναι παραθαλάσσια και βρίσκεται στην περιοχή της Ραφήνας. Τα μικροδίκτυα προσομοιώνονται και αναλύονται με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER Energy (Hybrid Optimization Model for Energy Resources) για να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση αυτών και να επιτύχουμε τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος. Ακόμη διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας για να παρουσιαστεί ο αντίκτυπος συγκεκριμένων μεταβλητών στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής ανάλυσης και της ανάλυσης ευαισθησίας προτείνουν την εγκατάστασή νέων διεσπαρμένων παραγωγών ή νέο πρότυπο λειτουργίας των ήδη υπαρχόντων.

Στο πρώτο κεφάλαιο επιχειρείται μια λεπτομερής παρουσίαση του λογισμικού HOMER που είναι βασικό εργαλείο για την ανάλυση των δυο μικροδικτύων που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία. Παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρειάζεται το πρόγραμμα για να εκτελέσει την προσομοίωση ενός μικροδικτύου, καθώς και κάποιες παραδοχές και απλουστεύσεις που κάνει. Μεγάλο μέρος του κεφαλαίου αποτελεί η παρουσίαση ενός απλού παραδείγματος που καταδεικνύει τις δυνατότητες του HOMER.

Το δεύτερο κεφάλαιο ξεκινά περιγράφοντας τα μικροδίκτυα γενικά. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν ένα μικροδίκτυο ,οι λόγοι για την ανάπτυξη τους, οι τεχνολογίες παραγωγής που μπορούν να περιλαμβάνουν , όπως επίσης και κάποια τεχνικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αφού, λοιπόν, αναφερθούν διάφορες πτυχές της λειτουργίας των μικροδικτύων γίνεται μια σύντομη περιγραφή της κατασκήνωσης «Μελτέμι». Το βασικότερο , όμως, κομμάτι του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των δύο μικροδικτύων στο «Μελτέμι» και η προσομοίωσή τους με το HOMER.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την ουσία της διπλωματικής εργασίας. Πραγματοποιείται βελτιστοποίηση των δυο μικροδικτύων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, όπου εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Επίσης διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας και γίνεται αντιληπτή η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου στη βέλτιστη υλοποίηση του κάθε συστήματος.

**Λέξεις κλειδιά:** Μικροδίκτυα, HOMER, τεχνοοικονομική ανάλυση, βελτιστοποίηση, ανάλυση ευαισθησίας, φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,

## Abstract

This diploma thesis performs a techno-economical study of the two existing microgrids in the pilot site of Meltemi, a seaside camping in Rafina near the Athens coast. The microgrids are simulated and analyzed using HOMER (Hybrid Optimization Models for Energy Resources) in order to optimize them and achieve the maximum energy production with the minimum cost.. Also, sensitivity analysis is conducted to demonstrate the effects of specific variables in the optimal implementation of the system. The results of the techno-economic and sensitivity analysis, suggest the integration of new DGs or new operation patterns of the existing ones.

In the first chapter a detailed presentation of the HOMER software which is an essential tool for the analysis of the two microgrids that this diploma thesis sets under study is attempted. Also , there is the presentation of the data needed by the program to perform the simulation of a microgrid and some assumptions and simplifications that HOMER makes. Much of the chapter is to present a simple example that demonstrates the capabilities of software.

The second chapter begins by describing the microgrids in general. Key elements that make up a microgrid are presented and also the reasons for their development , production technologies that may include, as well as some technical issues to be taken into account. Having mentioned various aspects of the operation of microgrids, a brief description of the camp “Meltemi” is made. The key , however, part of the chapter is the presentation of the two microgrids in “Meltemi” and their simulation by HOMER.

The third chapter contains the essence of this diploma thesis. Optimization of the two microgrids is conducted and the results are presented which lead us to useful conclusions. Moreover, sensitivity analysis is carried out and we observe the effect of solar radiation and wind speed in the optimal implementation of each system.

**Keywords:** Microgrids, HOMER, techno-economic analysis, optimization , sensitivity analysis, photovoltaic, wind turbine, renewable energy sources

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Το λογισμικό HOMER και οι δυνατότητές του</b> .....   | 10 |
| 1.1 Εισαγωγή.....   | 10 |
| 1.2 Βασικά οικονομικά μεγέθη.....                           | 12 |
| 1.3 Παραδοχές και περιορισμοί του προγράμματος.....         | 13 |
| 1.4 Αναλυτική παρουσίαση προγράμματος.....                  | 14 |
| 1.4.1 Δεδομένα φορτίου.....                                 | 15 |
| 1.4.2 Εξοπλισμός συστήματος.....                            | 16 |
| 1.4.2.1 Γεννήτρια.....                                      | 17 |
| 1.4.2.2 Ανεμογεννήτρια.....                                 | 19 |
| 1.4.2.3 Φωτοβολταϊκά.....                                   | 20 |
| 1.4.2.4 Μπαταρίες.....                                      | 21 |
| 1.4.2.5 Υδροηλεκτρικά.....                                  | 22 |
| 1.4.2.6 Fuel cell.....                                      | 24 |
| 1.4.2.7 Boiler.....   | 25 |
| 1.4.2.8 Μετατροπέας.....                                    | 26 |
| 1.4.2.9 Σύνδεση στο δίκτυο.....                             | 27 |
| 1.4.3 Πόροι.....  | 28 |
| 1.4.3.1 Άνεμος.....   | 28 |
| 1.4.3.2 Ήλιος.....  | 30 |
| 1.4.3.3 Καύσιμα.....  | 31 |
| 1.4.3.4 Νερό.....   | 33 |
| 1.4.3.5 Αλλαγή κλίμακας δεδομένων.....                      | 34 |
| 1.4.4 Περιορισμοί.....                                      | 35 |
| 1.4.5 Οικονομικά δεδομένα.....                              | 36 |
| 1.5 Παράδειγμα προσομοίωσης.....                            | 37 |
| 1.5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....                            | 39 |
| 1.5.2 Βελτιστοποίηση του συστήματος.....                    | 45 |
| 1.5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας.....                              | 47 |
| <b>2. Τα πιλοτικά Μικροδίκτυα στο «Μελτέμι»</b> .....       | 54 |
| 2.1 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids).....                        | 54 |
| 2.2 Τα Μικροδίκτυα.....                                     | 55 |
| 2.2.1 Λόγοι για την ανάπτυξη των μικροδικτύων.....          | 56 |
| 2.2.2 Τεχνολογίες παραγωγής.....                            | 57 |
| 2.2.3 Ηλεκτρονικά ισχύος.....                               | 60 |
| 2.2.4 Σημείο σύνδεσης με το δίκτυο.....                     | 61 |
| 2.2.5 Τεχνική λειτουργία του μικροδικτύου.....              | 61 |
| 2.2.6 Οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου.....           | 63 |
| 2.2.7 Έλεγχος του μικροδικτύου.....                         | 63 |
| 2.2.7.1 Κεντρικός έλεγχος.....                              | 64 |
| 2.2.7.2 Διεσπαρμένος έλεγχος.....                           | 65 |
| 2.2.7.3 Διεσπαρμένος έλεγχος με χρήση ευφυών πρακτόρων..... | 65 |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.7.4 Διαφορές.....  | 67 |
| 2.3 Η κατασκήνωση « Το Μελέμυ».....  | 68 |
| 2.4 Πόροι.....   | 70 |
| 2.4.1 Ηλιακό δυναμικό .....  | 72 |
| 2.4.2 Αιολικό δυναμικό .....   | 72 |
| 2.5 Το Διασυνδεδεμένο Μικροδίκτυο .....                                    | 73 |
| 2.5.1 Ηλεκτρικό Φορτίο .....   | 73 |
| 2.5.2 Ανεμογεννήτρια .....   | 74 |
| 2.5.3 Φωτοβολταϊκά .....   | 75 |
| 2.5.4 Ντιζελογεννήτρια.....  | 77 |
| 2.5.5 Inverters.....   | 77 |
| 2.6 Προσομοίωση του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου με το HOMER .....         | 78 |
| 2.6.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης .....                     | 78 |
| 2.6.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης .....                    | 81 |
| 2.6.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του διασυνδεδεμένου συστήματος..... | 84 |
| 2.7 Το Αυτόνομο Μικροδίκτυο .....  | 84 |
| 2.7.1 Ηλεκτρικό φορτίο .....   | 85 |
| 2.7.2 Ανεμογεννήτρια.....  | 86 |
| 2.7.3 Φωτοβολταϊκά .....   | 86 |
| 2.7.4 Μπαταρίες.....   | 87 |
| 2.7.5 Inverter .....   | 87 |
| 2.8 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος στο HOMER.....                    | 87 |
| 2.8.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης .....                     | 88 |
| 2.8.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.....                     | 91 |
| 2.8.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος.....       | 94 |

### **3. Βελτιστοποίηση των Μικροδικτύων με χρήση του λογισμικού HOMER.....**

|   |     |
|---|-----|
| 3.1 Βελτιστοποίηση του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου.....  | 97  |
| 3.1.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση του βέλτιστου συστήματος .....  | 98  |
| 3.1.1.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.....   | 99  |
| 3.1.1.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.....  | 104 |
| 3.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....  | 108 |
| 3.1.2.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.....         | 109 |
| 3.1.2.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.....        | 112 |
| 3.1.2.3 Παρουσίαση της επιρροής των μεταβλητών ευαισθησίας στη διαμόρφωση του μικροδικτύου .....            | 113 |
| 3.1.3 Συμπεράσματα από την βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου..... | 117 |
| 3.2 Βελτιστοποίηση του αυτόνομου μικροδικτύου.....  | 118 |
| 3.2.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση του βέλτιστου συστήματος .....  | 119 |
| 3.2.1.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.....   | 119 |
| 3.2.1.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης.....  | 123 |



|   |            |
|---|------------|
| 3.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας.....  | 125        |
| 3.2.2.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.....   | 126        |
| 3.2.2.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.....  | 129        |
| 3.2.2.3 Παρουσίαση της επιρροής των μεταβλητών ευαισθησίας στη διαμόρφωση του μικροδικτύου.....       | 131        |
| 3.2.3 Συμπεράσματα από την βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας του αυτόνομου μικροδικτύου..... | 135        |
| <b>4. Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις-Προοπτικές συνέχισης.....</b>   | <b>137</b> |
| <b>Παράρτημα.....</b>   | <b>139</b> |

# 1. Το λογισμικό HOMER και οι δυνατότητές του

## 1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούμε το λογισμικό προσομοίωσης HOMER Energy. Το πρόγραμμα κατασκευάστηκε αρχικά για λογαριασμό του αμερικάνικου εθνικού οργανισμού για τις ΑΠΕ ( NREL , National Renewable Energy Laboratory) . Αποτελεί ένα εργαλείο τεχνοοικονομικής ανάλυσης για ΣΗΕ. Εξειδικεύεται σε συστήματα μικρής κλίμακας , αυτόνομα ή διασυνδεδεμένα, που χρησιμοποιούν ΑΠΕ και συμβατικές γεννήτριες , τεχνολογίες αποθήκευσης , ενώ καλύπτει και άλλα παρεμφερή ζητήματα όπως θερμική ενέργεια και βιοκαύσιμα. Το πρόγραμμα μελετά τη λειτουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου του συστήματος σε βάθος χρόνου εξάγοντας συμπεράσματα για την παραγόμενη ενέργεια, την κατανάλωση καυσίμου, το κόστος αλλά και τους εκπεμπόμενους ρύπους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, για τη πρόβλεψη της λειτουργίας του, τη διαστασιοποίηση των παραμέτρων του και τη διερεύνηση μεταβαλλόμενων μεταβλητών[1].

Το πρόγραμμα κατά την προσομοίωση εκτελεί πολλαπλές μελέτες ροής φορτίου, σε ωριαία βάση, και για τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους . Στη συνέχεια επεκτείνεται σε όλη την περίοδο ζωής του συστήματος. Βρίσκει τον συνδυασμό των εξαρτημάτων του μικροδικτύου που ικανοποιούν τα υπάρχοντα φορτία με το μικρότερο δυνατό κόστος. Από τις χιλιάδες προσομοιώσεις που εκτελεί βρίσκει τι βέλτιστο σύστημα και παράγει αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας κάποιων μεταβλητών [2],[3]. Αρχικά απαιτείται από το χρήστη να ορίσει εισόδους :

(α) Την δομή του υπό εξέταση συστήματος, δηλαδή από ποια πιθανά στοιχεία θα αποτελείται (equipment to consider) . Απεικονίζεται με ένα απλουστευμένο διάγραμμα.

(β) Τις λεπτομέρειες των επιμέρους στοιχείων, όπως γεννήτριες, φορτία, μετατροπείς, ταμιευτήρες και εξωτερική διασύνδεση. Εισάγονται δεδομένα(component inputs) για το είδος των στοιχείων, τον αριθμό και στη συνέχεια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τρόποι διασύνδεσης , ρυθμίσεις λειτουργίας και οικονομικά στοιχεία. Δίνεται η δυνατότητα διαφορετικών μεγεθών ισχύος προς εξέταση ή εναλλακτικά να μην συμπεριληφθεί κάποιο στοιχείο.

(γ) Τους διαθέσιμους πόρους του συστήματος (resources), όπως αποθέματα και τιμές καυσίμων, αιολικό και ηλιακό δυναμικό, πληροφορίες για το περιβάλλον της εγκατάστασης, στοιχεία για την οικονομία , την αγορά ενέργειας, περιορισμούς που τίθενται, καθώς και ρυθμίσεις ελέγχου του συστήματος.[1],[4]

Κατά την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων , παρέχεται η επιπλέον δυνατότητα σε αριθμητικές μεταβλητές να οριστούν με ένα ευρύτερο σύνολο τιμών, που να

εκφράζει πιθανές μεταβολές στις παραμέτρους (sensitivity values). Αφού οριστούν από το χρήστη όλα τα παραπάνω στοιχεία εισόδου εκτελείται η προσομοίωση της λειτουργίας του εικονικού συστήματος. Γίνονται υπολογισμοί του ισοζυγίου ενέργειας (παραγωγής / κατανάλωσης) και ταυτόχρονη οικονομική ανάλυση (για βέλτιστη κατανομή φορτίου, ένταξη μονάδων), για κάθε ώρα ενός έτους. Τα αποτελέσματα επεκτείνονται για αριθμό ετών, ίσο με το κύκλο ζωής του συστήματος, και στη συνέχεια τα μελλοντικά μεγέθη ανάγονται στην παρούσα χρονική στιγμή. Έτσι παρουσιάζονται στον χρήστη τα τελικά αποτελέσματα με τη μορφή αριθμητικών δεδομένων ή γραφημάτων. Τα αποτελέσματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

(α) Αποτελέσματα εξομοίωσης (simulation results) που είναι τα αναλυτικά δεδομένα για τη λειτουργία ενός συστήματος σε όλο το χρόνο ζωής ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το κόστος και την οικονομική βιωσιμότητά του.

(β) Αποτελέσματα βελτιστοποίησης (optimization results) όπου παρατίθενται οι εξομοιώσεις από όλα τα πιθανά συστήματα που μπορούν να υλοποιηθούν με βάση τα δεδομένα εισόδου προς εξέταση. Τα εναλλακτικά συστήματα, εφόσον κρίνονται επαρκή, ταξινομούνται με βάση το μικρότερο κόστος (NPC, net present cost). Αυτό το κόστος περιλαμβάνει το αρχικό αλλά και κόστος αντικατάστασης των εξαρτημάτων, κόστη λειτουργίας και συντήρησης καθώς και το κόστος του καυσίμου[3]. Έτσι ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το βέλτιστο σύστημα ή να κάνει συγκρίσεις.

(γ) Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity results), όπου επαναλαμβάνεται η βελτιστοποίηση για κάθε τιμή του συνόλου μιας αριθμητικής μεταβλητής (εφόσον ορίστηκαν sensitivity values), ώστε να υποδειχθεί, κάθε φορά εκ νέου, το βέλτιστο σύστημα. Έτσι εξετάζεται αν διατηρείται η καταλληλότητα ενός συστήματος υπό την επίδραση διαφορετικών δεδομένων.[1],[3],[5]

Ο χρήστης αξιολογεί τα αποτελέσματα, και με βάση τα συμπεράσματά του μπορεί να τροποποιήσει τις αρχικές παραμέτρους και να επαναλάβει την όλη προσομοίωση.

## 1.2 Βασικά οικονομικά μεγέθη

Το HOMER χρησιμοποιεί βασικές οικονομικές έννοιες για την αξιολόγηση των συστημάτων. Αναφέρουμε μερικές, όπως εξηγούνται στο εγχειρίδιο(help) του προγράμματος.

Πληθωρισμός( inflation)  $f$  είναι το οικονομικό φαινόμενο της μεταβολής της αγοραστικής αξίας του χρήματος. Συνήθως είναι θετικός, δηλαδή τα αγαθά ακριβαίνουν και η αξία του χρήματος μειώνεται. Οφείλεται κυρίως στην κυκλοφορία νέου χρήματος σε μια οικονομία. Εκφράζεται με ένα ποσοστό % με το οποίο ένα αρχικό κεφάλαιο χάνει αξία ετησίως[6].

Ονομαστικό επιτόκιο (nominal interest rate)  $i'$ , είναι η πρόσθετη ετήσια αξία που αποκτά ένα οφειλόμενο ποσό. Οι τόκοι που προστίθενται αποτελούν μια μορφή αποζημίωσης για την στέρηση του κεφαλαίου από τον δανειστή, ενώ θα μπορούσε να του είχε αποφέρει επιπλέον κέρδη αν επενδύοταν. Εκφράζεται ετησίως ως ποσοστό % του ποσού[5].

Πραγματικό επιτόκιο ( interest rate)  $i$  είναι το ονομαστικό επιτόκιο προσαρμοσμένο στον πληθωρισμό. Χρησιμοποιείται στο HOMER έναντι του ονομαστικού γιατί απαλείφει τον πληθωρισμό από τους υπολογισμούς. Υπολογίζεται ως ποσοστό % επί του ποσού [6]

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (1) .$$

Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίων (Capital Recovery Factor), CRF, είναι ο συντελεστής που αντιστοιχίζει το σύνολο μιας συνεχούς ροής σταθερών ποσών, εκτεινόμενης σε χρονική περίοδο  $N$  ετών, σε μια σταθερή ετήσια δόση ( τρέχουσας αξίας) , λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό επιτόκιο :

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2) .$$

Ετησιοποιημένο κόστος ( annualized cost),  $C_{ann}$ , είναι το συνολικό ποσό  $C$  που δαπανήθηκε σε ένα κύκλο ζωής  $N$  ετών , αντιστοιχισμένο στην ετήσια σταθερή δόση, με τη βοήθεια του CRF. Εκφράζεται σε €/έτος :

$$C_{ann} = C \cdot CRF \quad (3).$$

Καθαρό τρέχον κόστος (Net Present Cost) NPC είναι ένα συνολικό κόστος σε € , για όλο το κύκλο ζωής, ανηγμένο στην παρούσα αξία του [6]

$$NPC = \frac{C_{ann, total}}{CRF} \quad (4).$$

Η εξέταση των επιλογών στο HOMER γίνεται με βάση το ολικό NPC διαφόρων συστημάτων. Αυτό περιλαμβάνει την αρχική αξία αγοράς (capital cost) , αλλά και το κόστος καυσίμων που θα καταναλωθούν, το κόστος συντήρησης που θα απαιτηθεί, τα κεφάλαια για την αντικατάσταση στοιχείων που θα παλιώσουν, την αγοραπωλησία ενέργειας με εξωτερικά δίκτυα, τα πρόστιμα ρύπων και τέλος την αξία απόσυρσης, δηλαδή τυχόν πώληση μεταχειρισμένων, με το πέρας του κύκλου ζωής[1].

Τέλος το κόστος ενέργειας (levelized Cost of Energy) COE είναι το μέσο κόστος της κάθε ωφέλιμης kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει το σύστημα. Αν η ενέργεια πωλείται και χρεώνεται με αυτήν την τιμή, το κόστος του συστήματος τελικά αποσβένεται, ενώ αν πωλείται ακριβότερα , υπάρχει κέρδος[1],[6].

$$COE = \frac{C_{ann, tot}(ΓΙΑ \_ ΠΑΡΑΓΩΓΗ \_ ΩΦΕΛΙΜΗΣ \_ ΗΛ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)}{Ε_{ΩΦΕΛ.ΗΛ} / \epsilon\tau\omicron\varsigma} \quad (5).$$

### 1.3 Παραδοχές και περιορισμοί του προγράμματος

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το λογισμικό HOMER για να προσεγγίσει ένα σύστημα εισάγουν εξορισμού απλουστεύσεις και παραδοχές. Κάποιες είναι:

(α) Τα οικονομικά μεγέθη θεωρείται ότι κλιμακώνονται στο μέλλον με το ίδιο επιτόκιο

(β) Τα ηλεκτρικά μοντέλα αγνοούν τις γραμμές μεταφοράς, αλλά οι απώλειες θα εμπεριέχονται στο φορτίο. Δεν λαμβάνεται καθόλου υπόψη η άεργος ισχύς. Εξετάζεται μόνο το ισοζύγιο ενεργού ισχύος, χωρίς επιπτώσεις σε τάση και συχνότητα

(γ) Δεν νοούνται βλάβες και διακοπές, μόνο πλήρης λειτουργία μέχρι το τέλος της ζωής ενός στοιχείου. Αγνοούνται τα μεταβατικά φαινόμενα, οι διαταραχές και η ταχύτητα απόκρισης, οπότε ο χρήστης του HOMER είναι υπεύθυνος για θέματα όπως επιτρεπτή διείσδυση ΑΠΕ και εφεδρεία.

(δ) Οι μέσες τιμές, όπως του φορτίου ή του ανέμου, είναι ολοκληρωμένες στο χρονικό βήμα της εξομοίωσης ( 1 ώρα στην περίπτωση μας), επομένως εξαλείφονται ενδιάμεσες αιχμές. Αυτό αντιμετωπίζεται με προσθήκη τυχαίου θορύβου στα δείγματα των τιμών ή και με ανάλυση σε μικρότερα χρονικά βήματα.

Η σοβαρότερη όμως παραδοχή του προγράμματος, που μπορεί να αποτελέσει αιτία ανακολουθίας μεταξύ προβλεπόμενων και πραγματικών καταστάσεων, είναι ότι ο χειρισμός του πραγματικού συστήματος θα γίνεται σύμφωνα με τις υποδείξεις του HOMER. Στην πράξη όμως ο έλεγχος μπορεί να γίνεται με μη βέλτιστο τρόπο. Επιπλέον υπάρχουν οι εξής αδυναμίες:

(α) Το πρόγραμμα δεν προβλέπει προφανείς μελλοντικές καταστάσεις, αλλά εκτελεί οικονομική ανάλυση μόνο με βάση τα στιγμιαία δεδομένα, συγκρίνονται οριακά κόστη. Έτσι, μπορεί να αποτύχει στη βέλτιστη διαχείριση αποθεμάτων ενέργειας, για την κάλυψη επερχόμενης αιχμής.

(β) Σε ένα πραγματικό σύστημα η ένταξη και ο χειρισμός μονάδων διέπονται από κανόνες και αποφεύγεται η λειτουργία για σύντομο χρονικό διάστημα. Η έναυση και η σβέση προσθέτει έξοδα, τα οποία το HOMER αγνοεί. Για να επιβληθεί λελογισμένη χρήση μιας μονάδας στο HOMER ορίζεται χρονοδιάγραμμα.

(γ) Το HOMER δεν μπορεί να θέσει όρια στην παραγωγή μονάδων ΑΠΕ( set points), αλλά αντίθετα, τους δίνει πάντοτε προτεραιότητα στην κατανομή φορτίου. Έτσι αν εμείς υποχρεώσουμε γεννήτριες να λειτουργούν παράλληλα, για εφεδρεία, μπορεί να προκύψει πλεόνασμα ισχύος που καταγράφεται σαν απορριπτόμενη ενέργεια (excess

energy). Αυτό οφείλεται στο ότι οι γεννήτριες πρέπει αναγκαστικά να λειτουργήσουν με μια ελάχιστη ισχύ.

Τέλος , τίθενται και κάποιοι αναπόφευκτοι περιορισμοί στον ίδιο τον ορισμό των στοιχείων και της λειτουργίας του συστήματος. Πηγή ανακρίβειας μπορεί να είναι τα λάθος δεδομένα που εισάγει ο χρήστης. Για να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα συνηθίζεται να ορίζονται σύνολα τιμών (sensitivity values) . Εδώ , βασική έλλειψη του HOMER είναι η ανικανότητα παρακολούθησης μιας τιμής που μεταβάλλεται κάθε χρόνο, όπως η ετήσια αύξηση της ζήτησης, η μείωση απόδοσης λόγω γήρανσης μονάδας, ένα οικονομικό μέγεθος που κλιμακώνεται με διαφορετικό ρυθμό από τα υπόλοιπα (όπως η τιμή πετρελαίου) ή και η ίδια η δομή του συστήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας επιτρέπει την εξέταση τέτοιων ζητημάτων, με στατικό όμως τρόπο, θεωρώντας κάθε εναλλακτική τιμή σταθερή για όλο τον κύκλο ζωής. Μια απλή λύση στο πρόβλημα είναι η προσομοίωση με τιμή που αντιστοιχεί στο μέσο του κύκλου ζωής και εκτίμηση των υπολοίπων τιμών του συνόλου με ανάλυση ευαισθησίας[1].

## 1.4 Αναλυτική Παρουσίαση Προγράμματος

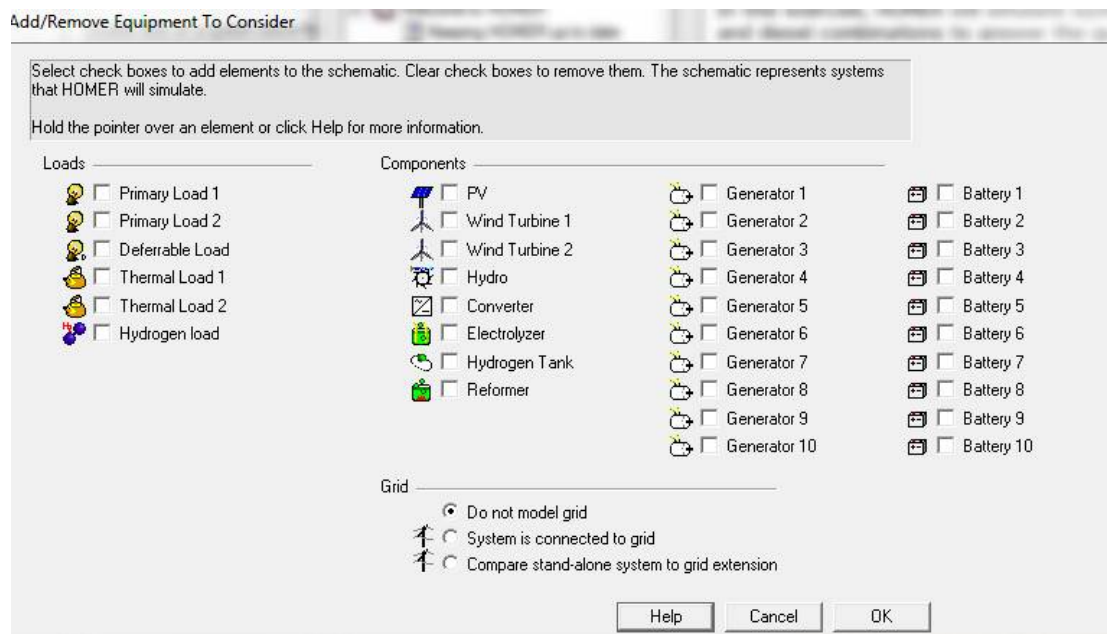
Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις δυνατότητες του HOMER και να εξηγήσουμε τις παραμέτρους που περιέχει.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε όταν ξεκινάμε να μελετάμε ένα σύστημα είναι να ορίσουμε τα στοιχεία που θα χρειαστούμε , αλλά και τις παραμέτρους των στοιχείων αυτών, ώστε να προχωρήσουμε στη συνέχεια στην προσομοίωση.

Το HOMER μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε μια ποικιλία επιλογών για να συνθέσουμε το σύστημα μας. Μπορούμε να επιλέξουμε το είδος του φορτίου μας. Αν είναι δηλαδή primary (πρωταρχικό), deferrable , thermal( θερμικό) ή hydrogen load. Πρωταρχικό (primary) είναι το φορτίο, το οποίο πρέπει να ικανοποιηθεί άμεσα και η παραγωγή μας προσπαθεί πάντα, πρώτα από όλα, να καλύψει. Αντίθετα , deferrable είναι ένα φορτίο το οποίο πρέπει να εξυπηρετηθεί κάποια στιγμή της ημέρας αλλά η ακριβής ώρα δεν έχει σημασία και διαφέρει από μέρα σε μέρα. Το θερμικό (thermal) φορτίο αναφέρεται στην ανάγκη για θερμική ενέργεια. Η θερμότητα μπορεί να χρειάζεται για θέρμανση χώρων , ζέσταμα νερού ή για κάποια βιομηχανική διαδικασία. Το θερμικό φορτίο εξυπηρετείται από τη περισσευούμενη θερμότητα που παράγεται από μια γεννήτρια, από ένα μπόιλερ ή από το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται[6].

Στη συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε τα στοιχεία από τα οποία θα αποτελείται το σύστημά μας. Μπορούμε , όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα , να επιλέξουμε αν θέλουμε να βάλουμε γεννήτριες και πόσες τον αριθμό. Επίσης μπορούμε να εισάγουμε κάποιες μορφές ΑΠΕ, όπως φωτοβολταϊκά , ανεμογεννήτριες , ή κάποιο υδροηλεκτρικό. Μια άλλη μορφή ΑΠΕ που μας δίνει τη δυνατότητα το HOMER να εντάξουμε στο σύστημα είναι το fuel cell (κυψέλη καυσίμου). Γι' αυτό ακριβώς το

λόγο υπάρχουν στις επιλογές τα στοιχεία electrolyzer ( ηλεκτρολύτης), hydrogen tank ( αποθήκη υδρογόνου) και reformer (αναμορφωτής) . Ακόμη βλέπουμε ότι μπορούμε να επιλέξουμε και τον αριθμό και το είδος των μπαταριών που θα χρειαστούμε. Τέλος απαραίτητος στο σύστημά μας είναι ένας converter (μετατροπέας ) ώστε να μπορέσουμε να συνδέσουμε τα στοιχεία που επιλέξαμε μεταξύ τους . Καθώς κάποια από αυτά παράγουν συνεχές ρεύμα το οποίο πρέπει να γίνει εναλλασσόμενο.



**Εικόνα 1.1** Φόρμα σύνθεσης του μικροδικτύου

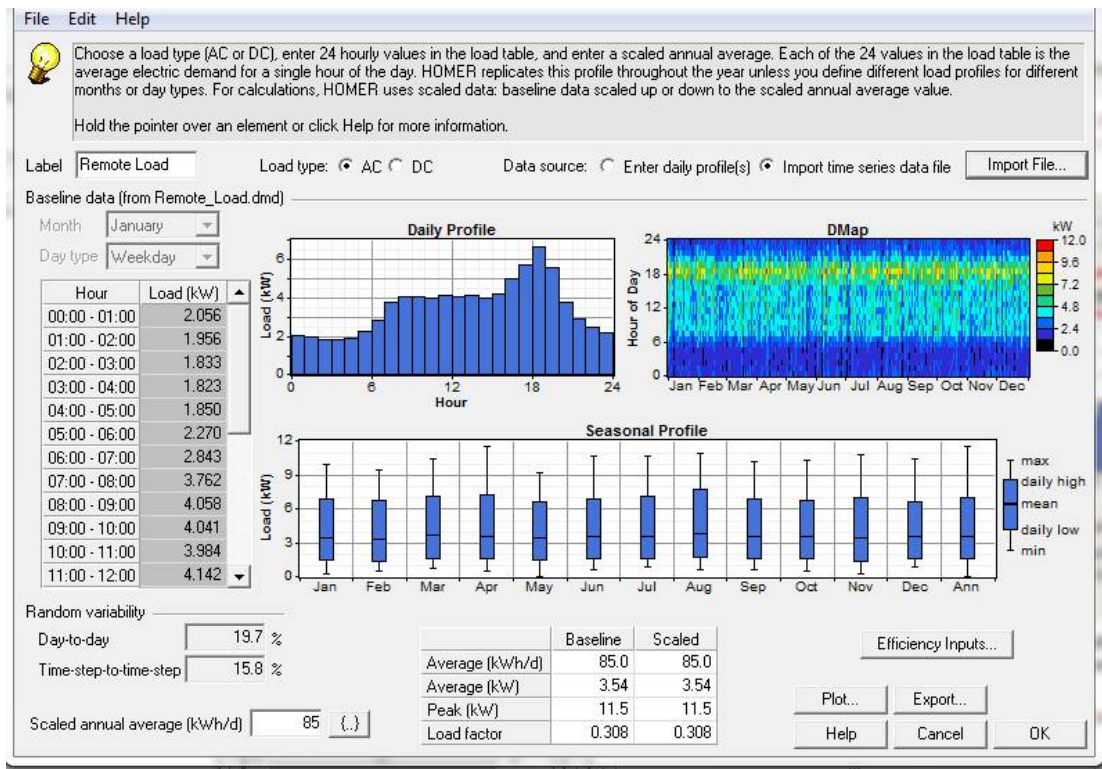
### 1.4.1 Δεδομένα φορτίου

Στη συνέχεια το HOMER μας ζητάει να εισάγουμε τις λεπτομέρειες του φορτίου. Υπάρχουν δυο τρόποι για να εισάγουμε τα στοιχεία που χρειαζόμαστε για το φορτίο.

Ο πρώτος είναι να φτιάξουμε ένα ξεχωριστό αρχείο το οποίο θα περιέχει τη ζητούμενη ισχύ για κάθε ώρα του έτους, δηλαδή 8760 τιμές. Το αρχείο αυτό το εισάγουμε στο HOMER και αυτό αναλαμβάνει να κάνει την ανάλυση όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα. Το HOMER ,λοιπόν, βρίσκει το καθημερινό προφίλ του φορτίου και κάνει ένα σχεδιάγραμμα γι' αυτό. Βλέπουμε ότι το HOMER κάνει και άλλους υπολογισμούς ,όπως τον υπολογισμό της μέσης κατανάλωσης ενέργειας κάθε μέρα και της κορυφής (peak ) του φορτίου. Επίσης, εκτός από την ανάλυση μιας μέσης ημέρας και την κατανάλωση σε κάθε ώρα της ημέρας, βλέπουμε και ένα γράφημα με την κατανάλωση ενέργειας κάθε μήνα του έτους. Έτσι μπορούμε να παρατηρήσουμε το πόσο διαφέρει το φορτίο ανάλογα με την εποχή του έτους.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να βάλουμε εμείς τις τιμές στο πίνακα του HOMER για την κατανάλωση ενέργειας με βάση το μήνα, την ώρα και τη μέρα. Αντί λοιπόν να δημιουργήσουμε ένα αρχείο που να περιέχει τις τιμές μπορούμε να τις γράψουμε κατευθείαν στο πρόγραμμα[6]. Εμείς θα προτιμήσουμε, στην εργασία μας, τον πρώτο τρόπο όπου χρειάζεται να εισάγουμε πληροφορίες για ένα φορτίο για κάθε

ώρα του έτους. Στην εικόνα 1.2 φαίνονται τα δεδομένα του φορτίου και κάποια διαγράμματα που σχεδιάζει το HOMER για να το περιγράψει καλύτερα.

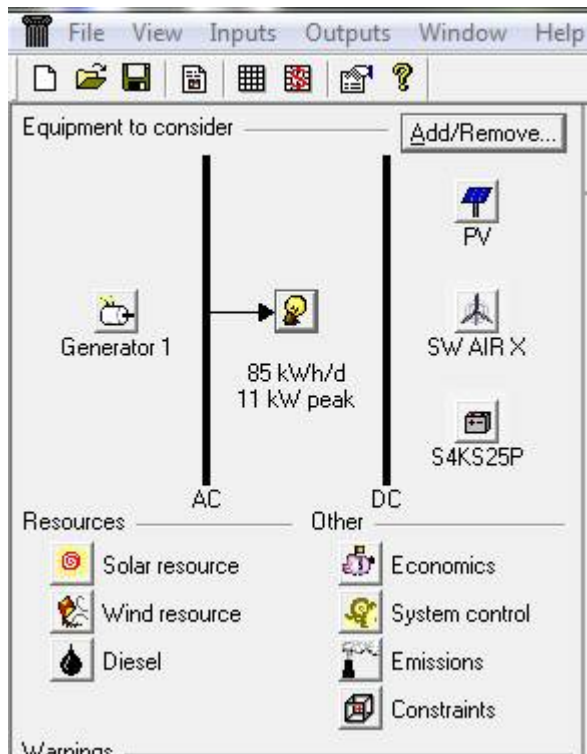


**Εικόνα 1.2** Τα δεδομένα του φορτίου όπως παρουσιάζονται από το HOMER

### 1.4.2 Εξοπλισμός συστήματος

Συνεχίζοντας με το σχεδιασμό του συστήματός μας πρέπει, εκτός από τις λεπτομέρειες του φορτίου, να εισάγουμε κάποιες περισσότερες πληροφορίες για κάθε στοιχείο που έχουμε επιλέξει. Το HOMER από τη στιγμή που επιλέξαμε κάποιον εξοπλισμό έχει δημιουργήσει ένα πολύ απλό σχέδιο του συστήματός μας, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.3, τοποθετώντας από ένα εικονίδιο για κάθε στοιχείο.





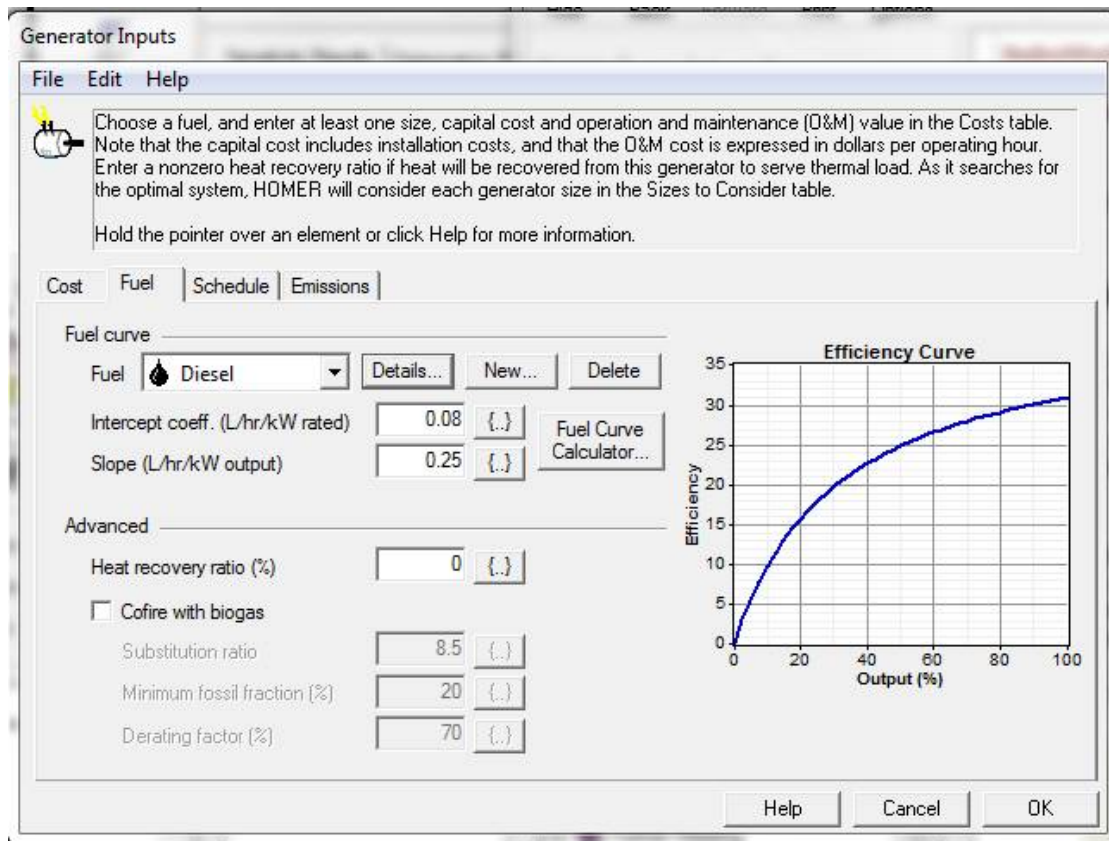
**Εικόνα 1.3** Σχέδιο του υπό εξέταση συστήματος από το HOMER

#### 1.4.2.1 Γεννήτρια

Αρχικά ορίζουμε τα χαρακτηριστικά της γεννήτριάς μας πατώντας το σχετικό εικονίδιο. Πρέπει να δηλώσουμε τα οικονομικά στοιχεία της γεννήτριας. Το HOMER μας καλεί να δώσουμε το αρχικό κόστος ανά κιλοβάτ της γεννήτριας και το κόστος ανά κιλοβάτ αν χρειαστεί να αντικαταστήσουμε τη γεννήτρια. Ακόμη απαραίτητο είναι το κόστος για λειτουργία και συντήρηση (operation and maintenance), το οποίο εκφράζεται σε δολάρια (ή οποιοδήποτε άλλο νόμισμα) ανά ώρα ανά κιλοβάτ. Εδώ καλό είναι να τονίσουμε ότι στο κόστος για συντήρηση και λειτουργία το HOMER δεν περιλαμβάνει το κόστος καυσίμων, καθώς το πρόγραμμα τα υπολογίζει ξεχωριστά. Έπειτα, πρέπει να ορίσουμε το μέγεθος της γεννήτριας, δηλαδή πόσα κιλοβάτ θα είναι και πόσες περιπτώσεις θα θεωρήσουμε στη προσομοίωση μας[6].

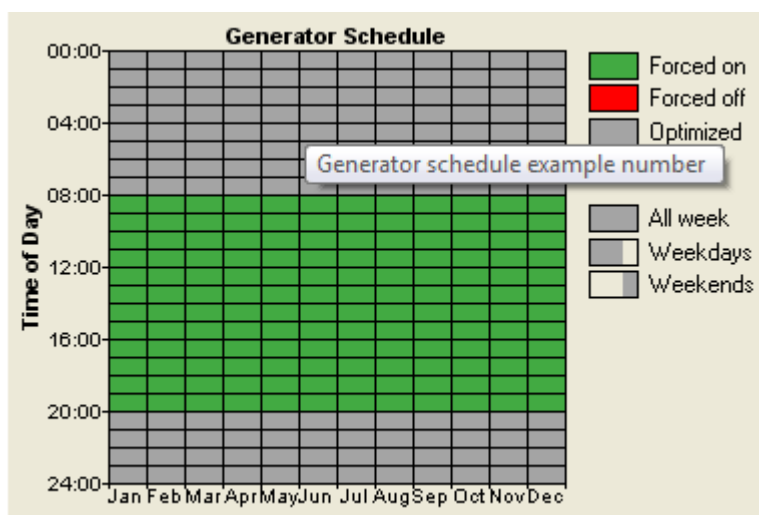
Ακόμη, στο HOMER έχουμε τη δυνατότητα να επέμβουμε και σε άλλα χαρακτηριστικά της γεννήτριας μας. Ένα από αυτά είναι η διάρκεια ζωής της γεννήτριας, η οποία είναι ο αριθμός των ωρών που μπορεί να δουλέψει η γεννήτρια πριν χρειαστεί αντικατάσταση. Επίσης πρέπει να ορίσουμε το ελάχιστο επιτρεπτό φορτίο που θα ανατίθεται στη γεννήτρια κατά την λειτουργία της.

Εξάλλου, μπορούμε να επιλέξουμε το καύσιμο που θα χρησιμοποιεί η γεννήτριά μας, καθώς επίσης και την κατανάλωση αυτού του καυσίμου. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να δηλώσουμε το ποσοστό της περισσευούμενης θερμότητας που παράγεται από τη γεννήτρια, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξυπηρέτηση κάποιου θερμικού φορτίου. Όλα τα παραπάνω φαίνονται στην εικόνα 1.4.



**Εικόνα 1.4** Πληροφορίες για την γεννήτρια

Το HOMER αποφασίζει πότε θα δουλέψει η γεννήτρια και πότε όχι ανάλογα με τα οικονομικά δεδομένα και την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή πότε συμφέρει να χρησιμοποιηθεί και πότε όχι, λαμβάνοντας υπόψη βέβαια τα δεδομένα των άλλων πηγών ενέργειας. Ωστόσο μας δίνει την ελευθερία να επιλέξουμε, αν θέλουμε, κάποιες ώρες που επιθυμούμε να λειτουργεί η γεννήτρια οπωσδήποτε και κάποιες άλλες που απαγορεύουμε τη λειτουργία της[6]. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το πρόγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας και πως μπορεί να διαμορφωθεί από το χρήστη.



**Εικόνα 1.5** Πρόγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας

Τέλος, σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας, το HOMER μας καλεί να εισάγουμε και κάποιες πληροφορίες για τις εκπομπές αερίων της γεννήτριας. Αργότερα, το HOMER χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να υπολογίσει τις συνολικές εκπομπές αερίων της γεννήτριας.

### 1.4.2.2 Ανεμογεννήτρια

Αφού τελειώσουμε με τη γεννήτρια μπορούμε να προχωρήσουμε με τον καθαρισμό των παραμέτρων του υπόλοιπου εξοπλισμού μας. Μια άλλη σημαντική πηγή ενέργειας για το σύστημά μας μπορεί να είναι μια ανεμογεννήτρια. Πατώντας , λοιπόν , το εικονίδιο που συμβολίζει την ανεμογεννήτρια στο HOMER ξεκινάμε να ρυθμίζουμε τις παραμέτρους όπως επιθυμούμε, η εικόνα 1.6 δείχνει το παράθυρο που ανοίγει το HOMER. Αρχικά πρέπει να επιλέξουμε τι είδος ανεμογεννήτριας θέλουμε. Το HOMER έχει μια ποικιλία από μοντέλα ανεμογεννητριών και καλούμαστε να επιλέξουμε μια. Κάθε μια συνοδεύεται και με μια χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ,που συνδέει την ισχύ με την ταχύτητα του ανέμου. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει συγκεκριμένη ισχύ την οποία δεν μπορούμε να αλλάξουμε.

**Εικόνα 1.6** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για την ανεμογεννήτρια

Στη συνέχεια θα πρέπει να σημειώσουμε το κόστος των ανεμογεννητριών ανάλογα με τον αριθμό τους . Επίσης , σε ότι έχει να κάνει με τα οικονομικά, πρέπει να ορίσουμε το κόστος αντικατάστασης και το κόστος για συντήρηση και λειτουργία, το οποίο εκφράζεται σε χρηματικές μονάδες ανά χρόνο. Επιπλέον, πρέπει να ορίσουμε τον αριθμό των ανεμογεννητριών που θα χρειαστούμε και πόσες περιπτώσεις θα πάρουμε

στην προσομοίωσή μας (δηλαδή τον αριθμό των ανεμογεννητριών σε κάθε προσομοίωση που θα τρέξει το HOMER) .Τέλος, υπάρχουν και άλλα δυο χαρακτηριστικά που χρειάζεται να συμπληρώσουμε. Αυτά είναι η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας και η απόσταση από το έδαφος του κέντρου του δρομέα της μηχανής[6].

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο των ανεμογεννητριών , που δεν ορίζουμε σ' αυτό το στάδιο , είναι το αιολικό δυναμικό. Θα αναφερθούμε σε αυτό αργότερα.

### 1.4.2.3 Φωτοβολταϊκά

Μια εξίσου σημαντική πηγή ενέργειας , που μας δίνει τη δυνατότητα το HOMER να χρησιμοποιήσουμε, είναι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ποια είναι τα χαρακτηριστικά που χρειάζεται να εισάγουμε. Αρχικά , όπως και στην ανεμογεννήτρια, πρέπει να εισάγουμε τα οικονομικά δεδομένα του φωτοβολταϊκού . Το πιο σημαντικό από αυτά είναι το κόστος του φωτοβολταϊκού και πως αυτό ποικίλει ανάλογα με την ισχύ του. Επίσης , δεν πρέπει να ξεχάσουμε, το κόστος αντικατάστασης που συχνά είναι μικρότερο από το αρχικό κόστος εγκατάστασης. Ενώ το κόστος λειτουργίας και συντήρησης έχει οριστεί από το HOMER μηδενικό. Εδώ πρέπει να προσέξουμε ότι όλες αυτές οι τιμές συμπεριλαμβάνουν όλα τα κόστη των υποσυστημάτων που σχετίζονται με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο[6].

**PV Inputs**

File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

| Costs     |              |                  |             |
|-----------|--------------|------------------|-------------|
| Size (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/yr) |
| 1.000     | 7000         | 6000             | 0           |
|           |              |                  |             |
| {.}       | {.}          | {.}              |             |

| Sizes to consider |
|-------------------|
| Size (kW)         |
| 0.000             |
| 1.000             |

**Properties**

Output current  AC  DC

Lifetime (years)  {.}

Derating factor (%)  {.}

Slope (degrees)  {.}

Azimuth (degrees W of S)  {.}

Ground reflectance (%)  {.}

**Advanced**

Tracking system

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C)  {.}

Nominal operating cell temp. (°C)  {.}

Efficiency at std. test conditions (%)  {.}

**Cost Curve**

Cost (000 \$) vs Size (kW)

— Capital — Replacement

Εικόνα 1.7 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τα φωτοβολταϊκά

Όπως και στην γεννήτρια και στην ανεμογεννήτρια, έτσι και εδώ , πρέπει να ορίσουμε στο HOMER τα μεγέθη των φωτοβολταϊκών που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε για να πραγματοποιήσει τις προσομοιώσεις.

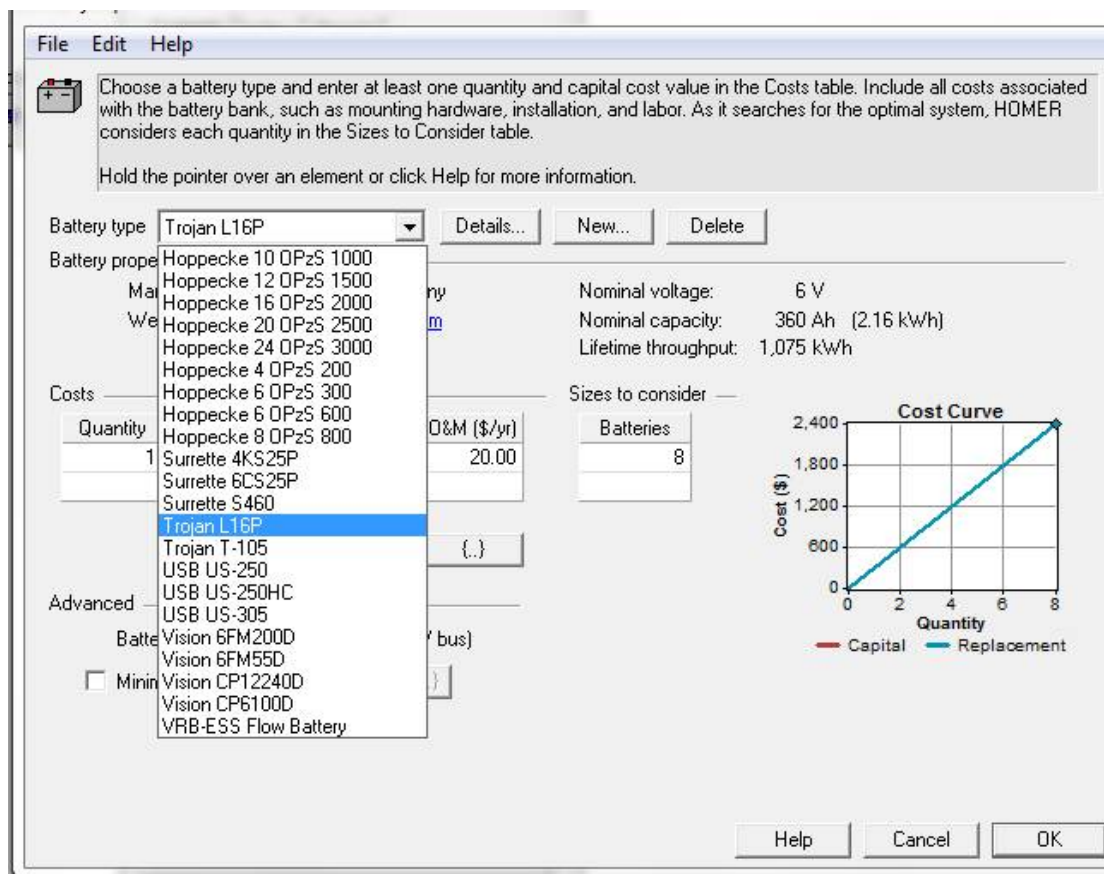
Στη συνέχεια, όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα , το πρόγραμμα μας ζητάει να σημειώσουμε και κάποιες άλλες ιδιότητες του φωτοβολταϊκού. Πρώτα από όλα αν το φωτοβολταϊκό παράγει συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Όπως γνωρίζουμε όλες οι φωτοβολταϊκές κυψέλες παράγουν συνεχές ρεύμα, υπάρχουν όμως κάποια φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία έχουν εγκατεστημένα inverters για την μετατροπή του ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Ακόμη υπάρχει ειδικό πεδίο για να εισάγουμε τη διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού. Επίσης πρέπει να εισάγουμε έναν παράγοντα μείωσης ( derating factor) , ο οποίος εφαρμόζεται στην έξοδο του φωτοβολταϊκού για να την μειώσει και να την φέρει στα επίπεδα που θα είναι όταν λειτουργεί σε πραγματικές συνθήκες . Στη συνέχεια υπάρχουν δυο παράγοντες που σχετίζονται με το πώς θα τοποθετηθεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο πρώτος είναι η κλίση (slope) , η οποία είναι η γωνία που έχουν τα φωτοβολταϊκά σε σχέση με τον ορίζοντα . Δεύτερος είναι το αζιμούθιο (azimuth) που ορίζει την κατεύθυνση προς την οποία κοιτάνε τα πλαίσια . Ένας άλλος παράγοντας που σχετίζεται με τη τοποθεσία που εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό είναι η ανακλαστικότητα του εδάφους( ground reflectance), η οποία είναι το κλάσμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στο έδαφος.

Εξάλλου το HOMER έχει και κάποια άλλα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού που πρέπει να εισάγουμε, τα οποία τα αναφέρει ως “προχωρημένα” ( advanced) . Ένα από αυτά είναι η ύπαρξη και το είδος tracking system, δηλαδή ενός συστήματος στρέψης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με το που βρίσκεται ο ήλιος κατά τη διάρκεια της ημέρας . Επίσης υπάρχει επιλογή για την επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του πλαισίου. Γι’ αυτό το λόγο στο HOMER πρέπει να σημειώσουμε ένα συντελεστή θερμοκρασίας ( temperature coefficient of power) , ο οποίος δείχνει πόσο εξαρτάται η έξοδος του φωτοβολταϊκού πλαισίου από τη θερμοκρασία της κυψέλης. Ακόμα έχουμε την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών (nominal operating cell temperature) , η οποία είναι η θερμοκρασία της κυψέλης για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , ταχύτητα ανέμου 1 m/s και ισχύ 0.8 Kw/m<sup>2</sup> . Τελευταίο χαρακτηριστικό σχετικό με τη θερμοκρασία είναι η αποδοτικότητα σε κανονικές συνθήκες δοκιμής (efficiency at standard test conditions)[6].

#### **1.4.2.4 Μπαταρίες**

Επόμενη πηγή αλλά και αποθήκη ενέργειας, που θα αναφερθούμε, είναι οι μπαταρίες. Το HOMER έχει αρκετά μοντέλα μπαταριών για να επιλέξουμε, όμως μπορούμε αν το επιθυμούμε να δημιουργήσουμε όποιο μοντέλο θέλουμε, αρκεί να γνωρίζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Όπως και παραπάνω έτσι και εδώ , αρχικά πρέπει να εισάγουμε το κόστος των μπαταριών που θα χρησιμοποιήσουμε , δείχνοντας βέβαια και τη σχέση του κόστους με την ποσότητά τους. Επίσης ,κατά τα γνωστά, σημειώνουμε το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών και το κόστος συντήρησης

και λειτουργίας. Τέλος, δηλώνουμε πόσες μπαταρίες θα χρησιμοποιήσουμε σε κάθε προσομοίωση που θα εκτελέσει το πρόγραμμα. Μπορούμε, αν θέλουμε, να ενώσουμε δυο ή περισσότερες μπαταρίες εν σειρά και να δημιουργήσουμε μια αλυσίδα. Αυτό το κάνουμε αν επιθυμούμε να αυξήσουμε την τάση που θα δίνει η συστοιχία των μπαταριών. Έπειτα συνδέουμε τις αλυσίδες παράλληλα για να δημιουργήσουμε τη συστοιχία μας [6]. Όλα τα παραπάνω μπορούμε να τα εισάγουμε στο παράθυρο που απεικονίζεται στην εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8 Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τις μπαταρίες

#### 1.4.2.5 Υδροηλεκτρικά

Άλλη μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που, όπως είπαμε, μας δίνει τη δυνατότητα το HOMER να χρησιμοποιήσουμε είναι τα υδροηλεκτρικά. Σε αντίθεση με τις άλλες πηγές ενέργειας που προαναφέραμε το HOMER μπορεί να θεωρήσει στην ανάλυσή του μόνο ενός μεγέθους υδροηλεκτρικό, το οποίο εμείς θα ορίσουμε. Γι' αυτό το λόγο δεν χρειάζεται να καθορίσουμε πως μεταβάλλεται το κόστος του υδροηλεκτρικού ανάλογα με το μέγεθός του. Έτσι σημειώνουμε απλώς αρχικό κόστος του υδροηλεκτρικού που θα χρησιμοποιήσουμε, το κόστος αντικατάστασής του και το κόστος για συντήρηση και λειτουργία. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε και την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του υδροηλεκτρικού.

Αφού συμπληρώσουμε τα οικονομικά στοιχεία του υδροηλεκτρικού πρέπει να ορίσουμε κάποια χαρακτηριστικά του υδροστρόβιλου. Το HOMER μας ζητάει να

ορίσουμε την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του ταμιευτήρα και του στροβίλου (available head). Ακόμη πρέπει να συμπληρώσουμε το ρυθμό ροής (design flow rate) για τον οποίο σχεδιάστηκε αυτός ο υδροστρόβιλος, συνήθως είναι ο ρυθμός ροής με τον οποίο ο στρόβιλος έχει τη μέγιστη απόδοση. Επίσης υπάρχουν η αναλογία ελάχιστης ροής ( minimum flow ratio) και η αναλογία μέγιστης ροής (maximum flow ratio), οι οποίες είναι το κλάσμα του ελάχιστου ρυθμού ροής προς τον design flow rate και το κλάσμα του μέγιστου ρυθμού ροής προς τον design flow rate αντίστοιχα. Τέλος , πολύ σημαντική είναι η απόδοση του υδροηλεκτρικού συστήματος , δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρει το νερό που μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Κάτι που δεν πρέπει να ξεχάσουμε είναι να αναφέρουμε τις απώλειες τριβής που δημιουργούνται λόγω της διέλευσης του νερού μέσα από τους σωλήνες καθώς μεταφέρεται από τον ταμιευτήρα στον στρόβιλο. Το HOMER τις εκφράζει με ένα ποσοστό και τις υπολογίζει λαμβάνοντας υπόψη κάποια χαρακτηριστικά των σωλήνων[6].

**Hydro Inputs**

File Edit Help

HOMER models run-of-river hydro installations. Enter the capital cost, available head, and turbine design flow rate. For Economics values, include the civil works and all costs associated with the hydro system. HOMER calculates the nominal power from the available head, design flow rate, and efficiency. Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Economics

Capital cost (\$) [ ] (.)

Replacement cost (\$) [ 0 ] (.)

O&M cost (\$/yr) [ 0 ] (.)

Lifetime (years) [ 25 ] (.)

Turbine

Available head (m) [ 25 ] (.) Nominal power: 92 kW

Design flow rate (L/s) [ 500 ] (.)

Minimum flow ratio (%) [ 50 ] (.) Generator type  AC  DC

Maximum flow ratio (%) [ 150 ] (.)

Efficiency (%) [ 75 ] (.)

Intake pipe

Pipe head loss (%) [ 15 ] (.) Pipe Head Loss Calculator...

Systems to consider

Simulate systems both with and without the hydro turbine

Include the hydro turbine in all simulated systems

Help Cancel OK

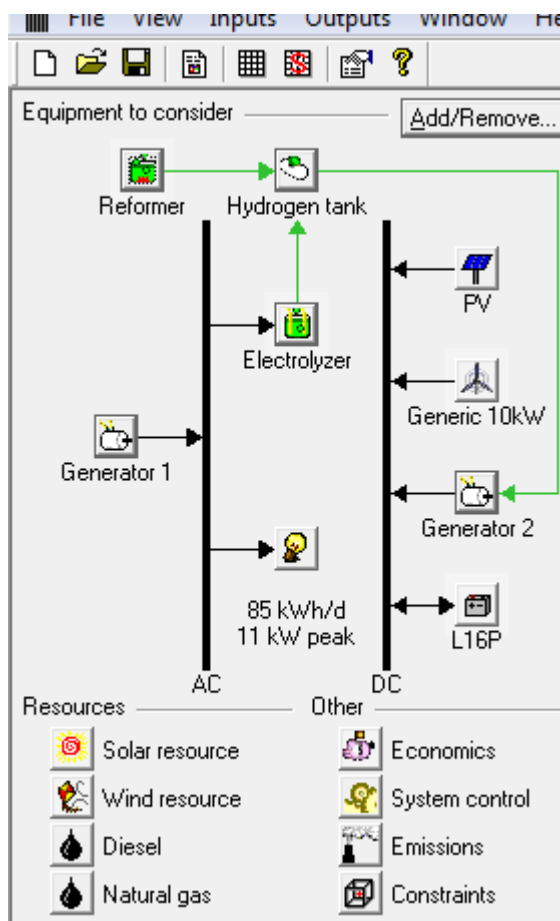
**Εικόνα 1.9** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τα υδροηλεκτρικά

### 1.4.2.6 Fuel cell

Άλλη μια πηγή ενέργειας που το HOMER έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει, με την οποία πάντως δεν θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, είναι η κυψέλες καυσίμου (fuel cell). Για την κυψέλη καυσίμου χρειαζόμαστε μια γεννήτρια η οποία λειτουργεί με υδρογόνο και παράγει συνεχές ρεύμα. Για την τροφοδοσία της κυψέλης καυσίμου με υδρογόνο μπορούμε να έχουμε μια δεξαμενή υδρογόνου, η οποία θα τροφοδοτείται είτε από ένα σύστημα ηλεκτρόλυσης (electrolyzer) είτε από έναν αναμορφωτή (reformer). Το σύστημα ηλεκτρόλυσης παράγει το υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού χρησιμοποιώντας ενέργεια από το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας που έχουμε στο σύστημά μας. Ο αναμορφωτής (reformer) παράγει υδρογόνο από κάποιον υδρογονάνθρακα, όπως το φυσικό αέριο[6].

Μπορούμε, όμως, για την τροφοδοσία της κυψέλης καυσίμου να χρησιμοποιήσουμε υδρογόνο που παράγεται κάπου εκτός του συστήματός μας αγοράζοντάς το.

Στην εικόνα φαίνεται το απλοποιημένο σχέδιο ενός μικροδικτύου που έχει κυψέλη καυσίμου όπως αναπαρίσταται από το HOMER.



**Εικόνα 1.10** Σχέδιο του μικροδικτύου με κυψέλη καυσίμου

Πάμε τώρα να δούμε τι παραμέτρους χρειάζεται να εισάγουμε στο εξοπλισμό που χρησιμοποιούμε για την κυψέλη καυσίμου.



Στο σύστημα ηλεκτρόλυσης , αρχικά εισάγουμε το κόστος του συστήματος και πως αυτό ποικίλει ανάλογα με την ισχύ του. Επίσης, δηλώνουμε τα μεγέθη του συστήματος ηλεκτρόλυσης για τα οποία επιθυμούμε το πρόγραμμα να εκτελέσει προσομοιώσεις . Πέρα από τα οικονομικά δεδομένα που μόλις αναφέραμε, το σύστημα ηλεκτρόλυσης έχει κάποιες ιδιότητες που πρέπει να συμπληρώσουμε. Όπως και σε πολλά άλλα από τα παραπάνω συστήματα που έχουμε αναφερθεί, πρέπει να ορίσουμε την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του συστήματος ηλεκτρόλυσης. Ακόμη εισάγουμε την απόδοση του συστήματος και την ελάχιστη ισχύ με την οποία μπορεί να δουλέψει. Τέλος , δεν πρέπει να ξεχάσουμε να σημειώσουμε αν το σύστημα τροφοδοτείται με συνεχές ή με εναλλασσόμενο ρεύμα.

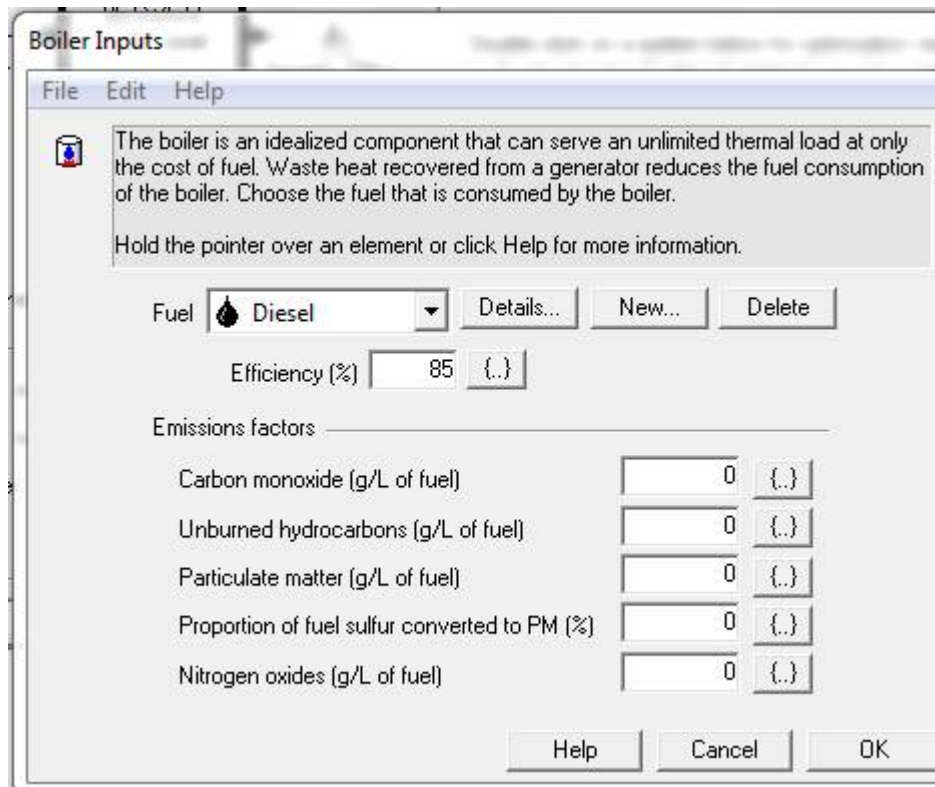
Για την δεξαμενή υδρογόνου , τώρα, πρέπει να εισάγουμε το κόστος και τη σχέση κόστους- μεγέθους, να δηλώσουμε τι μεγέθους δεξαμενές θα χρησιμοποιήσει το HOMER για τις προσομοιώσεις , καθώς και τη διάρκεια ζωής της.

Όσον αφορά τον αναμορφωτή (reformer) πρέπει ορίσουμε τη σχέση κόστους μεγέθους και το μέγεθος των αναμορφωτών που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα. Επιπλέον είναι απαραίτητο να καθορίσουμε το καύσιμο που θα χρησιμοποιεί. Τέλος εισάγουμε τη διάρκεια ζωής του αναμορφωτή και την απόσταση παράδοσης του υδρογόνου[6].

#### **1.4.2.7 Boiler**

Όπως είπαμε στην εισαγωγή στο HOMER εκτός από το πρωταρχικό φορτίο (primary load) μπορούμε να εντάξουμε στο σύστημά μας και ένα θερμικό φορτίο . Το θερμικό φορτίο εξυπηρετείται από τη περισσευούμενη θερμότητα που παράγεται από μια γεννήτρια, από ένα μπόιλερ (λέβητας) ή από το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Μόλις επιλέξουμε για το σύστημά μας ένα θερμικό φορτίο το HOMER αμέσως προσθέτει και ένα boiler (λέβητας). Το πρόγραμμα θεωρεί ότι το boiler μπορεί να εξυπηρετήσει όποιο θερμικό φορτίο δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν οι γεννήτριες. Με άλλα λόγια χρησιμοποιεί το boiler σαν εναλλακτική πηγή θερμότητας όποτε χρειαστεί.

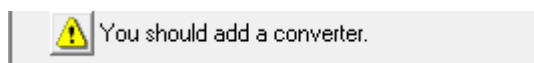
Ενώ ανοίγουμε το παράθυρο στο HOMER για την εισαγωγή των δεδομένων για το boiler , το οποίο φαίνεται στην εικόνα 1.11, το πρώτο χαρακτηριστικό που ρυθμίζουμε είναι το καύσιμο το οποίο θα καταναλώνει. Αμέσως μετά συμπληρώνουμε την απόδοση του boiler, δηλαδή το κλάσμα της ενέργειας του καυσίμου που μετατρέπεται σε θερμότητα. Κατόπιν υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες σχετικούς με τις εκπομπές ρύπων από το boiler. Αυτοί είναι α. η ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται ανά μονάδα καυσίμου β. η ποσότητα άκαυστων υδρογονανθράκων που εκπέμπονται ανά μονάδα καυσίμου γ. η ποσότητα σωματιδιακής ύλης που εκπέμπεται ανά μονάδα καυσίμου δ. το ποσοστό του θείου στο καύσιμο που εκπέμπεται ως σωματιδιακή ύλη και ε. η ποσότητα οξειδίων του αζώτου που εκπέμπονται ανά μονάδα καυσίμου[6].



**Εικόνα 1.11** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το boiler

#### 1.4.2.8 Μετατροπείας

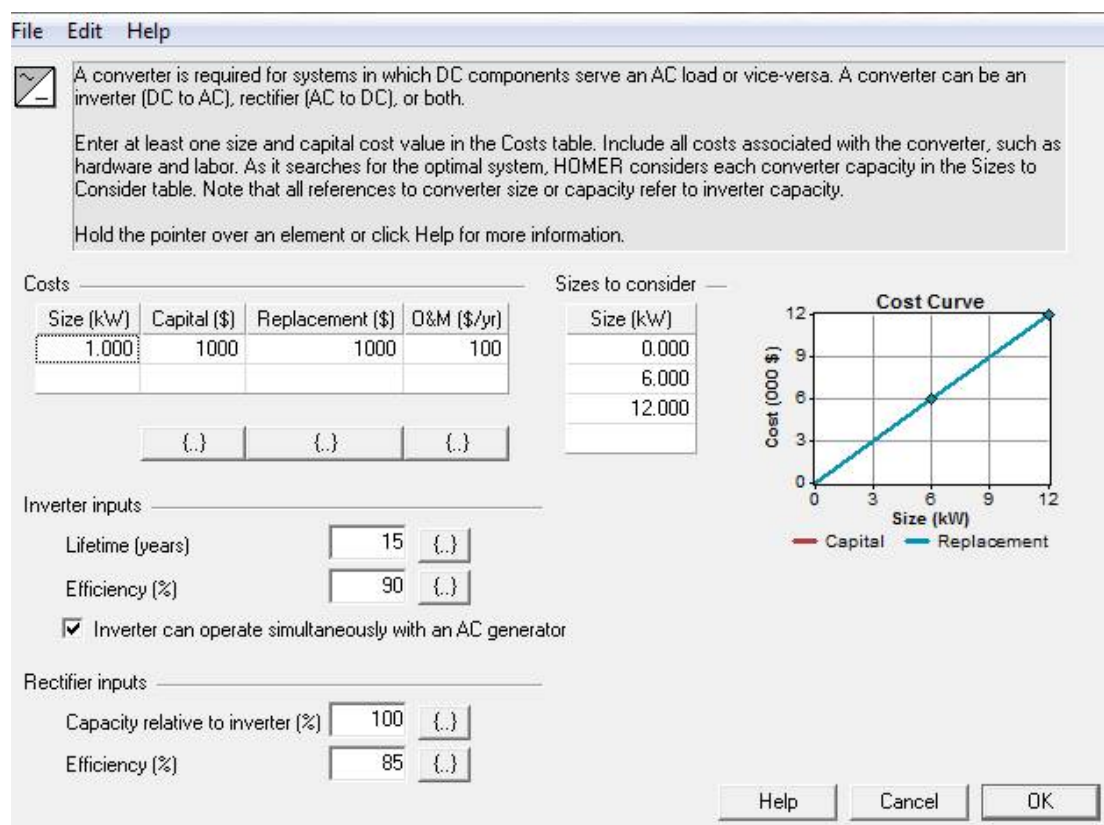
Αφού , λοιπόν , επιλέξουμε όποιες πηγές ενέργειας επιθυμούμε για να αποτελέσουν μέρος του συστήματός μας απομένει ένα ακόμα απαραίτητο εξάρτημα για να είναι ολοκληρωμένο και λειτουργικό το σύστημά μας . Όπως έχουμε προαναφέρει και στην εισαγωγή , είναι απαραίτητος ένας μετατροπείας (converter) . Η παρουσία του είναι αναγκαία για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί το φορτίο από τις πηγές που έχουν έξοδο συνεχές ρεύμα. Το HOMER μας ενημερώνει για αυτήν την παράλειψή μας εμφανίζοντας μια προειδοποίηση, η οποία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.12** Προειδοποίηση από το HOMER για την ανάγκη πρόσθεσης μετατροπείας στο σύστημα μας

Μετά την πρόσθεση ενός μετατροπείας στο σύστημά μας πρέπει να ρυθμίσουμε κάποιες παραμέτρους του στο παράθυρο που ανοίγεται από το πρόγραμμα και απεικονίζεται στην εικόνα 1.13.. Αρχικά , όπως και στα προηγούμενα, ορίζουμε το κόστος ενός μετατροπείας και πως σχετίζεται με την ισχύ του. Επίσης εισάγουμε το κόστος αντικατάστασης και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Στη συνέχεια πρέπει, και εδώ , να ορίσουμε τα μεγέθη των μετατροπέων που θα χρησιμοποιήσει το HOMER στις προσομοιώσεις. Έπειτα έχουμε δυο ξεχωριστές κατηγορίες παραμέτρων ανάλογα με το αν ο μετατροπείας λειτουργεί ως αντιστροφείας (inverter) ή ως ανορθωτής (rectifier). Αν λειτουργεί ως αντιστροφείας πρέπει να σημειώσουμε τη διάρκεια ζωής του και την απόδοσή του , η οποία είναι το ποσοστό της DC

ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε AC ηλεκτρική ενέργεια. Αν, αντίθετα, λειτουργεί ως ανορθωτής πρέπει να ορίσουμε την ονομαστική χωρητικότητα του ανορθωτή σε σχέση με τον αντιστροφέα. Επίσης, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, σημειώνουμε την απόδοση του ανορθωτή, δηλαδή το ποσοστό της AC ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε DC ηλεκτρική ενέργεια.



**Εικόνα 1.13** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τον μετατροπέα

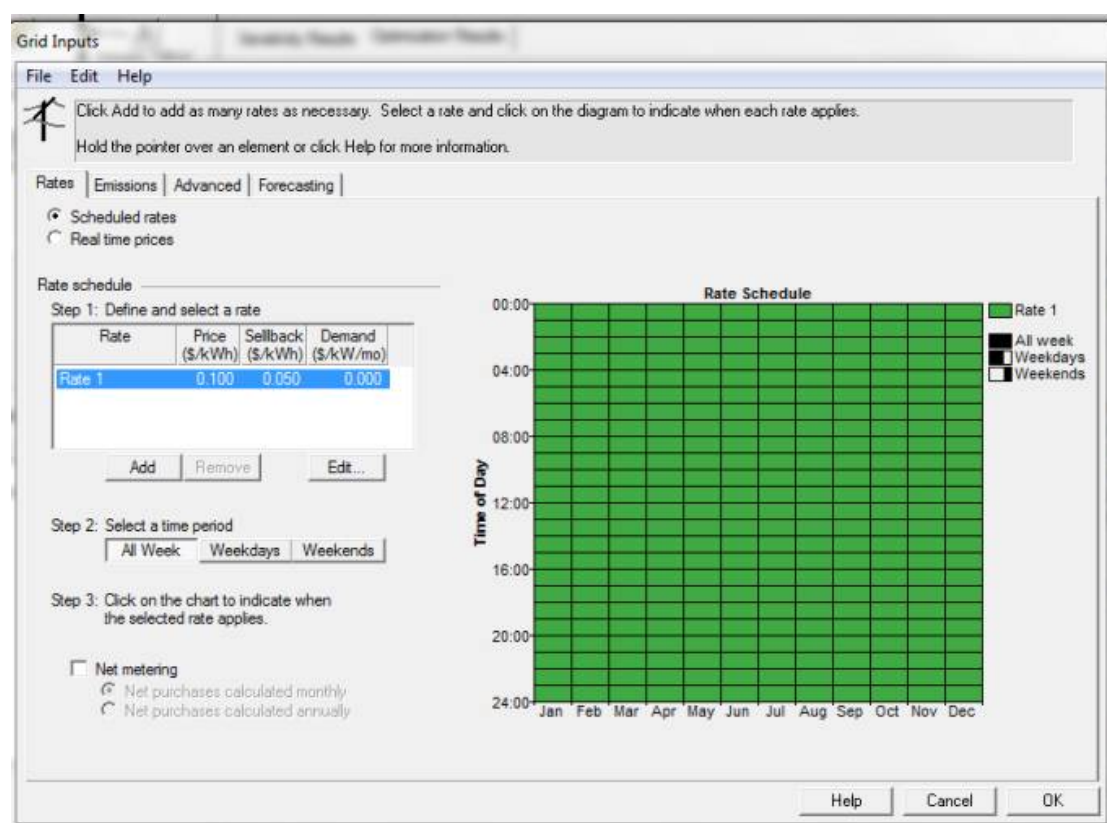
#### 1.4.2.9 Σύνδεση στο δίκτυο

Συνεχίζοντας την παρουσίαση των δυνατοτήτων του προγράμματος, πολύ σημαντικό είναι να καθορίσουμε αν το σύστημά μας θα είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο ή αν θα είναι αυτόνομο. Αν επιλέξουμε το σύστημά μας να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο πρέπει να ρυθμίσουμε κάποιες παραμέτρους του ηλεκτρικού δικτύου. Αρχικά πρέπει να ορίσουμε τα οικονομικά δεδομένα αγοράς και πώλησης ενέργειας στο δίκτυο. Αυτά είναι η τιμή αγοράς της κιλοβατώρας από το δίκτυο, η τιμή που μας πληρώνει η δημόσια υπηρεσία για την πώληση ενέργειας στο δίκτυο και τα μηνιαία τέλη που χρεώνει η δημόσια υπηρεσία τη μηνιαία ζήτηση αιχμής. Αν οι τιμές αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή με την εποχή του χρόνου μπορούμε να ορίσουμε παραπάνω από μια τιμή για κάθε μεταβλητή. Το HOMER μας δίνει τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα χρονοδιάγραμμα για το πότε θα εφαρμόζεται η κάθε τιμή.

Το HOMER μας ζητάει, επίσης, να συμπληρώσουμε και κάποιους παράγοντες για τις εκπομπές αερίων που οφείλονται στην παραγωγή ενέργειας από το δίκτυο. Το HOMER χρησιμοποιεί αυτές τις τιμές για να υπολογίσει τις εκπομπές των ρύπων που

οφείλονται στην ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο και τις εκπομπές των ρύπων που αποφεύχθηκαν λόγω της πώλησης ενέργειας στο δίκτυο.

Πέρα από τα αρχικά οικονομικά δεδομένα που αναφέραμε και σχετίζονται με το δίκτυο, το HOMER μας καλεί να ορίσουμε και δυο πρόσθετες χρεώσεις λόγω της σύνδεσης του συστήματος με το δίκτυο. Αυτές είναι το τέλος που χρεώνεται από τη δημόσια υπηρεσία για να επιτρέψει ένα σύστημα να συνδεθεί στο δίκτυο και το ετήσιο τέλος που χρεώνεται από τη δημόσια υπηρεσία για την παροχή εφεδρικής ισχύος στο σύστημα[6]. Όλα τα παραπάνω τα εισάγουμε που ανοίγεται από το πρόγραμμα και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.14** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για τη σύνδεση του μικροδικτύου με το δίκτυο της ΔΕΗ.

### 1.4.3 Πόροι

Επόμενο μας βήμα στο σχεδιασμό του μοντέλου που θα προσομοιώσει το πρόγραμμα είναι ο καθορισμός των δεδομένων που αφορούν τους πόρους του συστήματος.

#### 1.4.3.1 Άνεμος

Ας ξεκινήσουμε με το αιολικό δυναμικό που είναι ο πόρος για να έχουμε ηλεκτρική ενέργεια από την ανεμογεννήτρια. Το HOMER χρειάζεται τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου κάθε ώρα του έτους για να υπολογίσει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, δηλαδή θέλει 8760 τιμές. Υπάρχουν δυο τρόποι για να εισαχθούν αυτά τα δεδομένα.

Ο πρώτος είναι να δημιουργήσουμε ένα αρχείο ,το οποίο θα περιέχει 8760 τιμές, μια για κάθε ώρα του έτους. Το αρχείο αυτό θα το συνδέσουμε με το HOMER και το πρόγραμμα θα το χρησιμοποιήσει για να κάνει την ανάλυση. Το HOMER θα υπολογίζει από αυτό το μέσο όρο κάθε μήνα και θα τους εμφανίσει σε ένα κατάλληλο πίνακα και σε ένα γράφημα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15.

Ο δεύτερος τρόπος είναι γράψουμε κατευθείαν στη φόρμα του προγράμματος τον μέσο όρο κάθε μήνα . Τότε το HOMER αναλαμβάνει μέσω αυτών των τιμών και τεσσάρων παραμέτρων να δημιουργήσει τις 8760 τιμές για το έτος. Οι τέσσερις αυτές παράμετροι είναι η μεταβλητή Weibull  $k$  , ο παράγοντας αυτοσυσχέτισης (autocorrelation factor) , το ημερήσιο σχέδιο δύναμης ( diurnal pattern strength) και οι ώρες της ημέρας που έχουμε κατά μέσο όρο μέγιστη ταχύτητα ανέμου(hour of peak wind speed). Η μεταβλητή Weibull  $k$  είναι ένα μέτρο της μακροπρόθεσμης κατανομής των ταχυτήτων των ανέμων. Ο παράγοντας αυτοσυσχέτισης είναι ένα μέτρο της από ώρα σε ώρα τυχαιότητας της ταχύτητας του ανέμου. Το ημερήσιο σχέδιο δύναμης (diurnal pattern strength) είναι ένα μέτρο για την ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με την ώρα της ημέρας[6].

Επίσης πρέπει να σημειώσουμε το υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και το ύψος που τοποθετήθηκε το ανεμόμετρο.

The screenshot shows the HOMER software interface for wind resource input. It includes a table of monthly wind speeds, a bar chart titled "Wind Resource" showing monthly wind speeds, and various input parameters.

| Month           | Wind Speed (m/s) |
|-----------------|------------------|
| January         | 4.794            |
| February        | 5.702            |
| March           | 3.338            |
| April           | 4.121            |
| May             | 4.062            |
| June            | 2.664            |
| July            | 3.572            |
| August          | 3.630            |
| September       | 3.594            |
| October         | 4.823            |
| November        | 6.587            |
| December        | 7.195            |
| Annual average: | 4.500            |

Other parameters: Altitude (m above sea level) 0, Anemometer height (m) 10, Variation With Height...  
 Advanced parameters: Weibull k 1.95, Autocorrelation factor 0.893, Diurnal pattern strength 0.283, Hour of peak windspeed 13

Scaled annual average (m/s) 4.5 (.) Plot... Export...

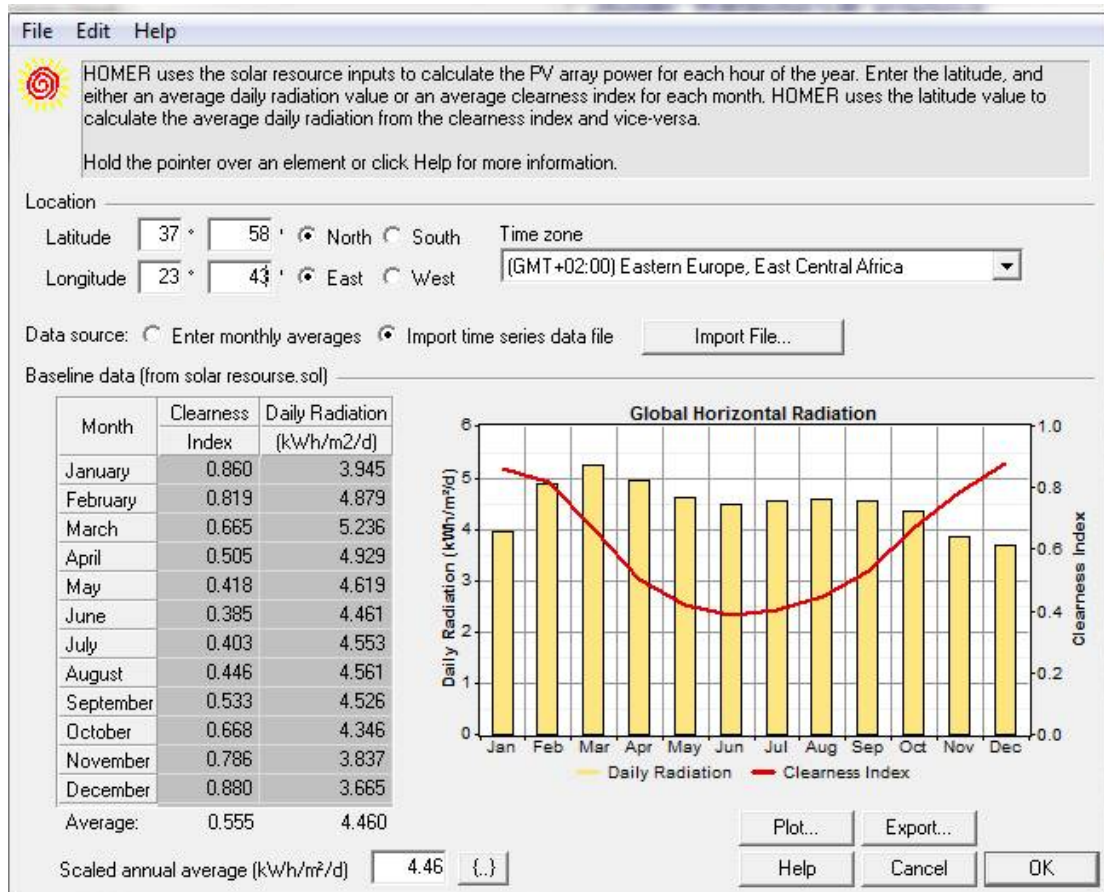
**Εικόνα 1.15** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το αιολικό δυναμικό

### 1.4.3.2 Ήλιος

Μετά το αιολικό δυναμικό θα περάσουμε στην εισαγωγή των δεδομένων για το ηλιακό δυναμικό. Το πρώτο πράγμα που μας ζητάει το HOMER ανοίγοντας τη φόρμα για την εισαγωγή των δεδομένων είναι ο προσδιορισμός του γεωγραφικού πλάτους και μήκους του μέρους που πρόκειται να εγκαταστήσουμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας από τον δείκτη καθαρότητας, ο οποίος θα εξηγήσουμε στη συνέχεια πως ορίζεται. Για τον καλύτερο προσδιορισμό των συνθηκών που επικρατούν πρέπει, επίσης, να εισάγουμε και την ζώνη ώρας της περιοχής.

Ας εξηγήσουμε, τώρα, τι είναι ο δείκτη καθαρότητας και γιατί μας είναι χρήσιμος. Ο δείκτης καθαρότητας είναι ένα μέτρο της καθαρότητας της ατμόσφαιρας. Είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1 και ορίζεται ως η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης διαιρούμενη με την ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα. Μπορούμε, αλλιώς, να πούμε ότι είναι το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μεταφέρεται διαμέσου της ατμόσφαιρας για να χτυπήσει την επιφάνεια της γης. Αν έχουμε ηλιόλουστη μέρα ο δείκτης καθαρότητας παίρνει μεγάλες τιμές ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε περίπτωση συννεφιάς.

Το HOMER χρειάζεται 8760 τιμές, που αντιπροσωπεύουν τη μέση παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια εκφρασμένη σε kWh/ m<sup>2</sup> για κάθε ώρα του έτους, για να πραγματοποιήσει τη προσομοίωση. Τις τιμές αυτές μπορούμε να τις έχουμε αποθηκεύσει σε ένα αρχείο το οποίο θα εισαχθεί στο πρόγραμμα. Υπάρχει, όμως, και η δυνατότητα να εισάγουμε κατευθείαν τους μηνιαίους μέσους όρους της ηλιακής ακτινοβολίας ή του δείκτη καθαρότητας στη κατάλληλη φόρμα που έχει το πρόγραμμα. Δεν πρέπει να συμπληρώσουμε και τους δυο, το HOMER υπολογίζει τον έναν από τον άλλον μέσω του γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Έχοντας το πρόγραμμα το μέσο όρο κάθε μήνα για την ηλιακή ακτινοβολία συνθέτει, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο, το σύνολο των 8760 τιμών που χρειάζεται για να κάνει την ανάλυση του[6].

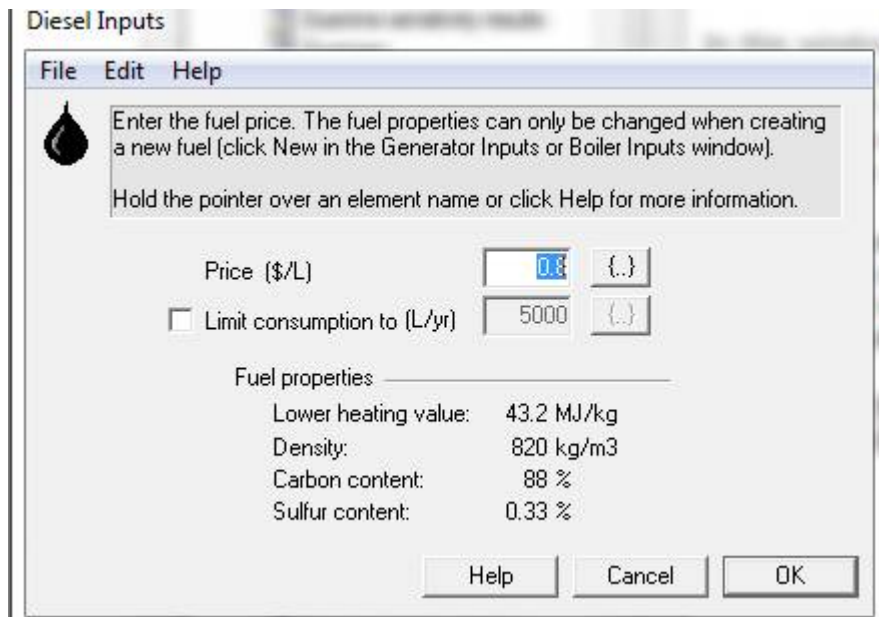


**Εικόνα 1.16** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το ηλιακό δυναμικό

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα το HOMER έχει έναν πίνακα που περιέχει το μέσο όρο κάθε μήνα της ηλιακής ακτινοβολίας και του δείκτη καθαρότητας. Τα δεδομένα αυτά τα αποτυπώνει και σε ένα σχεδιάγραμμα για την καλύτερη παρουσίασή τους.

### 1.4.3.3 Καύσιμα

Συνεχίζοντας την αναφορά μας στους πόρους του συστήματος θα μιλήσουμε για το καύσιμο που χρησιμοποιεί η γεννήτριά μας. Όταν ορίσαμε τις παραμέτρους της γεννήτριας επιλέξαμε το καύσιμο που επιθυμούμε να καταναλώνει. Η επιλογή μπορεί να γίνει μεταξύ από πετρέλαιο (diesel), αιθανόλη (ethanol), βενζίνη (gasoline), μεθανόλη (methanol), φυσικό αέριο (natural gas) και προπάνιο (propane). Υπάρχει, επίσης, η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε βιοαέριο αλλά θα αναφερθούμε σε αυτήν την περίπτωση στη συνέχεια γιατί χρειάζεται διαφορετική αντιμετώπιση. Αν, για παράδειγμα, η γεννήτρια δουλεύει με πετρέλαιο το μόνο που έχουμε να κάνουμε είναι να ορίσουμε την τιμή του πετρελαίου ανά λίτρο και το όριο κατανάλωσης σε ένα χρόνο. Το HOMER μας πληροφορεί, κατά την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων, και για κάποια χαρακτηριστικά του καυσίμου που χρησιμοποιούμε, όπως την πυκνότητα και την περιεκτικότητα σε άνθρακα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.17. Παρόμοια λειτουργούμε και στην περίπτωση που η γεννήτρια χρησιμοποιεί κάποιο από τα άλλα καύσιμα που αναφέραμε.



**Εικόνα 1.17** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων καυσίμου

Αναφέραμε παραπάνω τη δυνατότητα που έχει το HOMER να χρησιμοποιήσει στις προσομιώσεις του μια γεννήτρια που καταναλώνει βιοαέριο. Το πρόγραμμα θεωρεί ότι το βιοαέριο παράγεται από έναν αεριοποιητή, ο οποίος τροφοδοτείται με βιομάζα ως πρώτη ύλη. Το πρόγραμμα, λοιπόν, δέχεται τη διαθεσιμότητα βιομάζας για ένα ολόκληρο χρόνο και υπολογίζει το βιοαέριο που παράγεται.

Όπως και τις προηγούμενες φορές, που χρειάστηκε να εισάγουμε δεδομένα για ένα έτος, υπάρχουν δυο τρόποι να το κάνουμε. Είτε δημιουργώντας ένα αρχείο που περιέχει 8760 τιμές είτε γράφοντας κατευθείαν τον ημερήσιο μέσο όρο κάθε μήνα (τόνοι / ημέρα) στον πίνακα του προγράμματος και αφήνοντας αυτό να συνθέσει τις τιμές για κάθε ώρα του έτους. Το HOMER εμφανίζει σε ένα πίνακα τον μέσο όρο των ημερών κάθε μήνα και δημιουργεί ένα γράφημα με αυτά τα δεδομένα.

Αφού εισάγουμε τα δεδομένα για τη διαθεσιμότητα της βιομάζας πρέπει να εισάγουμε κάποιες ιδιότητες της βιομάζας. Πρώτα από όλα σημειώνουμε τη μέση τιμή της βιομάζας ανά τόνο. Συνεχίζουμε συμπληρώνοντας την περιεκτικότητα της βιομάζας σε άνθρακα. Πολύ σημαντική είναι η αναλογία αεριοποίησης, που είναι το κλάσμα της ποσότητας του βιοαερίου προς την ποσότητα της βιομάζας που καταναλώνεται στον αεριοποιητή. Τέλος εισάγουμε το ενεργειακό περιεχόμενο (LHV of biogas) του βιοαερίου που παράγεται στον αεριοποιητή[6].



**Biomass Resource Inputs**

File Edit Help

The biomass resource is the source of biogas (gasified biomass) for generator fuel. Enter the average monthly availability of biomass feedstock and its price per tonne. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

| Month           | Available Biomass (tonnes/day) |
|-----------------|--------------------------------|
| January         | 106.000                        |
| February        | 234.000                        |
| March           | 123.000                        |
| April           | 245.000                        |
| May             | 124.000                        |
| June            | 179.000                        |
| July            | 193.000                        |
| August          | 231.000                        |
| September       | 98.000                         |
| October         | 134.000                        |
| November        | 181.000                        |
| December        | 243.000                        |
| Annual average: | 173.734                        |

**Biomass Resource**

Properties

Average price (\$/t)

Carbon content (%)

Gasification ratio (kg/kg)

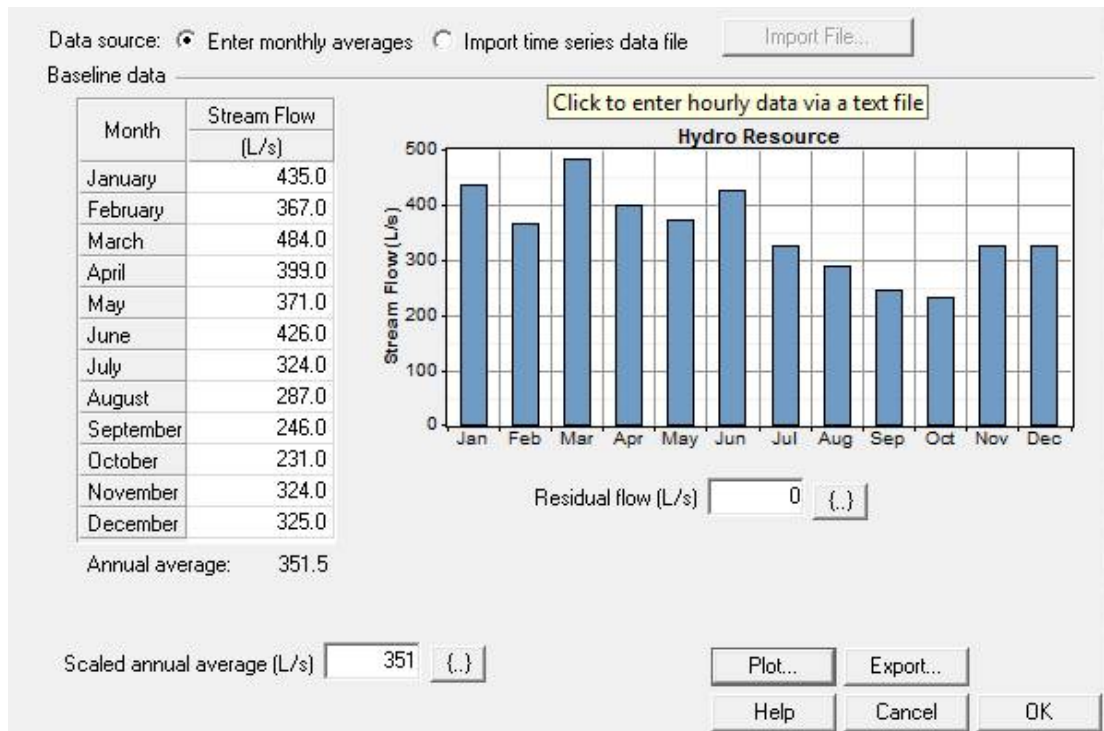
LHV of biogas (MJ/kg)

Scaled annual average (t/d)

**Εικόνα 1.18** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων βιομάζας

#### 1.4.3.4 Νερό

Καθώς προχωράμε στην παρουσίαση των πόρων που χρειάζονται τα συστήματα που μπορεί να μοντελοποιήσει το HOMER φτάνουμε στο νερό και στη δύναμή του, που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροστρόβιλους. Εδώ, πάλι, πρέπει να εισάγουμε 8760 τιμές στο HOMER οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη μέση ροή νερού, εκφραζόμενη σε λίτρα ανά δευτερόλεπτο, για κάθε ώρα του έτους. Όπως έχουμε πολλάκις στα προηγούμενα αυτό το κάνουμε είτε εισάγοντας τις τιμές από ένα αρχείο είτε γράφοντας κατευθείαν στο παράθυρο του προγράμματος τη μέση ροή νερού για κάθε μήνα. Στην εικόνα 1.19 φαίνεται η φόρμα που εισάγουμε τα δεδομένα για το νερό



**Εικόνα 1.19** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων για το νερό

#### 1.4.3.5 Αλλαγή κλίμακας δεδομένων

Πριν ολοκληρώσουμε την παρουσίαση των δεδομένων των πόρων ενός συστήματος δεν πρέπει να παραλείψουμε να πούμε ότι το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να αλλάξει την κλίμακα των δεδομένων και να τα χρησιμοποιήσει στη συνέχεια.

Σε όλες τις προηγούμενες φορές, που κλιθήκαμε να εισάγουμε δεδομένα για κάθε ώρα ενός έτους, παρατηρούμε ότι το HOMER έχει ένα πεδίο που αναγράφεται η τιμή του «κλιμακούμενου ετήσιου μέσου όρου», τον οποίο αρχικά τον έχει εξισώσει με τον ετήσιο μέσο όρο που προκύπτει από τα δεδομένα μας .

Για να αλλάξει κλίμακα στα δεδομένα το HOMER πολλαπλασιάζει κάθε μια από τις 8760 τιμές με έναν παράγοντα. Οι πολλαπλασιασμένες τιμές έχουν ,τόρα, μέση ετήσια τιμή ίση με την τιμή που έχουμε ορίσει στο πεδίο κλιμακούμενος ετήσιος μέσος όρος. Η τιμή του παράγοντα αυτού προκύπτει διαιρώντας τον κλιμακούμενο μέσο όρο με τον αρχικό μέσο όρο των δεδομένων. Τα δεδομένα ,έχοντας αλλάξει κλίμακα , διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά που είχαν και τα βασικά δεδομένα αλλά ίσως διαφέρουν σε μέγεθος. Όπως προείπαμε αρχικά το HOMER ορίζει τον κλιμακούμενο μέσο όρο ίσο με τον αρχικό μέσο όρο , δίνοντάς μας την δυνατότητα να τον αλλάξουμε αν το επιθυμούμε. Όταν αυτές οι δυο τιμές είναι ίσες τα κλιμακούμενα δεδομένα και τα βασικά ( αρχικά) δεδομένα είναι , προφανώς , ίδια[6].

Δυο λόγοι υπάρχουν ώστε το HOMER να χρησιμοποιήσει έναν κλιμακούμενο μέσο όρο είτε για να γίνει κάποια μετατροπή μονάδος είτε για να εκτελέσει μια ανάλυση ευαισθησίας[5].

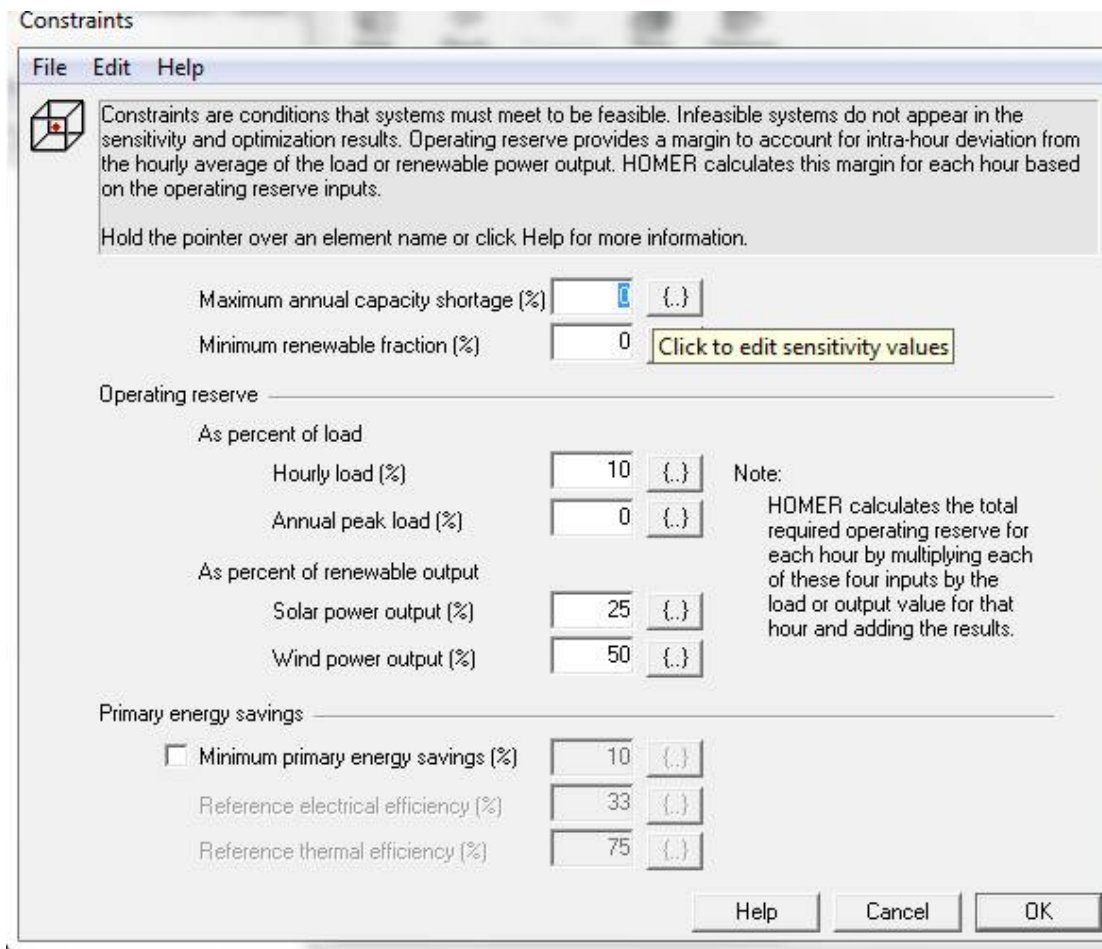
#### 1.4.4 Περιορισμοί

Συνεχίζοντας την παρουσίασή μας για το HOMER καλό είναι να αναφερθούμε σε κάποιους περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα και πως αυτοί ορίζονται. Προφανώς, το HOMER απορρίπτει τα συστήματα που δεν ικανοποιούν αυτούς τους περιορισμούς και δεν τα περιλαμβάνει στα αποτελέσματα . Το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να ορίσουμε εμείς αυτούς τους περιορισμούς πατώντας το σχετικό εικονίδιο και εμφανίζοντας τη φόρμα που απεικονίζεται στην εικόνα 1.20.

Πρώτα από όλα πρέπει να ορίσουμε τη μέγιστη ετήσια έλλειψη παραγωγικής ικανότητας, η οποία είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του κλάσματος έλλειψης παραγωγικής ικανότητας. Το κλάσμα αυτό είναι η συνολική έλλειψη παραγωγικής ικανότητας διαιρούμενη από το συνολικό ετήσιο ηλεκτρικό φορτίο. Στη συνέχεια συμπληρώνουμε την ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της ετήσιας αναλογίας της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε σχέση με τη συνολική παραγωγή ενέργειας.

Έπειτα, βλέπουμε ότι υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί που σχετίζονται με το αποθεματικό λειτουργίας, το οποίο είναι η πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα λειτουργίας που εξασφαλίζει την αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και αν το φορτίο αυξηθεί απότομα ή παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μειωθεί απότομα. Το HOMER , λοιπόν, για να ορίσει το απαραίτητο αποθεματικό λειτουργίας χρησιμοποιεί τέσσερις εισόδους, δυο που σχετίζονται με το ηλεκτρικό φορτίο και δυο που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το συνολικό απαιτούμενο αποθεματικό είναι το άθροισμα των τεσσάρων τιμών που προκύπτουν από αυτές τις τέσσερις εισόδους. Έτσι, σημειώνουμε το ποσοστό του ωριαίου μέσου φορτίου που θέλουμε να προστεθεί στο αποθεματικό λειτουργίας. Ακόμη σε ό,τι έχει να κάνει με το φορτίο ορίζουμε το ποσοστό της ετήσιας αιχμής φορτίου που θέλουμε να προσθέσουμε στο αποθεματικό λειτουργίας. Όσον αφορά τις εισόδους που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές , οι τιμές που προστεθούν στο αποθεματικό λειτουργίας είναι ένα ποσοστό της εξόδου της ανεμογεννήτριας και ένα ποσοστό της εξόδου του φωτοβολταϊκού .

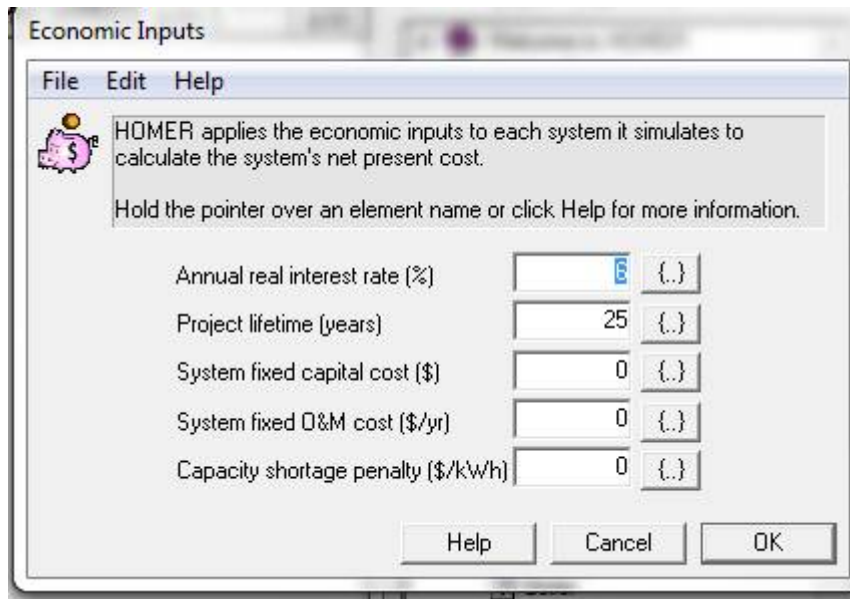
Στο HOMER μπορούμε να ορίσουμε και όρια στις εκπομπές κάποιων αερίων, τα οποία όρια αν ξεπεραστούν υπάρχει κάποιο πρόστιμο. Τα αέρια αυτά είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα, οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, τη σωματιδιακή ύλη , το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου[6].



**Εικόνα 1.20** Παράθυρο εισαγωγής περιορισμών

### 1.4.5 Οικονομικά δεδομένα

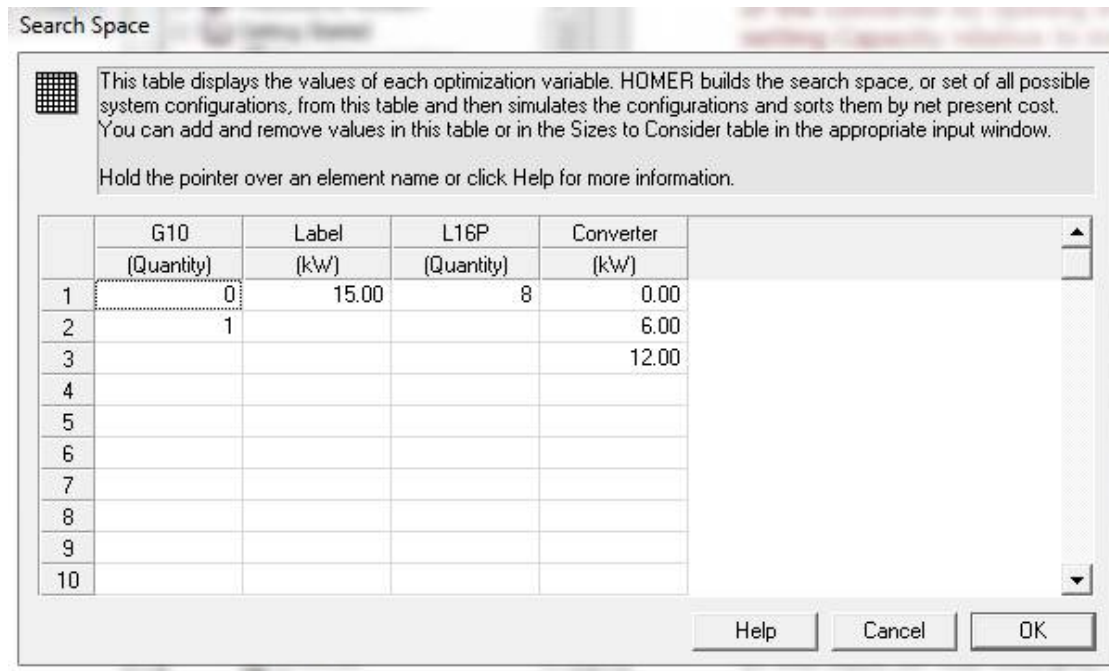
Τέλος , πριν προχωρήσουμε στην εκτέλεση προσομοίωσης για ένα σύστημα, πρέπει να εισάγουμε κάποια δεδομένα για οικονομικούς παράγοντες τα οποία θα χρησιμοποιήσει το HOMER για τον υπολογισμό άλλων οικονομικών παραγόντων οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Οι οικονομικές μεταβλητές που πρέπει να προσδιορίσουμε είναι το ετήσιο πραγματικό επιτόκιο, η διάρκεια ζωής του συστήματος, το σταθερό κόστος του συστήματος ανεξαρτήτου μεγέθους , το σταθερό κόστος για συντήρηση και λειτουργία του συστήματος ανεξαρτήτου μεγέθους και το πρόστιμο για έλλειψη παραγωγικής ικανότητας.



Εικόνα 1.21 Παράθυρο εισαγωγής οικονομικών δεδομένων

## 1.5 Παράδειγμα προσομοίωσης

Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε ένα εικονικό σύστημα , ίδιο με αυτό που χρησιμοποιεί και το εγχειρίδιο του προγράμματος, για να δείξουμε πως εκτελεί το HOMER μια προσομοίωση ενός συστήματος και τι δεδομένα μας δίνει για τη βέλτιστη διαμόρφωσή του. Το σύστημα θα αποτελείται από μια γεννήτρια 15 kW , μια ανεμογεννήτρια 10kW , 8 μπαταρίες και έναν μετατροπέα η ισχύς οποίου θα αλλάζει για να εξετάσουμε ποια είναι η βέλτιστη. Όλα αυτά τα χρησιμοποιούμε για την εξυπηρέτηση ενός πρωταρχικού φορτίου που έχει χαρακτηριστικά 85 kWh/ d και αιχμή 11 kW.Πριν προχωρήσουμε στην εκτέλεση της προσομοίωσης μπορούμε πατώντας το εικονίδιο «search space» να δούμε τον πίνακα που απεικονίζει όλες τις μεταβλητές βελτιστοποίησης, τις μεταβλητές δηλαδή που καθορίζουν πόσες περιπτώσεις θα εξετάσουμε , τις οποίες εισάγαμε όταν ρυθμίζαμε τις παραμέτρους για κάθε στοιχείο. Ο πίνακας αυτός παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



**Εικόνα 1.22** Πίνακας παρουσίασης μεταβλητών βελτιστοποίησης

Το HOMER θα προσομοιώσει το σύστημα για όλους τους συνδυασμούς των μεταβλητών που φαίνονται παραπάνω. Δηλαδή θα εκτελέσει έξι προσομοιώσεις,  $2 \times 1 \times 1 \times 3 = 6$ . Από αυτούς θα απορρίψει εκείνους που δεν θα μπορούν να εξυπηρετήσουν το φορτίο ή δεν ικανοποιούν κάποιους από τους περιορισμούς.

Πατώντας «calculate» ξεκινά η προσομοίωση και ύστερα από λίγα δευτερόλεπτα έχουμε τα αποτελέσματα τα οποία φαίνονται στην εικόνα 1.23.

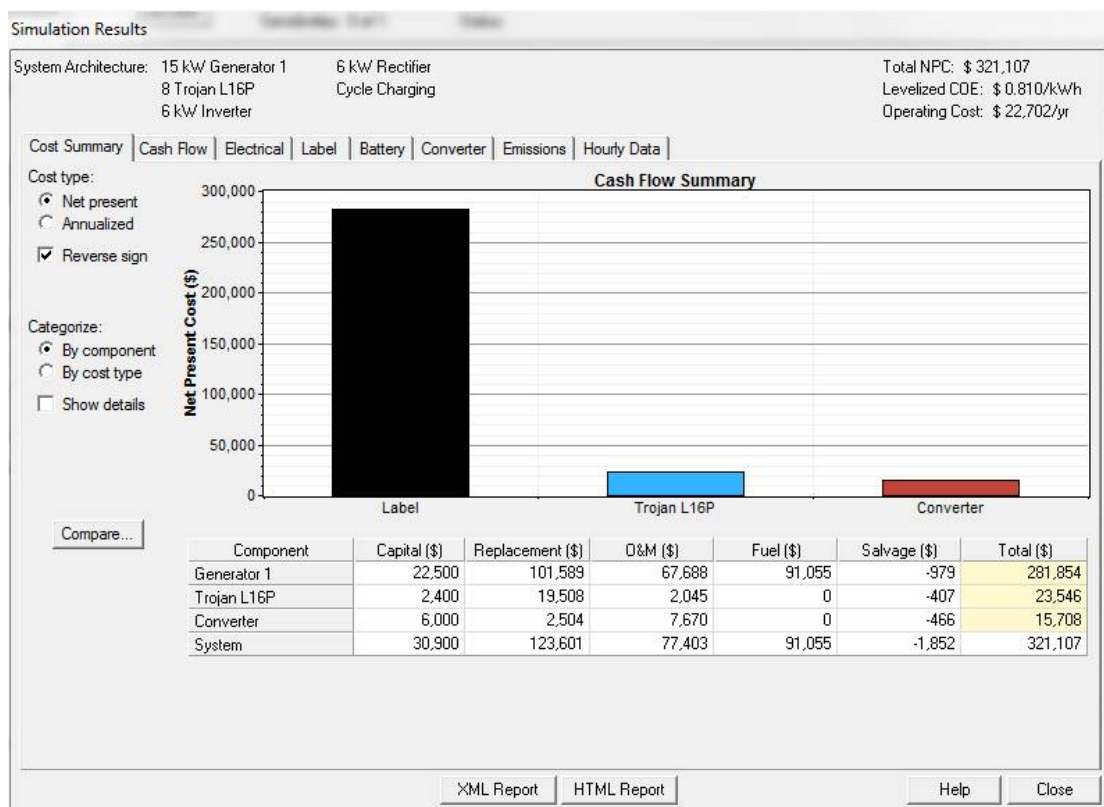
| Sensitivity Results                                    |     | Optimization Results |      |            |                 |                        |            |              |            |            |             |
|--|-----|----------------------|------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|
| Double click on a system below for simulation results. |     |                      |      |            |                 |                        |            |              |            |            |             |
| Categorized Overall                                    |     |                      |      |            |                 |                        |            |              |            |            |             |
|  | G10 | Label (kW)           | L16P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) |
|  |     | 15                   | 8    | 6          | \$ 30,900       | 22,702                 | \$ 321,107 | 0.810        | 0.00       | 17,807     | 7,060       |
|  |     | 15                   | 8    | 12         | \$ 36,900       | 23,438                 | \$ 336,519 | 0.849        | 0.00       | 17,788     | 7,052       |
|  | 1   | 15                   | 8    | 6          | \$ 60,900       | 21,648                 | \$ 337,630 | 0.851        | 0.20       | 15,799     | 6,410       |
|  | 1   | 15                   | 8    | 12         | \$ 66,900       | 22,307                 | \$ 352,052 | 0.888        | 0.21       | 15,711     | 6,372       |

**Εικόνα 1.23** Αποτελέσματα προσομοίωσης

Βλέπουμε ότι στον παραπάνω πίνακα το HOMER εμφανίζει μια λίστα με τις τέσσερις διαμορφώσεις του συστήματος που είναι εφικτές, κατατάσσοντάς τες από την πιο αποδοτική στην λιγότερο αποδοτική. Η αποδοτικότητα των συστημάτων ελέγχεται με βάση το καθαρό τρέχον κόστος (NPC). Πέρα από αυτό όμως, στον πίνακα εμφανίζονται και άλλα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος. Βλέπουμε ότι υπάρχει το αρχικό κεφάλαιο που χρησιμοποιήθηκε, το μέσο κόστος λειτουργίας ανά έτος, το κόστος ενέργεια, δηλαδή το μέσο κόστος για κάθε κιλοβατώρα που παράγει το σύστημα, τα λίτρα πετρελαίου που χρειάστηκαν και οι ώρες που δούλεψε η γεννήτρια. Παρατηρούμε ότι για το παρόν σύστημα η βέλτιστη διαμόρφωση περιλαμβάνει τη γεννήτρια, τις μπαταρίες και μετατροπέα 6 kW.

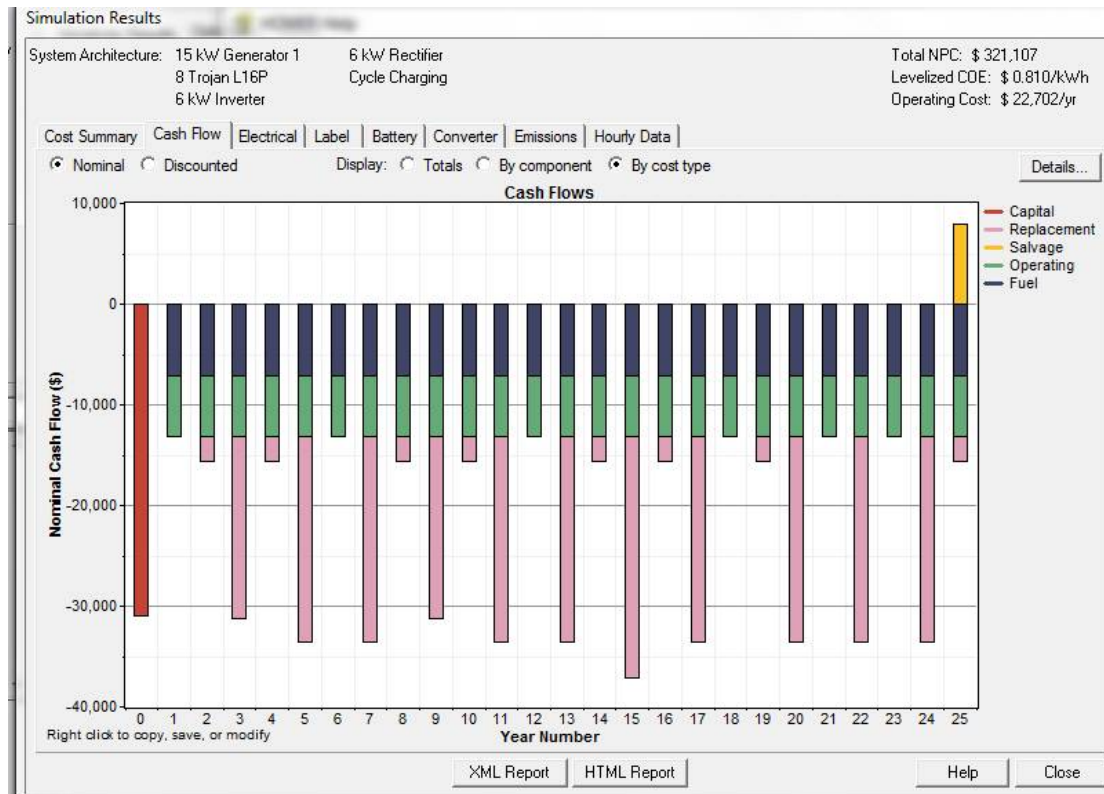
### 1.5.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Μπορούμε, αν το επιθυμούμε, να δούμε τα αποτελέσματα του κάθε σχεδιασμού του συστήματος με περισσότερη λεπτομέρεια κάνοντας διπλό κλικ στη γραμμή του συστήματος που μας ενδιαφέρει. Στην προκειμένη περίπτωση θα εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά του βέλτιστου συστήματος. Ανοίγει, λοιπόν, ένα παράθυρο, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 1.24, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, στην κορυφή του οποίου εμφανίζονται τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα και τρία αποτελέσματα: το συνολικό τρέχον καθαρό κόστος, το κόστος ενέργειας και το κόστος λειτουργίας. Πιο κάτω βλέπουμε μια σειρά από καρτέλες, η πρώτη εκ των οποίων έχει λεπτομέρειες για το συνολικό κόστος. Το HOMER έχει δημιουργήσει ένα γράφημα για να δείξει πόσα χρήματα ξοδεύτηκαν σε κάθε κομμάτι του εξοπλισμού και έναν πίνακα εξηγεί με περισσότερη λεπτομέρεια που οφείλονται τα έξοδα του συστήματός μας. Η παρουσίαση των δεδομένων αυτών μπορεί να γίνει είτε με βάση το καθαρό τρέχον κόστος είτε με βάση το ετησιοποιημένο κόστος.



Εικόνα 1.24 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το συνολικό κόστος

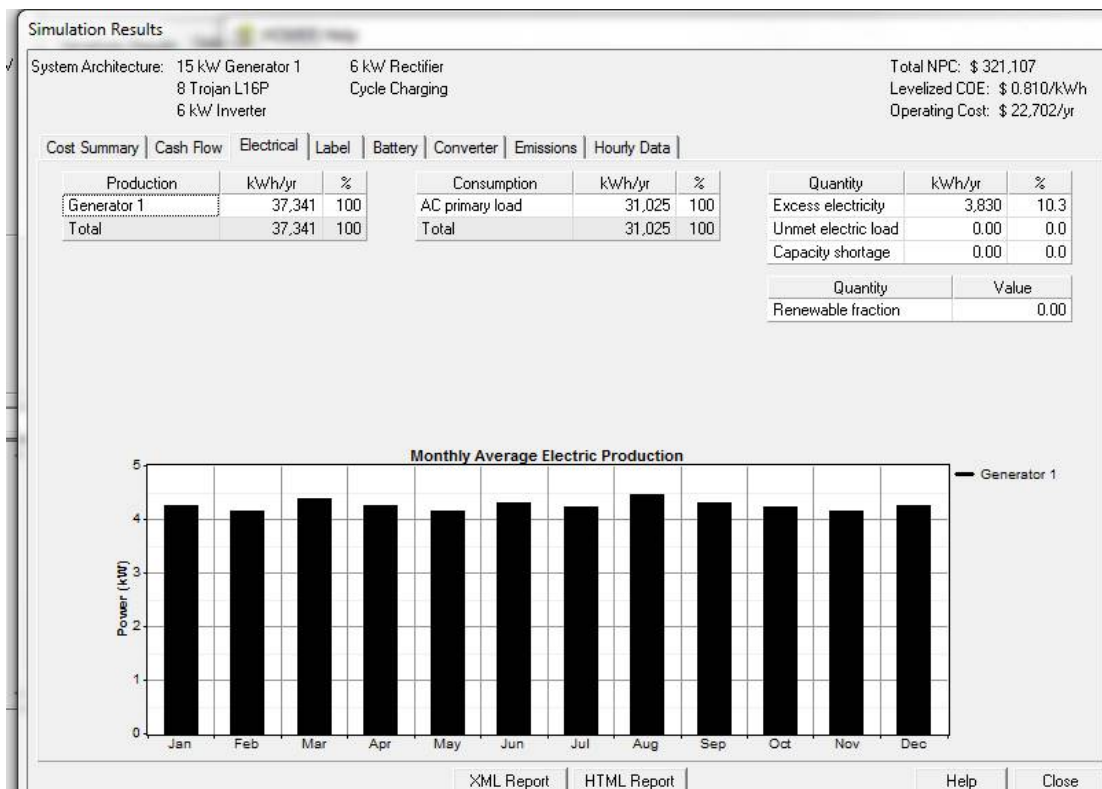
Η επόμενη καρτέλα, που παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα, δείχνει τη ροή των χρημάτων χρόνο με το χρόνο και έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε να δούμε που καταναλώνονται αυτά τα ποσά (γεννήτρια, μπαταρίες, μετατροπέας) ή το είδος των εξόδων ( αρχικό κεφάλαιο, συντήρηση κ.α.) .



**Εικόνα 1.25** Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις ταμειακές ροές

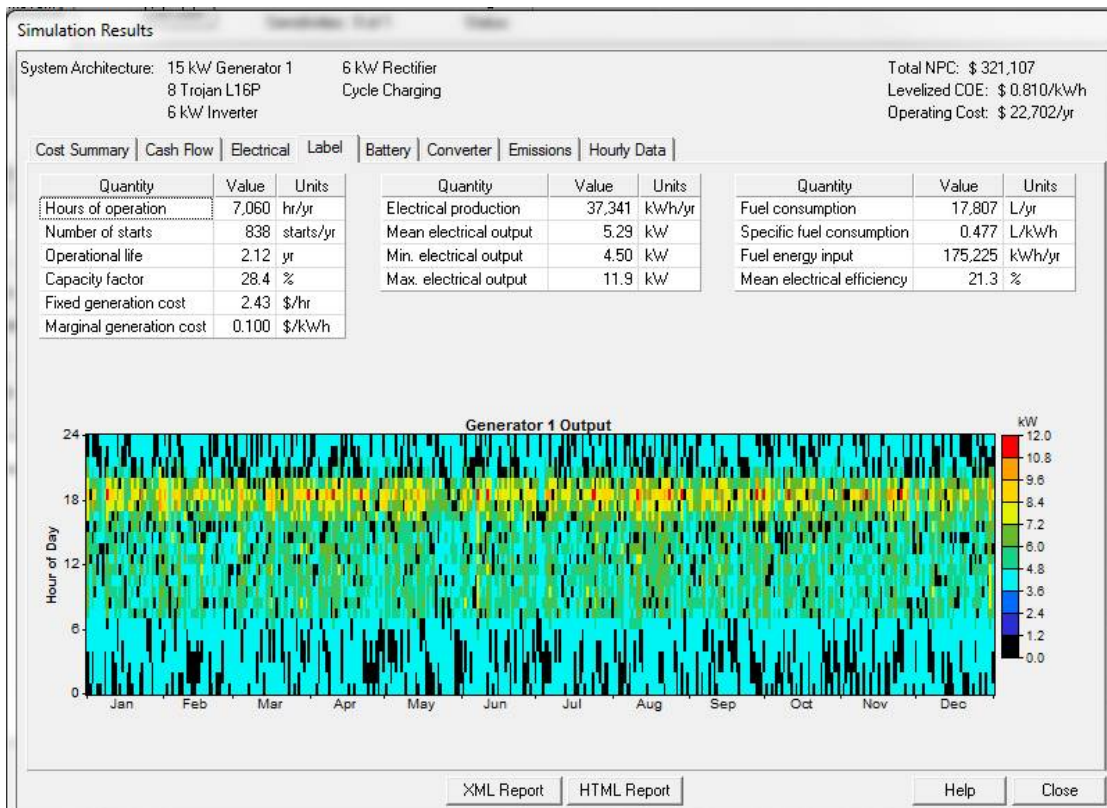
Ακολουθεί η «ηλεκτρική ταμπέλα» στην οποία παρουσιάζονται λεπτομέρειες για την παραγωγή και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.26. Στη συγκεκριμένη καρτέλα βλέπουμε τη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από όλες τις πηγές, την αναλογία της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές σε σχέση με τη συνολική παραγωγή (στη προκειμένη περίπτωση είναι μηδέν καθώς το βέλτιστο σύστημα δεν περιέχει ανανεώσιμες πηγές), το AC φορτίο που εξυπηρετείται, το DC φορτίο που εξυπηρετείται, την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, το φορτίο που δεν εξυπηρετείται και το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας.





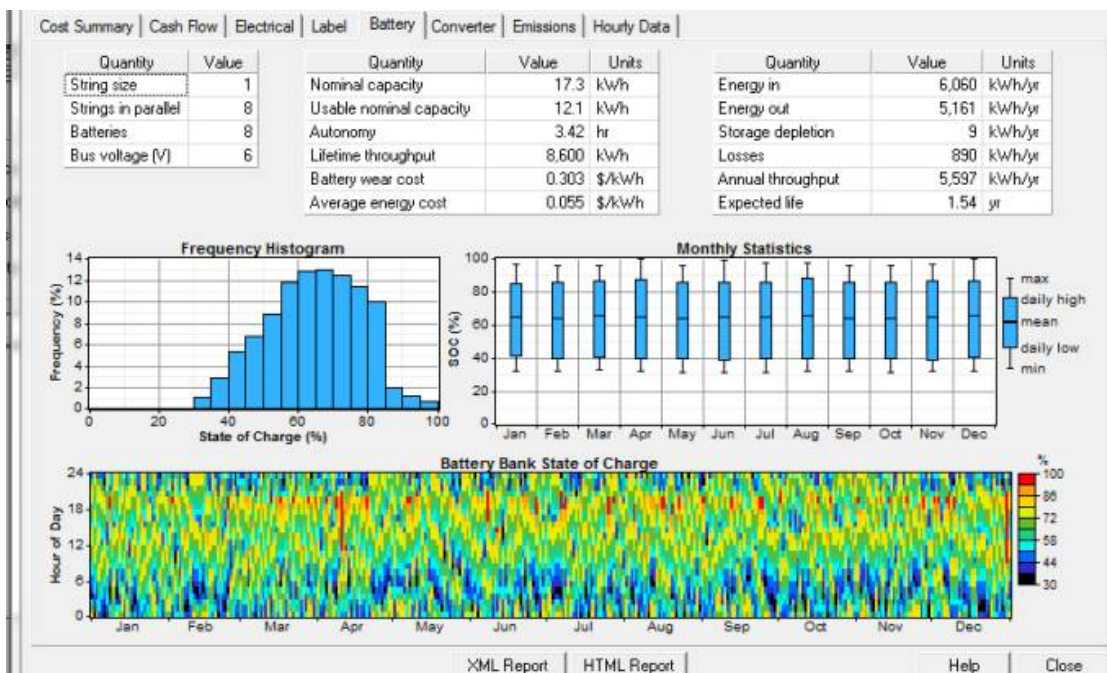
**Εικόνα 1.26** Ηλεκτρικά αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι επόμενες καρτέλες έχουν πληροφορίες για την λειτουργία του κάθε κομματιού του εξοπλισμού μας. Στη προκειμένη περίπτωση υπάρχει μια καρτέλα για τη γεννήτρια στην οποία υπάρχουν πολλών ειδών πληροφορίες για τη λειτουργία της κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Μπορούμε να δούμε τις ώρες λειτουργίας της ανά έτος, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος, την αιχμή της ισχύος, την κατανάλωση καυσίμου και διάφορες άλλες χρήσιμες λεπτομέρειες που μας βοηθούν στην κατανόηση της λειτουργίας της και στην προσπάθεια μας να ελέγξουμε τα οικονομικά στοιχεία του συστήματός μας. Ακόμη το HOMER χρησιμοποιεί ένα γράφημα που δείχνει την ισχύ της γεννήτριας κατά τη διάρκεια ενός έτους και μέσα στην ημέρα. Όλα αυτά τα βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα.



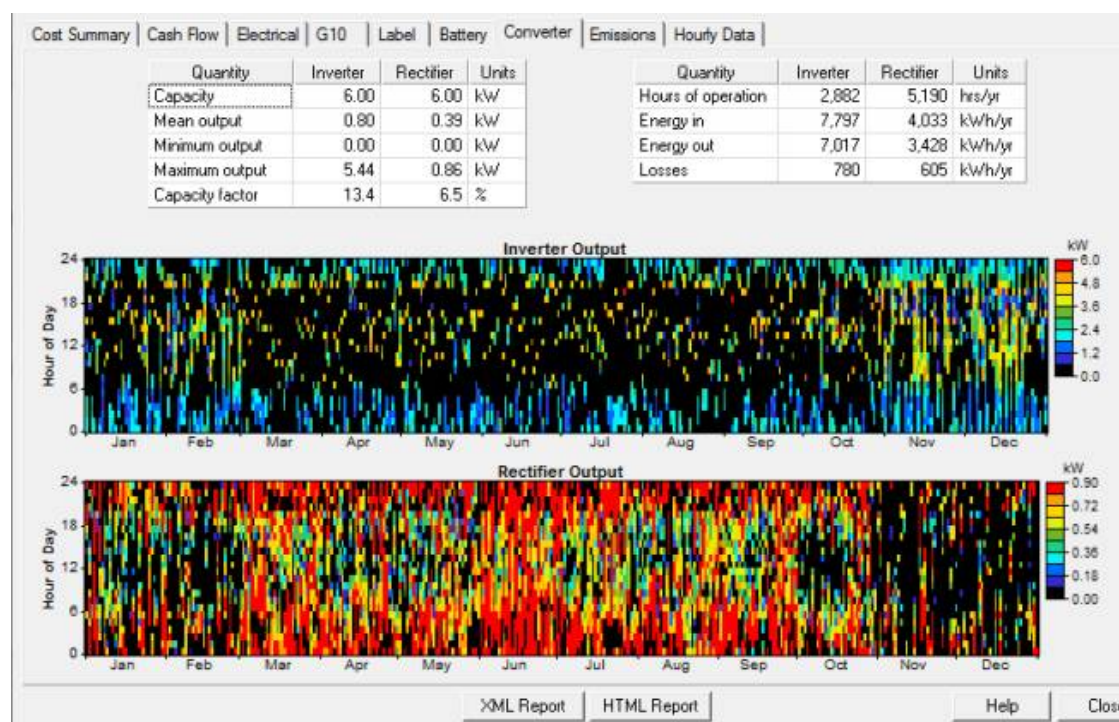
Εικόνα 1.27 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τη γεννήτρια

Έπειτα ακολουθεί η καρτέλα που έχει τις πληροφορίες για τις μπαταρίες που χρησιμοποιήσαμε . Εδώ, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.28, βλέπουμε την αυτονομία των μπαταριών , τη διάρκεια ζωής τους, την ετήσια διακίνηση ενέργειας , τις απώλειες που είχαν , το μέσο κόστος ενέργειας καθώς και διαγράμματα για την κατάσταση φόρτισής τους .



Εικόνα 1.28 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις μπαταρίες

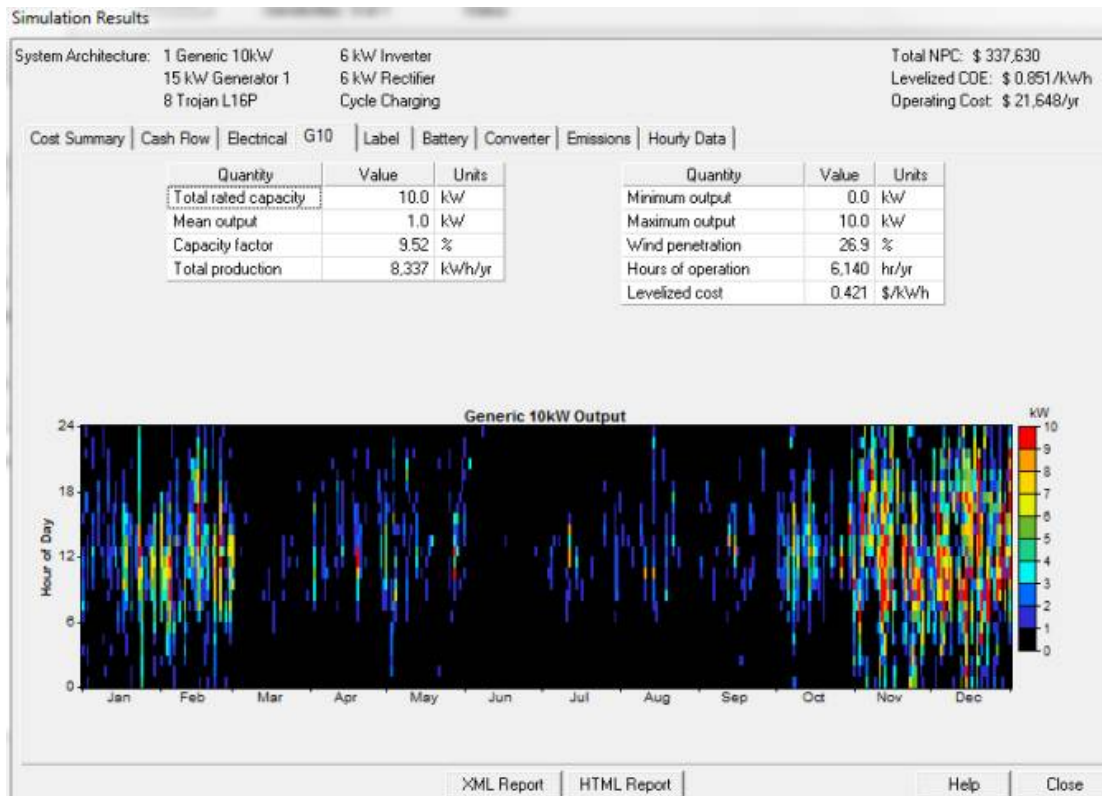
Τελευταίο κομμάτι του συστήματός μας ,που δεν αναφερθήκαμε , είναι ο μετατροπέας. Η επόμενη καρτέλα ,λοιπόν, περιέχει λεπτομέρειες για τη λειτουργία του μετατροπέα όπως τη μέση ισχύ εξόδου, τις ώρες λειτουργίας σαν αντιστροφέας και σαν ανορθωτής , την ενέργεια που διακίνησε και τις απώλειες που είχε. Ακόμη ,όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.29, το HOMER χρησιμοποιεί και δυο διαγράμματα για να παρουσιάσει καλύτερα την λειτουργία του μετατροπέα.



**Εικόνα 1.29** Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον μετατροπέα

Η βέλτιστη διαμόρφωση αυτού του συστήματος δεν έχει στη σύνθεση του μια ανεμογεννήτρια ή φωτοβολταϊκά πλαίσια ή υδροηλεκτρικά. Όπως γίνεται αντιληπτό αν είχαμε και άλλον εξοπλισμό στο σύστημά μας θα υπήρχαν και για αυτόν αντίστοιχες λεπτομέρειες ως προς τη λειτουργία του.

Αν υπήρχε μια ανεμογεννήτρια στο σύστημά μας ( επιλέξαμε τη βέλτιστη διαμόρφωση για να εξετάσουμε που δεν περιέχει την ανεμογεννήτρια) θα υπήρχε μια καρτέλα ,η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 1.30, που θα μας πληροφορούσε μέγιστη ισχύ της ανεμογεννήτριας , τη μέση ισχύ , τη συνολική παραγωγή ενέργειας ανά έτος, τις ώρες λειτουργίας ανά έτος , το κόστος ενέργειας και τον πολύ σημαντικό παράγοντα της αιολικής διεύθυνσης , ο οποίος δείχνει πόσο συνεισφέρει στο φορτίο η ανεμογεννήτρια.



**Εικόνα 1.30** Αποτελέσματα προσομοίωσης για την ανεμογεννήτρια

Παρόμοια ανάλυση από το HOMER και στην περίπτωση που έχουμε φωτοβολταϊκά ή υδροηλεκτρικά. Η μονή διαφορά είναι ότι αντί για αιολική διείσδυση που έχουμε στις ανεμογεννήτριες στα φωτοβολταϊκά και στα υδροηλεκτρικά έχουμε ηλιακή και υδροηλεκτρική αντίστοιχα.

Αν το σύστημά μας είχε κάποιο θερμικό φορτίο θα εμπεριείχε και ένα boiler. Το HOMER θα μας παρουσίαζε ενδιαφέροντα στοιχεία για το θερμικό φορτίο όπως από ποια πηγή ενέργειας εξυπηρετήθηκε, πόσο ήταν το θερμικό φορτίο κάθε χρόνο και πόσο πλεονάζουσα θερμότητα παράχθηκε ανά έτος.

Όσον αφορά το boiler οι λεπτομέρειες που θα μας έδινε το HOMER είναι ώρες λειτουργίας ανά έτος, η παραγωγή θερμικής ενέργειας ανά έτος, η μέση ισχύς, η κατανάλωση καυσίμου και η μέση απόδοση του.

Δεν πρέπει να παραλείψουμε το ενδεχόμενο να ήταν το σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο. Το HOMER θα παρουσίαζε μια αναλυτική περιγραφή σχετικά με την αγορά και πώληση ενέργειας μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Η ανάλυση θα ήταν, όπως βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 1.31, ξεχωριστή για κάθε μήνα και θα αναφερόταν στην ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε, στην ζήτηση αιχμής και στην χρέωση της ενέργειας που αγοράστηκε.

| Month  | Energy    | Energy | Net       | Peak   | Energy | Demand |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|        | Purchased | Sold   | Purchases | Demand | Charge | Charge |
|        | (kWh)     | (kWh)  | (kWh)     | (kW)   | (\$)   | (\$)   |
| Jan    | 27,376    | 0      | 27,376    | 58     | 1,095  | 288    |
| Feb    | 24,425    | 0      | 24,425    | 54     | 977    | 272    |
| Mar    | 27,816    | 0      | 27,816    | 55     | 1,113  | 274    |
| Apr    | 26,720    | 0      | 26,720    | 57     | 1,069  | 286    |
| May    | 27,256    | 0      | 27,256    | 58     | 1,090  | 292    |
| Jun    | 26,838    | 0      | 26,838    | 60     | 1,074  | 300    |
| Jul    | 27,482    | 0      | 27,482    | 54     | 1,099  | 272    |
| Aug    | 28,279    | 0      | 28,279    | 55     | 1,131  | 273    |
| Sep    | 26,846    | 0      | 26,846    | 56     | 1,074  | 281    |
| Oct    | 27,698    | 0      | 27,698    | 54     | 1,108  | 272    |
| Nov    | 26,467    | 0      | 26,467    | 56     | 1,059  | 279    |
| Dec    | 27,502    | 0      | 27,502    | 60     | 1,100  | 300    |
| Annual | 324,704   | 0      | 324,704   | 60     | 12,988 | 3,389  |

**Εικόνα 1.31** Αποτελέσματα προσομοίωσης για την αγοραπωλησία ενέργειας με το δίκτυο

Η τελευταία καρτέλα της ανάλυσης των αποτελεσμάτων ονομάζεται «ωριαία δεδομένα» και μας επιτρέπει να κάνουμε μια περαιτέρω ανάλυση κάποιων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης μέσω γραφημάτων και πινάκων.

### 1.5.2 Βελτιστοποίηση του συστήματος

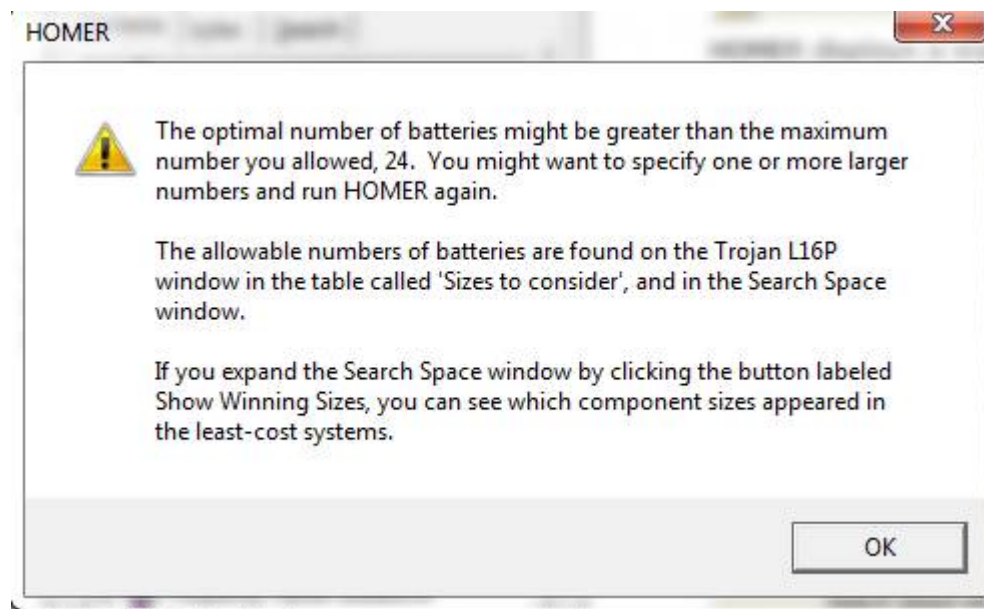
Επόμενο βήμα στην ανάλυση του συστήματος που θεωρήσαμε για να παρουσιάσουμε τις δυνατότητες του HOMER είναι να προσπαθήσουμε να βελτιστοποιήσουμε τα αποτελέσματα τροποποιώντας το σχεδιασμό του. Θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά του σε περίπτωση που προσθέσουμε και άλλες μπαταρίες για να μειώσουμε την παραγόμενη πλεονάζουσα ενέργεια. Πατώντας το εικονίδιο των μπαταριών μπορούμε να προσθέσουμε και άλλους αριθμούς μπαταριών προς εξέταση από το πρόγραμμα. Πέρα από τις 8 λοιπόν που βάλαμε αρχικά, βάζουμε και τις επιλογές 16 και 24. Πατάμε «calculate» και μετά από λίγα δευτερόλεπτα έχουμε τα αποτελέσματα της νέας προσομοίωσης, όπως φαίνονται στην εικόνα 1.32.

Double click on a system below for simulation results.

|  | G10 | Label (kW) | L16P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) |
|--|-----|------------|------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|
|  |     | 15         | 24   | 6          | \$ 35,700       | 19,079                 | \$ 279,590 | 0.705        | 0.00       | 14,922     | 4,894       |
|  | 1   | 15         | 24   | 6          | \$ 65,700       | 17,743                 | \$ 292,520 | 0.738        | 0.22       | 12,392     | 4,323       |
|  |     | 15         | 16   | 6          | \$ 33,300       | 20,861                 | \$ 299,973 | 0.756        | 0.00       | 16,072     | 5,912       |
|  |     | 15         | 24   | 12         | \$ 41,700       | 20,921                 | \$ 309,139 | 0.779        | 0.00       | 15,413     | 5,217       |
|  | 1   | 15         | 16   | 6          | \$ 63,300       | 19,448                 | \$ 311,904 | 0.786        | 0.22       | 13,661     | 5,230       |
|  |     | 15         | 16   | 12         | \$ 39,300       | 21,964                 | \$ 320,068 | 0.807        | 0.00       | 16,246     | 6,019       |
|  |     | 15         | 8    | 6          | \$ 30,900       | 22,702                 | \$ 321,107 | 0.810        | 0.00       | 17,807     | 7,060       |
|  |     | 15         | 8    | 12         | \$ 36,900       | 23,438                 | \$ 336,519 | 0.849        | 0.00       | 17,788     | 7,052       |
|  | 1   | 15         | 8    | 6          | \$ 60,900       | 21,648                 | \$ 337,630 | 0.851        | 0.20       | 15,799     | 6,410       |
|  | 1   | 15         | 8    | 12         | \$ 66,900       | 22,307                 | \$ 352,052 | 0.888        | 0.21       | 15,711     | 6,372       |
|  | 1   | 15         | 24   | 12         | \$ 71,700       | 19,457                 | \$ 320,431 | 0.808        | 0.22       | 12,842     | 4,596       |
|  | 1   | 15         | 16   | 12         | \$ 69,300       | 20,562                 | \$ 332,157 | 0.838        | 0.22       | 13,838     | 5,337       |

**Εικόνα 1.32** Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Από ότι βλέπουμε καταφέραμε να πετύχουμε βέλτιστο σύστημα το οποίο έχει μικρότερο καθαρό τρέχον κόστος από το βέλτιστο σύστημα που είχαμε επιτύχει με τα προηγούμενα δεδομένα. Παρατηρούμε , όμως, ότι το HOMER μας έχει βγάλει μια ειδοποίηση , η οποία μας ενημερώνει ότι ο αριθμός των μπαταριών, που έχουμε ορίσει στο πρόγραμμα να χρησιμοποιήσει, ενδεχομένως να είναι ανεπαρκής και επιδέχεται βελτίωσης.



**Εικόνα 1.33** Προειδοποίηση HOMER για τον αριθμό μπαταριών

Το πρόγραμμα μας λέει , λοιπόν , ότι μπορούμε να βελτιώσουμε και άλλο την αποδοτικότητα του συστήματος. Προσθέτουμε και άλλες μπαταρίες για να δούμε ποιος είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός. Έτσι τώρα το πρόγραμμα εκτελεί τις προσομοιώσεις και με 32, 40,48 και 56 μπαταρίες. Παρατηρούμε στην εικόνα 1.35 ότι το βέλτιστο σύστημα είναι αυτό που έχει 32 μπαταρίες, γεννήτρια και μετατροπέα. . Καταφέραμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο το καθαρό τρέχον κόστος που είναι το κριτήριο που χρησιμοποιεί το HOMER για να βρεί το οικονομικά αποδοτικότερο. Τα πέντε πιο αποδοτικά συστήματα δεν περιέχουν ανεμογεννήτρια και μόλις το έκτο αποδοτικότερο σύστημα είναι το πρώτο που έχει στη σύνθεσή του μία , το οποίο περιέχει επίσης και 56 μπαταρίες.

Ακόμη ,πρέπει να σημειώσουμε την εντυπωσιακή μείωση της πλεονάζουσας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν προσθέσαμε και άλλες μπαταρίες στο σύστημα . Παρατηρούμε, στην παρακάτω εικόνα, ότι αρχικά το βέλτιστο σύστημα παρήγαγε 10% περίπου πλεονάζουσα ενέργεια και επιτύχαμε αυτό το ποσοστό ουσιαστικά να το μηδενίσουμε με τη προσθήκη των μπαταριών.

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 0.207  | 0.00 |
| Unmet electric load | 0.00   | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00   | 0.00 |

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 3,830  | 10.3 |
| Unmet electric load | 0.00   | 0.0  |
| Capacity shortage   | 0.00   | 0.0  |

**Εικόνα 1.34** Αποτελέσματα των προσομοιώσεων που σχετίζονται με χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

|  | G10 | Label (kW) | L16P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) |
|--|-----|------------|------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|
|  |     | 15         | 32   | 6          | \$ 38,100       | 18,403                 | \$ 273,348 | 0.689        | 0.00       | 14,463     | 4,317       |
|  |     | 15         | 24   | 6          | \$ 35,700       | 19,079                 | \$ 279,590 | 0.705        | 0.00       | 14,922     | 4,894       |
|  |     | 15         | 40   | 6          | \$ 40,500       | 18,853                 | \$ 281,510 | 0.710        | 0.00       | 14,527     | 4,127       |
|  |     | 15         | 56   | 6          | \$ 45,300       | 18,847                 | \$ 286,225 | 0.722        | 0.00       | 14,296     | 3,617       |
|  |     | 15         | 48   | 6          | \$ 42,900       | 19,109                 | \$ 287,175 | 0.724        | 0.00       | 14,513     | 3,911       |
|  | 1   | 15         | 56   | 6          | \$ 75,300       | 16,630                 | \$ 287,890 | 0.726        | 0.21       | 11,279     | 3,017       |
|  | 1   | 15         | 32   | 6          | \$ 68,100       | 17,260                 | \$ 288,738 | 0.728        | 0.22       | 11,946     | 3,866       |
|  | 1   | 15         | 48   | 6          | \$ 72,900       | 16,974                 | \$ 289,884 | 0.731        | 0.22       | 11,533     | 3,287       |
|  | 1   | 15         | 40   | 6          | \$ 70,500       | 17,195                 | \$ 290,306 | 0.732        | 0.22       | 11,768     | 3,582       |
|  |     | 15         | 32   | 12         | \$ 44,100       | 19,412                 | \$ 292,256 | 0.737        | 0.00       | 14,566     | 4,384       |
|  | 1   | 15         | 24   | 6          | \$ 65,700       | 17,743                 | \$ 292,520 | 0.738        | 0.22       | 12,392     | 4,323       |
|  |     | 15         | 16   | 6          | \$ 33,300       | 20,861                 | \$ 299,973 | 0.756        | 0.00       | 16,072     | 5,912       |
|  |     | 15         | 40   | 12         | \$ 46,500       | 19,831                 | \$ 300,013 | 0.756        | 0.00       | 14,619     | 4,177       |
|  | 1   | 15         | 32   | 12         | \$ 74,100       | 18,260                 | \$ 307,528 | 0.775        | 0.22       | 12,022     | 3,915       |
|  |     | 15         | 24   | 12         | \$ 41,700       | 20,921                 | \$ 309,139 | 0.779        | 0.00       | 15,413     | 5,217       |
|  |     | 15         | 48   | 12         | \$ 48,900       | 20,538                 | \$ 311,439 | 0.785        | 0.00       | 14,795     | 4,067       |
|  | 1   | 15         | 16   | 6          | \$ 63,300       | 19,448                 | \$ 311,904 | 0.786        | 0.22       | 13,661     | 5,230       |
|  | 1   | 15         | 56   | 12         | \$ 81,300       | 18,051                 | \$ 312,052 | 0.787        | 0.21       | 11,489     | 3,102       |
|  | 1   | 15         | 40   | 12         | \$ 76,500       | 18,429                 | \$ 312,079 | 0.787        | 0.22       | 11,902     | 3,657       |
|  | 1   | 15         | 48   | 12         | \$ 78,900       | 18,427                 | \$ 314,458 | 0.793        | 0.21       | 11,757     | 3,395       |
|  |     | 15         | 56   | 12         | \$ 51,300       | 20,588                 | \$ 314,490 | 0.793        | 0.00       | 14,704     | 3,823       |
|  |     | 15         | 16   | 12         | \$ 39,300       | 21,964                 | \$ 320,068 | 0.807        | 0.00       | 16,246     | 6,019       |
|  |     | 15         | 8    | 6          | \$ 30,900       | 22,702                 | \$ 321,107 | 0.810        | 0.00       | 17,807     | 7,060       |
|  |     | 15         | 8    | 12         | \$ 36,900       | 23,438                 | \$ 336,519 | 0.849        | 0.00       | 17,788     | 7,052       |
|  | 1   | 15         | 8    | 6          | \$ 60,900       | 21,648                 | \$ 337,630 | 0.851        | 0.20       | 15,799     | 6,410       |
|  | 1   | 15         | 8    | 12         | \$ 66,900       | 22,307                 | \$ 352,052 | 0.888        | 0.21       | 15,711     | 6,372       |
|  | 1   | 15         | 24   | 12         | \$ 71,700       | 19,457                 | \$ 320,431 | 0.808        | 0.22       | 12,842     | 4,596       |
|  | 1   | 15         | 16   | 12         | \$ 69,300       | 20,562                 | \$ 332,157 | 0.838        | 0.22       | 13,838     | 5,337       |

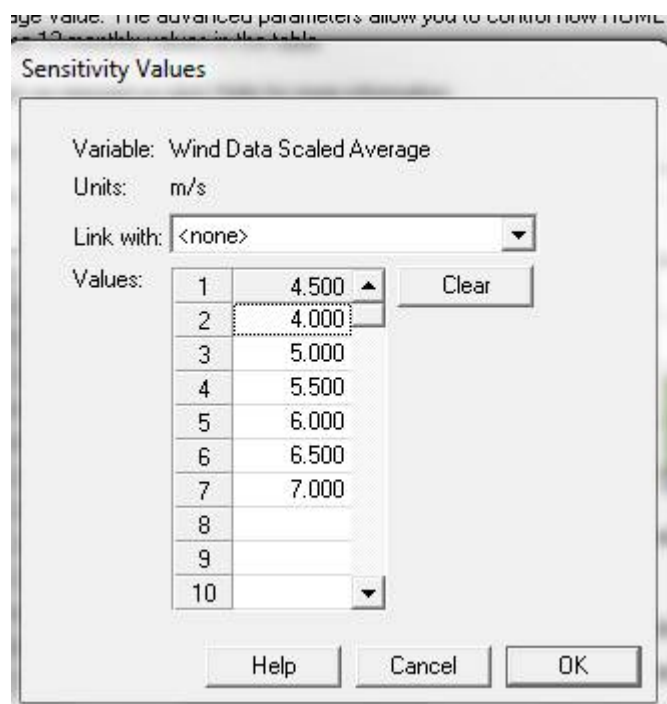
**Εικόνα 1.35** Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

### 1.5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Το HOMER , λοιπόν , μας βοήθησε να βελτιώσουμε το σύστημα . Όμως η απουσία ανεμογεννήτριας στο βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μας γεννάει το ερώτημα κάτω από ποιες συνθήκες θα συμπεριληφθεί μια στο σύστημά μας . Την απάντηση σ' αυτήν την ερώτηση τη δίνει η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis).

Προηγουμένως είδαμε ότι το HOMER μπορεί να χρησιμοποιήσει δεδομένα αλλάζοντάς τους κλίμακα, κάτι που μας δίνει την δυνατότητα πραγματοποιήσουμε ανάλυση ευαισθησίας για κάποιες μεταβλητές. Στο συγκεκριμένο σύστημα μπορούμε να εισάγουμε τιμές ευαισθησίας για τον κλιμακούμενη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και της τιμής του πετρελαίου. Η ανάλυση ευαισθησίας θα μας επιτρέψει να εξερευνήσουμε πως επηρεάζουν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου και η τιμή του πετρελαίου το βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος. Θα μας δείξει , δηλαδή , για ποιες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της τιμής του πετρελαίου έχει νόημα να συμπεριλάβουμε ανεμογεννήτριες στο σύστημά μας.

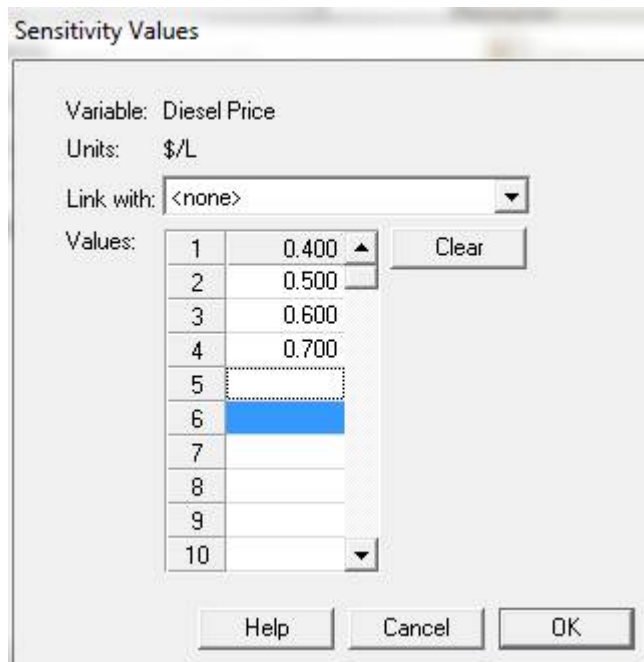
Για να προσθέσουμε τιμές ευαισθησίας για την ταχύτητα του ανέμου ανοίγουμε το παράθυρο με τις πληροφορίες του αιολικού δυναμικού και πατάμε το εικονίδιο δίπλα στην τιμή της κλιμακούμενης μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου. Εκεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.36, βλέπουμε ότι αρχικά το HOMER έχει εισάγει την τιμή 4.5 που είναι η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου. Εμείς προσθέτουμε και τις τιμές 4, 5, 5.5, 6, 6.5 και 7. Το πρόγραμμα, δηλαδή, θα εκτελέσει 7 προσομοιώσεις με διαφορετικές τιμές ταχύτητας του ανέμου για κάθε σχεδιασμό συστήματος.



**Εικόνα 1.36** Φόρμα εισαγωγής τιμών ευαισθησίας για τον άνεμο.

Ίδια διαδικασία ακολουθούμε για να προσθέσουμε τιμές ευαισθησίας στην τιμή του πετρελαίου. Στην εικόνα 1.37 απεικονίζεται η φόρμα εισαγωγής των τιμών ευαισθησίας για την τιμή του πετρελαίου. Εδώ αρχικά είχαμε ορίσει την τιμή του πετρελαίου στα 0.4 δολάρια το λίτρο. Τώρα προσθέτουμε τις τιμές 0.5, 0.6, 0.7.





**Εικόνα 1.37** Φόρμα εισαγωγής τιμών ευαισθησίας για την τιμή του πετρελαίου

Το HOMER τώρα καλείται να εκτελέσει πολλές προσομοιώσεις καθώς πρέπει να προσομοιώσει το κάθε σχέδιο του συστήματος 28 φορές ,4x7 αφού έχουμε 7 τιμές για την ταχύτητα του ανέμου και 4 για την τιμή του πετρελαίου. Παρατηρούμε στην εικόνα 1.38 ότι στα αποτελέσματα υπάρχουν, τώρα, και οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου και του κόστους του πετρελαίου τις οποίες και μπορούμε να αλλάξουμε για να δούμε πως επιδρούν στη διαμόρφωση του συστήματος. Στην παρακάτω εικόνα έχουμε επιλέξει τη μέγιστη ταχύτητα ανέμου και την ελάχιστη τιμή πετρελαίου , δεδομένα που καθιστούν την υλοποίηση του συστήματος με την ανεμογεννήτρια , τη γεννήτρια και 56 μπαταρίες βέλτιστη. Παρότι όμως η υλοποίηση αυτή είναι η οικονομικά αποδοτικότερη , αν δούμε αναλυτικότερα τις λεπτομέρειες που μας παρέχει το HOMER θα παρατηρήσουμε ότι παράγουμε μεγάλο ποσοστό πλεονάζουσας ενέργειας , το οποίο ξεπερνά το 15 %.

Sensitivity Results Optimization Results

Sensitivity variables

Wind Speed (m/s)  Diesel Price (\$/L)

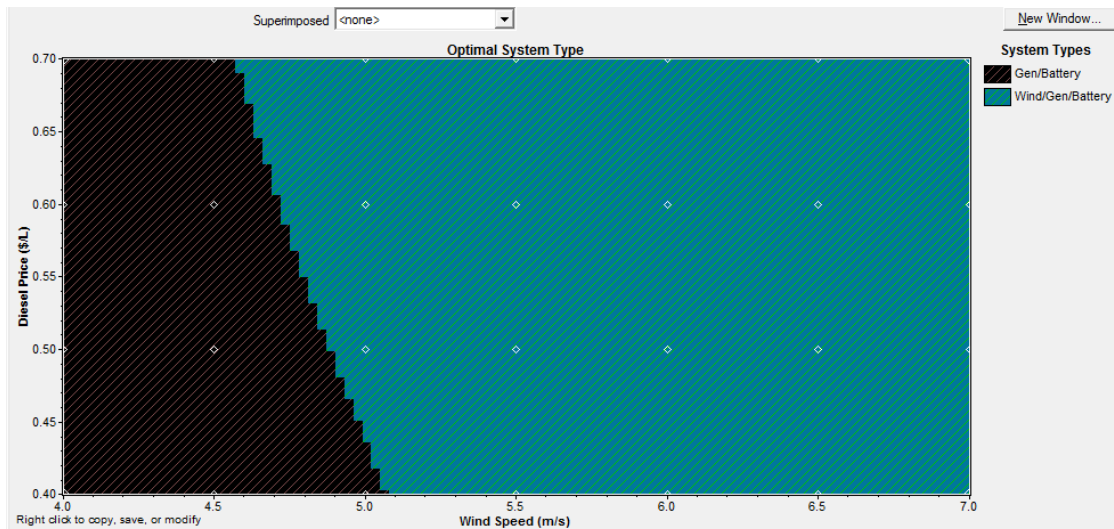
Double click on a system below for simulation results.

|  | G10 | Gen (kW) | L16P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Gen (hrs) |
|--|-----|----------|------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|
|  | 1   | 15       | 56   | 6          | \$ 75,300       | 11,593                 | \$ 223,500 | 0.564        | 0.58       | 6,891      | 2,011     |
|  | 1   | 15       | 48   | 6          | \$ 72,900       | 11,807                 | \$ 223,836 | 0.564        | 0.59       | 7,072      | 2,175     |
|  | 1   | 15       | 40   | 6          | \$ 70,500       | 12,048                 | \$ 224,511 | 0.566        | 0.58       | 7,322      | 2,383     |
|  | 1   | 15       | 32   | 6          | \$ 68,100       | 12,468                 | \$ 227,479 | 0.574        | 0.58       | 7,714      | 2,668     |
|  | 1   | 15       | 24   | 6          | \$ 65,700       | 13,035                 | \$ 232,330 | 0.586        | 0.58       | 8,303      | 3,048     |
|  | 1   | 15       | 56   | 12         | \$ 81,300       | 12,280                 | \$ 238,283 | 0.601        | 0.60       | 6,441      | 1,830     |
|  | 1   | 15       | 48   | 12         | \$ 78,900       | 12,558                 | \$ 239,437 | 0.604        | 0.60       | 6,713      | 2,032     |
|  | 1   | 15       | 40   | 12         | \$ 76,500       | 12,870                 | \$ 241,027 | 0.608        | 0.59       | 7,024      | 2,273     |
|  | 1   | 15       | 32   | 12         | \$ 74,100       | 13,167                 | \$ 242,417 | 0.611        | 0.59       | 7,403      | 2,557     |
|  | 1   | 15       | 24   | 12         | \$ 71,700       | 14,021                 | \$ 250,936 | 0.633        | 0.58       | 8,199      | 3,058     |
|  | 1   | 15       | 16   | 6          | \$ 63,300       | 14,780                 | \$ 252,236 | 0.636        | 0.55       | 9,768      | 3,859     |
|  | 1   | 15       | 16   | 12         | \$ 69,300       | 15,330                 | \$ 265,270 | 0.669        | 0.56       | 9,471      | 3,756     |
|  |     | 15       | 32   | 6          | \$ 38,100       | 18,403                 | \$ 273,348 | 0.689        | 0.00       | 14,463     | 4,317     |
|  | 1   | 15       | 8    | 6          | \$ 60,900       | 16,909                 | \$ 277,053 | 0.699        | 0.51       | 11,912     | 4,912     |
|  |     | 15       | 24   | 6          | \$ 35,700       | 19,079                 | \$ 279,590 | 0.705        | 0.00       | 14,922     | 4,894     |
|  |     | 15       | 40   | 6          | \$ 40,500       | 18,853                 | \$ 281,510 | 0.710        | 0.00       | 14,527     | 4,127     |
|  | 1   | 15       | 8    | 12         | \$ 66,900       | 16,917                 | \$ 283,153 | 0.714        | 0.52       | 11,304     | 4,646     |
|  |     | 15       | 56   | 6          | \$ 45,300       | 18,847                 | \$ 286,225 | 0.722        | 0.00       | 14,296     | 3,617     |
|  |     | 15       | 48   | 6          | \$ 42,900       | 19,109                 | \$ 287,175 | 0.724        | 0.00       | 14,513     | 3,911     |
|  |     | 15       | 32   | 12         | \$ 44,100       | 19,412                 | \$ 292,256 | 0.737        | 0.00       | 14,566     | 4,384     |
|  |     | 15       | 16   | 6          | \$ 33,300       | 20,861                 | \$ 299,973 | 0.756        | 0.00       | 16,072     | 5,912     |
|  |     | 15       | 40   | 12         | \$ 46,500       | 19,831                 | \$ 300,013 | 0.756        | 0.00       | 14,619     | 4,177     |
|  |     | 15       | 24   | 12         | \$ 41,700       | 20,921                 | \$ 309,139 | 0.779        | 0.00       | 15,413     | 5,217     |
|  |     | 15       | 48   | 12         | \$ 48,900       | 20,538                 | \$ 311,439 | 0.785        | 0.00       | 14,795     | 4,067     |
|  |     | 15       | 56   | 12         | \$ 51,300       | 20,588                 | \$ 314,490 | 0.793        | 0.00       | 14,704     | 3,823     |
|  |     | 15       | 16   | 12         | \$ 39,300       | 21,964                 | \$ 320,068 | 0.807        | 0.00       | 16,246     | 6,019     |
|  |     | 15       | 8    | 6          | \$ 30,900       | 22,702                 | \$ 321,107 | 0.810        | 0.00       | 17,807     | 7,060     |

**Εικόνα 1.38** Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

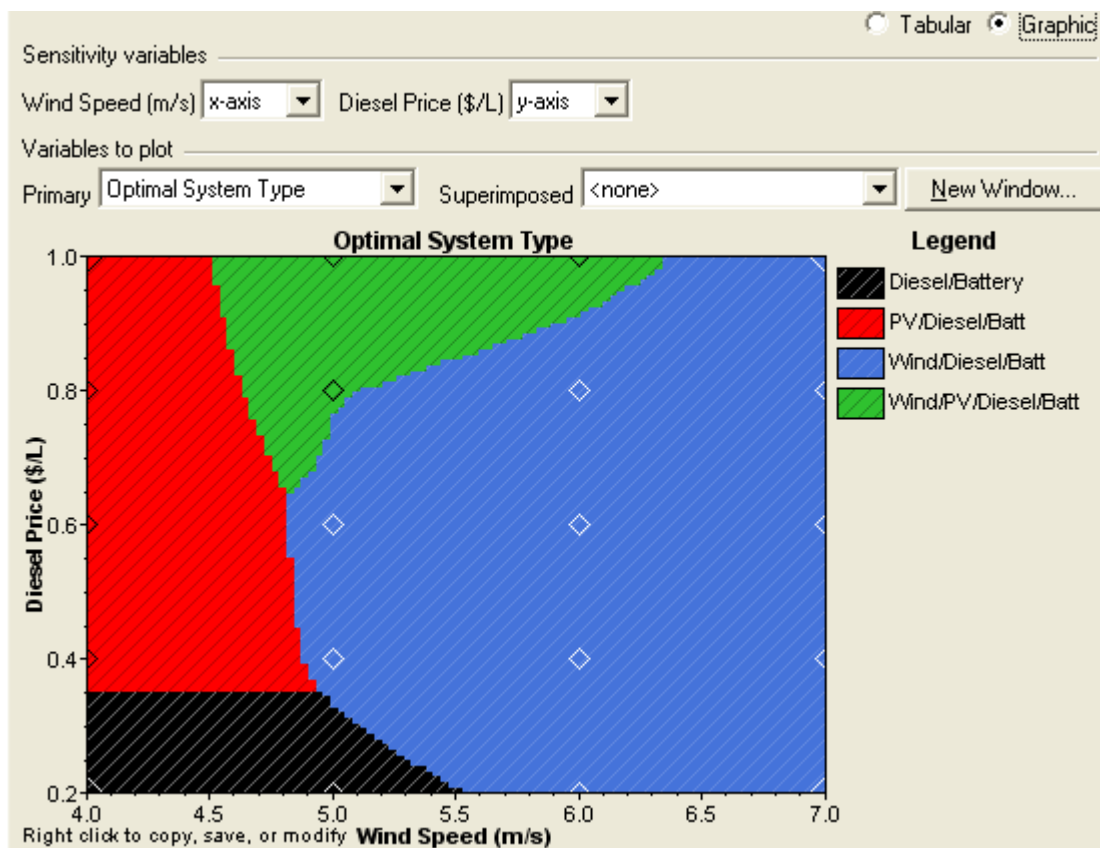
Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε πίνακα όταν έχουμε αρκετές τιμές ευαισθησίας δεν είναι ενδεδειγμένη και δεν βολεύει στην κατανόηση συμπερασμάτων. Γι αυτό το λόγο το HOMER μας παρέχει τη δυνατότητα να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και με διάφορα γραφήματα. Μπορούμε να φτιάξουμε τεσσάρων ειδών γραφήματα στο HOMER: διαγράμματα του βέλτιστου τύπου συστήματος (optimal system type charts), οικόπεδα επιφάνειας (surface plots), γραφήματα γραμμής (line graphs) και γραφήματα αράχνη. Τα διαγράμματα του βέλτιστου τύπου συστήματος είναι τα πιο χρήσιμα για εμάς και δίνουν την καλύτερη αίσθηση των αποτελεσμάτων ευαισθησίας. Δείχνουν τον οικονομικά αποδοτικότερο τύπο συστήματος σε σχέση με τις μεταβλητές ευαισθησίας. Το γράφημα κάνει ευκολότερο να δούμε κάτω υπό ποιες καταστάσεις οι διάφοροι τύποι συστήματος είναι βέλτιστοι.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε το διάγραμμα βέλτιστου τύπου συστήματος για το σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στο παράδειγμά μας.



**Εικόνα 1.39** Διάγραμμα βέλτιστου τύπου συστήματος

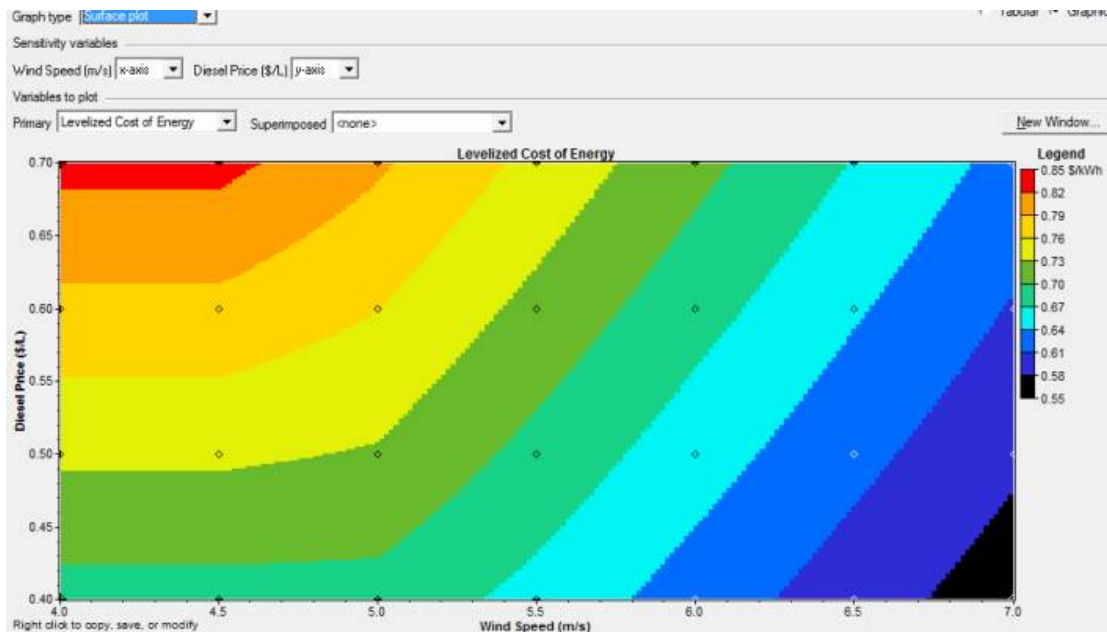
Στην εικόνα 1.40 έχουμε το διάγραμμα βέλτιστου τύπου συστήματος για ένα σύστημα που αποτελείται από ντιζελογεννήτρια , φωτοβολταϊκό , μπαταρίες και ανεμογεννήτρια.



**Εικόνα 1.41** Διάγραμμα βέλτιστου τύπου συστήματος

Μπορούμε , όμως , να επιλέξουμε να σχεδιάσουμε και τη σχέση κάποιας άλλης μεταβλητής με τις τιμές ευαισθησίας , τότε το HOMER δημιουργεί ένα οικόπεδο επιφάνειας όπως χαρακτηριστικά το ονομάζει. Παρακάτω , στην εικόνα

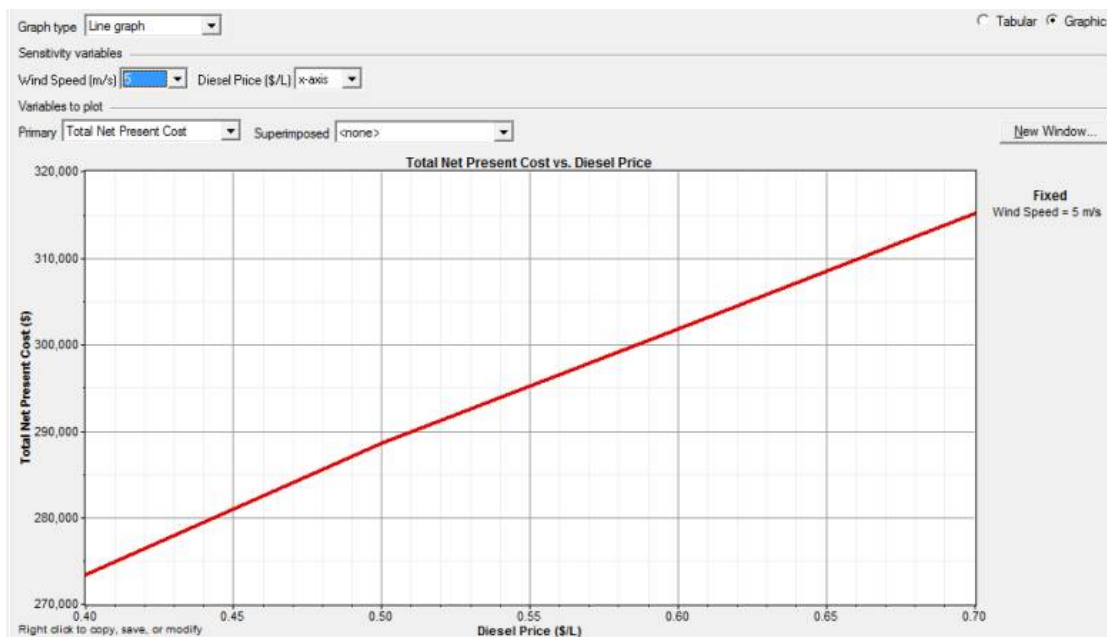
1.42, βλέπουμε πως επηρεάζουν οι μεταβλητές ευαισθησίας το κόστος ενέργειας στο σύστημα που χρησιμοποιήσαμε στο παράδειγμα.



**Εικόνα 1.42** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο κόστος ενέργειας

Τα γραφήματα γραμμής το HOMER τα χρησιμοποιεί για να δείξει τη σχέση μιας μεταβλητής εξόδου με μία μόνο μεταβλητή ευαισθησίας κρατώντας την άλλη μεταβλητή ευαισθησίας σταθερή.

Εδώ έχουμε τη σχέση του καθαρού τρέχοντος κόστους με την τιμή του πετρελαίου όταν η ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή στα 5m/s.



**Εικόνα 1.43** Διάγραμμα της σχέσης του καθαρού τρέχοντος κόστους με την τιμή του πετρελαίου

Τελευταίο είδος γραφήματος για το HOMER είναι το γράφημα αράχνη (spider graph) το οποίο δείχνει σε ποια από τις μεταβλητές ευαισθησίας είναι πιο ευαίσθητη μια μεταβλητή εξόδου.

### **Αναφορές**

- [1] Κατσαφάρος Ι. «Μελέτη του ενεργειακού συστήματος της Ικαρίας», διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011.
- [2] E. Al-Ammar, N. Malik, M. Usman, “Application of Using Hybrid Renewable Energy in Saudi Arabia”, ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 1, \_ο. 4, 2011, 84-89
- [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”, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, 2005
- [4] E.I. Zoulias, N.Lymeropoulos, “Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems”, Renewable Energy 32 (2007) 680–696
- [4] Bindu U Kansara, B.R. Parekh, “Modelling and Simulation of Distributed Generation System Using HOMER Software”, International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, pp. 328-332, 2011.
- [6] Getting started guide for HOMER

## 2. Τα πιλοτικά Μικροδίκτυα στο «Μελτέμι»

### 2.1 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)

Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί να ενσωματώσει ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των χρηστών (παραγωγών και καταναλωτών) με σκοπό να διασφαλιστεί αποτελεσματικά η σταθερότητα, η οικονομία και η ασφάλεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα έξυπνα δίκτυα έχουν σκοπό να ενσωματώσουν τη σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία στον αναλογικό κόσμο της ηλεκτρικής ενέργειας και να πετύχουν εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση κόστους και αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Έτσι, υπερκαλύπτεται το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα δίκτυο μεταφοράς δεδομένων και μετρήσεων που μας δίνει τη δυνατότητα εποπτείας και διαχείρισης του δικτύου[1]. Ένα έξυπνο δίκτυο περιλαμβάνει συνδυασμό λογισμικού και υλικού και επιτρέπει αποτελεσματικότερη ροή ισχύος και δίνει την δυνατότητα στους καταναλωτές να ελέγχουν τη ζήτηση ενέργειας. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να επιτρέψουμε το χειρισμό συγκεκριμένων οικιακών συσκευών (όπως πλυντήρια) προγραμματίζοντας τη λειτουργία τους όταν η ζήτηση και η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλή, ενώ να απενεργοποιούνται κάποιες συσκευές σε ώρες αιχμής, όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακριβή. Τον ίδιο έλεγχο μπορούμε να επιτρέψουμε και στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, δίνοντας τη δυνατότητα μεταβολής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδικτύου[2].

Στα έξυπνα δίκτυα κάθε μονάδα του δικτύου έχει το δικό της ανεξάρτητο επεξεργαστή, με στιβαρό λειτουργικό σύστημα, ικανό να δρα ως ανεξάρτητος πράκτορας (agent), που μπορεί να επικοινωνεί και να συνεργάζεται με τους άλλους επεξεργαστές σχηματίζοντας μία μεγάλη κατακεντρωμένη υπολογιστική πλατφόρμα.

Τα έξυπνα δίκτυα έχουν ως κύριους άξονες :

- Την ευφυή συνύπαρξη της κεντρικής και διεσπαρμένης παραγωγής με αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης άνθρακα και αποδοτικού χειρισμού της ζήτησης.
- Την εμπορία ενέργειας και τη βελτιστοποίηση κόστους μέσω χρονομεταβλητών τιμολογίων και διαφόρων κινήτρων εξαρτώμενων από το μεταβαλλόμενο φορτίο.
- Την ενεργό συμμετοχή του πελάτη με βάση την επικοινωνία σε δυο κατευθύνσεις και τη μεγάλη ροή πληροφορίας[2]

Μια προσέγγιση των ευφυών δικτύων αποτελεί το σενάριο των μικροδικτύων των οποίων η δομή και ο έλεγχος εξυπηρετούν τα προαναφερθέντα

## 2.2 Τα Μικροδίκτυα

Καλό θα ήταν πριν αναφερθούμε στο σύστημα που υπάρχει στο Μελέμι να αναλύσουμε μέχρι ένα βαθμό τι είναι μικροδίκτυο και πως λειτουργεί. Αυτό θα μας βοηθήσει στη συνέχεια να αντιληφθούμε καλύτερα το σύστημα που θα μελετήσουμε.

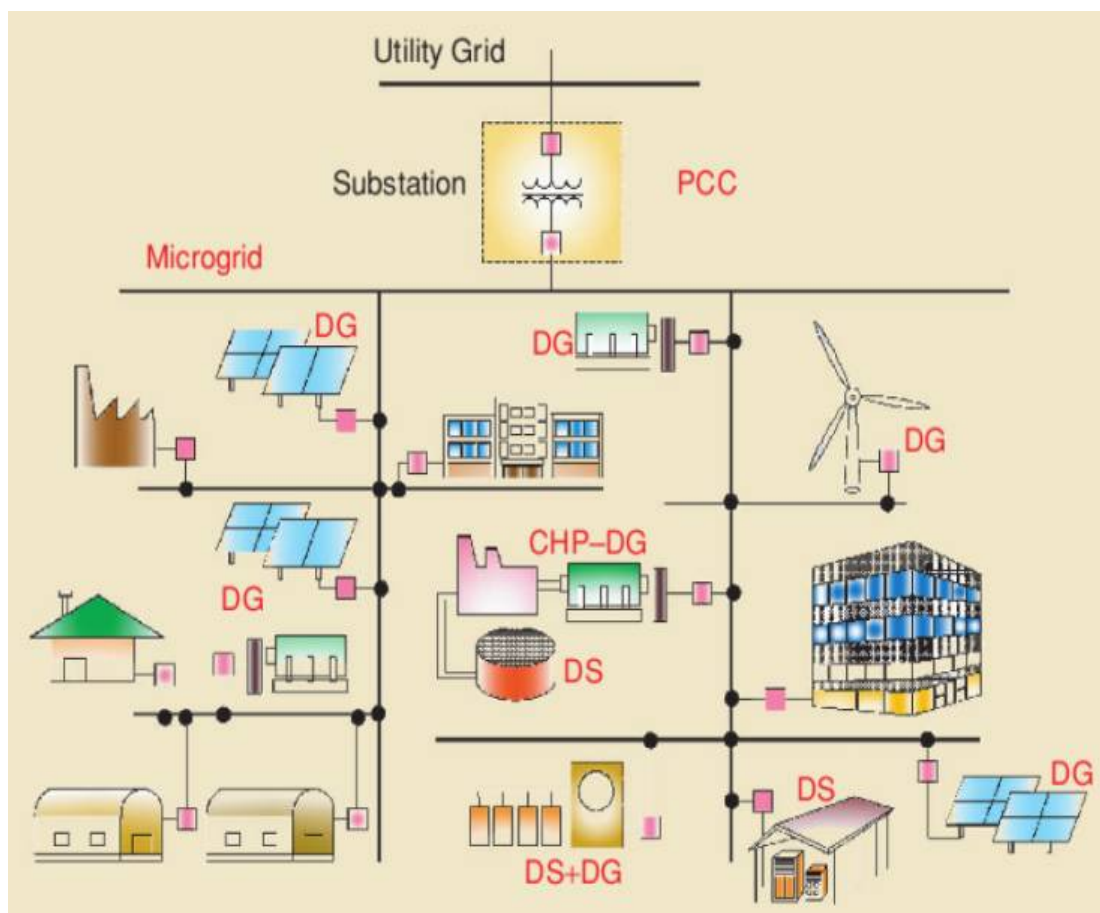
Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής (μικροπηγές) (<100kW) όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου ή φωτοβολταϊκά κύτταρα σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, σφόνδυλοι) μονάδες προστασίας αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στην χαμηλή τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο είτε αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο σχηματίζοντας μία νησίδα[3]-[5]. Ουσιαστικά τα μικροδίκτυα είναι μικρογραφίες των μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας[3]. Σκοπός του μικροδικτύου είναι μέσω της σωστής διαχείρισης της διεσπαρμένης παραγωγής και του φορτίου, να φροντίζει για την αποδοτική και συνεχή τροφοδότηση των καταναλωτών.

Το μικροδίκτυο συνήθως λειτουργεί σε κατάσταση σύνδεσης με το δίκτυο. Παρόλα αυτά, αναμένεται να υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές ελέγχου, οι σωστές στρατηγικές και ικανοποιητική παραγωγή για να μπορεί να τροφοδοτηθεί τουλάχιστον ένα μέρος του φορτίου σε συνθήκες νησιδοποίησης[1]. Η αξιόπιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου, συνεπάγεται εκτός από την κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και άεργου ισχύος, και τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτού. Παράλληλα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή διαρροές[6],[7].

Όταν ένα μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι, προφανώς, δυνατή η ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό ή απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση[8]. Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στην χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει την το επίπεδο τάσης λειτουργίας. Το μέγεθος των μονάδων παραγωγής και φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Προφανώς μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη μέση τάση, που σημαίνει και αύξηση απωλειών κατά την μεταφορά και διανομή. Πρέπει, ακόμη, να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις διασυνδεδεμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου[6],[7],[9].

Σε ένα δεύτερο στάδιο, ένα μικροδίκτυο μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ένας «καλός πολίτης» του κεντρικού δικτύου. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει αν το μικροδίκτυο ρυθμιζόταν ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο, π.χ. να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται, ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση απαιτείται προφανώς και μια

μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου[6],[9].



**Εικόνα 2.1** Τυπική δομή μικροδικτύου με φορτία και διεσπαρμένες παραγωγές [4]

### 2.2.1 Λόγοι για την ανάπτυξη των μικροδικτύων

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που οδήγησαν στην ανάπτυξη των μικροδικτύων και οι οποίοι συνοψίζουν και τα πλεονεκτήματα αυτών. Θα προσπαθήσουμε στη συνέχεια να αναφέρουμε περιληπτικά τους περισσότερους από αυτούς, κάτι που θα μας δείξει τη χρησιμότητα των μικροδικτύων.

1. Ανάγκη διαθεσιμότητας ευέλικτων, μικρών μονάδων παραγωγής και αποδοτικότερης χρήσης ενέργειας. Λόγω της τοπικότητας του μικροδικτύου μπορεί να γίνεται αποτελεσματικότερη διαχείριση ενέργειας. Μπορεί να μεγιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές του μικροδικτύου ενώ μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την ανάγκη για εφεδρείες, καθώς μικρές ευέλικτες μονάδες μπορούν να μπουν σε λειτουργία πολύ γρήγορα[1].
2. Ανάγκη να υπάρξει μια μείωση των ρύπων. Με τη λειτουργία των μικροδικτύων μπορούμε εύκολα να εισάγουμε τις κατάλληλες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που, στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, αποφέρουν ελάχιστη παραγωγή ρύπων. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό λόγω του μικρού μεγέθους και του είδους των μονάδων αυτών. Με τα μεγάλα



εργοστάσια παραγωγής ενέργειας δεν έχουμε τη δυνατότητα να κάνουμε γρήγορο έλεγχο και να εισάγουμε μονάδες κατά βούληση κάθε στιγμή λόγω τεχνικών και οικονομικών περιορισμών[1]. Με τα μικροδίκτυα έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μεθόδους φιλικές προς το περιβάλλον και έτσι μειώνεται η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα, που εκπέμπουν οι παραδοσιακές μονάδες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα όπως ο λιγνίτης ή το πετρέλαιο[10].

3. Με τα μικροδίκτυα οι μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι κοντά στα τοπικά φορτία και μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα και την αξιοπιστία της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον τελικό καταναλωτή[10]. Τα σύγχρονα φορτία απαιτούν αδιάλειπτη παροχή ισχύος και τάση απαλλαγμένη από οποιαδήποτε ανωμαλία, κάτι το οποίο τα σημερινά ΣΗΕ αδυνατούν να προσφέρουν λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ παραγωγής και φορτίου[10].
4. Πολιτική ανταγωνισμού και απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αν ο σχεδιασμός της οικονομικής λειτουργίας των μικροδικτύων γίνει σωστά, τότε μπορεί να αναπτυχθεί οικονομική δραστηριότητα στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές εταιρείες. Οι εταιρείες αυτές μπορούν να εγκαταστήσουν μικρές μονάδες παραγωγής για τη δική τους εξυπηρέτηση ή για την πώληση σε άλλους καταναλωτές στο μικροδίκτυο[1]. Οι μικρές εταιρείες αποκτούν κίνητρα για τη χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
5. Διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας. Ανάλογα με την περιοχή και το μέγεθος του μικροδικτύου μπορούμε να συναντήσουμε διάφορες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, ηλιακή, φυσικό αέριο, πετρέλαιο. Το κάθε είδος σταθμού έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Έτσι, με το σωστό προγραμματισμό εγκατάστασης και λειτουργίας μπορούμε να έχουμε μια όσο το δυνατόν βέλτιστη λειτουργία του μικροδικτύου[1].
6. Αύξηση των εθνικών και διεθνών ενεργειακών αναγκών. Η ζήτηση ενέργειας τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει συνεχή αύξηση, μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η διεσπαρμένη παραγωγή και η δημιουργία μικροδικτύων.
7. Εύκολη εύρεση περιοχών εγκατάστασης μονάδων παραγωγής και γρήγορη κατασκευή με μικρότερο κόστος εγκατάστασης. Σε μικρές μονάδες παραγωγής, οι ανάγκες εγκαταστάσεων προστασίας είναι μικρές. Επίσης το μέγεθος των μονάδων αυτών τους επιτρέπει να συνδέονται απευθείας σε δίκτυο χαμηλής τάσης, απαλείφοντας έτσι την ανάγκη κατασκευής υποσταθμών[1].
8. Μεταφέροντας την παραγωγή πιο κοντά στους καταναλωτές μειώνουμε το κόστος μεταφοράς και την ανάγκη κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς. Ακόμη, μπορούμε να αποφύγουμε εργασίες αναβάθμισης του δικτύου (αντικατάσταση μετασχηματιστών, δημιουργία νέων υποσταθμών) σε αναπτυσσόμενες περιοχές[1],[11].

### 2.2.2 Τεχνολογίες παραγωγής

Το βασικό στοιχείο των μικροδικτύων είναι οι μονάδες παραγωγής και στο σημείο αυτό θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή των βασικών τεχνολογιών παραγωγής που εμπλέκονται στα συστήματα που μελετάμε.

- Γεννήτριες

Στα μικροδίκτυα έχουμε γεννήτριες μικρής ισχύος. Αυτές μπορεί να λειτουργούν καίγοντας diesel, βενζίνη, φυσικό αέριο ή και βιοκαύσιμα.

- Μικροτουρμπίνες.

Οι μικροτουρμπίνες κυμαίνονται σε ισχείς από 20 έως 100kW. Η τεχνολογία τους προέρχεται από τις βοηθητικές μονάδες ισχύος (auxiliary power unit -APU) και η μηχανολογική τους λειτουργία είναι απλή με ότι αυτό συνεπάγεται σε θέματα διάρκειας ζωής και απαιτήσεων συντήρησης. Οι μικροτουρμπίνες προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών. Το καύσιμό τους είναι κυρίως το φυσικό αέριο ωστόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και πετρέλαιο ή προπάνιο.[3],[12]

- Κυψέλες καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία τεχνολογία που υπόσχεται πολλά τόσο στα μικροδίκτυα όσο και στον γενικότερο χώρο της διεσπαρμένης παραγωγής. Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι μια ηλεκτροχημική διάταξη που μετατρέπει απευθείας την χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Το καύσιμο που τροφοδοτεί τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να είναι υδρογόνο ή θεωρητικά οποιοδήποτε άλλο συμβατικό καύσιμο αποτελούμενο από υδρογονάνθρακες. Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας, είναι αθόρυβα και καθαρά αλλά το βασικό τους πρόβλημα αυτήν τη στιγμή είναι το υψηλό τους κόστος.[3],[13]

- Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα συναντάμε πολύ συχνά σε μικροδίκτυα και αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα αυτού. Συγκαταλέγονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν αθόρυβα και δεν παράγουν εκπομπές αερίων.[3]

- Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι και αυτές μια πολύ σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Στα μικροδίκτυα υπάρχουν συχνά, συνήθως μικρής ισχύος, και συνεισφέρουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενες την αιολική ενέργεια.[3]

- Αποθήκευση ενέργειας

Το βασικό πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε εκτεταμένη κλίμακα. Σχεδόν όλη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή για το μέγεθός τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Οι βασικές μέθοδοι αποθήκευσης είναι[3]:

- Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτή της ηλεκτροχημικής μετατροπής και αποθήκευσης της ενέργειας σε συσκευές που ονομάζονται ηλεκτρικοί συσσωρευτές ή κοινώς μπαταρίες και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος

- Με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) όπου ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

- Με σφονδύλους (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα – γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στροφέμενη μάζα[13].

- Με υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.

- Με διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια παράγεται, όταν ζητηθεί, με έναν υδροστρόβιλο.

- Μονάδες συμπαραγωγής

Μία βασική τεχνολογία που είναι οικονομικά συμφέρουσα είναι αυτή της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Πιο συγκεκριμένα από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού που χρησιμοποιούν καύσιμα αξιοποιείται η θερμότητα της καύσης. Τυπικά σε μία συμβατική μηχανή σχεδόν τα τρία τέταρτα της ενέργειας του καυσίμου είναι θερμική ενέργεια η οποία αποβάλλεται στο περιβάλλον. Στις μονάδες συμπαραγωγής χρησιμοποιείται η θερμότητα αυτή προκειμένου να καλύψει τοπικές ανάγκες σε θέρμανση με άμεσο αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι είναι πολύ δύσκολη η μεταφορά θερμότητας και ειδικά για το μέγεθος των μονάδων που μελετάμε είναι αδύνατη, οπότε απαιτείται η μονάδα παραγωγής να είναι δίπλα στο φορτίο. Με τα μικροδίκτυα αυτό το πρόβλημα λύνεται. [3],[12]

Στην παρακάτω φωτογραφία βλέπουμε τη δομή του μικροδικτύου που έχει εγκατασταθεί στην Κύθνο



Εικόνα 2.2 Μικροδίκτυο στην Κύθνο [1]

### 2.2.3 Ηλεκτρονικά ισχύος

Τα κύρια στοιχεία που καθιστούν τα μικροδίκτυα εφικτά είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος, τα συστήματα ελέγχου και η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των πηγών. Όλα αυτά επιτρέπουν στο μικροδίκτυο να λειτουργεί ως ημιαυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Στην ακόλουθη ενότητα θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τη σημασία των ηλεκτρονικών ισχύος για το μικροδίκτυο.

Οι μικροπηγές συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Αυτό είναι απαραίτητο για να υπάρξει μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχό τους, αφού η παρεμβολή του μετατροπέα αποσυμπλέκει τον έλεγχο της πρωτογενούς πηγής ισχύος από αυτόν του δικτύου. Όμως τις περισσότερες φορές η σύνδεση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι επιβεβλημένη καθώς είναι αδύνατη η απευθείας σύνδεση των πηγών στο δίκτυο. Για παράδειγμα οι μπαταρίες, τα φωτοβολταϊκά και οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ισχύ σε συνεχές ρεύμα, ενώ οι μικροτουρμπίνες και οι σφόνδυλοι σε εναλλασσόμενο με πολύ υψηλή και μεταβλητή συχνότητα αντίστοιχα [10],[14]-[16]. Ουσιαστικά ο έλεγχος των αντιστροφών καθορίζει την παροχή ενεργού και άεργου ισχύος από τις μικροπηγές στο σύστημα. Αναλαμβάνει να προσαρμόσει τα χαρακτηριστικά και την παραγωγή ισχύος της κάθε μικροπηγής στις ανάγκες του συστήματος και ταυτόχρονα τη ρύθμιση της τάσης στο

μικροδίκτυο[16]. Αποκτά , λοιπόν, πρωτεύουσα σημασία για τη σύνδεση των μικροπηγών στο δίκτυο και τον σχηματισμό του μικροδικτύου[10].

Η χρήση των αντιστροφών για σύνδεση των μονάδων στο δίκτυο, διαφοροποιεί την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο σύστημα ή με ένα απομονωμένο σύστημα ισχύος στο οποίο συμμετέχουν μονάδες όπως γεννήτριες ντίζελ , υδροστρόβιλοι και ανεμογεννήτριες. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζουν την ευσταθή λειτουργία τους στις στρεφόμενες μάζες των μηχανών που συνδέονται απευθείας στο δίκτυο. Στην περίπτωση του μικροδικτύου όλες σχεδόν οι πηγές συνδέονται μέσω αντιστροφών και έτσι το σύστημα δεν διαθέτει την απαραίτητη αδράνεια που εξασφαλίζουν οι στρεφόμενες μηχανές μέσω της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας. Ακόμα και αν οι μικροπηγές βασίζουν τη λειτουργία τους στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή, η στρεφόμενη μηχανή είναι απομονωμένη από το δίκτυο με τη παρεμβολή του αντιστροφέα. Εναπόκειται στον έλεγχο των αντιστροφών που συνδέουν στο δίκτυο διατάξεις συσσώρευσης ενέργειας και πηγές με ελεγχόμενη παραγωγή ισχύος, να υποκαταστήσει την ευσταθή απόκριση που έχει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με στρεφόμενες μηχανές[14],[16]. Εκτός από τον έλεγχο των αντιστροφών των μικροπηγών, ελεγκτές μπορούν να τοποθετηθούν και σε μέρος των φορτίων του μικροδικτύου . Οι ελεγκτές αυτοί μπορεί να πραγματοποιούν απόρριψη και εισαγωγή φορτίων ανάλογα με την κρισιμότητά τους ώστε να διατηρείται η επιθυμητή ισορροπία παραγωγής-κατανάλωσης στο σύστημα[10].

#### **2.2.4 Σημείο σύνδεσης με το δίκτυο**

Ο τρόπος που τα μικροδίκτυα συνδέονται στο δίκτυο διανομής διαφοροποιείται. Διαφοροποιήσεις υπάρχουν για το αν το ίδιο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο στη μέση τάση ή στη χαμηλή, σε μια ή περισσότερες θέσεις. Μικρές παραγωγικές μονάδες σε συνδυασμό με ορισμένα φορτία, π.χ. ένα σύστημα παραγωγής που θα τροφοδοτεί ένα νοσοκομείο, και λειτουργεί όπως ένα μικροδίκτυο, θα είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο της χαμηλής τάσης. Αντίθετα στη μέση τάση συνδέονται τα συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους. Οι μονάδες παραγωγής μαζί με τα φορτία σχηματίζουν ένα δίκτυο χαμηλής τάσης, αποτελώντας σαν σύνολο το μικροδίκτυο, και συνδέονται στη μέση τάση που τα βλέπει σαν κάτι ενιαίο, μια ανεξάρτητη οντότητα. Με παρόμοιο τρόπο υπάρχουν μικροδίκτυα που συνδέονται στο δίκτυο στην υψηλή τάση. [7],[9].

Το βασικό θέμα ,όμως, που αφορά το σημείο σύνδεσης του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο είναι ο σωστός συγχρονισμός μεταξύ των δύο . Ο διακόπτης στο σημείο σύνδεσης (point of common coupling –PCC) είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση αυτή και δεν πρέπει να επιτρέψει τη μετάβαση από αυτόνομη λειτουργία σε διασυνδεδεμένη αν η νησίδα και το δίκτυο δεν είναι συγχρονισμένα. Κάτι τέτοιο, προφανώς, απαιτεί μέτρηση της τάσης και της συχνότητας και στις δύο πλευρές του διακόπτη[18].

#### **2.2.5 Τεχνική λειτουργία του μικροδικτύου**

Η εισαγωγή μονάδων παραγωγής στο επίπεδο την χαμηλής και μέσης τάσης δεν είναι απλό θέμα από τεχνικής πλευράς ειδικά αν αυτή ενταθεί στο μέλλον. Δημιουργούνται

μία σειρά από τεχνικά ζητήματα που θα πρέπει να μελετηθούν με προσοχή τα οποία όμως δεν είναι άμεσο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καλό θα είναι, όμως, να αναφερθούμε έστω και περιληπτικά σε αυτά για να κατανοήσουμε καλύτερα τη λειτουργία του μικροδικτύου.

1. Ένα θέμα που παρουσιάζεται είναι οι μεταβολές της τάσης του δικτύου. Για κάθε δίκτυο διανομής έχουν τεθεί συγκεκριμένα όρια για την τάση. Το πλέον επικίνδυνο σενάριο από την παρουσία μικροπηγών στο επίπεδο της χαμηλής τάσης είναι η πιθανότητα να υπερβεί η τάση τα μέγιστα επιτρεπτά όρια [3].
2. Επίσης πρόβλημα είναι η αύξηση στη στάθμη βραχυκυκλώσεως του δικτύου. Η χρήση στρεφόμενων κυρίως μηχανών στις μονάδες παραγωγής προφανώς θα έχει επίπτωση στο επίπεδο του σφάλματος. Η αύξηση του επιπέδου του σφάλματος πιθανόν να απαιτεί αλλαγές στους διακόπτες του δικτύου κάτι που συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους ειδικά αν τις όποιες αναβαθμίσεις είναι υποχρεωμένος να τις αναλάβει ο ιδιοκτήτης της μονάδας. [3]
3. Σημαντικό θέμα για την εισαγωγή των μικροπηγών στο δίκτυο είναι η ποιότητα ισχύος. Η ποιότητα ισχύος περιλαμβάνει μία σειρά από φαινόμενα[3]:
  - Μεταβολή της τάσης (Voltage variation)
  - Απότομη αλλαγή της τάσης (Rapid voltage change )
  - Διακύμανση της τάσης (Voltage fluctuation )
  - Φλίκερ (Flicker)
  - Προσωρινή υπέρταση (Temporary power frequency overvoltage or swell)
  - Αρμονικές στην τάση (Harmonic voltage)
  - Ασυμμετρία στην τάση (Voltage unbalance)
4. Άλλο ζήτημα είναι η προστασία των συσκευών του μικροδικτύου, το οποίο είναι ένα σύνθετο θέμα αφού αφορά τόσο τη λειτουργία των υπαρχόντων προστασιών αλλά και των αλλαγών που θα πρέπει να γίνουν στο σύστημα διανομής. Ειδικότερα θα πρέπει να μελετηθεί το θέμα των γειώσεων, των προστασιών που θα πρέπει να έχουν οι μονάδες αλλά και τη λειτουργία του συστήματος σε κατάσταση νησίδας. Οι κατανεμημένες παραγωγές που είναι ενσωματωμένες σε δίκτυα είναι πιθανόν να διατηρούν ενεργές γραμμές έπειτα από την αποσύνδεση του υπερκείμενου δικτύου δημιουργώντας έτσι κινδύνους για το προσωπικό που δουλεύει για την αποκατάσταση ενός σφάλματος ή στην συντήρηση του δικτύου.[3]
5. Η ενσωμάτωση κατανεμημένων παραγωγών στο δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του δικτύου εφόσον αυτό δεν είναι σχεδιασμένο για ενσωμάτωση τέτοιων πηγών. Για παράδειγμα, κατανεμημένες παραγωγές με κυμαινόμενη ισχύ εξόδου ή με χρήση επαγωγικών γεννητριών έχουν απαιτήσεις σε άεργο ισχύ δυσχεραίνοντας την αξιοπιστία λειτουργίας του δικτύου[10].
6. Δεν θα πρέπει να ξεχάσουμε το θέμα της ευστάθειας του συστήματος που αφορά κυρίως την περίπτωση που η εκτεταμένη χρήση της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και των μικροπηγών χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της

ασφάλειας του δικτύου. Το βασικό πρόβλημα σε αυτήν την περίπτωση είναι η συμπεριφορά των διεσπαρμένων μονάδων μετά από μία απώλεια μίας μεγάλης μονάδος ή μίας μεγάλης γραμμής μεταφοράς.[3]

7. Τέλος, υπάρχουν οικονομικά ζητήματα που αφορούν τις συμφωνίες αγοράς και πώλησης της ενέργειας, αλλά και ρυθμίσεις που καθορίζουν την ευθύνη των ιδιοκτητών κατανεμημένης παραγωγής και του δικτύου απέναντι σε διάφορα τεχνικά και οικονομικά θέματα που κάνουν αναγκαία την ύπαρξη μιας ρυθμιστικής αρχής σαν την Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (Federal Energy Regulatory Commission –FERC) που δημιουργήθηκε το 1977 στις ΗΠΑ[10].

### 2.2.6 Οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου

Ο σκοπός της ύπαρξης των μικροδικτύων είναι να χρησιμοποιηθούν από ένα ή περισσότερους καταναλωτές με σκοπό να εξυπηρετήσουν το δικό τους οικονομικό όφελος. Παρόλο που πιθανόν να υπάρχει ενδιαφέρον και για λειτουργικά θέματα όπως περιβαλλοντικά ή επαρκείας ισχύος σε κάθε περίπτωση το βασικό στοιχείο παραμένει το κόστος[11]. Το κόστος παραγωγής των μικροδικτύων θα πρέπει να συγκριθεί με το κόστος της ενέργειας στο επίπεδο της χαμηλής τάσης. Ευθεία σύγκριση με το κόστος παραγωγής των μεγάλων μονάδων δεν είναι δίκαιη αφού αγνοούνται κόστη για την μεταφορά της ενέργειας από ένα απομακρυσμένο σημείο στον καταναλωτή. Αντίθετα τεχνολογίες που αφορούν την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη.

Ωστόσο το θέμα της οικονομικής λειτουργίας δεν μπορεί να μείνει μόνο στο θέμα του κόστους παραγωγής αφού υπεισέρχονται και άλλοι παράμετροι στο πρόβλημα όπως αυτό της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος. Στα παλαιότερα συστήματα η λειτουργία βασιζόταν σε ένα κεντρικό σύστημα όπου η πολιτική σε σχέση με την αξιοπιστία και την ποιότητα της ισχύος ήταν κοινή για όλους του πελάτες. Αντίθετα η σύγχρονη αντίληψη θέλει το κάθε καταναλωτή να αποφασίζει για τον εαυτό του το επίπεδο της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος γνωρίζοντας βέβαια ότι υπάρχει και ένα αντίστοιχο κόστος. Τέλος ένα βασικό θέμα σε σχέση με τα οικονομικά των μικροδικτύων αφορά την σχέση τους με το κυρίως δίκτυο και αν η λειτουργία ξεπεράσει την απλή σχέση της αγοραπωλησίας ενέργειας. Ένας χαρακτηρισμός που επαναλαμβάνεται ιδιαίτερα στο αμερικανικό σύστημα είναι αυτός του «καλού πολίτη» δηλαδή αν το μικροδίκτυο επικουρεί την λειτουργία του κεντρικού δικτύου και η χρήση των πηγών γίνεται με ορθολογικό τρόπο[3],[12]. Ωστόσο και η συμμετοχή στην αγορά ενέργειας θα πρέπει να γίνεται με μία μέθοδο που περικλείει τις ιδιαιτερότητες του συστήματος και ειδικά το μέγεθος αφού τα μικροδίκτυα των λίγων δεκάδων kW δεν μπορούν να σταθούν με την ίδια βαρύτητα με μία μονάδα πολλών MW σε μία αγορά ενέργειας και σίγουρα θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι τοπικές ανάγκες.[3]

### 2.2.7 Έλεγχος του μικροδικτύου

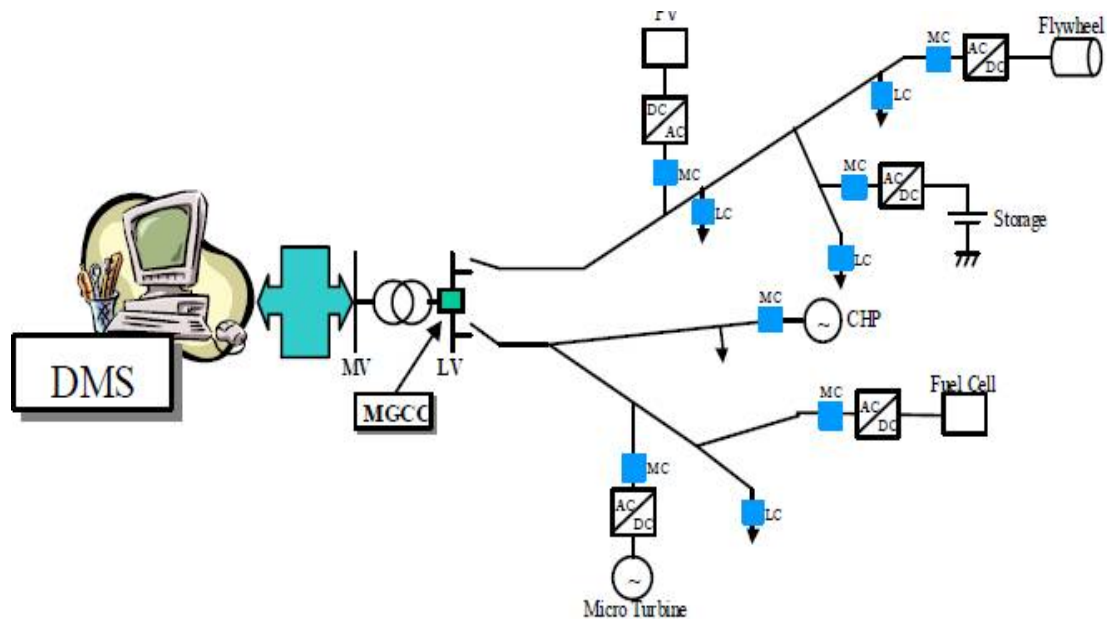
Ο έλεγχος του μικροδικτύου είναι πολύ σημαντικός για τη λειτουργία του και είναι υπεύθυνος για τη βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του μικροδικτύου. Ο έλεγχος μπορεί να γίνεται κάπου κεντρικά, δηλαδή οι αποφάσεις και οι υπολογισμοί παίρνονται από έναν κεντρικό ελεγκτή και στη συνέχεια ανακοινώνονται στους

παραγωγούς και στους καταναλωτές. Μια άλλη προσέγγιση που έχει προταθεί για τα μικροδίκτυα είναι ο διεσπαρμένος έλεγχος, όπου οι αποφάσεις παίρνονται τοπικά από τα φορτία και τους παραγωγούς χωρίς την ύπαρξη του κεντρικού ελεγκτή. Οι τοπικοί ελεγκτές παίρνουν κάποια είσοδο (σήμα) από το διαχειριστή του μικροδικτύου και με βάση αυτό το σήμα επηρεάζουν την παραγωγή ή κατανάλωση τους[1].

### 2.2.7.1 Κεντρικός έλεγχος

Σε αυτή την περίπτωση οι τοπικοί ελεγκτές των παραγωγών και των φορτίων (Local Controllers) λαμβάνουν εντολές ελέγχου από τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller)[4]. Ο κεντρικός ελεγκτής έχει τη γενική εποπτεία του μικροδικτύου και δρα σαν διεπαφή ανάμεσα στο μικροδίκτυο και το υπόλοιπο δίκτυο. Όλες οι πληροφορίες από τους LC μαζεύονται στον MGCC. Εκεί γίνεται η επεξεργασία και η βελτιστοποίηση με βάση τους συνολικούς στόχους του μικροδικτύου και δίνονται εντολές στους LC[1]. Ο κεντρικός ελεγκτής χρησιμοποιεί τις τιμές της αγοράς για την ηλεκτρική ενέργεια και τα καύσιμα για να αποφασίσει τη ποσότητα της ενέργειας που θα πάρει ή θα δώσει το μικροδίκτυο βελτιστοποιώντας τις δυνατότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτει. Έτσι σε ένα κεντρικά ελεγχόμενο μικροδίκτυο ο MGCC έχει την ευθύνη για την μείωση του κόστους λειτουργίας, την μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, την αύξηση του συνολικού κέρδους του μικροδικτύου κτλ. Ο MGCC μπορεί να εκδώσει εντολές οι οποίες έχουν να κάνουν με την παραγωγή του κάθε τοπικού παραγωγού, ποια φορτία θα εξυπηρετηθούν και ποια θα απορριφθούν[1],[4]. Οι LC είναι υποχρεωμένοι να ακολουθούν τις εντολές αυτές και έχουν περιορισμένες δυνατότητες αυτονομίας[1]. Κατά την απομονωμένη λειτουργία ο έλεγχος του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου αποκτά τον χαρακτήρα της βελτιστοποίησης και του σχεδιασμού της παραγωγής που επιτελείται σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Τέλος, κατά τη συνδεδεμένη λειτουργία με το υπερκείμενο δίκτυο μέσης τάσης, ο έλεγχος από τον κεντρικό ελεγκτή θα γίνεται σε συντονισμό με το σύστημα διαχείρισης του δικτύου διανομής (DMS-Distribution Management System) που θα αποτελεί το τελευταίο επίπεδο ελέγχου και οποιαδήποτε βελτιστοποίηση της παραγωγής στο μικροδίκτυο θα εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες στο δίκτυο διανομής. Το DMS συχνά μπορούμε να το συναντήσουμε και ως Distribution Network Operator (DNO). Το DNO, λοιπόν, είναι υπεύθυνο για την τεχνική λειτουργία του δικτύου μέσης και χαμηλής τάσης όπου ένα ή περισσότερα μικροδίκτυα συνδέονται[19]. Επιπρόσθετα, σε μια ελεύθερη αγορά ενέργειας απαιτείται και η ύπαρξη ενός διαχειριστή αγοράς (market operator-MO), ο οποίος αναλαμβάνει την ευθύνη για μια ομαλή λειτουργία της αγοράς ανάμεσα στα μικροδίκτυα και το κύριο δίκτυο[20],[21].





Εικόνα 2.3 Τυπική δομή μικροδικτύου [4]

### 2.2.7.2 Διεσπαρμένος έλεγχος

Ο διεσπαρμένος έλεγχος σκοπό έχει να προωθήσει την αυτονομία των παραγωγών και των καταναλωτών μέσα στο μικροδίκτυο. Η αυτονομία αυτή υπονοεί ότι οι τοπικοί ελεγκτές (LC) έχουν κάποιο επίπεδο νοημοσύνης και μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους διαμορφώνοντας έτσι μια μεγάλη νοήμονα οντότητα[20]. Εισάγοντας την ιδέα της αυτονομίας στο μικροδίκτυο, ο κάθε τοπικός ελεγκτής μπορεί να έχει το δικό του στόχο ο οποίος να μην είναι κατά ανάγκη ο ίδιος για όλους. Σε αυτό το είδος του ελέγχου, οι ελεγκτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, υπακούοντας σε κάποιους κανόνες και ακολουθώντας κάποια πρωτόκολλα, για να προσδιορίσουν τη λειτουργική κατάσταση του μικροδικτύου. Αυτές οι προδιαγραφές κάνουν το διεσπαρμένο σύστημα ελέγχου ιδανικό για τη χρήση Multi-Agent πλατφόρμας[20]. Δηλαδή, ενός συστήματος που ο κάθε τοπικός ελεγκτής αποτελείται από έναν πράκτορα (agent), ο οποίος είναι ένα πρόγραμμα που διαθέτει κάποιο επίπεδο νοημοσύνης. Ο κάθε πράκτορας, ανάλογα με το τι είδος τοπικού ελεγκτή αντιπροσωπεύει (καταναλωτή, παραγωγού, μπαταρίες) μπορεί να έχει τους δικούς του στόχους και να αντιδρά διαφορετικά στις όποιες αλλαγές ή γεγονότα συμβούν στο μικροδίκτυο[1].

### 2.2.7.3 Διεσπαρμένος έλεγχος με χρήση ευφυών πρακτόρων

Πρώτα από όλα ένας ευφυής πράκτορας είναι μία φυσική οντότητα η οποία δρα στο περιβάλλον ή μία εικονική οντότητα. Στην περίπτωση των ενεργειακών συστημάτων ο φυσικός πράκτορας μπορεί να ελέγχει απευθείας μία μικροτουρμπίνα ενώ ο εικονικός πράκτορας μπορεί να είναι το πρόγραμμα που συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας[3],[21]. Ο πράκτορας είναι μία οντότητα λογισμικού που έχει δύο βασικές ιδιότητες, αυτήν της ευφυΐας αλλά και της ικανότητας να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες[22]. Το γεγονός ότι οι πράκτορες επικοινωνούν τους δίδει την δυνατότητα να μαθαίνουν, να συνεργάζονται αλλά και να συντονίζονται. Ο ευφυής πράκτορας

σχηματίζει μία κοινωνία με άλλους αντίστοιχους πράκτορες με βάση κάποιους κανόνες και στόχο έχει να λύσει ένα ή περισσότερα προβλήματα[19].

Εντάσσοντας τον έλεγχο των στοιχείων του μικροδικτύου σε ένα σύστημα πολλαπλών ευφυών πρακτόρων ουσιαστικά η κάθε μονάδα συμμετέχει στον μηχανισμό λήψης αποφάσεων για λειτουργικά θέματα. Έτσι οι πράκτορες θα καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα συμμετέχει σε μία αγορά ενέργειας ή την συμπεριφορά των μονάδων κατά την διάρκεια της απομονωμένης λειτουργίας[22].

Οι αρμοδιότητες ενός κεντρικού ελεγκτή θα περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό και οι αποφάσεις θα λαμβάνονται στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο. Αυτός είναι ο βασικός λόγος που σύμφωνα με την αρχιτεκτονική αυτή ο κάθε πράκτορας και κατά συνέπεια η μονάδα που αυτός ελέγχει θα πρέπει να διαθέτει ευφυΐα και προηγμένες ικανότητες επικοινωνίας. Με τον όρο προηγμένη επικοινωνία δεν αναφερόμαστε κατ' ανάγκη σε γρήγορες και μεγάλου όγκου επικοινωνίες αλλά σε ποιοτική επικοινωνία που σχετίζεται με την ανταλλαγή γνώσεων και εννοιών.

Ακόμη υπάρχει και το διαχρονικό θέμα του κόστους. Μία μονάδα που πιθανόν να στοιχίζει λιγότερο από 10 χιλιάδες ευρώ απαιτεί να έχει το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας. Η παρουσία ενός συστήματος κεντρικού ελέγχου στην καλύτερη περίπτωση συνεπάγεται ενός κόστους συγκρίσιμου με την τιμή του εξοπλισμού και σίγουρα αυτό δεν θα είναι εύκολο να αποσβεστεί. Αντίθετα η λειτουργία με τους πράκτορες μπορεί να βασιστεί σε πολύ φτηνούς μικροεπεξεργαστές πλακέτας κρατώντας το κόστος κάτω από τα διακόσια ευρώ. Εμμένοντας στο θέμα του κόστους θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν και το θέμα του προσωπικού. Στα μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα η παρουσία ειδικευμένου προσωπικού δεν έχει τρομερό αντίκτυπο στο κόστος λειτουργίας. Αντίθετα στα μικρά συστήματα δεν είναι εφικτό να υπάρχει προσωπικό που να επιτηρεί συνεχώς το σύστημα. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η τοπική ευφυΐα προκειμένου να υποκαταστήσουμε τις ανάγκες σε προσωπικό[3],[23].

Επιπλέον κατά την εγκατάσταση μίας νέας μονάδας, εάν το σύστημά μας έχει ικανότητες «εγκατάστασης και άμεσης λειτουργίας» (plug n' play) τότε περιορίζεται ακόμη περισσότερο το κόστος. Αυτή είναι μία σημαντική δυνατότητα που θα πρέπει να έχει το σύστημα. Όταν αναφέρεται άμεση λειτουργία δεν σημαίνει απλά να αρχίζει να παράγει ενέργεια αλλά να καταλάβει το σύστημα ποιες ακριβώς μονάδες έχει δίπλα του και στη συνέχεια να συνεργαστεί μαζί τους[3],[6].

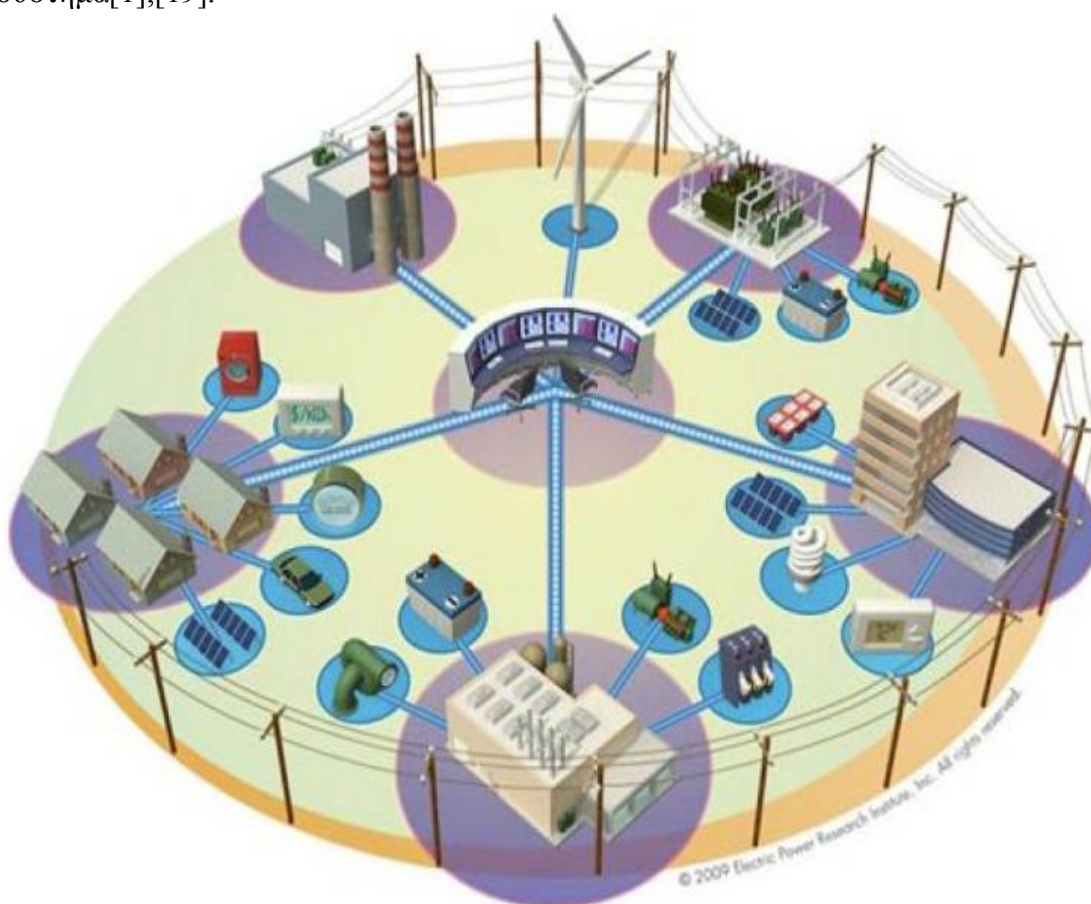
Ένας ευφυής πράκτορας όπως προαναφέραμε έχει την δυνατότητα να δρα στο περιβάλλον. Ο πράκτορας ουσιαστικά δρα στο περιβάλλον του με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με τις άμεσες αποφάσεις του. Για παράδειγμα αν ο πράκτορας είναι μία γεννήτρια diesel τότε η απόφαση για την αύξηση της παραγωγής επηρεάζει την τάση στους γύρω ζυγούς, τις παραγωγές στις άλλες μονάδες του συστήματος αλλά και σε γενικότερο οπτικό πεδίο την συνολική ευστάθεια και ασφάλεια του συστήματος. Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με την επικοινωνία του με τους άλλους πράκτορες όπου επηρεάζοντας τις αποφάσεις τους αλλάζει έμμεσα την κατάσταση του περιβάλλοντος.[21]

Τέλος ο κάθε ευφυής πράκτορας έχει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά και προσπαθεί να ικανοποιήσει κάποιους στόχους χρησιμοποιώντας τους πόρους, τις ικανότητες του αλλά και τις υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει. Ο τρόπος με τον οποίο ο ευφυής πράκτορας χρησιμοποιεί τα παραπάνω καθορίζει την συμπεριφορά του[19].

#### 2.2.7.4 Διαφορές

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δυο προσεγγίσεις (κεντρικό και δεσπαρμένο έλεγχο) έχει να κάνει με τον όγκο των πληροφοριών που μεταφέρονται και επεξεργάζονται σε κάθε περίπτωση. Ένα κεντρικό σύστημα απαιτεί ο MGCC να ασκεί απευθείας έλεγχο στους τοπικούς ελεγκτές, να μπορεί να μαζεύει όλες τις πληροφορίες, να τις επεξεργάζεται και να βγάζει αποτελέσματα σε «λογικό χρόνο». Αυτό απαιτεί ένα πλήρες και γρήγορο σύστημα επικοινωνίας. Επίσης, πρέπει ο MGCC να διαθέτει μεγάλη επεξεργαστική ισχύ ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται τα δεδομένα και να δίνει εντολές ταχύτατα, έτσι ώστε να διορθώνει σφάλματα ασφάλειας του μικροδίκτυου και να μπορεί να κάνει σωστή οικονομική διαχείριση του. Αυτό όμως, γίνεται οικονομικά ανέφικτο καθώς ο αριθμός των τοπικών ελεγκτών στο μικροδίκτυο αυξάνεται.

Από την άλλη πλευρά, ο δεσπαρμένος έλεγχος απαιτεί πιο απλό δίκτυο επικοινωνίας και το ποσό πληροφοριών που ανταλλάσσεται μπορεί να είναι ελάχιστο. Οι ελεγκτές μπορούν να λαμβάνουν μαζικά κάποιο σήμα και με βάση αυτό και το τύπο του εκάστοτε ελεγκτή να παίρνουν κάποιες αποφάσεις τοπικά. Αυτή η προσέγγιση επίσης, προσφέρει τη δυνατότητα "plug and play". Δηλαδή, κάθε τοπικός ελεγκτής που εγκαθίσταται θα έχει τον ίδιο πράκτορα με έναν ήδη υπάρχον του ίδιου τύπου (π.χ. οικιακό καταναλωτή "τύπου Α"). Στο αντίστοιχο κεντρικό μοντέλο, κάθε νέα προσθήκη στο σύστημα θα απαιτούσε προγραμματιστικές αλλαγές στο όλο σύστημα[1],[19].



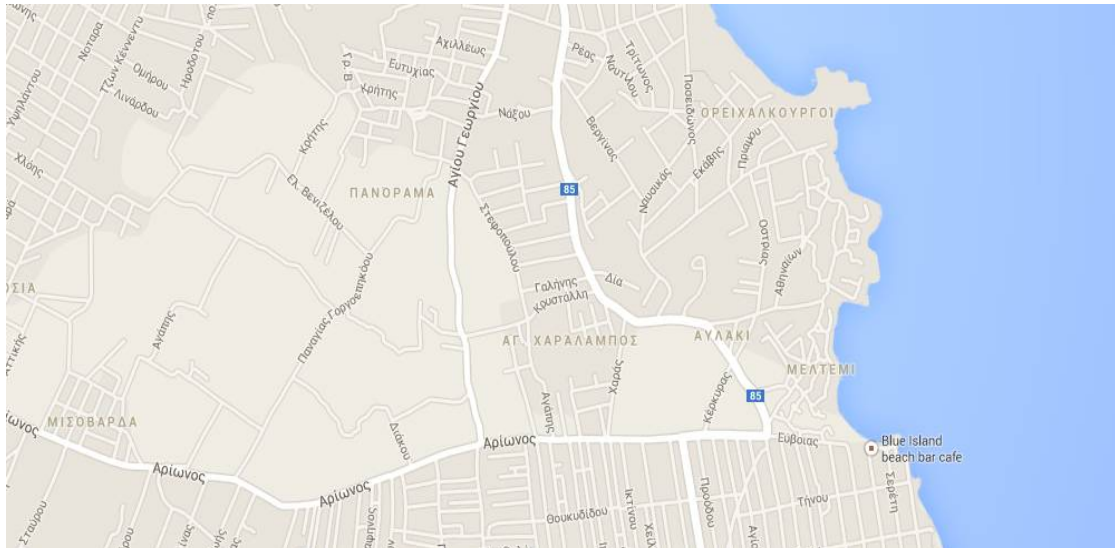
Εικόνα 2.4 Δομή ενός μικροδίκτυου [9]

### 2.3 Η κατασκήνωση « Το Μελέμι»

Το Μελέμι είναι ένας παραθαλάσσιος κατασκηνωτικός συνεταιρισμός που βρίσκεται στην περιοχή της Ραφήνας. Συγκεκριμένα στις περιοχές “Αυλάκι” και “Λάκκα” Ραφήνας. Ο συνεταιρισμός νοικιάζει την έκταση από τον δήμο Ραφήνας. Η ίδρυσή του χρονολογείται στο 1946 , λίγο μετά δηλαδή το τέλος του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Οι κάτοικοι σ’ αυτόν τον οικισμό είναι υπάλληλοι εταιρειών πετρελαιοειδών. Αρχικά έμεναν όλοι σε σκηνές και η περιοχή δεν είχε ούτε ρεύμα ούτε νερό. Αργότερα άρχισαν να κτίζονται οι πρώτες ξύλινες κατοικίες. Σήμερα αποτελείται από 220 λυόμενες κατοικίες περίπου 70 τ.μ. η καθεμιά , από τις οποίες οι 184 ανήκουν στα μόνιμα μέλη και οι υπόλοιπες στα μέλη του Συλλόγου Υπαλλήλων Εταιρειών Πετρελαίου και Υγραερίου (ΣΥΕΠΥ). Το Μελέμι διοικείται από διοικητικό συμβούλιο το οποίο εκλέγεται κάθε δύο χρόνια.



Εικόνα 2.5 Μια άποψη της κατασκήνωσης από ψηλά



**Εικόνα 2.6** Η περιοχή που βρίσκεται το «Μελτέμι»

Το Μελτέμι, σαν παραθαλάσσιο, είναι ένας οικισμός που γεμίζει με κατοίκους κατά την θερινή περίοδο. Οι λυόμενες κατοικίες χρησιμοποιούνται από τα μέλη κυρίως ως εξοχικές κατοικίες. Χτισμένο μέσα στο πράσινο και δίπλα στη θάλασσα είναι ένα τέλειο μέρος για να περάσει κάποιος το καλοκαίρι του. Όπως γίνεται αντιληπτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιων κανόνων για την εύρυθμη λειτουργία της κατασκήνωσης. Γι αυτό το σκοπό υπάρχει κανονισμός λειτουργίας για την τήρηση του οποίου είναι υπεύθυνο το διοικητικό συμβούλιο. Βοηθητικά όργανα του Δ.Σ. για τη λειτουργία της κατασκήνωσης είναι ο Αρχηγός, οι Ειδικές Επιτροπές που δύναται να συστήνει για συγκεκριμένο σκοπό το Δ.Σ. και η Επιτροπή Νεολαίας. Τα μέλη του συνεταιρισμού είναι υποχρεωμένα να καταβάλουν κάθε μήνα μια εισφορά η οποία είναι απαραίτητη για την ύπαρξη της κατασκήνωσης και καθορίζεται με αποφάσεις του Δ.Σ. Προφανώς οι κάτοικοι της κατασκήνωσης έχουν και μια σειρά από άλλες υποχρεώσεις, οι οποίες ορίζονται από τον κανονισμό λειτουργίας, και έχουν να κάνουν με την προστασία του περιβάλλοντος, τη καθαριότητα, την ασφάλεια και γενικά του κανόνες καλής γειτονίας [24].

Στην κατασκήνωση υπάρχουν εγκατεστημένα δύο μικροδίκτυα, ένα αυτόνομο και ένα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο της ΔΕΗ. Το αυτόνομο σύστημα που τίθεται υπό μελέτη αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία συνδέονται με μια συστοιχία μπαταριών και από μια ανεμογεννήτρια η οποία και αυτή συνδέεται με μπαταρίες. Έτσι έχουμε δυο υβριδικά συστήματα για να καλύψουμε τις ανάγκες μιας κατοικίας της κατασκήνωσης. Το διασυνδεδεμένο σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό από καταναμημένες παραγωγές, οι οποίες μπορούν εν μέρει να υποστηρίξουν το φορτίο της κατασκήνωσης σε περίπτωση απομονωμένης λειτουργίας. Το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, μπαταρίες και μια ντιζελογεννήτρια, η οποία όμως χρησιμοποιείται κυρίως σε περίπτωση πυρκαγιάς. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται τα χαρακτηριστικά των μηχανημάτων που αποτελούν τα δυο μικροδίκτυα.

Πίνακας I: Τα χαρακτηριστικά του αυτόνομου συστήματος.

| Αυτόνομο Σύστημα   |                | Ονομαστικά χαρακτηριστικά | Brand name    |
|--------------------|----------------|---------------------------|---------------|
| Υβριδικό σύστημα 1 | φωτοβολταϊκά   | 0.34 kW                   | Yingli Solar  |
|                    | μπαταρίες      | 4 x 12 V (105 Ah)         | Delphi BE 64M |
| Υβριδικό σύστημα 2 | ανεμογεννήτρια | 0.600 kW                  | NTUA          |
|                    | μπαταρίες      | 4x 12V (100Ah)            | Banner        |

Πίνακας II: Τα χαρακτηριστικά του διασυνδεδεμένου συστήματος.

| Διασυνδεδεμένο Σύστημα         |                | Ονομαστικά χαρακτηριστικά | Brand name               |
|--------------------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|
| Παραγωγή 1:                    | φωτοβολταϊκά   | 2.720 kW                  | Yingli Solar             |
|                                | inverter       | 3.000kW                   | Wurth solergy            |
| Παραγωγή 2:                    | φωτοβολταϊκά   | 0.680 kW                  | Yingli Solar             |
|                                | inverter       | 0.600 kW                  | Mastervolt Soladin 600   |
| Παραγωγή 3:                    | φωτοβολταϊκά   | 0.850 kW                  | Yingli Solar             |
|                                | inverter       | 2.000 kW                  | Steca grid 2000 Master-M |
| Παραγωγή 4 (υβριδικό σύστημα): | φωτοβολταϊκά   | 0.115 kW                  |                          |
|                                | μπαταρίες      | 2x 12 V (105 Ah)          | DELPHI BE 105 64 M       |
|                                | charger        | 12V, 10 A                 | Mastervolt IVO 12/10     |
| Παραγωγή 5:                    | ανεμογεννήτρια | 0.400 kW                  | NTUA                     |
|                                | inverter       | 0.600 kW                  | Mastervolt soladin 600   |

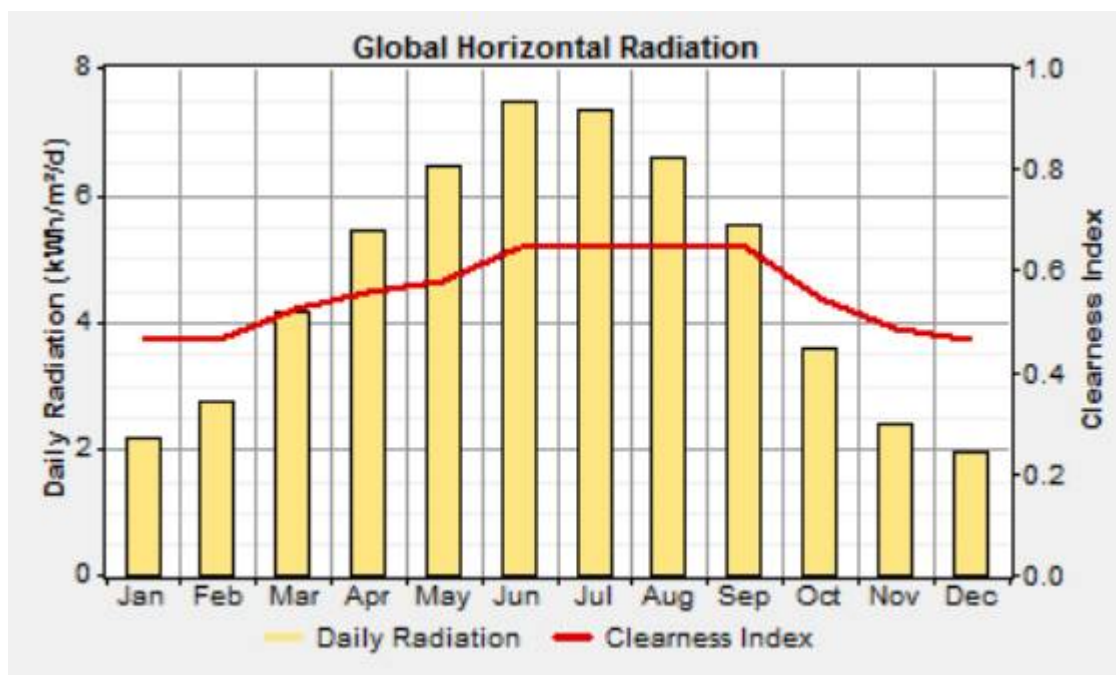
## 2.4 Πόροι

Στη διπλωματική αυτή εργασία χρησιμοποιήσαμε κάποια δεδομένα για τους πόρους του συστήματος τα οποία ήταν απαραίτητα για να πραγματοποιήσουμε την ανάλυση των μικροδικτύων και να προχωρήσουμε στη βελτιστοποίηση αυτών. Τα συστήματα στο Μελέμι αποτελούνται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και μια ντιζελογεννήτρια. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πληροφορίες για το ηλιακό και το αιολικό δυναμικό στην περιοχή της Ραφήνας.

### 2.4.1 Ηλιακό δυναμικό

Το λογισμικό HOMER για να εκτελέσει την προσομοίωση χρειάζεται δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία για κάθε ώρα ενός έτους. Το HOMER μας δίνει τη δυνατότητα, προσδιορίζοντας το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος της τοποθεσίας που έχουμε εγκαταστήσει τα φωτοβολταϊκά, να εισάγει από τη βάση δεδομένων του μέσω του internet την ηλιακή ακτινοβολία και τους δείκτες καθαρότητας για κάθε ώρα του έτους. Εισάγονται, λοιπόν, 8760 τιμές με τις οποίες το HOMER υπολογίζει τους μηνιαίους μέσους όρους της ηλιακής ακτινοβολίας και του δείκτη καθαρότητας. Στην εικόνα 2.7 βλέπουμε ένα διάγραμμα που απεικονίζει τη μηνιαία μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας και του δείκτη καθαρότητας και στην

εικόνα 2.8 μπορούμε να δούμε σε πίνακα τις ακριβείς τιμές αυτών των χαρακτηριστικών.



**Εικόνα 2.7** Ηλιακή ακτινοβολία και δείκτης καθαρότητας στην περιοχή της Ραφήνας για περίοδο ενός έτους

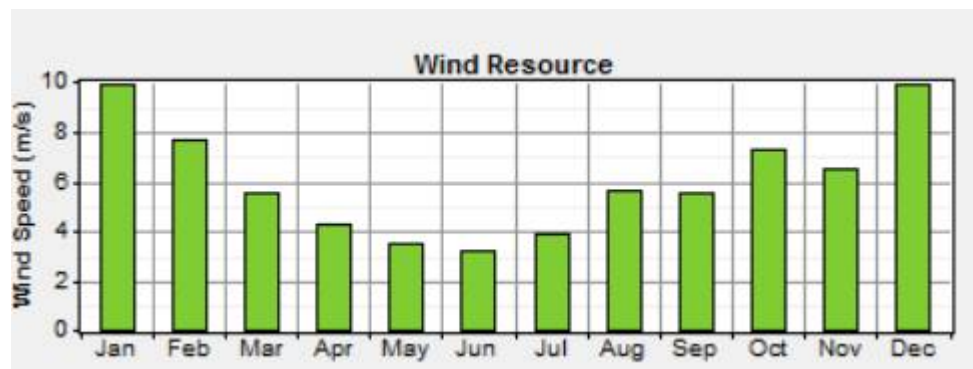
| Month     | Clearness Index | Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /d) |
|-----------|-----------------|---|
| January   | 0.472           | 2.163                                   |
| February  | 0.464           | 2.762                                   |
| March     | 0.527           | 4.149                                   |
| April     | 0.558           | 5.453                                   |
| May       | 0.582           | 6.436                                   |
| June      | 0.647           | 7.487                                   |
| July      | 0.649           | 7.329                                   |
| August    | 0.646           | 6.603                                   |
| September | 0.648           | 5.504                                   |
| October   | 0.548           | 3.562                                   |
| November  | 0.488           | 2.378                                   |
| December  | 0.464           | 1.930                                   |
| Average:  | 0.579           | 4.656                                   |

**Εικόνα 2.8** Πίνακας με τις μηνιαίες μέσες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και του δείκτη καθαρότητας

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή ειδικά την περίοδο μεταξύ Μαΐου και Αυγούστου. Για την περιοχή της Ραφήνας η ετήσια μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 4.656 kWh m<sup>-2</sup> και η ετήσια μέση τιμή του δείκτη καθαρότητας είναι 0.579.

## 2.4.2 Αιολικό δυναμικό

Όπως και με την ηλιακή ακτινοβολία έτσι και με την ταχύτητα του ανέμου το HOMER χρειάζεται τις τιμές της για κάθε ώρα ενός έτους ώστε να εκτελέσει την προσομοίωση του συστήματος. Δημιουργήσαμε ένα αρχείο με 8760 τιμές της ταχύτητας του ανέμου, όπως αυτές μετρήθηκαν στην περιοχή της Ραφήνας, και το εισάγαμε στο HOMER. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αυτές τις τιμές και υπολογίζει τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου καθώς και την μέση ετήσια τιμή. Βλέπουμε στην εικόνα 2.9 ένα διάγραμμα για την ταχύτητα του ανέμου κάθε μήνα όπως αυτό αναπαριστάται στο HOMER. Στην εικόνα 2.10 μπορούμε να δούμε έναν πίνακα με τη μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου κάθε μήνα.



Εικόνα 2.9 Γράφημα που απεικονίζει την μέση ταχύτητα του ανέμου κάθε μήνα

| Month           | Wind Speed (m/s) |
|-----------------|------------------|
| January         | 9.856            |
| February        | 7.648            |
| March           | 5.511            |
| April           | 4.242            |
| May             | 3.521            |
| June            | 3.181            |
| July            | 3.882            |
| August          | 5.592            |
| September       | 5.566            |
| October         | 7.327            |
| November        | 6.517            |
| December        | 9.856            |
| Annual average: | 6.058            |

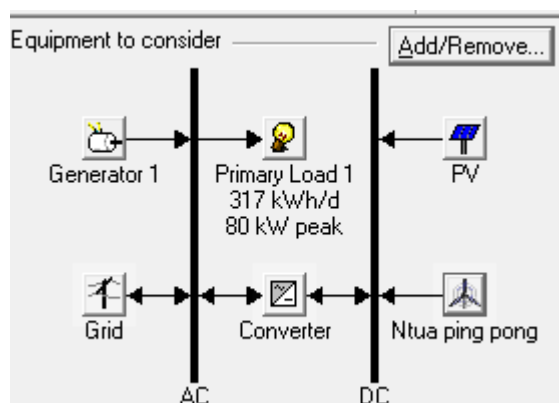
Εικόνα 2.10 Πίνακας με τις μηνιαίες μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου

Από τις παραπάνω εικόνες βλέπουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι αυξημένη τους μήνες του φθινοπώρου και του χειμώνα. Ενώ είναι αισθητά μειωμένη κατά τη διάρκεια την άνοιξης και του μεγαλύτερου μέρους του καλοκαιριού. Παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τον Αύγουστο σε σχέση με τον Ιούλιο, κάτι που δικαιολογείται από τα γνωστά σε όλους μας αυγουστιάτικα μελτέμια. Η ετήσια μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο «Μελτέμι» είναι 6.06 m/s, όπως αυτή υπολογίστηκε από το HOMER.



## 2.5 Το Διασυνδεδεμένο Μικροδίκτυο

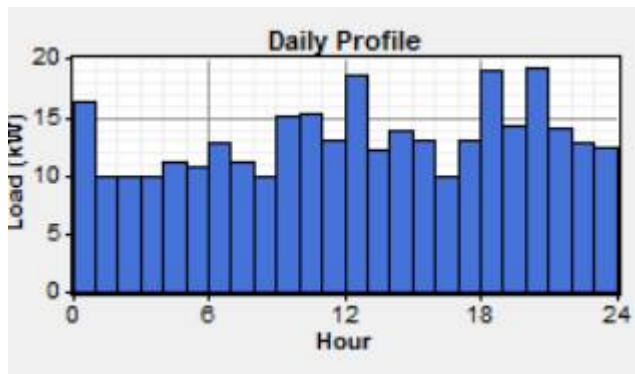
Το διασυνδεδεμένο σύστημα , όπως αναφέραμε παραπάνω, αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 4.25kW , μια ανεμογεννήτρια 0.400kW και μια ντιζελογεννήτρια 36kW. Ακόμη υπάρχει ένα υβριδικό σύστημα που αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο 0.115kW , μια συστοιχία μπαταριών και έναν charger. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας για τα φώτα που υπάρχουν στο κτίριο του πιγκ-πονγκ , καθώς υπάρχει ένας χειροκίνητος διακόπτης που μας επιτρέπει να επιλέξουμε αν θέλουμε τα φώτα να τροφοδοτούνται από το δίκτυο ή από το υβριδικό σύστημα. Στην εικόνα 2.11 μπορούμε να δούμε το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο , όπως αυτό αναπαρίσταται σχηματικά από το HOMER. Όλος ο εξοπλισμός που συνθέτει το σύστημα μας είναι ήδη εγκατεστημένος στην κατασκευή, οπότε θα υποθέσουμε ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης όλων των εξαρτημάτων είναι μηδενικό για να πραγματοποιήσουμε τις προσομοιώσεις με το HOMER.



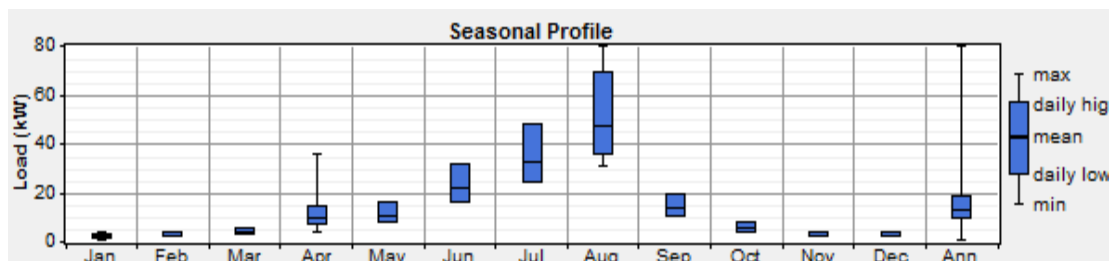
Εικόνα 2.11 Σχηματική υλοποίηση από το HOMER του μικροδικτύου

### 2.5.1 Ηλεκτρικό Φορτίο

Αρχικά, για να ξεκινήσουμε την ανάλυση του μικροδικτύου και να μπορέσει το λογισμικό HOMER να εκτελέσει τις απαραίτητες προσομοιώσεις πρέπει να παρουσιάσουμε τα δεδομένα που έχουμε για το ηλεκτρικό φορτίο που εξυπηρετεί το μικροδίκτυο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το HOMER χρειάζεται το φορτίο για κάθε ώρα του έτους , δηλαδή 8760 τιμές , για να εκτελέσει τους υπολογισμούς και να μας παρουσιάσει με τα κατάλληλα σχεδιαγράμματα το καθημερινό προφίλ του φορτίου αλλά και τη μεταβολή αυτού ανάλογα με το μήνα του έτους. Ακόμα, όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πρόγραμμα υπολογίζει τη μέση κατανάλωση ενέργειας κάθε μέρα και την κορυφή ( peak) του φορτίου. Η εικόνα 2.12 δείχνει το καθημερινό προφίλ του φορτίου και η εικόνα 2.13 μας παρουσιάζει τη μεταβολή του φορτίου ανάλογα με την εποχή.



**Εικόνα 2.12** Καθημερινό προφίλ του φορτίου



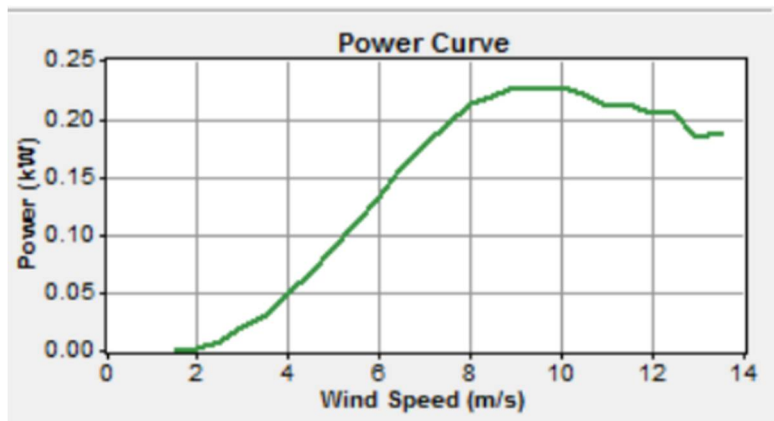
**Εικόνα 2.13** Εποχιακό προφίλ του φορτίου

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο διαφέρει πολύ ανάλογα με την εποχή. Οι καλοκαιρινοί μήνες είναι αυτοί που το φορτίο μεγιστοποιείται ενώ βλέπουμε ότι το χειμώνα το φορτίο σχεδόν μηδενίζεται. Η μεταβολή αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι το «Μελτέμι» είναι μια κατασκήνωση που χρησιμοποιείται από τους κατοίκους της κυρίως ως εξοχική κατοικία. Το καλοκαίρι, λοιπόν, και ειδικά τον Αύγουστο το «Μελτέμι» είναι γεμάτο με κατοίκους, οι οποίοι περνάνε τις καλοκαιρινές τους διακοπές, ενώ το χειμώνα υπάρχουν πολύ λίγοι κάτοικοι που μένουν μόνιμα εκεί.

Το HOMER υπολόγισε, με βάση τα στοιχεία που του εισάγαμε, ότι η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην κατασκήνωση είναι 317kWh/μέρα και η ετήσια κορυφή (peak) του φορτίου είναι 79.7 kW.

## 2.5.2 Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια που είναι εγκατεστημένη στο «Μελτέμι» και συμπεριλαμβάνεται στο διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο κατασκευάστηκε από την ομάδα του εργαστηρίου smartgrid του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και η χαρακτηριστική της καμπύλη ισχύος φαίνεται στην εικόνα 2.14. Όπως αναφέραμε παραπάνω θεωρούμε το αρχικό κόστος της ανεμογεννήτριας μηδενικό και ορίζουμε το κόστος αντικατάστασής της ίσο με 400€, πληροφορίες οι οποίες είναι απαραίτητες για να εκτελέσει την προσομοίωση το HOMER. Επίσης πρέπει να ορίσουμε το κόστος για τη λειτουργία και τη συντήρηση τη ανεμογεννήτριας (operation & maintenance- O&M), το οποίο είναι 20€ το χρόνο. Η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας θεωρήσαμε ότι είναι 20 χρόνια και το ύψος του άξονά της 12 μέτρα.



**Εικόνα 2.14** Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας



**Εικόνα 2.15** Η ανεμογεννήτρια που είναι εγκατεστημένη στο «Μελτέμι»

### 2.5.3 Φωτοβολταϊκά

Το σύστημα που εξετάζουμε έχει εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 4.25 kW , τα οποία είναι τοποθετημένα σε τρία διαφορετικά μέρη . Τα περισσότερα από αυτά είναι εγκατεστημένα στην είσοδο της κατασκήνωσης και φαίνονται στην εικόνα 2.16. Μπορούμε να δούμε μια κατασκευή που περιλαμβάνει δεκαέξι πλαίσια ισχύος 170 W το καθένα.



**Εικόνα 2.16** Φωτοβολταϊκά πλαίσια στην είσοδο στην της κατασκήνωσης

Επίσης υπάρχουν τοποθετημένα τέσσερα πάνελ των 170 W έκαστος στη σκεπή του αρχηγείου της κατασκήνωσης και άλλα πέντε στο παντοπωλείο , τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 2.17.



**Εικόνα 2.17** Φωτοβολταϊκά πλαίσια στο παντοπωλείο

Όπως βλέπουμε από τις φωτογραφίες κάποια δέντρα δημιουργούν μερική σκίαση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κάτι που σαφώς μειώνει την αποδοτικότητά τους. Στις προσομοιώσεις που θα εκτελέσει το HOMER θα θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει αυτή η σκίαση για να δούμε ποια είναι η βέλτιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών που έχουν εγκατασταθεί στο «Μελτέμι».

Όπως αναφέραμε προηγουμένως θεωρούμε στην εργασία μας το αρχικό κόστος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών μηδενικό , αντιθέτως ορίζουμε το κόστος

αντικατάστασης αυτών στα 3500€ ανά kW. Επίσης το κόστος για συντήρηση και λειτουργία είναι πρακτικά μηδέν και η διάρκεια ζωής τους είκοσι χρόνια.

#### 2.5.4 Ντιζελογεννήτρια

Η ντιζελογεννήτρια που υπάρχει στο «Μελτέμι» είναι ισχύος 36 kW αλλά ως επί των πλείστων παραμένει ανενεργή καθώς η λειτουργία της δεν είναι οικονομικά αποδοτική παρά μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις όπως η κατάσβεση μιας πυρκαγιάς. Εμείς, βέβαια, θα την εντάξουμε στο σύστημα που θα προσομοιώσουμε στο HOMER για να επιβεβαιώσουμε τα παραπάνω και στη συνέχεια θα εξετάσουμε αν γίνεται να αξιοποιηθεί με κάποιο τρόπο.

Το αρχικό κόστος της γεννήτριας θεωρείται μηδέν και το κόστος αντικατάστασής της ίσο με 7000€. Η διάρκεια ζωής της είναι 15000 ώρες λειτουργίας και το ελάχιστο φορτίο που πρέπει να εξυπηρετεί κατά τη λειτουργία της είναι 30 % της ονομαστικής της τιμής. Όλες οι παραπάνω πληροφορίες είναι απαραίτητες στο HOMER για να εκτελέσει τις προσομοιώσεις, όπως απαραίτητη είναι και η κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας η οποία είναι 0.25L/ kWh. Η εικόνα 2.18 δείχνει την γεννήτρια που υπάρχει στο «Μελτέμι».



Εικόνα 2.18 Η γεννήτρια στο «Μελτέμι»

#### 2.5.5 Inverters

Για να λειτουργήσει το σύστημα χρειάζεται ένας inverter ώστε να μπορεί να γίνει ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ac και dc ζυγών. Παρότι στο μικροδίκτυο υπάρχει ένας inverter σε κάθε καταναμημένη παραγωγή στη σύνδεσή της με το μικροδίκτυο, στο HOMER θεωρήσαμε μόνον έναν inverter (αθροίζοντάς τους όλους). Το γεγονός αυτό είναι μια απλοποίηση που κάνει το HOMER για να προσομοιώσει το σύστημα και να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς που πρέπει.

Στο σύστημά μας, λοιπόν, έχουμε έναν inverter 3 kW με τον οποίο συνδέονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που είναι στην είσοδο της κατασκήνωσης, έναν inverter 0.6 kW που είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών που είναι στο αρχηγείο και έναν inverter 2kW για τα φωτοβολταϊκά στο παντοπωλείο. Ακόμα υπάρχει ένας inverter που συνδέεται με την ανεμογεννήτρια και είναι ισχύος 0.6kW. Στην προσομοίωση στο HOMER χρησιμοποιήσαμε έναν inverter 6.2 kW, αθροίζοντας την ισχύ των προαναφερθέντων, ο οποίος έχει 95% αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής 15 χρόνια. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης του inverter θεωρήθηκε μηδενικό και το κόστος αντικατάστασής του ίσο με 2000€.

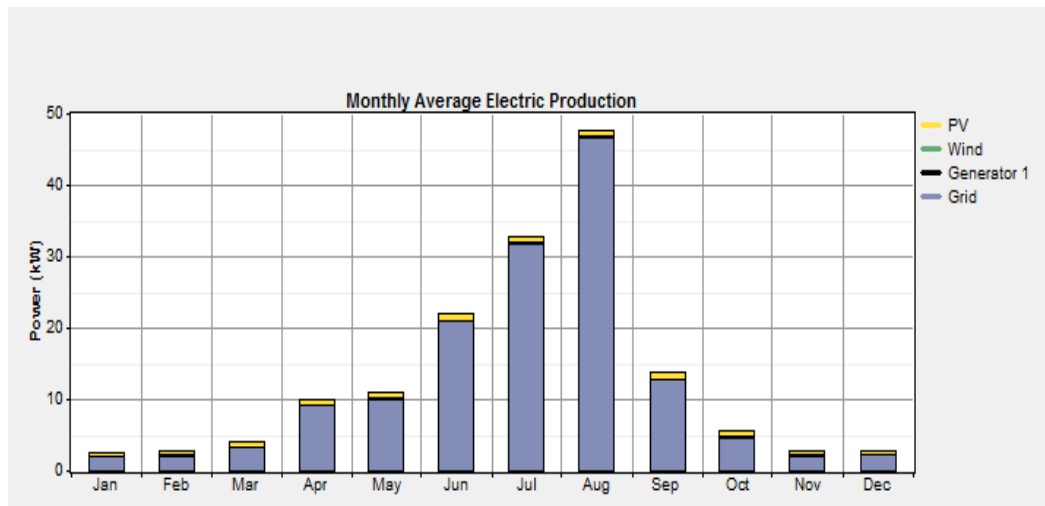
## **2.6 Προσομοίωση του διασυνδεδεμένου μικροδίκτυου με το HOMER**

Αφού λοιπόν περιγράφηκε ο εξοπλισμός που αποτελεί το σύστημά μας, τώρα θα προσομοιωθεί το μικροδίκτυο στο HOMER για να αξιολογήσουμε τα λειτουργικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του, όπως την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το ηλεκτρικό φορτίο που εξυπηρετείται σε ένα έτος, το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας αν υπάρχει, τη συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας, το φορτίο που δεν εξυπηρετείται κτλ. Επίσης, υπολογίζονται κάποιοι παράμετροι του συστήματος που σχετίζονται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει αυτό (εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ετήσια κατανάλωση καυσίμου). Το HOMER εκτελεί την προσομοίωση και προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος και ελαχιστοποιώντας το καθαρό τρέχον κόστος του συστήματος[24]. Σ' αυτό το στάδιο το σύστημα προσομοιώθηκε στην υπάρχουσα κατάσταση και αξιολογήθηκε από τεχνοοικονομική άποψη. Στη συνέχεια ο σκοπός μας θα είναι να βελτιωθεί η αποδοτικότητα του συστήματος και η οικονομική βιωσιμότητά του.

### **2.6.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης**

Όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η εικόνα 2.19 μας δείχνει πόσο συνεισφέρει κάθε καταναεμημένη παραγωγή στο ηλεκτρικό φορτίο και είναι φανερό η συνεισφορά του ηλεκτρικού δικτύου, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες που αυξάνεται κατακόρυφα η κατανάλωση.

Στην εικόνα 2.20 μπορούμε να δούμε την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε, η οποία είναι μηδενική, το φορτίο που δεν εξυπηρετήθηκε και το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας. Φαίνεται, όμως ακόμα, και το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών, το οποίο είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που δείχνει το ποσοστό της ενέργειας που προήλθε από ανανεώσιμες πηγές (ήλιο, άνεμο). Είναι αντιληπτό ότι το 6% που είναι αυτή τη στιγμή το συγκεκριμένο κλάσμα είναι πολύ μικρό και είναι σκοπός μας στη συνέχεια της εργασίας να προτείνουμε τρόπους για να αυξηθεί.



**Εικόνα 2.19** Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

| Quantity            | kWh/yr  | %    |
|---------------------|---------|------|
| Excess electricity  | 0.00128 | 0.00 |
| Unmet electric load | 0.00    | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00    | 0.00 |

| Quantity           | Value  |
|--------------------|--------|
| Renewable fraction | 0.0626 |

**Εικόνα 2.20** Χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε αναλυτικά πόσες κιλοβατώρες παρήγαγαν τα φωτοβολταϊκά και η ανεμογεννήτρια και πόσες προήλθαν από το δίκτυο. Παρατηρούμε ότι το 94% της ενέργειας προέρχεται από το δίκτυο και μόλις το 6 % από το φωτοβολταϊκά, ενώ η ανεμογεννήτρια συνεισφέρει ελάχιστα. Ακόμη, η ντιζελογεννήτρια δεν έχει καμία συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το HOMER αποδεικνύει ότι η χρησιμοποίησή της είναι ασύμφορη, όπως και περιμέναμε.

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 6,445   | 6   |
| Wind turbine   | 826     | 1   |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 108,872 | 94  |
| Total          | 116,142 | 100 |

**Εικόνα 2.21** Ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας

Στη συνέχεια το HOMER μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά ξεχωριστά για τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών. Η εικόνα 2.22

δείχνει τη μέση ισχύ στην έξοδο των φωτοβολταϊκών πλασίων καθώς και την μέση ενέργεια που παράγουν μια μέρα αυτά. Ως capacity factor ορίζεται η μέση ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού διαιρούμενη με την ονομαστική του ισχύ.

| Quantity         | Value | Units  |
|------------------|-------|--------|
| Rated capacity   | 4.25  | kW     |
| Mean output      | 0.74  | kW     |
| Mean output      | 17.7  | kWh/d  |
| Capacity factor  | 17.3  | %      |
| Total production | 6,445 | kWh/yr |

**Εικόνα 2.22** Τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

Επίσης στην εικόνα 2.23 μπορούμε να δούμε τις ώρες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, το κόστος ανά κιλοβατώρα και τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στην παραγωγή ενέργειας.

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 4.43   | kW     |
| PV penetration     | 5.57   | %      |
| Hours of operation | 4,384  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0233 | \$/kWh |

**Εικόνα 2.23** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών 2

Παρόμοια στοιχεία μας δίνει το HOMER και για τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Στην εικόνα 2.24 βλέπουμε τη μέση ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας, τη συνολική παραγωγή ενέργειας σε διάρκεια ενός έτους και τον capacity factor που ορίζεται όπως προηγουμένως.

| Quantity             | Value | Units  |
|----------------------|-------|--------|
| Total rated capacity | 0.400 | kW     |
| Mean output          | 0.09  | kW     |
| Capacity factor      | 23.6  | %      |
| Total production     | 826   | kWh/yr |

**Εικόνα 2.24** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Η εικόνα 2.25 παρουσιάζει τις ώρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, το κόστος ανά κιλοβατώρα, τη διείσδυση του ανέμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι πολύ μικρή και θα προσπαθήσουμε να την βελτιώσουμε στη συνέχεια, καθώς επίσης και την ελάχιστη και μέγιστη ισχύ που δίνει στην έξοδό της η ανεμογεννήτρια.



| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 0.23   | kW     |
| Wind penetration   | 0.714  | %      |
| Hours of operation | 8,235  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0294 | \$/kWh |

**Εικόνα 2.25** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της ανεμογεννήτριας 2

Η εικόνα 2.26 μας παρουσιάζει κάποια στοιχεία σε σχέση με την αγορά ενέργειας από το δίκτυο της ΔΕΗ. Στην υπάρχουσα κατάσταση η πώληση ενέργειας στο δίκτυο είναι πρακτικά μηδενική και βλέπουμε ότι τους καλοκαιρινούς μήνες το μικροδίκτυο αναγκάζεται να αγοράζει σημαντικά ποσά ενέργειας από το δίκτυο της ΔΕΗ.

| Month  | Energy    | Energy | Net       | Peak   | Energy | Demand |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|        | Purchased | Sold   | Purchases | Demand | Charge | Charge |
|        | (kWh)     | (kWh)  | (kWh)     | (kW)   | (\$)   | (\$)   |
| Jan    | 1,479     | 30     | 1,448     | 4      | 140    | 0      |
| Feb    | 1,405     | 16     | 1,388     | 4      | 136    | 0      |
| Mar    | 2,480     | 0      | 2,480     | 6      | 248    | 0      |
| Apr    | 6,566     | 0      | 6,566     | 36     | 657    | 0      |
| May    | 7,520     | 0      | 7,520     | 16     | 752    | 0      |
| Jun    | 15,117    | 0      | 15,117    | 32     | 1,512  | 0      |
| Jul    | 23,747    | 0      | 23,747    | 48     | 2,375  | 0      |
| Aug    | 34,744    | 0      | 34,744    | 80     | 3,474  | 0      |
| Sep    | 9,148     | 0      | 9,148     | 20     | 915    | 0      |
| Oct    | 3,488     | 0      | 3,488     | 8      | 349    | 0      |
| Nov    | 1,530     | 20     | 1,510     | 4      | 148    | 0      |
| Dec    | 1,648     | 8      | 1,641     | 4      | 163    | 0      |
| Annual | 108,872   | 74     | 108,797   | 80     | 10,868 | 0      |

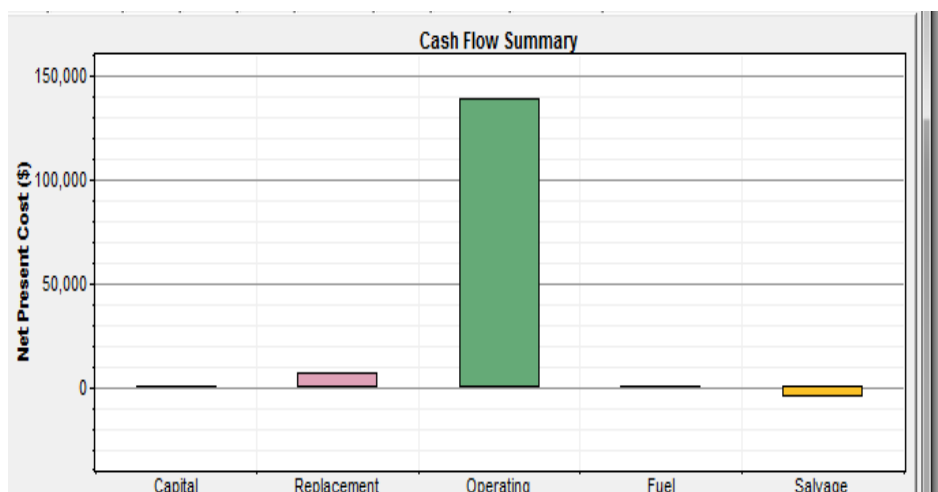
**Εικόνα 2.26** Στοιχεία για την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο της ΔΕΗ

## 2.6.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

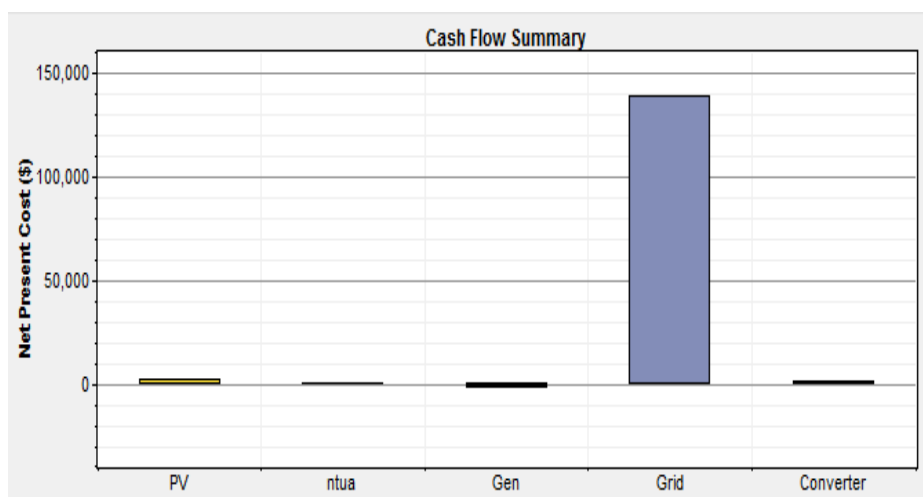
Εξίσου σημαντικά με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μικροδικτύου είναι και τα συμπεράσματα που εξάγονται για τα οικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος που εξετάζουμε. Το καθαρό τρέχον κόστος ,παράμετρος με βάση την οποία το HOMER κατατάσσει τις δυνατές υλοποιήσεις, για το σύστημά μας για ένα σχέδιο με διάρκεια ζωής 25 έτη είναι 140,246 € . Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματός μας είναι 10,971€ και το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι 0.095 € . Πέρα από τα παραπάνω απόλυτα νούμερα το HOMER μας παρουσιάζει και μια σειρά από διαγράμματα για να καταλάβουμε πως και που σπαταλούνται τα λεφτά που χρειάζεται το σύστημα για να λειτουργήσει.

Αρχικά, στην εικόνα 2.27 βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των λεφτών που δαπανήθηκαν ήταν για λειτουργικά έξοδα , κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι σχεδόν όλη η ενέργεια που χρειάστηκε για να λειτουργήσει το σύστημά μας αγοράστηκε από το δίκτυο της ΔΕΗ. Το παραπάνω φαίνεται και στην εικόνα 2.28

που μας δείχνει ότι το δίκτυο έχει τη μερίδα του λέοντος στον επιμερισμό των εξόδων. Δεν πρέπει να ξεχνάμε εδώ ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης του μικροδικτύου έχει θεωρηθεί μηδέν αφού όλα τα μέρη του μικροδικτύου είναι ήδη εγκατεστημένα.

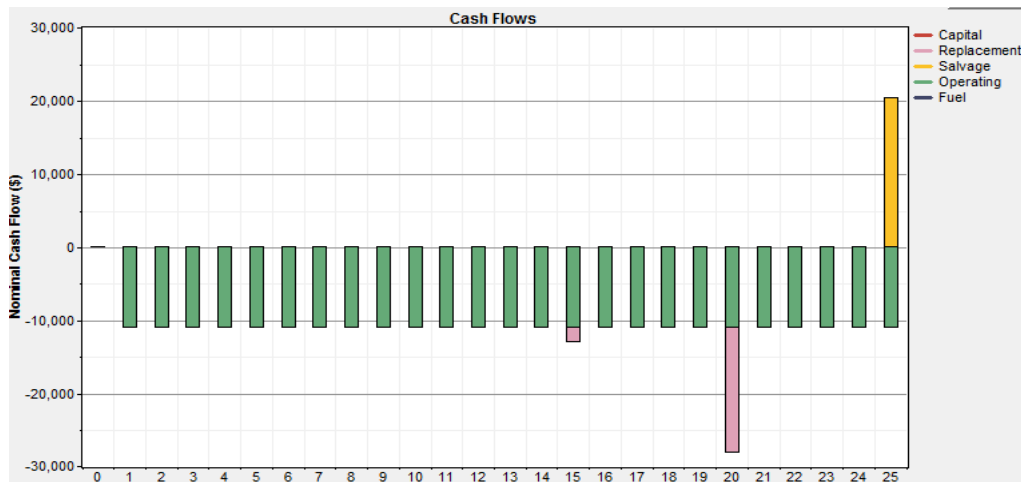


**Εικόνα 2.27** Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους

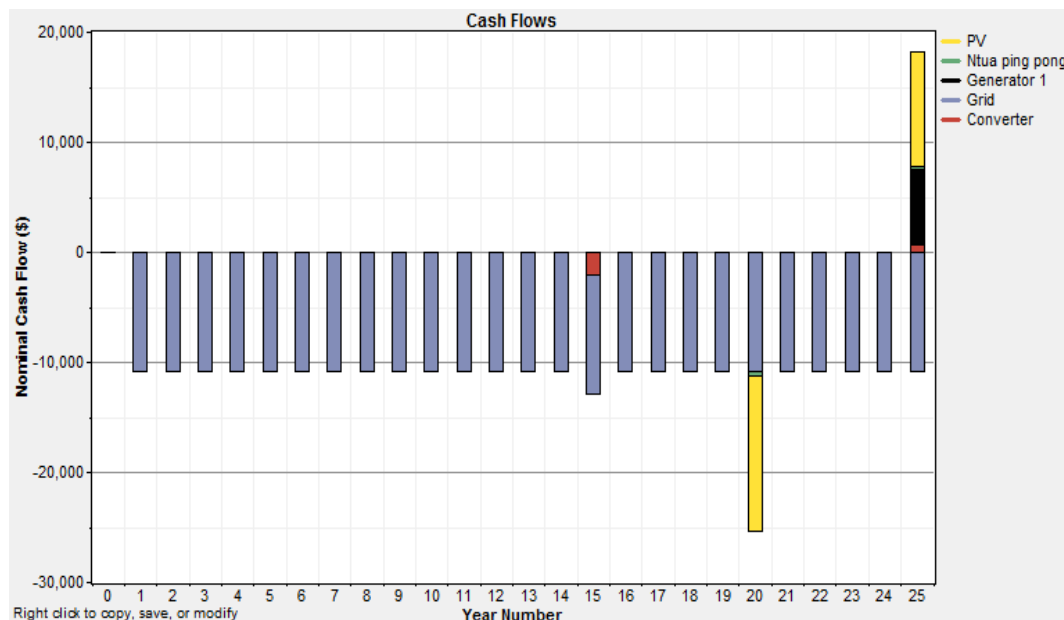


**Εικόνα 2.28** Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου

Στη συνέχεια, στην εικόνα 2.29 βλέπουμε την περίληψη των ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια των 25 χρόνων. Μπορούμε να δούμε πως επιμερίζονται τα έξοδα κάθε χρόνο και παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι τα έξοδα λειτουργίας του συστήματος είναι σταθερά κάθε χρόνο και αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών εξόδων ενώ το κόστος αντικατάστασης κάποιων εξαρτημάτων επιβαρύνει το σύστημα κάποια μεμονωμένα έτη. Η εικόνα 2.30 απεικονίζει τα ίδια αποτελέσματα αλλά με βάση το εξάρτημα του συστήματος μας και όχι το είδος του κόστους.



**Εικόνα 2.29** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το είδος του κόστους



**Εικόνα 2.30** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου

Τελειώνοντας την παρουσίαση των οικονομικών χαρακτηριστικών του συστήματος το HOMER μας εμφανίζει σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα πόσο κόστισε αναλυτικά κάθε εξάρτημα του μικροδικτύου .

| Component      | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|----------------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV             | 0            | 4,365            | 0        | 0         | -2,446       | 1,919      |
| Ntua ping pong | 0            | 125              | 256      | 0         | -70          | 310        |
| Generator 1    | 0            | 0                | 0        | 0         | -1,590       | -1,590     |
| Grid           | 0            | 0                | 138,928  | 0         | 0            | 138,928    |
| Converter      | 0            | 835              | 0        | 0         | -155         | 679        |
| System         | 0            | 5,325            | 139,183  | 0         | -4,262       | 140,246    |

**Εικόνα 2.31** Κόστη ανά κατηγορία και εξάρτημα

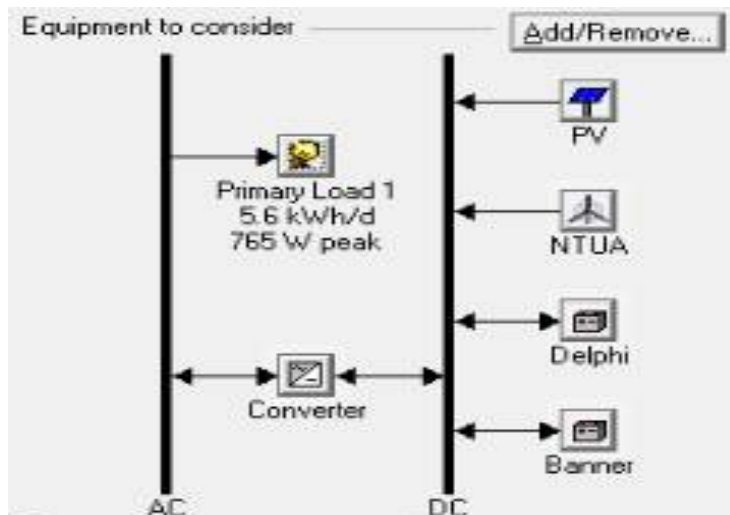
### 2.6.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου

Από την προσομοίωση του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου με το HOMER εξήχθησαν κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα που θα μας βοηθήσουν στη συνέχεια να επιτύχουμε την βελτιστοποίηση του συστήματος:

- Το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μόλις 6% και είναι απαραίτητο να αυξηθεί και να έχουμε μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας για το σύστημα μας
- Σχεδόν όλη η ενέργεια που χρησιμοποιεί το μικροδίκτυο αγοράζεται από το δίκτυο της ΔΕΗ , το ποσοστό αγγίζει το 94%. Τα φωτοβολταϊκά συνεισφέρουν το υπόλοιπο 6% και η ανεμογεννήτρια έχει μηδαμινή συνεισφορά.
- Η ντιζελογεννήτρια , όπως αναμενόταν, δεν έχει καμία συνεισφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργεια καθώς η χρησιμοποίηση της κρίνεται ασύμφορη
- Το καθαρό τρέχον κόστος για ένα σχέδιο με διάρκεια ζωής 25 έτη είναι 140,246€ και το ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι 10,971€, και τα δύο πρέπει να μειωθούν
- Το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε αγοράστηκε από το δίκτυο της ΔΕΗ οδηγεί σε αυξημένα λειτουργικά έξοδα κάθε χρόνο, τα οποία αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος των εξόδων που έχει το μικροδίκτυο.

### 2.7 Το Αυτόνομο Μικροδίκτυο

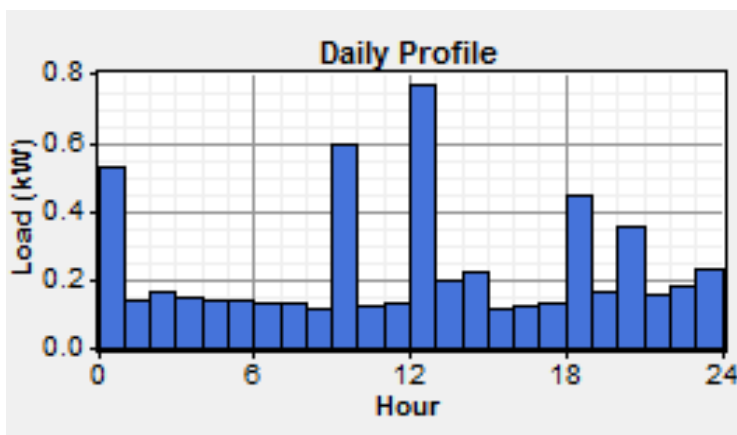
Το αυτόνομο σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 0.34kW, μια ανεμογεννήτρια 0.400 kW και δυο συστοιχίες μπαταριών. Στην εικόνα 2.32 μπορούμε να δούμε το αυτόνομο μικροδίκτυο , όπως αυτό αναπαρίσταται σχηματικά από το HOMER. Όλος ο εξοπλισμός που συνθέτει το σύστημα μας, όπως και με το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, είναι ήδη εγκατεστημένος στην κατασκήνωση, οπότε θα υποθέσουμε ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης όλων των εξαρτημάτων είναι μηδενικό για να πραγματοποιήσουμε τις προσομοιώσεις με το HOMER.



Εικόνα 2.32 Σχηματική υλοποίηση από το HOMER του αυτόνομου μικροδικτύου

### 2.7.1 Ηλεκτρικό φορτίο

Αρχικά, για να ξεκινήσουμε την ανάλυση του μικροδικτύου και να μπορέσει το λογισμικό HOMER να εκτελέσει τις απαραίτητες προσομοιώσεις πρέπει να παρουσιάσουμε τα δεδομένα που έχουμε για το ηλεκτρικό φορτίο που εξυπηρετεί αυτό. Το HOMER χρειάζεται το φορτίο για κάθε ώρα του έτους, δηλαδή 8760 τιμές, για να εκτελέσει τους υπολογισμούς και να μας παρουσιάσει με τα κατάλληλα σχεδιαγράμματα το καθημερινό προφίλ του φορτίου. Ακόμα, όπως και με το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, το πρόγραμμα υπολογίζει τη μέση κατανάλωση ενέργειας κάθε μέρα και την κορυφή (peak) του φορτίου. Η εικόνα 2.33 δείχνει το καθημερινό προφίλ του φορτίου.

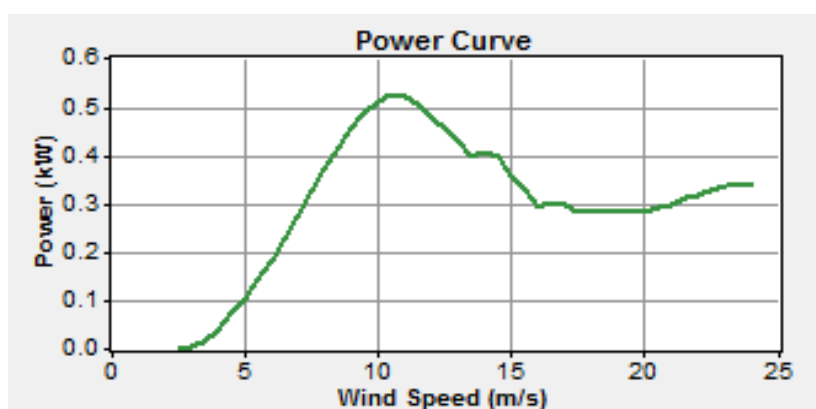


Εικόνα 2.33 Καθημερινό προφίλ του φορτίου

Το HOMER υπολόγισε, με βάση τα στοιχεία που του εισάγαμε, ότι η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας στην συγκεκριμένη κατοικία είναι 5.6kWh/μέρα και η κορυφή (peak) του φορτίου είναι 765W.

## 2.7.2 Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια που είναι εγκατεστημένη στο αυτόνομο μικροδίκτυο στο «Μελτέμι» κατασκευάστηκε από την ομάδα του εργαστηρίου smartgrid του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και η χαρακτηριστική της καμπύλη ισχύος φαίνεται στην εικόνα 2.34. Όπως αναφέραμε και στο διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο θεωρούμε το αρχικό κόστος της ανεμογεννήτριας μηδενικό και ορίζουμε το κόστος αντικατάστασής της ίσο με 400€. Επίσης πρέπει να ορίσουμε το κόστος για τη λειτουργία και τη συντήρηση τη ανεμογεννήτριας, το οποίο είναι 20€ το χρόνο. Η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας θεωρείται ότι είναι 20 χρόνια και το ύψος του άξονά της 12 μέτρα.



Εικόνα 2.34 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

## 2.7.3 Φωτοβολταϊκά

Στο αυτόνομο μικροδίκτυο υπάρχουν εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά ισχύος 340 W ( 2x170W) , τα οποία είναι τοποθετημένα στην σκεπή της κατοικίας που εξυπηρετεί το μικροδίκτυο όπως φαίνεται στην εικόνα 2.35. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι μηδέν και ορίζουμε το κόστος αντικατάστασης αυτών στα 3500€/kW. Το κόστος για συντήρηση και λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι μηδενικό και η διάρκεια ζωής τους είκοσι χρόνια.



**Εικόνα 2.35** Φωτοβολταϊκά πλαίσια στο αυτόνομο σύστημα

#### **2.7.4 Μπαταρίες**

Απαραίτητες για τη λειτουργία ενός αυτόνομου μικροδικτύου είναι οι μπαταρίες ώστε να αποθηκεύεται η παραχθείσα ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες. Στο «Μελτέμι» υπάρχουν δύο συστοιχίες μπαταριών , μία για τα φωτοβολταϊκά και μια για την ανεμογεννήτρια. Συνδεδεμένες με τα φωτοβολταϊκά είναι τέσσερις μπαταρίες μάρκας Delphi 12v και 105ah ενώ με την ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη μια συστοιχία μπαταριών μάρκας Banner 12V και 100ah. Το HOMER δεν μας δίνει τη δυνατότητα να συνδέσουμε συγκεκριμένη συστοιχία μπαταριών με κάποια κατανεμημένη παραγωγή παρά μόνο να προσθέσουμε όσες μπαταρίες θέλουμε στο σύστημα μας οι οποίες θα τροφοδοτούνται από όλες τις κατανεμημένες παραγωγές. Έτσι προσθέσαμε οχτώ μπαταρίες παρόμοιων χαρακτηριστικών για να εκτελέσουμε την προσομοίωση.

#### **2.7.5 Inverter**

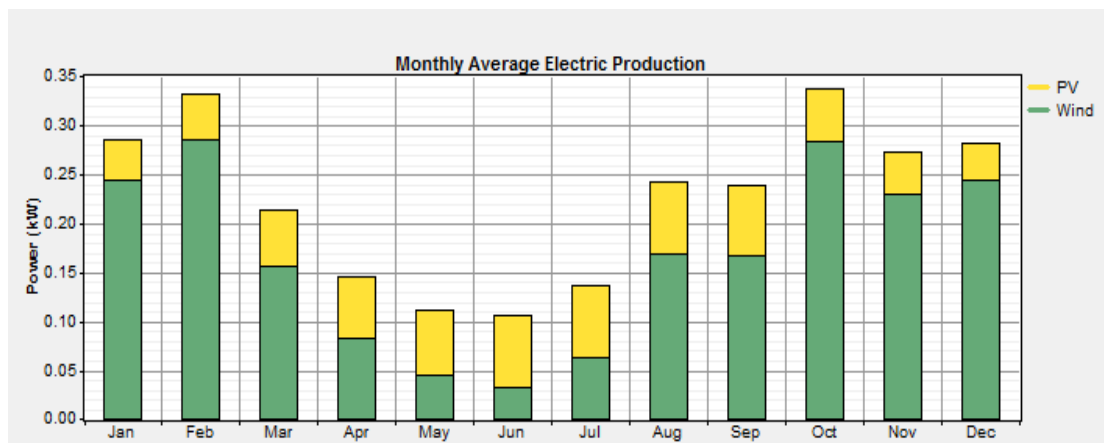
Όπως έχει αναφερθεί για να λειτουργήσει το σύστημα χρειάζεται ένας inverter . Παρότι στο μικροδίκτυο υπάρχει διαφορετικός inverter για τα φωτοβολταϊκά και διαφορετικός για την ανεμογεννήτρια, στο HOMER θεωρήσαμε μόνον έναν inverter που να εξυπηρετεί και τα δυο συστήματα. Στην προσομοίωση στο HOMER χρησιμοποιήσαμε έναν inverter 1 kW , ο οποίος έχει 95% αποδοτικότητα και διάρκεια ζωής 15 χρόνια. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης του inverter θεωρήθηκε μηδενικό και το κόστος αντικατάστασής του ίσο με 500€.

### **2.8 Προσομοίωση του αυτόνομου συστήματος στο HOMER**

Αφού λοιπόν περιγράψαμε τον εξοπλισμό του αυτόνομου μικροδικτύου, τώρα θα το προσομοιώσουμε στο HOMER για να αξιολογήσουμε τα λειτουργικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του, όπως κάναμε και με το διασυνδεδεμένο σύστημα.

## 2.8.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

Όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες ο υπάρχον εξοπλισμός του μικροδικτύου δεν είναι ικανός να καλύψει όλο το ηλεκτρικό φορτίο της κατοικίας που εξυπηρετεί το σύστημα. Στην εικόνα 2.36 φαίνεται πόσο συνεισφέρει κάθε κατανεμημένη παραγωγή στο ηλεκτρικό φορτίο. Είναι αντιληπτό ότι η ανεμογεννήτρια έχει μεγαλύτερη συνεισφορά από τα φωτοβολταϊκά ειδικά του μήνες του φθινοπώρου και του χειμώνα. Αντιθέτως από το Μάιο μέχρι τον Ιούλιο τα φωτοβολταϊκά λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας και της χαμηλότερης ταχύτητας του ανέμου συνεισφέρουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.36 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η εικόνα 2.37 δείχνει ότι το 74% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την ανεμογεννήτρια και το 26% από τα φωτοβολταϊκά και επιβεβαιώνεται αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω.

| Production   | kWh/yr | %   |
|--------------|--------|-----|
| PV array     | 515    | 26  |
| Wind turbine | 1,454  | 74  |
| Total        | 1,970  | 100 |

Εικόνα 2.37 Ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας

Στην εικόνα 2.38 φαίνονται η πλεονάζουσα ενέργεια που παράχθηκε, το φορτίο που δεν εξυπηρετήθηκε και το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας. Το γεγονός ότι 22.1% του φορτίου δεν εξυπηρετήθηκε και ότι το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας ξεπερνά το 28% δείχνει ότι ο υπάρχον εξοπλισμός του συστήματος δεν είναι ικανός να καλύψει τις ανάγκες του και το σύστημά μας πρέπει να βελτιωθεί. Στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα προτείνουμε τρόπους για να εξαλείψουμε αυτούς τους δύο παράγοντες.



| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 215    | 10.9 |
| Unmet electric load | 453    | 22.1 |
| Capacity shortage   | 583    | 28.5 |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 1.00  |

**Εικόνα 2.38** Χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Στις επόμενες εικόνες το HOMER μας παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η εικόνα 2.39 δείχνει τη μέση ισχύ εξόδου, τη μέση ενέργεια που παράγεται σε μια μέρα από τα φωτοβολταϊκά και τη συνολική ενέργεια που παράγεται από αυτά σε ένα έτος. Ακόμη στην εικόνα 2.40 φαίνεται το κόστος ανά κιλοβατώρα, οι ώρες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών και η διείσδυση των φωτοβολταϊκών στην παραγωγή ενέργειας.

| Quantity         | Value | Units  |
|------------------|-------|--------|
| Rated capacity   | 0.340 | kW     |
| Mean output      | 0.06  | kW     |
| Mean output      | 1.41  | kWh/d  |
| Capacity factor  | 17.3  | %      |
| Total production | 515   | kWh/yr |

**Εικόνα 2.39** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 0.35   | kW     |
| PV penetration     | 25.2   | %      |
| Hours of operation | 4,384  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0250 | \$/kWh |

**Εικόνα 2.40** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών 2

Στη συνέχεια παρόμοια χαρακτηριστικά μας δίνει το HOMER και για τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας, όπως είδαμε και με το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο παραπάνω. Στις παρακάτω εικόνες, λοιπόν, φαίνεται η μέση ισχύς εξόδου, ο παράγοντας ικανότητας (capacity factor), η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανεμογεννήτρια σε ένα έτος, η μέγιστη ισχύς εξόδου, η διείσδυση του ανέμου στην παραγωγή ενέργειας, οι ώρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και το κόστος ανά παραχθείσα κιλοβατώρα.

| Quantity             | Value | Units  |
|----------------------|-------|--------|
| Total rated capacity | 0.500 | kW     |
| Mean output          | 0.17  | kW     |
| Capacity factor      | 33.2  | %      |
| Total production     | 1,454 | kWh/yr |

**Εικόνα 2.41** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 0.52   | kW     |
| Wind penetration   | 71.2   | %      |
| Hours of operation | 7,963  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0167 | \$/kWh |

**Εικόνα 2.42** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας 2

Επόμενο κομμάτι του μικροδικτύου για το οποίο το HOMER μας δίνει πληροφορίες για τη λειτουργία του είναι οι μπαταρίες. Στις εικόνες 2.43 και 2.44 παρουσιάζονται η ονομαστική και η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα των μπαταριών, η αυτονομία που προσφέρουν, οι απώλειες που έχουν, ο ετήσιος κύκλος ενέργειας που μπαίνει και βγαίνει από αυτές κ.α.

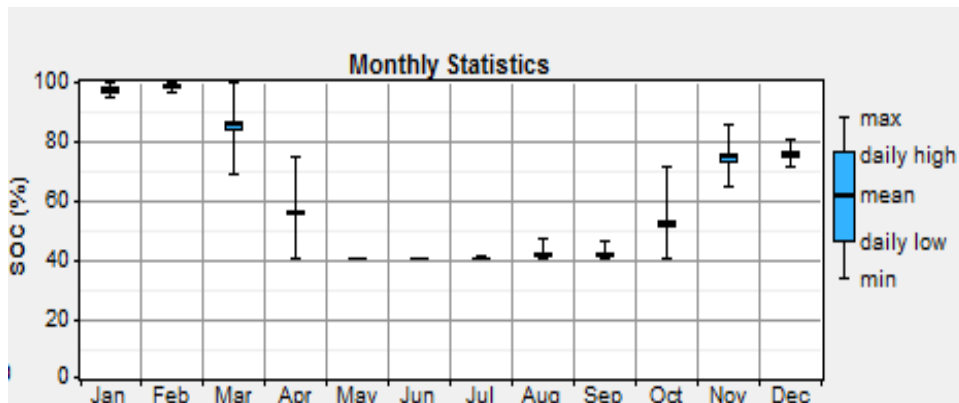
| Quantity                | Value  | Units  |
|-------------------------|--------|--------|
| Nominal capacity        | 10.1   | kWh    |
| Usable nominal capacity | 7.06   | kWh    |
| Autonomy                | 30.2   | hr     |
| Lifetime throughput     | 16,281 | kWh    |
| Battery wear cost       | 0.079  | \$/kWh |
| Average energy cost     | 0.000  | \$/kWh |

**Εικόνα 2.43** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών

| Quantity          | Value | Units  |
|-------------------|-------|--------|
| Energy in         | 590   | kWh/yr |
| Energy out        | 511   | kWh/yr |
| Storage depletion | 4     | kWh/yr |
| Losses            | 75    | kWh/yr |
| Annual throughput | 551   | kWh/yr |
| Expected life     | 12.0  | yr     |

**Εικόνα 2.44** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών 2

Η εικόνα 2.45 είναι ένα γράφημα, το οποίο μας δείχνει την ποσοστό φόρτισης που βρίσκονται οι μπαταρίες κάθε μήνα (SOC= state of charge). Είναι φανερό ότι τη μισή διάρκεια του έτους το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών αγγίζει ή ξεπερνά το 80%. Αντίθετα από τον Μάιο μέχρι των Σεπτέμβριο το ποσοστό αυτό πέφτει στο 40% λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης ενέργειας.

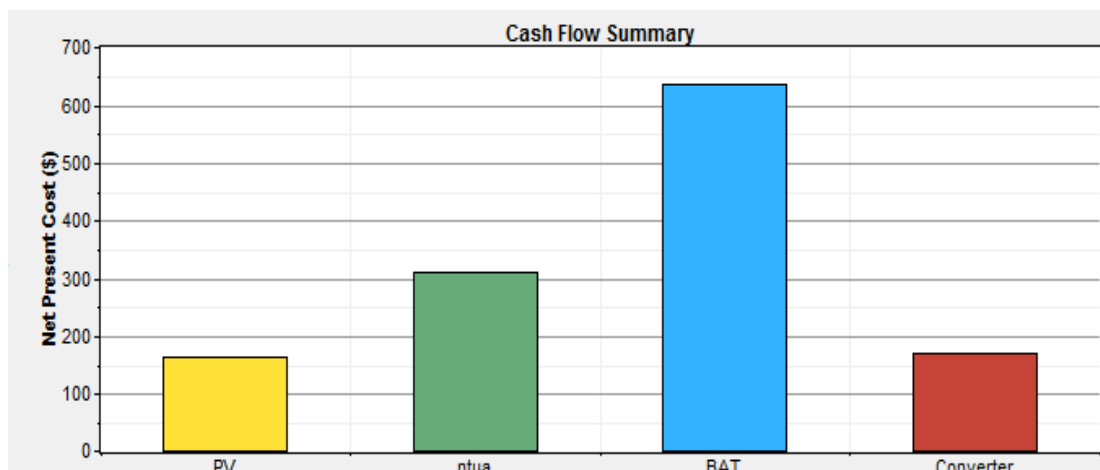


Εικόνα 2.45 Κατάσταση φόρτισης

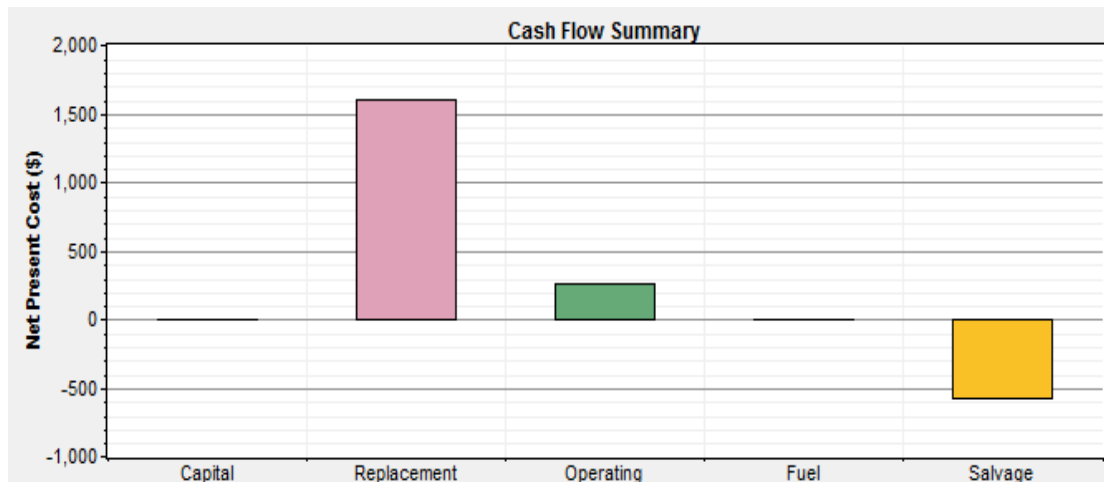
## 2.8.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

Αφού παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μικροδικτύου, στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα οικονομικά αποτελέσματα τα οποία είναι πολύ σημαντικά όπως είπαμε και στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Το καθαρό τρέχον κόστος για το σύστημά μας για ένα σχέδιο με διάρκεια ζωής 25 έτη είναι 1281 € . Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματός μας είναι 100€ και το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι 0.063 €. Πέρα από τα παραπάνω απόλυτα νούμερα το HOMER μας παρουσιάζει και κάποια διαγράμματα για να καταλάβουμε πως και που σπαταλούνται τα λεφτά που χρειάζεται το σύστημα για να λειτουργήσει.

Αρχικά, η εικόνα 2.46 μας δείχνει για ποιο μέρος του εξοπλισμού σπαταλήθηκαν τα περισσότερα λεφτά και παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των χρημάτων ξοδεύτηκε για τις μπαταρίες.. Στην εικόνα 2.47 φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των εξόδων που έγιναν οφειλόταν στο κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού και ένα μέρος ήταν για λειτουργικά έξοδα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε εδώ ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης του μικροδικτύου έχει θεωρηθεί μηδέν αφού όλα τα μέρη του μικροδικτύου είναι ήδη εγκατεστημένα.

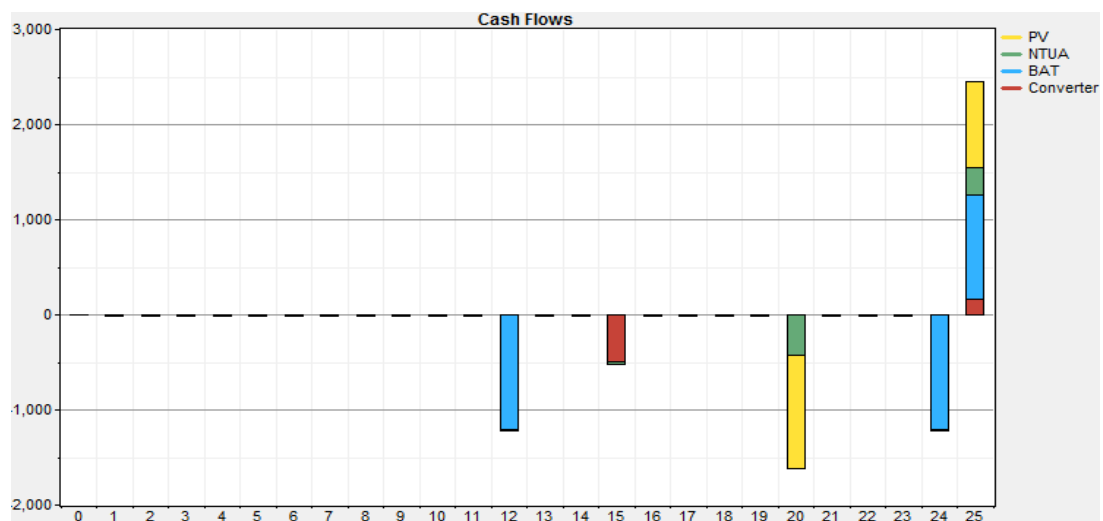


Εικόνα 2.46 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα

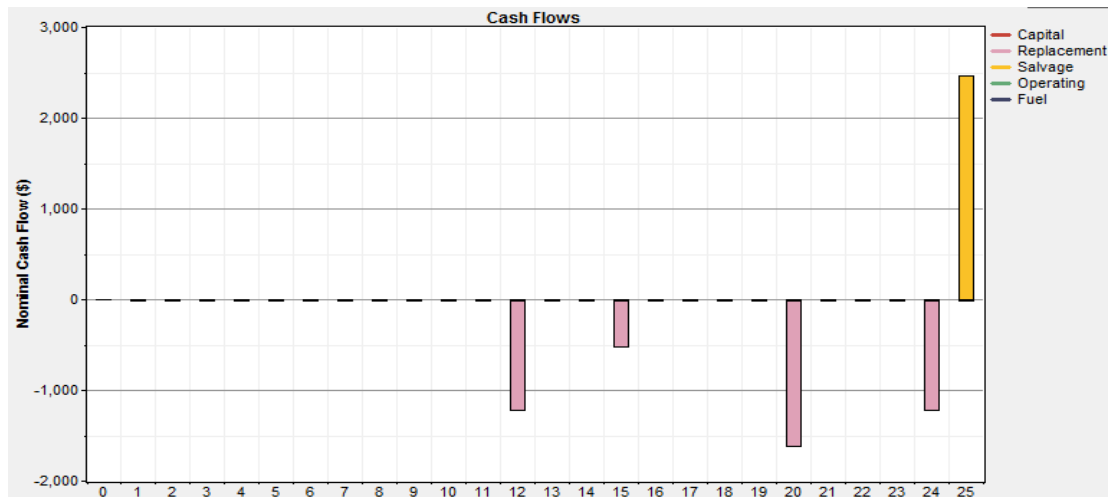


**Εικόνα 2.47** Περίληψη του κόστους με βάση τον τύπο του κόστους

Στη συνέχεια, στις εικόνες 2.48 και 2.49 βλέπουμε την περίληψη των ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια των 25 χρόνων με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου και τον τύπο του κόστους αντίστοιχα. Μπορούμε να δούμε πως επιμερίζονται τα έξοδα κάθε χρόνο και παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο, ότι τα έξοδα λειτουργίας του συστήματος είναι σταθερά κάθε χρόνο αν και σχεδόν αμελητέα και κάποια συγκεκριμένα έτη έχουμε έξοδα αντικατάστασης του εξοπλισμού που αποτελούν και το μεγαλύτερο κομμάτι των εξόδων του συστήματος.



**Εικόνα 2.48** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου



**Εικόνα 2.49** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το είδος του κόστους

Η εικόνα 2.50 παρουσιάζει έναν πίνακα ο οποίος δείχνει αναλυτικά τα χρήματα που δαπανήθηκαν ή εξοικονομήθηκαν από το σύστημα με βάση το εξάρτημα του εξοπλισμού και τον τύπο του κόστους. Προφανώς εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα που είχαμε και με τα παραπάνω γραφήματα , μόνο που τώρα μπορούμε να δούμε και τα απόλυτα νούμερα.

| Component | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|-----------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV        | 0            | 374              | 0        | 0         | -210         | 164        |
| NTUA      | 0            | 125              | 256      | 0         | -70          | 310        |
| BAT       | 0            | 893              | 0        | 0         | -256         | 636        |
| Converter | 0            | 209              | 0        | 0         | -39          | 170        |
| System    | 0            | 1,600            | 256      | 0         | -575         | 1,281      |

**Εικόνα 2.50** Έξοδα ανά κατηγορία και εξάρτημα

### 2.8.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του αυτόνομου μικροδικτύου

Όπως παραπάνω με το διασυνδεδεμένο σύστημα , έτσι και εδώ με το αυτόνομο , η προσομοίωση με το HOMER έβγαλε κάποια πού χρήσιμα αποτελέσματα που είναι καλό να τα έχουμε υπόψη μας στη συνέχεια όταν θα προχωρήσουμε στην βελτιστοποίηση του συστήματος

- Ο υπάρχον εξοπλισμός του μικροδικτύου δεν είναι ικανός να καλύψει όλο το φορτίο της κατοικίας που εξυπηρετεί καθώς το 22.1% του φορτίου δεν εξυπηρετείται. Στη συνέχεια, κατά τη βελτιστοποίηση του αυτόνομου μικροδικτύου, θα προσπαθήσουμε να μηδενίσουμε αυτό το ποσοστό.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους παράγεται από τις ανεμογεννήτριες , οι οποίες συνεισφέρουν το 74% της παραγόμενης ενέργειας. Το υπόλοιπο 26% προέρχεται από το φωτοβολταϊκά. Ειδικά κατά του μήνες του φθινοπώρου και του χειμώνα η συνεισφορά των ανεμογεννητριών είναι ακόμα μεγαλύτερη ενώ από τον Μάιο μέχρι τον Ιούλιο είναι οι μόνοι μήνες που ,λόγω της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας , τα

φωτοβολταϊκά παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες.

- Κατά τη μισή διάρκεια του έτους, από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο , το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών δεν ξεπερνά το 60%.
- Το καθαρό τρέχον κόστος για το σύστημά μας για ένα σχέδιο με διάρκεια ζωής 25 χρόνια είναι 1281€
- Το μεγαλύτερο των χρημάτων που δαπανήθηκαν για το σύστημά μας ήταν έξοδα αντικατάστασης του εξοπλισμού και συγκεκριμένα των μπαταριών, δεδομένου βέβαια ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης του μικροδικτύου είναι μηδέν αφού ο εξοπλισμός είναι ήδη εγκατεστημένος.

## Αναφορές

- [1] Π. Χ. Αριστείδου, “Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στα Μικροδίκτυα”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ,2010
- [2] ΗΜΥ 445 /681 Εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή, Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [3] Άρης Ευάγγελος Λ. Δημέας ,ΕΜΠ, Συμβολή στον καταναμημένο ελεγχό συστημάτων ηλεκτρικής ενεργειας με μοναδες διεσπαρμενης παραγωγης στην χαμηλη ταση, ΑΘΗΝΑ 2006
- [4] A.G. Tsikalakis, N.D. Hatziargyriou, “Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 1, pp.241-248,2008.
- [5] Q. Shafiee, J.c.Vasquez, J. M. Guerrero ”Distributed Secondary Control for Islanded MicroGrids - A Networked Control Systems Approach” Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark,2012 .
- [6] Χ. Ι. Αναστόπουλος , “Ανάλυση της λειτουργίας εργαστηριακού πρωτότυπου μικροδικτύου”, διπλωματική εργασία, ΕΜΠ,2004.
- [7] Ε.Δ Κεμενέ, “Ανάλυση και σχεδιασμός επιδεικτικού μικροδικτύου-Μελέτη συμπεριφοράς ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος”, διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010.
- [8] K. Nishikawa, J. Baba, E. Shimoda, T. Kikuchi,Y. Itoh, T. Nitta, S.Numata, E.Masada, “ Design Methods and Integrated Control for Microgrid”, IEEE,2008
- [9] Γ.Δ.Κατσαρός, “ Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου”, διπλωματική εργασία, Πναεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [10] Χ.Ν Παπαδημητρίου, “Έλεγχος καταναμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενεργειας για ένταξή της σε μικροδίκτυα”, διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012

- [11] L. D. Watson, J. W. Kimball, “ Frequency Regulation of a Microgrid Using Solar Power”, IEEE,2011.
- [12] R.Lasseter, A.Akhil, C.Marnay, J.Stephens, J.Dagle, R.Guttromson, A. S. Meliopoulos, R.Yinger, J. Eto, “ Integration of Distributed Energy Resources-The CERTS MicroGrid Concept”, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions,2002.
- [13] B. Kroposki, R.Lasseter, T.Ise, S.Morozumi, S.Papathanassiou, N. Hatziargyriou, “A look at microgrid technologies and testing projects from around the world”, IEEE power & energy magazine, May/June 2008.
- [14] C.K. Sao, P. W. Lehn “ Control and Power Management of Converter Fed Microgrids”, IEEE Transactions on power systems, VOL. 23, NO. 3, AUGUST 2008
- [15] H. Kakigano, Y. Miura,T. Ise, “Configuration and Control of a DC Microgrid for Residential Houses”, IEEE T&D Asia 2009.
- [16] E. Barklund, N.Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburo, T.C.Green, “Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters” , IEEE Transactions on power electronics, vol. 23, no. 5, September 2008.
- [17] T.Wu,K. Sun, C. Kuo, C. Chang, “Predictive Current Controlled 5-kW Single-Phase Bidirectional Inverter With Wide Inductance Variation for DC-Microgrid Applications” , IEEE Transactions on power electronics, vol. 25, no. 12, December 2010.
- [18] C.Cho, J. Jeon, J. Kim, S. Kwon, K. Park, S. Kim, “Active Synchronizing Control of a Microgrid”, IEEE Transactions on power electronics, vol. 26, no. 12, December 2011.
- [19] S. J. Chatzivasiliadis, N. D. Hatziargyriou, A. L. Dimeas , “Development of an Agent Based Intelligent Control System for Microgrids”, IEEE 2008.
- [20] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas ,“Microgrids Management-Control and Operation Aspects of Microgrids”, IEEE power & energy magazine May/June 2008.
- [21] A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou, “Operation of a Multiagent System for Microgrid Control”, IEEE Transactions on power systems, vol. 20, no. 3, August 2005.
- [22] A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou , “Agent based Control for Microgrids” , IEEE 2007.
- [23] A. L. Dimeas, S.I. Hatzivasiliadis, N. D. Hatziargyriou, “ Control agents for enabling customer-driven Microgrids” , IEEE 2009.

[24] Κανονισμός λειτουργίας κατασκήνωσης «Μελτέμι»



### 3. Βελτιστοποίηση των Μικροδικτύων και ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του λογισμικού HOMER

#### 3.1 Βελτιστοποίηση του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό διεξάγεται η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου. Μεγάλος αριθμός επιλογών για διαφορετικά μεγέθη των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται είναι διαθέσιμος καθώς επίσης και εξαρτήματα που μπορούν να προστεθούν στο σύστημα και έχουν νόημα. Επίσης πραγματοποιείται και ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρείται μια σειρά από διαφορετικές τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, για την ταχύτητα του ανέμου και για την τιμή του πετρελαίου ντίζελ για μοντελοποίηση με σκοπό την αξιολόγηση του αντίκτυπού τους στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος[1].

Ο πίνακας 3.1 δείχνει τις τιμές που θεωρήσαμε για κάθε μια από τις μεταβλητές βελτιστοποίησης. Απεικονίζει διαφορετικά σύνολα από όλες τις πιθανές μεταβλητές για τη διαμόρφωση του συστήματος. Το HOMER προσομοιώνει όλες τις πιθανές διαμορφώσεις και τις ταξινομεί με βάση την καθαρή παρούσα αξία.

|    | PV Array<br>(kW) | ntua<br>(Quantity) | Gen<br>(kW) | Grid<br>(kW) | Converter<br>(kW) |
|----|------------------|--------------------|-------------|--------------|-------------------|
| 1  | 0.000            | 0                  | 0.00        | 1,000.000    | 0.00              |
| 2  | 4.250            | 1                  | 36.00       |              | 6.20              |
| 3  | 10.000           | 2                  |             |              | 10.00             |
| 4  | 14.000           | 4                  |             |              | 20.00             |
| 5  | 20.000           | 8                  |             |              | 30.00             |
| 6  | 25.000           | 10                 |             |              | 40.00             |
| 7  | 30.000           | 12                 |             |              | 50.00             |
| 8  | 40.000           | 15                 |             |              | 70.00             |
| 9  | 50.000           |                    |             |              |                   |
| 10 | 60.000           |                    |             |              |                   |

Πίνακας 3.1 Τιμές των μεταβλητών

Όπως προαναφέρθηκε μεταβλητές ευαισθησίας σε αυτήν την προσομοίωση είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η τιμή του πετρελαίου ντίζελ. Τέσσερις διακριτές τιμές χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας για την ηλιακή ακτινοβολία. Η πραγματική τιμή για την ηλιακή ακτινοβολία είναι  $4.66 \text{ kWh m}^{-2}$  και θεωρήσαμε άλλες τρεις τιμές 4, 5 και  $5.5 \text{ kWh m}^{-2}$ . Ακόμη η ετήσια μέση τιμή για την ταχύτητα του ανέμου είναι  $6.06 \text{ m/s}$  και οι τιμές ευαισθησίας ορίστηκαν 5, 5.5, 6.5 και  $7 \text{ m/s}$ . Επίσης τρεις διακριτές τιμές (1, 1.1 και 1.3 € ανά λίτρο) χρησιμοποιήθηκαν για την τιμή του πετρελαίου ντίζελ στην ανάλυση ευαισθησίας παρότι η χρησιμοποίηση της ντιζελογεννήτριας είναι ασύμφορη.

Το HOMER εκτέλεσε 76,800 προσομοιώσεις για να βελτιστοποιήσει το σύστημα και να βρει την βέλτιστη διαμόρφωση και χρειάστηκε είκοσι δύο λεπτά για να τις ολοκληρώσει.

Σε πρώτη φάση θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος που μας προτείνει το HOMER χρησιμοποιώντας τα μεγέθη των εξαρτημάτων που θεωρήσαμε και κρατώντας σταθερές τις πραγματικές τιμές που μετρήσαμε για την ταχύτητα του ανέμου (6.06 m/s) και την ηλιακή ακτινοβολία (4.66 kWh m<sup>-2</sup>). Εν συνεχεία θα παρουσιάσουμε την ανάλυση ευαισθησίας που εκτέλεσε το HOMER και θα γίνει αντιληπτό πόσο επηρεάζουν αυτές οι δυο μεταβλητές την βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος.

### 3.1.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση του βέλτιστου συστήματος

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 θεωρήσαμε αρκετά πιθανά μεγέθη φωτοβολταϊκών, έναν σημαντικό πιθανό αριθμό ανεμογεννητριών που είναι εγκατεστημένες στο μικροδίκτυό μας αλλά και τους κατάλληλους inverter που απαιτούνται για να λειτουργήσει το σύστημά μας με τα νέα δεδομένα που προσομοιώνουμε. Το HOMER αφού εκτέλεσε τις προσομοιώσεις για όλες τις πιθανές διαμορφώσεις του μικροδικτύου μας, τις κατέταξε όλες με βάση το συνολικό καθαρό τρέχον κόστος και η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την κατάταξη αυτή. Όπως μπορούμε να δούμε το HOMER μας προτείνει την εγκατάσταση νέων ανεμογεννητριών αλλά δεν θεωρεί απαραίτητη την εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων εάν η ηλιακή ακτινοβολία παραμένει στα ίδια επίπεδα. Καθώς μπορεί η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος που φαίνεται στην εικόνα 3.1 να περιέχει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 60kW και να έχει καθαρό τρέχον κόστος 133,440€ αλλά μπορούμε να δούμε ότι σχεδόν ίδιο κόστος (μόλις 226€ ευρώ παραπάνω) έχει και η υλοποίηση του συστήματος με φωτοβολταϊκά ισχύος 4.25 kW (τα ήδη υπάρχοντα δηλαδή). Καλό θα είναι να προσπαθήσουμε να αναλύσουμε πέραν από τη βέλτιστη διαμόρφωση και τη δεύτερη στην κατάταξη καθώς η συγκεκριμένη υλοποίηση απαιτεί και πολύ μικρότερο αρχικό κεφάλαιο.

Η βέλτιστη διαμόρφωση, λοιπόν, του συστήματος περιέχει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος 60kW, 15 ανεμογεννήτριες όμοιες με αυτήν που είναι εγκατεστημένη ήδη στο μικροδίκτυο και έναν converter ισχύος 50 kW. Όπως προείπαμε η διαμόρφωση αυτή έχει καθαρό τρέχον κόστος 133,440€ και να υπενθυμίσουμε σ' αυτό το σημείο ότι η αντίστοιχη τιμή για το υπάρχον σύστημα είναι 140,246 €. Παρατηρούμε, δηλαδή, μια μικρή μείωση. Η δεύτερη καλύτερη διαμόρφωση του συστήματος περιέχει φωτοβολταϊκά 4.25kW, 15 ανεμογεννήτριες και έναν converter 6.2 kW. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει καθαρό τρέχον κόστος 133,666€. Θα παρουσιαστούν, όμως, αναλυτικά στη συνέχεια τα οικονομικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αφού πρώτα αναλύσουμε τα ηλεκτρικά αποτελέσματα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δυο υλοποιήσεις περιέχουν και μια ντιζελογεννήτρια, αυτό συμβαίνει επειδή

είναι ήδη εγκατεστημένη στο δίκτυο αλλά το HOMER δεν προτείνει τη λειτουργία της σε καμία περίπτωση αφού τη θεωρεί ασύμφορη.

Global Solar (kWh/m<sup>2</sup>/d) 4.66 Wind Speed (m/s) 6.06 Diesel Price (\$/L) 1.1

Double click on a system below for simulation results.

|  | PV (kW) | ntua | Gen (kW) | Conv. (kW) | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Gen (hrs) |
|--|---------|------|----------|------------|-----------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|
|  | 60.00   | 15   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 180,492      | -3,681                 | \$ 133,440 | 0.090        | 0.60       |            | 0         |
|  | 4.25    | 15   | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 5,600        | 10,018                 | \$ 133,666 | 0.090        | 0.16       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 50.0       | 1000      | \$ 180,492      | -3,556                 | \$ 135,031 | 0.091        | 0.60       |            |           |
|  | 4.25    | 15   |          | 6.2        | 1000      | \$ 5,600        | 10,143                 | \$ 135,256 | 0.091        | 0.16       |            |           |
|  | 4.25    | 15   | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 7,100        | 10,046                 | \$ 135,516 | 0.092        | 0.16       |            | 0         |
|  | 4.25    | 12   | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 4,400        | 10,268                 | \$ 135,664 | 0.092        | 0.14       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 179,292      | -3,346                 | \$ 136,516 | 0.092        | 0.59       |            | 0         |
|  | 4.25    | 10   | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 3,600        | 10,417                 | \$ 136,759 | 0.092        | 0.13       |            | 0         |
|  | 4.25    | 15   |          | 10.0       | 1000      | \$ 7,100        | 10,170                 | \$ 137,106 | 0.093        | 0.16       |            |           |
|  | 4.25    | 12   |          | 6.2        | 1000      | \$ 4,400        | 10,393                 | \$ 137,254 | 0.093        | 0.14       |            |           |
|  | 60.00   | 15   | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 184,440      | -3,684                 | \$ 137,347 | 0.093        | 0.60       |            | 0         |
|  | 4.25    | 12   | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 5,900        | 10,300                 | \$ 137,574 | 0.093        | 0.14       |            | 0         |
|  | 4.25    | 8    | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 2,800        | 10,550                 | \$ 137,662 | 0.093        | 0.11       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   |          | 50.0       | 1000      | \$ 179,292      | -3,222                 | \$ 138,106 | 0.093        | 0.59       |            |           |
|  | 4.25    | 10   |          | 6.2        | 1000      | \$ 3,600        | 10,541                 | \$ 138,349 | 0.094        | 0.13       |            |           |
|  | 60.00   | 10   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 178,492      | -3,137                 | \$ 138,396 | 0.094        | 0.59       |            | 0         |
|  | 4.25    | 10   | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 5,100        | 10,449                 | \$ 138,675 | 0.094        | 0.13       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 176,544      | -2,943                 | \$ 138,926 | 0.094        | 0.60       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 60.0       | 1000      | \$ 184,440      | -3,560                 | \$ 138,937 | 0.094        | 0.60       |            |           |
|  | 4.25    | 12   |          | 10.0       | 1000      | \$ 5,900        | 10,425                 | \$ 139,164 | 0.094        | 0.14       |            |           |
|  | 4.25    | 4    | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 1,200        | 10,798                 | \$ 139,229 | 0.094        | 0.08       |            | 0         |
|  | 4.25    | 8    |          | 6.2        | 1000      | \$ 2,800        | 10,674                 | \$ 139,252 | 0.094        | 0.11       |            |           |
|  | 4.25    | 8    | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 4,300        | 10,582                 | \$ 139,578 | 0.094        | 0.11       |            | 0         |
|  | 4.25    | 2    | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 400          | 10,914                 | \$ 139,918 | 0.095        | 0.07       |            | 0         |
|  | 60.00   | 10   |          | 50.0       | 1000      | \$ 178,492      | -3,012                 | \$ 139,987 | 0.095        | 0.59       |            |           |
|  | 10.00   | 15   | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 24,792       | 9,013                  | \$ 140,013 | 0.095        | 0.23       |            | 0         |
|  | 60.00   | 8    | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 177,692      | -2,936                 | \$ 140,157 | 0.095        | 0.58       |            | 0         |
|  | 4.25    | 1    | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 0            | 10,971                 | \$ 140,246 | 0.095        | 0.06       |            | 0         |
|  | 4.25    | 10   |          | 10.0       | 1000      | \$ 5,100        | 10,574                 | \$ 140,265 | 0.095        | 0.13       |            |           |
|  | 60.00   | 15   |          | 40.0       | 1000      | \$ 176,544      | -2,818                 | \$ 140,516 | 0.095        | 0.60       |            |           |
|  | 4.25    | 15   | 36       | 20.0       | 1000      | \$ 11,048       | 10,131                 | \$ 140,559 | 0.095        | 0.16       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 183,240      | -3,338                 | \$ 140,563 | 0.095        | 0.59       |            | 0         |
|  | 4.25    | 4    |          | 6.2        | 1000      | \$ 1,200        | 10,922                 | \$ 140,820 | 0.095        | 0.08       |            |           |
|  | 4.25    |      | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 0            | 11,027                 | \$ 140,966 | 0.095        | 0.06       |            | 0         |
|  | 4.25    | 4    | 36       | 10.0       | 1000      | \$ 2,700        | 10,830                 | \$ 141,146 | 0.095        | 0.08       |            | 0         |
|  | 4.25    | 8    |          | 10.0       | 1000      | \$ 4,300        | 10,707                 | \$ 141,168 | 0.095        | 0.11       |            |           |
|  |         | 15   | 36       | 6.2        | 1000      | \$ 5,600        | 10,610                 | \$ 141,233 | 0.095        | 0.11       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 175,344      | -2,648                 | \$ 141,494 | 0.096        | 0.59       |            | 0         |
|  | 4.25    | 2    |          | 6.2        | 1000      | \$ 400          | 11,038                 | \$ 141,508 | 0.096        | 0.07       |            |           |
|  | 10.00   | 15   |          | 10.0       | 1000      | \$ 24,792       | 9,138                  | \$ 141,603 | 0.096        | 0.23       |            |           |

Εικόνα 3.1 Κατάταξη των πιθανών υλοποιήσεων του συστήματος με βάση το καθαρό τρέχον κόστος

### 3.1.1.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

Όπως φαίνεται στις επόμενες εικόνες 3.2 και 3.3 η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συνολικής ισχύος 60kW και των 15 ανεμογεννητριών αύξησε τη συνεισφορά της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον τα φωτοβολταϊκά παράγουν το 53 % της συνολικής ενέργειας και οι ανεμογεννήτριες το

7 %. Η αύξηση αυτή είναι σημαντικότερη, ειδικά για την παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, και κατά συνέπεια παρατηρείται μια σπουδαία αύξηση στο κλάσμα ανανεώσιμων πηγών που πλέον ξεπερνά το 60%, ενώ ήταν μόλις 6%. Ακόμη το 30% της ενέργειας που παράγεται πωλείται στο δίκτυο της ΔΕΗ καθώς δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από το μικροδίκτυό μας γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και μας αποφέρει αρκετά έσοδα.

Στη δεύτερη περίπτωση το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που χρειάζεται το μικροδίκτυο συνεχίζει να προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ. Υπάρχει, βέβαια, μια αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από της ανεμογεννήτριες καθώς πλέον συνεισφέρουν το 10% της συνολικής παραγωγής όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Το γεγονός, όμως, ότι δεν εγκαταστάθηκαν επιπλέον φωτοβολταϊκά κράτησε χαμηλά την συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας και αναγκάζει το δίκτυο να αγοράζει το 84% της απαιτούμενης ενέργειας από το δίκτυο της ΔΕΗ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών να έχει αυξηθεί μεν και να είναι στο 16% αλλά να είναι πολύ χαμηλότερο από ότι στην προηγούμενη περίπτωση.

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 90,983  | 53  |
| Wind turbines  | 12,387  | 7   |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 67,705  | 40  |
| Total          | 171,075 | 100 |

| Consumption     | kWh/yr  | %   |
|-----------------|---------|-----|
| AC primary load | 115,705 | 70  |
| Grid sales      | 49,844  | 30  |
| Total           | 165,549 | 100 |

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 6,445   | 5   |
| Wind turbines  | 12,387  | 10  |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 99,145  | 84  |
| Total          | 117,976 | 100 |

| Consumption     | kWh/yr  | %   |
|-----------------|---------|-----|
| AC primary load | 115,705 | 99  |
| Grid sales      | 1,306   | 1   |
| Total           | 117,011 | 100 |

**Εικόνα 3.2** Ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας (α) στη διαμόρφωση με 60kW PV και (β) με 4.25kW PV αντίστοιχα

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 377    | 0.22 |
| Unmet electric load | 0.00   | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00   | 0.00 |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 0.604 |

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 26.1   | 0.02 |
| Unmet electric load | 0.00   | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00   | 0.00 |

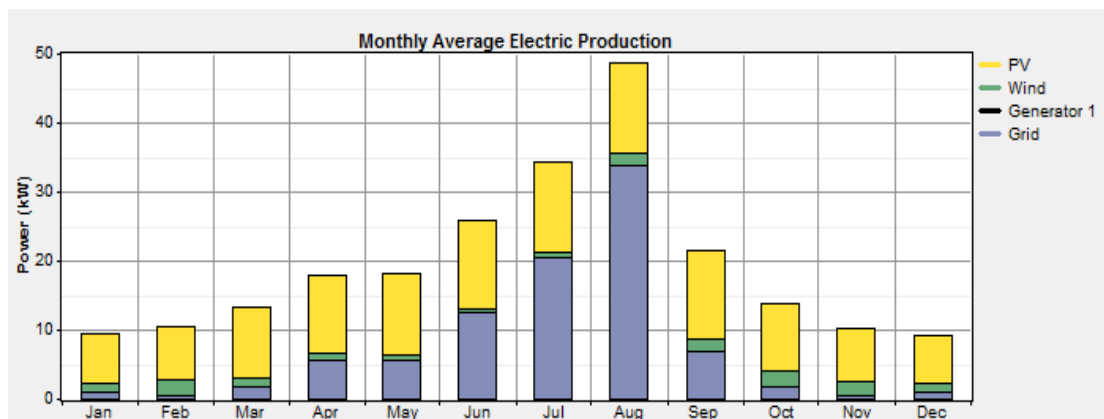
| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 0.160 |

**Εικόνα 3.3** Χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη διαμόρφωση (α) με 60kW PV και (β) με 4.25kW PV αντίστοιχα.

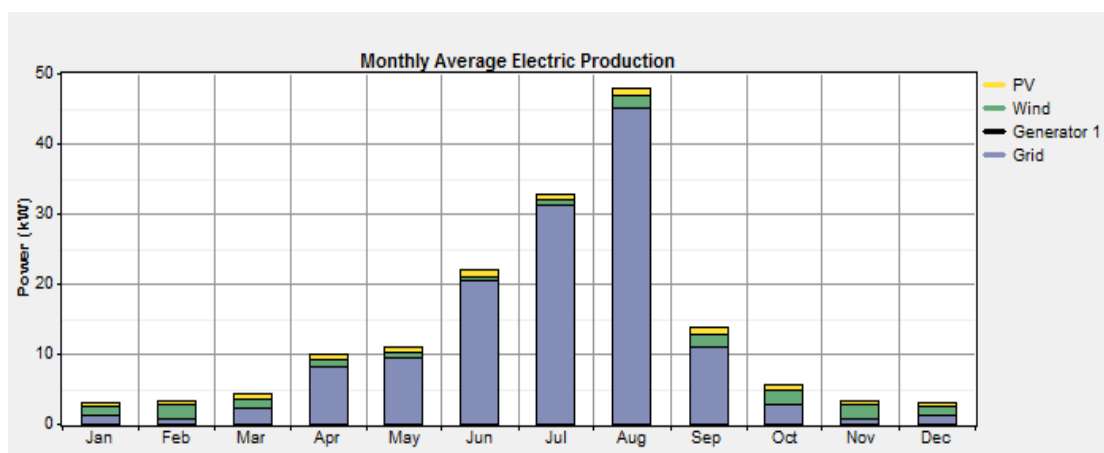
Προφανώς και στις δυο περιπτώσεις η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας και το φορτίο που δεν εξυπηρετήθηκε έχουν μηδενικές τιμές ως απόρροια της σύνδεσης με το δίκτυο της ΔΕΗ.

Στην εικόνα 3.4 μπορούμε να δούμε από πού προέρχεται η παραγόμενη ενέργεια κάθε μήνα και είναι φανερό ότι τα φωτοβολταϊκά έχουν την μεγαλύτερη συνεισφορά από τον Σεπτέμβριο μέχρι Μάιο αλλά τους καλοκαιρινούς μήνες η απότομη αύξηση του

φορτίου αναγκάζει το σύστημα να αγοράζει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας από το δίκτυο της ΔΕΗ καθώς η παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες δεν επαρκεί για να καλυφθούν οι ανάγκες της κατασκήνωσης. Στη δεύτερη περίπτωση και στην εικόνα 3.5 φαίνεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους το δίκτυο της ΔΕΗ έχει τη μερίδα του λέοντος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και βέβαια τους καλοκαιρινούς μήνες ακόμα περισσότερο.



Εικόνα 3.4 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημα με 60kW PV



Εικόνα 3.5 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημα με 4.25kW PV

Οι εικόνες 3.6 και 3.7 απεικονίζουν κάποια ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Είναι φανερό η μεγάλη διαφορά στην παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά του συστήματος με τα PV 60kW από αυτό με τα 4.25 kW, όπως επίσης και η μεγάλη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στην εξυπηρέτηση του φορτίου στην πρώτη περίπτωση όπου φτάνει το 78.6%. Όπως είναι λογικό κάποια χαρακτηριστικά είναι ίδια είτε έχουμε 60 kW είτε 4.25 kW όπως ο capacity factor και οι ώρες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, αφού δεν εξαρτώνται από την ισχύ των πλαισίων.

| Quantity         | Value  | Units  |
|------------------|--------|--------|
| Rated capacity   | 60.0   | kW     |
| Mean output      | 10.4   | kW     |
| Mean output      | 249    | kWh/d  |
| Capacity factor  | 17.3   | %      |
| Total production | 90,983 | kWh/yr |

| Quantity         | Value | Units  |
|------------------|-------|--------|
| Rated capacity   | 4.25  | kW     |
| Mean output      | 0.74  | kW     |
| Mean output      | 17.7  | kWh/d  |
| Capacity factor  | 17.3  | %      |
| Total production | 6,445 | kWh/yr |

**Εικόνα 3.6** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών για τη διαμόρφωση (α) με 60kW PV και (β) με 4.25kW PV αντίστοιχα

| Quantity           | Value | Units  |
|--------------------|-------|--------|
| Minimum output     | 0.0   | kW     |
| Maximum output     | 62.6  | kW     |
| PV penetration     | 78.6  | %      |
| Hours of operation | 4,384 | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.156 | \$/kWh |

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 4.43   | kW     |
| PV penetration     | 5.57   | %      |
| Hours of operation | 4,384  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0233 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.7** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών για τη διαμόρφωση (α) με 60kW PV και (β) με 4.25kW PV αντίστοιχα 2

Στις εικόνες 3.8 και 3.9 παρουσιάζονται παρόμοια χαρακτηριστικά για τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Προφανώς, εδώ δεν υπάρχει διαχωρισμός των δυο συστημάτων, καθώς και τα δυο αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό ανεμογεννητριών. Μπορούμε να δούμε τη σημαντική αύξηση στη συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ενέργειας αφού πλέον παράγονται πάνω από 12,000kWh σε έναν χρόνο, όπως επίσης και τη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην εξυπηρέτηση του φορτίου όπου ξεπερνά το 10%. Τα δυο αυτά χαρακτηριστικά δεκαπενταπλασίασαν τις τιμές τους σε σχέση με το υπάρχον σύστημα, όπως συνέβη δηλαδή και με τον αριθμό των ανεμογεννητριών. Ακόμα στις εικόνες αυτές αποτυπώνονται, όπως έχει

αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η μέση ισχύς εξόδου , ο capacity factor, οι ώρες λειτουργίας , η μέγιστη ισχύς εξόδου και το κόστος ανά kWh.

| Quantity             | Value  | Units  |
|----------------------|--------|--------|
| Total rated capacity | 6.00   | kW     |
| Mean output          | 1.41   | kW     |
| Capacity factor      | 23.6   | %      |
| Total production     | 12,387 | kWh/yr |

**Εικόνα 3.8** Χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 3.40   | kW     |
| Wind penetration   | 10.7   | %      |
| Hours of operation | 8,235  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0648 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.9** Χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών 2

Οι επόμενες δυο εικόνες 3.10 και 3.11 απεικονίζουν την αγοραπωλησία ενέργειας με το δίκτυο της ΔΕΗ κάθε μήνα για τα δυο συστήματα που εξετάζονται. Είναι αντιληπτό ότι στην πρώτη περίπτωση η ηλεκτρική ενέργεια που πωλείται στο δίκτυο είναι σημαντική ειδικά από τον Σεπτέμβριο μέχρι το Μάιο και αποφέρει αρκετά έσοδα. Τους καλοκαιρινούς μήνες το μικροδίκτυο λόγω της αύξησης του φορτίου αναγκάζεται να αγοράζει μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας και να πουλά μόλις λίγα. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα μας πουλά μόλις λίγες kWh τους χειμωνιάτικους μήνες και αναγκάζεται , όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, να αγοράζει μεγάλα ποσά ενέργειας κυρίως το καλοκαίρι για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του.

| Month  | Energy    | Energy | Net       | Peak   | Energy | Demand |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|        | Purchased | Sold   | Purchases | Demand | Charge | Charge |
|        | (kWh)     | (kWh)  | (kWh)     | (kW)   | (\$)   | (\$)   |
| Jan    | 768       | 4,907  | -4,139    | 4      | -1,199 | 0      |
| Feb    | 351       | 4,924  | -4,573    | 4      | -1,245 | 0      |
| Mar    | 1,296     | 6,386  | -5,090    | 6      | -1,531 | 0      |
| Apr    | 3,972     | 5,258  | -1,285    | 36     | -970   | 0      |
| May    | 4,207     | 4,934  | -727      | 16     | -862   | 0      |
| Jun    | 9,000     | 2,458  | 6,542     | 32     | 261    | 0      |
| Jul    | 15,266    | 667    | 14,599    | 48     | 1,353  | 0      |
| Aug    | 25,196    | 147    | 25,049    | 79     | 2,481  | 0      |
| Sep    | 4,938     | 5,052  | -114      | 20     | -820   | 0      |
| Oct    | 1,414     | 5,680  | -4,267    | 8      | -1,336 | 0      |
| Nov    | 448       | 4,980  | -4,533    | 4      | -1,250 | 0      |
| Dec    | 850       | 4,451  | -3,601    | 4      | -1,072 | 0      |
| Annual | 67,705    | 49,844 | 17,861    | 79     | -6,189 | 0      |

**Εικόνα 3.10** Στοιχεία για την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο της ΔΕΗ για τη διαμόρφωση με τα 60kW PV

| Month  | Energy    | Energy | Net       | Peak   | Energy | Demand |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|        | Purchased | Sold   | Purchases | Demand | Charge | Charge |
|        | (kWh)     | (kWh)  | (kWh)     | (kW)   | (\$)   | (\$)   |
| Jan    | 921       | 288    | 633       | 4      | 17     | 0      |
| Feb    | 445       | 366    | 78        | 4      | -51    | 0      |
| Mar    | 1,664     | 96     | 1,568     | 6      | 141    | 0      |
| Apr    | 5,913     | 3      | 5,910     | 36     | 591    | 0      |
| May    | 7,070     | 0      | 7,070     | 16     | 707    | 0      |
| Jun    | 14,777    | 0      | 14,777    | 32     | 1,478  | 0      |
| Jul    | 23,184    | 0      | 23,184    | 48     | 2,318  | 0      |
| Aug    | 33,551    | 0      | 33,551    | 79     | 3,355  | 0      |
| Sep    | 8,007     | 0      | 8,007     | 20     | 801    | 0      |
| Oct    | 2,024     | 14     | 2,010     | 8      | 199    | 0      |
| Nov    | 562       | 338    | 225       | 4      | -32    | 0      |
| Dec    | 1,027     | 201    | 826       | 4      | 51     | 0      |
| Annual | 99,145    | 1,306  | 97,839    | 79     | 9,575  | 0      |

**Εικόνα 3.11** Στοιχεία για την αγοραπωλησία ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο της ΔΕΗ για τη διαμόρφωση με τα 4.25kW PV

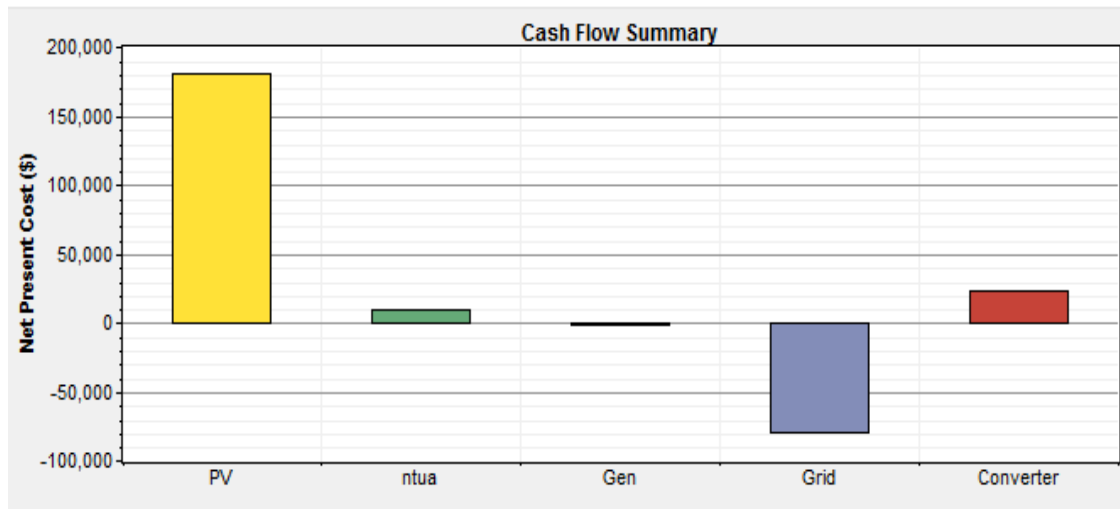
### 3.1.1.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

Αφού ολοκληρώθηκε η παρουσίαση των ηλεκτρικών αποτελεσμάτων θα περάσουμε στα οικονομικά αποτελέσματα με βάση τα οποία το HOMER κατατάσσει τα συστήματα. Όπως έχει αναφερθεί το καθαρό τρέχον κόστος για το σύστημα με τα 60kW PV είναι 133,440€ και για το σύστημα με τα 4.25kW PV είναι 133,666€ . Διαφορά πολύ μικρή η οποία μας ώθησε στην εξέταση και των δυο συστημάτων για να έχουμε μια πλήρη εποπτεία του συστήματος. Υπάρχει , όμως, μεγάλη διαφορά στο αρχικό κεφάλαιο που χρειάζονται οι δυο υλοποιήσεις. Στην πρώτη περίπτωση είναι απαραίτητα πάνω από 180,000€ ενώ στην δεύτερη χρειάζονται μόλις 5,600 € . Βέβαια τα λεφτά που απαιτούνται για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών αποσβένονται από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο ενώ στη δεύτερη υλοποίηση η έλλειψη των επιπλέον φωτοβολταϊκών οδηγεί το σύστημα στην αγορά ενέργειας όπως έχουμε αναφέρει. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας, λοιπόν , στην πρώτη περίπτωση είναι -3.681€ (έχουμε κέρδη δηλαδή) και στη δεύτερη 10,018 € . Βλέπουμε, δηλαδή , ότι στην πρώτη υλοποίηση δίνουμε ένα μεγάλο αρχικό κεφάλαιο, ένα μέρος του οποίου το παίρνουμε πίσω με την πάροδο του χρόνου ενώ στη δεύτερη ξοδεύουμε ένα μικρό κεφάλαιο στην αρχή αλλά απαιτείται και ένα σημαντικό ποσό κάθε χρόνο για τη λειτουργία του συστήματος.

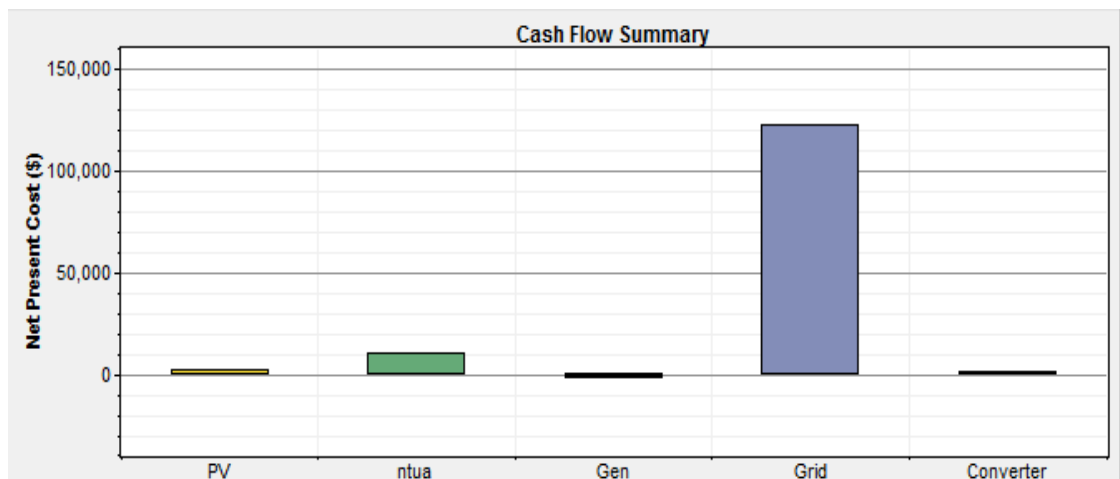
Στη συνέχεια παρουσιάζονται μια σειρά από διαγράμματα τα οποία μας δείχνουν σχηματικά πως ξοδεύονται τα λεφτά και για ποιο εξάρτημα του μικροδικτύου. Οι εικόνες 3.12 και 3.13 απεικονίζουν για ποιο εξάρτημα δαπανήθηκαν τα χρήματα για τα δυο υπό εξέταση συστήματα . Στο πρώτο βλέπουμε, και σχηματικά πλέον , ότι το μεγαλύτερο μέρος χρησιμοποιήθηκε για τα φωτοβολταϊκά ενώ έχουμε έσοδα από την



πώληση της ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ. Αντίθετα στο δεύτερο μικροδίκτυο το κόστος για την εγκατάσταση καταναμημένων παραγωγών είναι μικρό ενώ δαπανώνται αρκετά χρήματα για την αγορά ενέργειας από το δίκτυο.

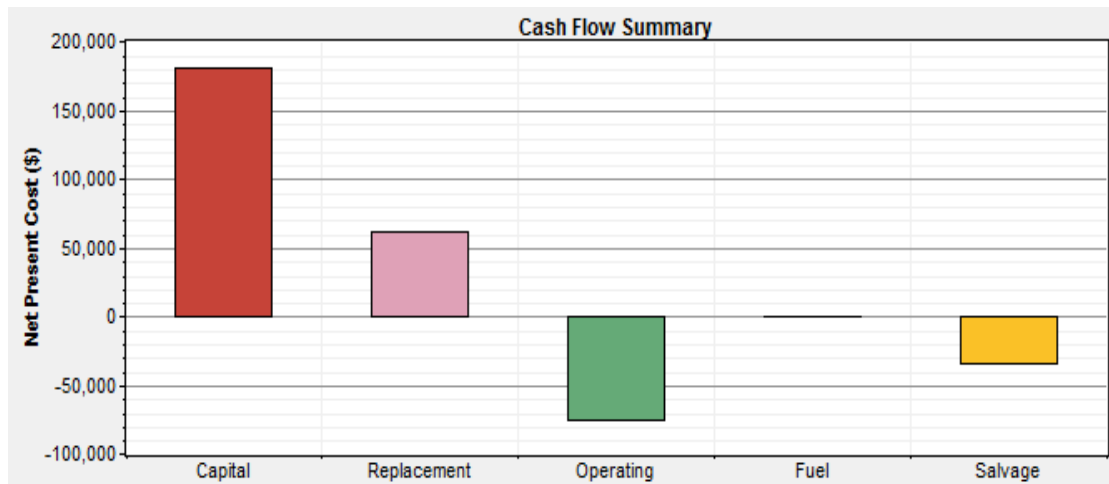


Εικόνα 3.12 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου με 60 kW PV

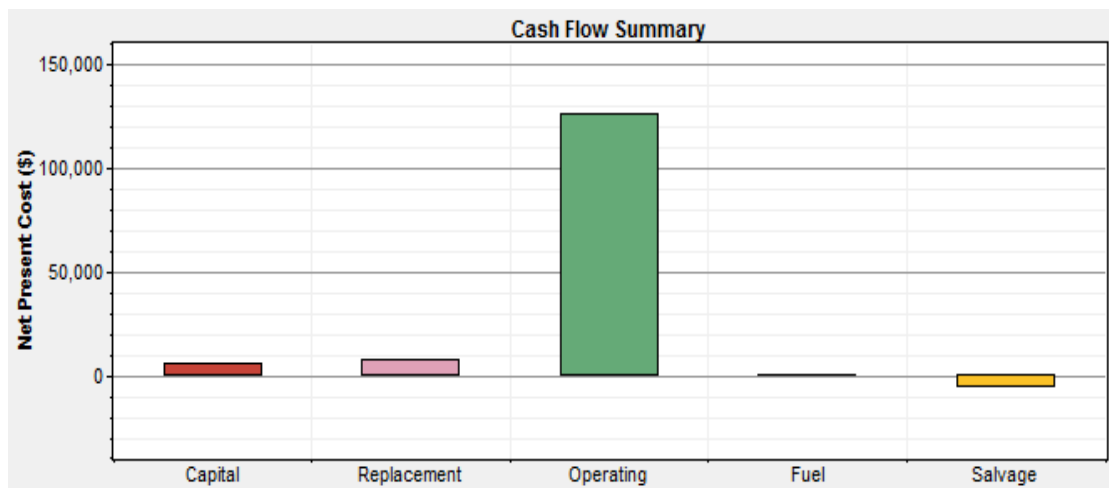


Εικόνα 3.13 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου με 4.25 kW PV

Οι εικόνες 3.14 και 3.15 παρουσιάζουν την περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους και φαίνεται η διαφορά που έχει ήδη αναφερθεί ανάμεσα στα δυο μικροδίκτυα, στο ένα το μεγαλύτερο κόστος είναι το αρχικό κεφάλαιο και στη συνέχεια έχουμε έσοδα από τη λειτουργία του ενώ στο άλλο έχουμε πολύ μικρό αρχικό κεφάλαιο αλλά υπάρχουν λειτουργικά έξοδα κάθε χρόνο.

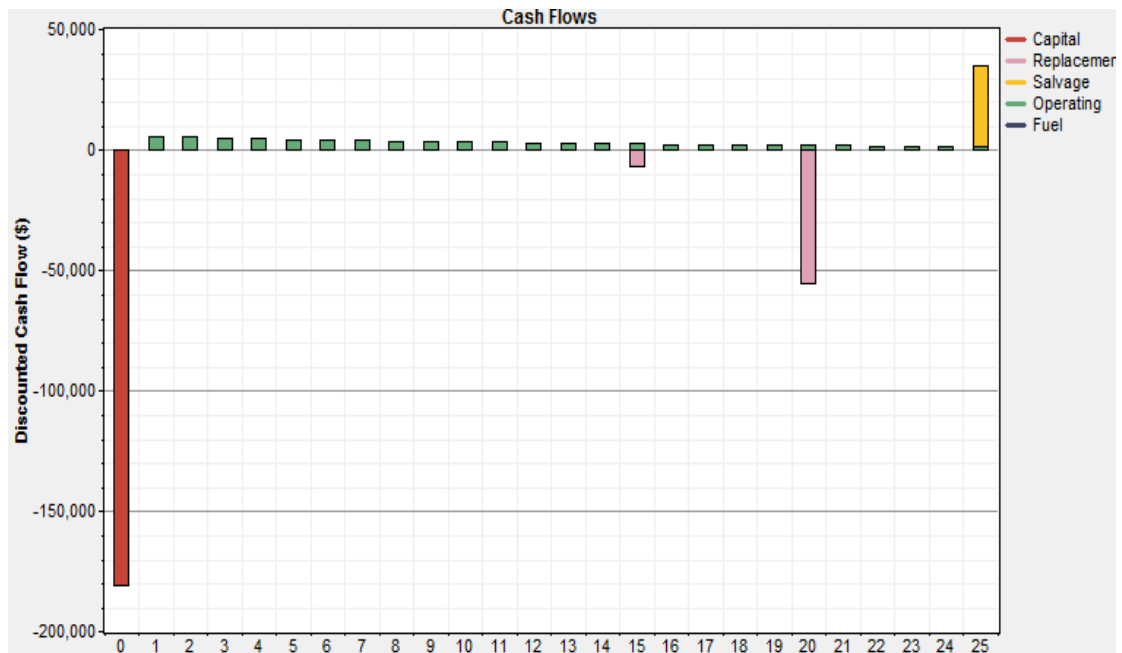


Εικόνα 3.14 Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους με 60 kW PV

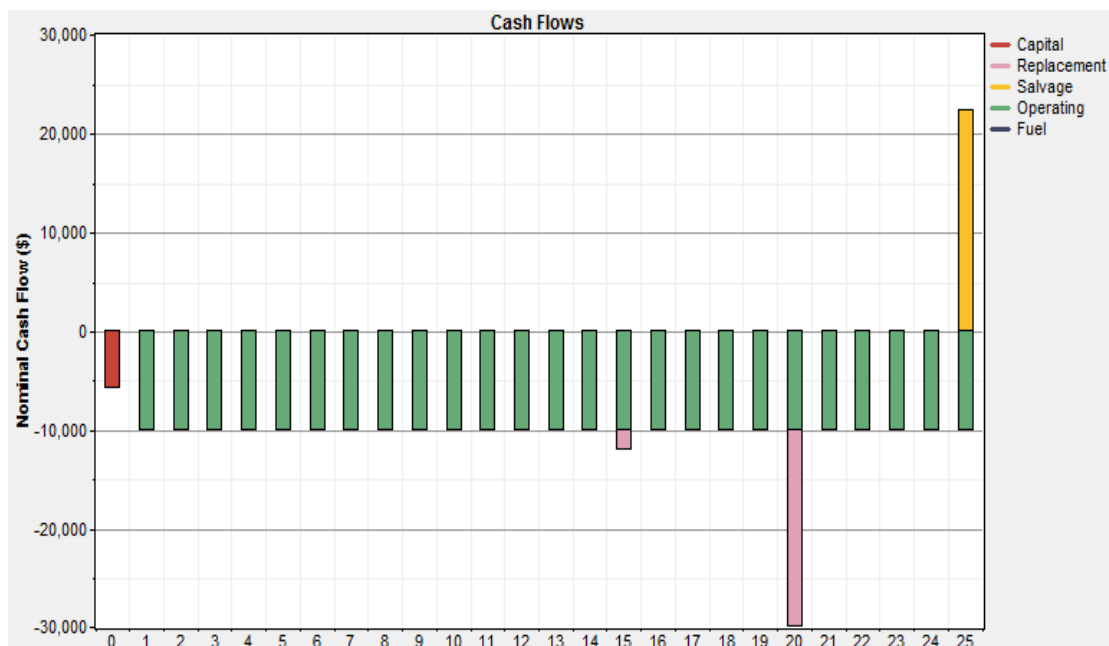


Εικόνα 3.15 Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους με 4.25 kW PV

Έπειτα στις παρακάτω δύο εικόνες απεικονίζεται η περίληψη των ταμειακών ροών για τα δύο συστήματα και φαίνεται πως επιμερίζονται τα έξοδα κάθε χρόνο. Πάλι γίνεται αντιληπτό ότι το πρώτο σύστημα έχει μεγάλο αρχικό κεφάλαιο ενώ το δεύτερο ένα σταθερό ποσό κάθε έτος που αντιστοιχεί στα λειτουργικά έξοδα. Βέβαια και τα δυο μικροδίκτυα επιβαρύνονται κάποια μεμονωμένα έτη με κόστη αντικατάστασης εξαρτημάτων.



**Εικόνα 3.16** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το είδος του κόστους με 60 kW PV



**Εικόνα 3.17** Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το είδος του κόστους με 4.25 kW PV

Τελειώνοντας την παρουσίαση των οικονομικών αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, στις εικόνες 3.18 και 3.19 έχουμε δυο πίνακες, έναν για το κάθε σύστημα, οι οποίοι εμφανίζουν αναλυτικά όλα τα ποσά που δαπανήθηκαν και για ποιο σκοπό. Προφανώς τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτούς τους πίνακες είναι ταυτόσημα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω με βάση τα διαγράμματα που σχηματίζει το HOMER.

| Component      | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|----------------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV             | 157,600      | 53,506           | 0        | 0         | -29,987      | 181,119    |
| Ntua ping pong | 5,600        | 1,871            | 3,835    | 0         | -1,048       | 10,257     |
| Generator 1    | 0            | 0                | 0        | 0         | -1,590       | -1,590     |
| Grid           | 0            | 0                | -79,115  | 0         | 0            | -79,115    |
| Converter      | 17,292       | 6,730            | 0        | 0         | -1,253       | 22,770     |
| System         | 180,492      | 62,107           | -75,280  | 0         | -33,878      | 133,440    |

**Εικόνα 3.18** Αναλυτικά χρήματα που δαπανήθηκαν με 60 kW PV

| Component      | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|----------------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV             | 0            | 4,365            | 0        | 0         | -2,446       | 1,919      |
| Ntua ping pong | 5,600        | 1,871            | 3,835    | 0         | -1,048       | 10,257     |
| Generator 1    | 0            | 0                | 0        | 0         | -1,590       | -1,590     |
| Grid           | 0            | 0                | 122,401  | 0         | 0            | 122,401    |
| Converter      | 0            | 835              | 0        | 0         | -155         | 679        |
| System         | 5,600        | 7,071            | 126,236  | 0         | -5,241       | 133,666    |

**Εικόνα 3.19** Αναλυτικά χρήματα που δαπανήθηκαν με 4.25 kW PV

### 3.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως αναφέραμε στην αρχή του κεφαλαίου το HOMER μας δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε και ανάλυση ευαισθησίας για το σύστημα μας έτσι ώστε να δούμε τον αντίκτυπο συγκεκριμένων μεταβλητών στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Από την ανάλυση αυτή εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια. Οι μεταβλητές ευαισθησίας στην προκειμένη περίπτωση είναι η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Παρότι θεωρήσαμε και την τιμή του πετρελαίου ντίζελ ως μεταβλητή ευαισθησίας δεν έχει νόημα περαιτέρω ενασχόληση με αυτή καθώς η χρησιμοποίηση της ντιζελογεννήτριας κρίνεται σε κάθε περίπτωση ασύμφορη.

Στην εικόνα 3.20 φαίνεται πως κατέταξε το HOMER τα συστήματα αν έχουμε μια μικρή αύξηση στην ηλιακή ακτινοβολία και στην ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτή τη κατάταξη, λοιπόν, έχουμε θεωρήσει ότι η ηλιακή ακτινοβολία έχει αυξηθεί στο  $5 \text{ kWh m}^{-2}$  και η ταχύτητα του ανέμου στο  $6.5 \text{ m/s}$ . Με αυτές τις αλλαγές παρατηρείται μεγάλη μείωση του καθαρού τρέχοντος κόστους και θα αναλύσουμε στη συνέχεια τη νέα υλοποίηση τόσο σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας όσο και σε σχέση με τα οικονομικά δεδομένα αυτής. Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πλέον ξεκάθαρο ότι το HOMER μας προτείνει την εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.20 όλες οι υλοποιήσεις που έχουν τις πρώτες θέσεις στην κατάταξη αποτελούνται από φωτοβολταϊκά ισχύος 60 kW. Ακόμη η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών θεωρείται, όπως είναι αναμενόμενο, και με αυτές τις συνθήκες επιβεβλημένη.

Sensitivity variables

Global Solar (kWh/m<sup>2</sup>/d) 5 Wind Speed (m/s) 6.5 Diesel Price (\$/L) 1.1

Double click on a system below for simulation results.

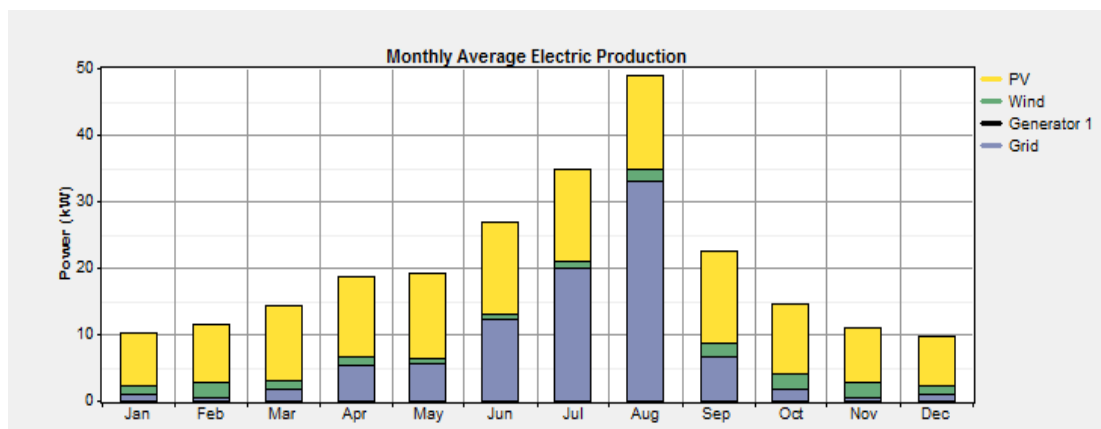
|  | PV (kW) | ntua | Gen (kW) | Conv. (kW) | Grid (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Gen (hrs) |
|--|---------|------|----------|------------|-----------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|
|  | 60.00   | 15   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 180,492      | -5,337                 | \$ 112,264 | 0.076        | 0.63       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 50.0       | 1000      | \$ 180,492      | -5,213                 | \$ 113,854 | 0.077        | 0.63       |            |           |
|  | 60.00   | 15   | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 184,440      | -5,480                 | \$ 114,381 | 0.077        | 0.63       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 179,292      | -4,987                 | \$ 115,547 | 0.078        | 0.62       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 60.0       | 1000      | \$ 184,440      | -5,356                 | \$ 115,972 | 0.078        | 0.63       |            |           |
|  | 60.00   | 12   |          | 50.0       | 1000      | \$ 179,292      | -4,862                 | \$ 117,137 | 0.079        | 0.62       |            |           |
|  | 60.00   | 10   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 178,492      | -4,765                 | \$ 117,576 | 0.079        | 0.61       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 183,240      | -5,108                 | \$ 117,939 | 0.080        | 0.62       |            | 0         |
|  | 60.00   | 10   |          | 50.0       | 1000      | \$ 178,492      | -4,641                 | \$ 119,167 | 0.081        | 0.61       |            |           |
|  | 60.00   | 15   | 36       | 70.0       | 1000      | \$ 188,388      | -5,399                 | \$ 119,371 | 0.081        | 0.63       |            | 0         |
|  | 60.00   | 8    | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 177,692      | -4,554                 | \$ 119,474 | 0.081        | 0.60       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   |          | 60.0       | 1000      | \$ 183,240      | -4,984                 | \$ 119,529 | 0.081        | 0.62       |            |           |
|  | 60.00   | 10   | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 182,440      | -4,874                 | \$ 120,138 | 0.081        | 0.61       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 70.0       | 1000      | \$ 188,388      | -5,275                 | \$ 120,961 | 0.082        | 0.63       |            |           |
|  | 60.00   | 8    |          | 50.0       | 1000      | \$ 177,692      | -4,430                 | \$ 121,065 | 0.082        | 0.60       |            |           |
|  | 60.00   | 10   |          | 60.0       | 1000      | \$ 182,440      | -4,749                 | \$ 121,729 | 0.082        | 0.61       |            |           |
|  | 60.00   | 8    | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 181,640      | -4,649                 | \$ 122,205 | 0.083        | 0.60       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 70.0       | 1000      | \$ 187,188      | -5,026                 | \$ 122,945 | 0.083        | 0.62       |            | 0         |
|  | 60.00   | 4    | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 176,092      | -4,137                 | \$ 123,207 | 0.083        | 0.59       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 176,544      | -4,139                 | \$ 123,628 | 0.084        | 0.63       |            | 0         |
|  | 60.00   | 8    |          | 60.0       | 1000      | \$ 181,640      | -4,525                 | \$ 123,795 | 0.084        | 0.60       |            |           |
|  | 60.00   | 12   |          | 70.0       | 1000      | \$ 187,188      | -4,901                 | \$ 124,535 | 0.084        | 0.62       |            |           |
|  | 60.00   | 4    |          | 50.0       | 1000      | \$ 176,092      | -4,013                 | \$ 124,797 | 0.084        | 0.59       |            |           |
|  | 60.00   | 2    | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 175,292      | -3,930                 | \$ 125,056 | 0.085        | 0.58       |            | 0         |
|  | 60.00   | 10   | 36       | 70.0       | 1000      | \$ 186,388      | -4,790                 | \$ 125,154 | 0.085        | 0.61       |            | 0         |
|  | 60.00   | 15   |          | 40.0       | 1000      | \$ 176,544      | -4,015                 | \$ 125,218 | 0.085        | 0.63       |            |           |
|  | 60.00   | 1    | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 174,892      | -3,826                 | \$ 125,977 | 0.085        | 0.58       |            | 0         |
|  | 60.00   | 4    | 36       | 60.0       | 1000      | \$ 180,040      | -4,208                 | \$ 126,249 | 0.085        | 0.59       |            | 0         |
|  | 60.00   | 12   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 175,344      | -3,835                 | \$ 126,323 | 0.085        | 0.62       |            | 0         |
|  | 50.00   | 15   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 152,444      | -2,019                 | \$ 126,634 | 0.086        | 0.58       |            | 0         |
|  | 60.00   | 2    |          | 50.0       | 1000      | \$ 175,292      | -3,805                 | \$ 126,646 | 0.086        | 0.58       |            |           |
|  | 60.00   | 10   |          | 70.0       | 1000      | \$ 186,388      | -4,666                 | \$ 126,744 | 0.086        | 0.61       |            |           |
|  | 60.00   | 8    | 36       | 70.0       | 1000      | \$ 185,588      | -4,565                 | \$ 127,228 | 0.086        | 0.60       |            | 0         |
|  | 60.00   |      | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 174,892      | -3,723                 | \$ 127,293 | 0.086        | 0.57       |            | 0         |
|  | 50.00   | 15   | 36       | 50.0       | 1000      | \$ 156,392      | -2,256                 | \$ 127,547 | 0.086        | 0.58       |            | 0         |
|  | 60.00   | 1    |          | 50.0       | 1000      | \$ 174,892      | -3,702                 | \$ 127,567 | 0.086        | 0.58       |            |           |
|  | 60.00   | 4    |          | 60.0       | 1000      | \$ 180,040      | -4,084                 | \$ 127,839 | 0.086        | 0.59       |            |           |
|  | 60.00   | 12   |          | 40.0       | 1000      | \$ 175,344      | -3,710                 | \$ 127,913 | 0.086        | 0.62       |            |           |
|  | 60.00   | 10   | 36       | 40.0       | 1000      | \$ 174,544      | -3,644                 | \$ 127,958 | 0.087        | 0.61       |            | 0         |
|  | 50.00   | 15   |          | 40.0       | 1000      | \$ 152,444      | -1,895                 | \$ 128,224 | 0.087        | 0.58       |            |           |

Εικόνα 3.20 Κατάταξη των πιθανών υλοποιήσεων του συστήματος με βάση το καθαρό τρέχον κόστος

### 3.1.2.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας

Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητα του ανέμου είχε ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά, κυρίως, και από τις ανεμογεννήτριες. Η εικόνα 3.21 δείχνει τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κάθε μήνα. Συγκρίνοντας το συγκεκριμένο διάγραμμα με το αντίστοιχο που παρουσιάσαμε για το βέλτιστο σύστημα για τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας δεν διακρίνεται εύκολα διαφορά. Στις εικόνες 3.22 και 3.23, όμως, μπορούμε να δούμε την αύξηση στην παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και τις ανεμογεννήτριες

σε απόλυτους αριθμούς, όπως επίσης και την άνοδο του κλάσματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ειδικά σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια παρατηρείται μια αύξηση που αγγίζει τις 8,000 kWh . Σίγουρα υπάρχει και μια αύξηση στην ενέργεια που συνεισφέρουν οι ανεμογεννήτριες αλλά κυμαίνεται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα αν και δεν είναι αμελητέα. Επίσης το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών αυξήθηκε στο 63% από το 60% ενώ πλέον παλούνται και 6,000 περισσότερες kWh στο δίκτυο της ΔΕΗ .



**Εικόνα 3.21** Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 98,464  | 55  |
| Wind turbines  | 13,207  | 7   |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 66,188  | 37  |
| Total          | 177,859 | 100 |

**Εικόνα 3.22** Ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 988    | 0.56 |
| Unmet electric load | 0.00   | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00   | 0.00 |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 0.628 |

**Εικόνα 3.23** Χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

| Consumption     | kWh/yr  | %   |
|-----------------|---------|-----|
| AC primary load | 115,705 | 68  |
| Grid sales      | 55,632  | 32  |
| Total           | 171,337 | 100 |

**Εικόνα 3.24** Κατανάλωση της ενέργειας

Με την αύξηση της μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας έχουμε σημαντική αύξηση της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών στην εξυπηρέτηση του φορτίου και της ισχύος εξόδου αυτών, χαρακτηριστικά τα οποία αποτυπώνονται στην εικόνα 3.25. Αντίστοιχα τα ίδια χαρακτηριστικά έχουν άνοδο και για τις ανεμογεννήτριες , σε μικρότερο βέβαια βαθμό , όπως βλέπουμε στην εικόνα 3.26.

| Quantity         | Value  | Units  |
|------------------|--------|--------|
| Rated capacity   | 60.0   | kW     |
| Mean output      | 11.2   | kW     |
| Mean output      | 270    | kWh/d  |
| Capacity factor  | 18.7   | %      |
| Total production | 98,464 | kWh/yr |

| Quantity           | Value | Units  |
|--------------------|-------|--------|
| Minimum output     | 0.0   | kW     |
| Maximum output     | 63.7  | kW     |
| PV penetration     | 85.1  | %      |
| Hours of operation | 4,384 | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.144 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.25** Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

| Quantity             | Value  | Units  |
|----------------------|--------|--------|
| Total rated capacity | 6.00   | kW     |
| Mean output          | 1.51   | kW     |
| Capacity factor      | 25.1   | %      |
| Total production     | 13,207 | kWh/yr |

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 3.40   | kW     |
| Wind penetration   | 11.4   | %      |
| Hours of operation | 8,152  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0608 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.26** Χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Τελειώνοντας με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της βέλτιστης διαμόρφωσης για τις νέες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας πρέπει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της συναλλαγής του μικροδικτύου με το δίκτυο της ΔΕΗ. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα το σύστημα αγοράζει περίπου 1,500 kWh λιγότερες πλέον αλλά πουλάει πάνω από 6,000 kWh περισσότερες σε σχέση με την προηγούμενη βέλτιστη υλοποίηση που παρουσιάστηκε παραπάνω. Όπως γίνεται αντιληπτό αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα το μικροδίκτυο να αυξάνει τα κέρδη του από την αγοραπωλησία ενέργειας με το δίκτυο.

| Month  | Energy    | Energy | Net       | Peak   | Energy | Demand |
|--------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|        | Purchased | Sold   | Purchases | Demand | Charge | Charge |
|        | (kWh)     | (kWh)  | (kWh)     | (kW)   | (\$)   | (\$)   |
| Jan    | 753       | 5,356  | -4,603    | 4      | -1,317 | 0      |
| Feb    | 370       | 5,358  | -4,988    | 4      | -1,356 | 0      |
| Mar    | 1,267     | 6,968  | -5,701    | 6      | -1,685 | 0      |
| Apr    | 3,872     | 5,864  | -1,993    | 36     | -1,138 | 0      |
| May    | 4,155     | 5,537  | -1,382    | 16     | -1,024 | 0      |
| Jun    | 8,915     | 3,012  | 5,903     | 32     | 108    | 0      |
| Jul    | 14,890    | 980    | 13,910    | 48     | 1,234  | 0      |
| Aug    | 24,522    | 198    | 24,324    | 79     | 2,401  | 0      |
| Sep    | 4,817     | 5,648  | -831      | 20     | -987   | 0      |
| Oct    | 1,380     | 6,322  | -4,942    | 8      | -1,506 | 0      |
| Nov    | 412       | 5,434  | -5,022    | 4      | -1,372 | 0      |
| Dec    | 836       | 4,955  | -4,119    | 4      | -1,205 | 0      |
| Annual | 66,188    | 55,632 | 10,556    | 79     | -7,846 | 0      |

**Εικόνα 3.27** Στοιχεία για την αγοραπωλησία ενέργειας με το δίκτυο

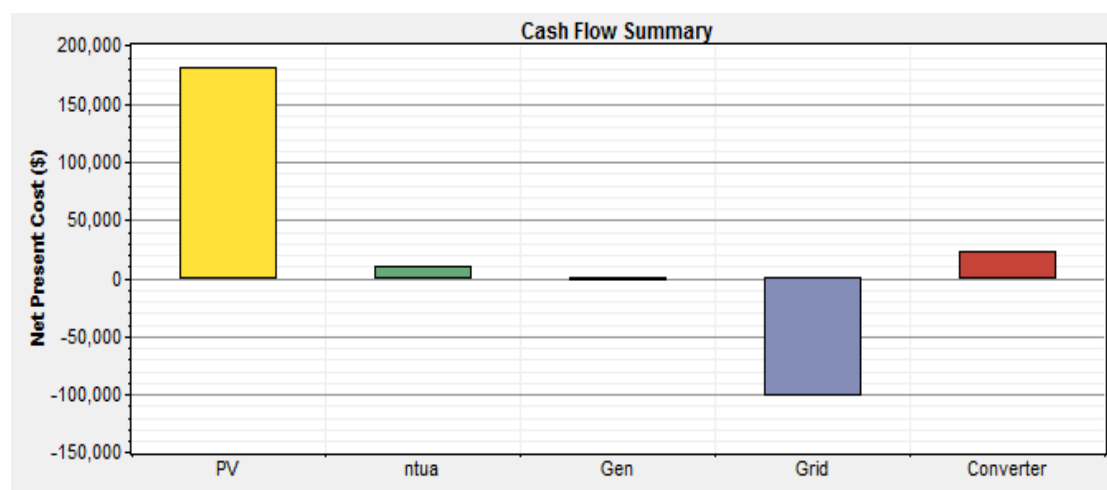
Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι η μικρή αυτή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου έφερε μιας σημαντική αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τις ανεμογεννήτριες και έτσι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να αγοράζει λιγότερη ενέργεια από το δίκτυο της ΔΕΗ και να πουλά περισσότερη. Είναι απαραίτητο όμως να αναφερθούν και τα

οικονομικά στοιχεία της νέας διαμόρφωσης για να διευκρινιστεί πόσο αποδοτικότερο είναι το μικροδίκτυο με αυξημένες τις μεταβλητές ευαισθησίας.

### 3.1.2.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας

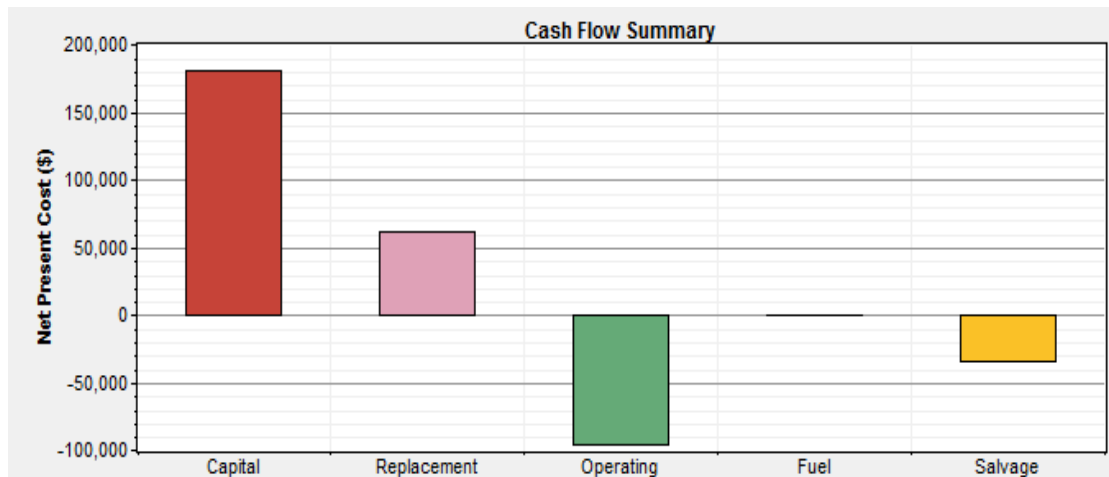
Το σπουδαιότερο οικονομικό δεδομένο με βάση το οποίο το HOMER κατατάσσει τα συστήματα είναι , όπως έχει αναφερθεί, το καθαρό τρέχον κόστος. Με την αύξηση των τιμών των μεταβλητών ευαισθησίας καταφέραμε να μειώσουμε το καθαρό τρέχον στα 112,264 € , είχαμε μια μείωση δηλαδή πάνω από 20,000 ευρώ καθώς στην προηγούμενη περίπτωση ήταν 133, 440€. Ακόμη υπάρχει μια σημαντική αύξηση στα έσοδα που έχει κάθε έτος το μικροδίκτυο, αφού πλέον εξοικονομεί 5,337 € ,ποσό που είναι σχεδόν 50% μεγαλύτερο από ότι στην προηγούμενη περίπτωση που αναλύθηκε παραπάνω .

Στις εικόνες 3.28 και 3.29 βλέπουμε τα διαγράμματα που χρησιμοποιεί το HOMER για να παρουσιάσει τα οικονομικά δεδομένα. Το στοιχείο που διαφοροποιεί το διάγραμμα της εικόνας 3.28 από το αντίστοιχο στην εικόνα 3.12 που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι τα έσοδα που έχουμε από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ. Παρατηρείται μια σημαντική αύξηση μεγαλύτερη των 20,000 € η οποία είναι απόρροια της περισσότερης ενέργειας που παράγουν πλέον τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες. Η διαφορά αυτή στα έσοδα που έχει το μικροδίκτυο ,στην εικόνα 3.29 αποτυπώνεται στην αύξηση των εσόδων από τη λειτουργία του μικροδικτύου. Κατά τα άλλα, το αρχικό κεφάλαιο που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών είναι ίδιο με προηγουμένως αφού προφανώς δεν επηρεάζεται από τις τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας .



Εικόνα 3.28 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου





Εικόνα 3.29 Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους

Στην εικόνα 3.30 παρουσιάζονται αναλυτικά τα έξοδα και έσοδα του μικροδικτύου και μπορούμε να δούμε με απόλυτα νούμερα την αύξηση των εσόδων από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ που είναι και το μόνο στοιχείο που διαφοροποιεί τα οικονομικά δεδομένα αυτής της προσομοίωσης με αυτήν που αναλύθηκε νωρίτερα στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η αύξηση αυτή είναι αρκετά σημαντική και είναι η αιτία που καταφέραμε να μειώσουμε το καθαρό τρέχον κόστος και να γίνει αποδοτικότερο το σύστημα μας.

| Component      | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|----------------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV             | 157,600      | 53,506           | 0        | 0         | -29,987      | 181,119    |
| Ntua ping pong | 5,600        | 1,871            | 3,835    | 0         | -1,048       | 10,257     |
| Generator 1    | 0            | 0                | 0        | 0         | -1,590       | -1,590     |
| Grid           | 0            | 0                | -100,292 | 0         | 0            | -100,292   |
| Converter      | 17,292       | 6,730            | 0        | 0         | -1,253       | 22,770     |
| System         | 180,492      | 62,107           | -96,457  | 0         | -33,878      | 112,264    |

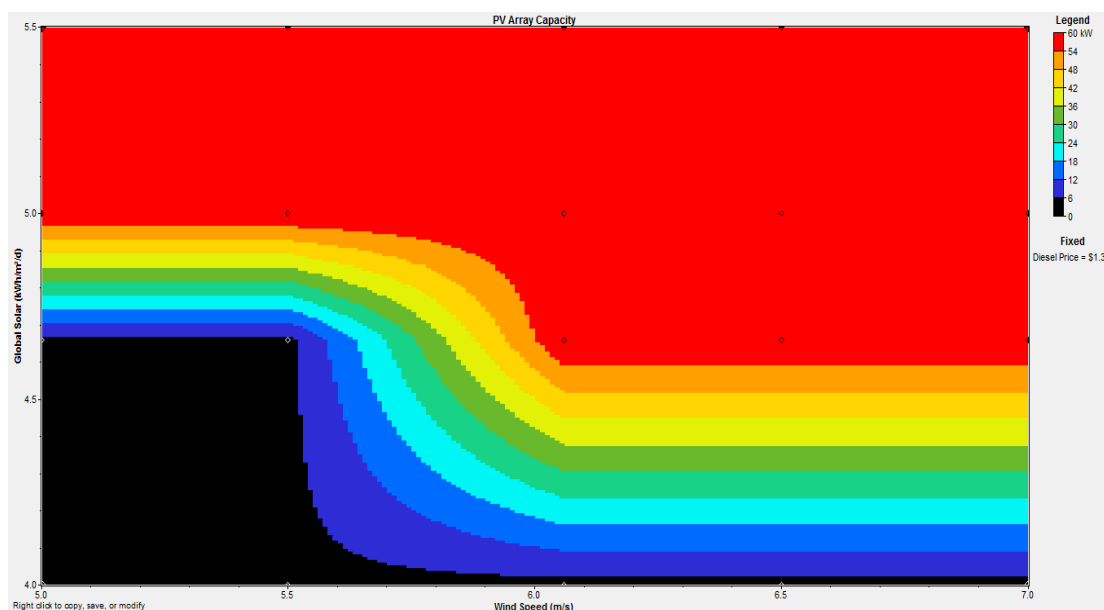
Εικόνα 3.30 Αναλυτικά χρήματα που δαπανήθηκαν

### 3.1.2.3 Παρουσίαση της επιρροής των μεταβλητών ευαισθησίας στη διαμόρφωση του μικροδικτύου

Πετύχαμε αυτήν την μείωση του κόστους αλλάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία από  $4.66 \text{ kWh m}^{-2}$  σε  $5 \text{ kWh m}^{-2}$  και την ταχύτητα του ανέμου από  $6.06 \text{ m/s}$  σε  $6.5 \text{ m/s}$ . Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, το σύστημά μας θα γινόταν ακόμα αποδοτικότερο αν είχαμε μεγαλύτερες αυξήσεις σε αυτές τις δύο μεταβλητές ευαισθησίας. Το HOMER έχει μια σειρά από διαγράμματα για να δείξει πως αλλάζουν τα δεδομένα του μικροδικτύου ανάλογα με τις αλλαγές των μεταβλητών ευαισθησίας.

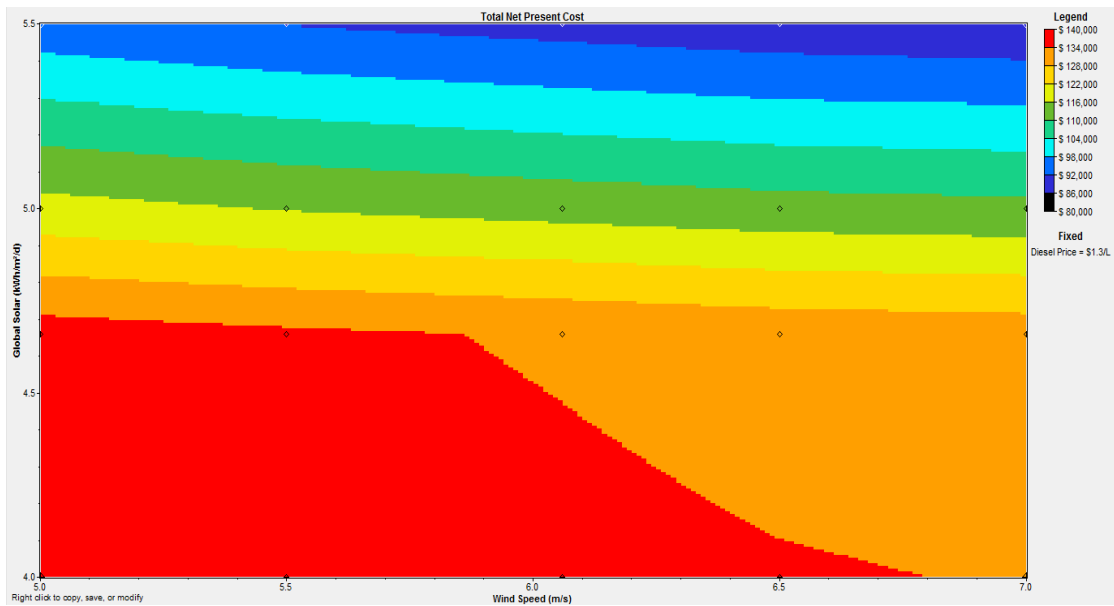
Στην εικόνα 3.31 φαίνεται το πως η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζει τη συνολική ισχύ των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών που έχει η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος. Στον κατακόρυφο άξονα είναι η ηλιακή ακτινοβολία και στον οριζόντιο η ταχύτητα του ανέμου. Κάθε διαφορετικό χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτό το διάγραμμα είναι πολύ σημαντικό και δείχνει με ξεκάθαρο τρόπο

την επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος. Είναι φανερό ότι όταν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας αγγίζει τα  $5\text{kWh m}^{-2}$  τότε η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών με ισχύ  $60\text{ kW}$  ενδείκνυται. Αντίθετα όταν κυμαίνεται σε πιο χαμηλά επίπεδα είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι επηρεάζει και η ταχύτητα του ανέμου την βέλτιστη εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών. Επίσης μπορούμε να δούμε ότι κάτω από  $5\text{ kWh m}^{-2}$  πολύ μικρές μεταβολές της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρούν άμεσα στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος.



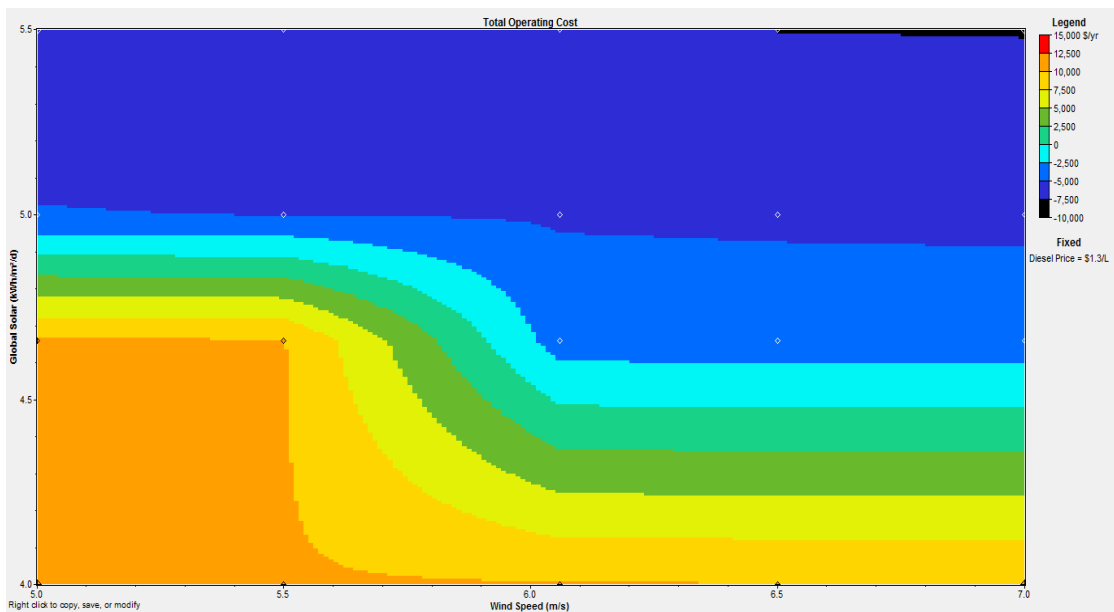
**Εικόνα 3.31** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Εκτός από το παραπάνω διάγραμμα, που δείχνει τη σχέση της ισχύος των φωτοβολταϊκών με τις μεταβλητές ευαισθησίας, το HOMER έχει αντίστοιχα διαγράμματα και για άλλες μεταβλητές του συστήματος. Στην εικόνα 3.32 φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας στο καθαρό τρέχον κόστος. Είναι φανερό η μείωση του καθαρού τρέχοντος κόστους με την αύξηση των μεταβλητών ευαισθησίας και κυρίως με την αύξηση της μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας, γεγονός που το παρατηρήσαμε και στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω. Σχηματικά είναι πιο εύκολα αντιληπτή η επιρροή των μεταβλητών ευαισθησίας στο καθορισμό του κόστους και φαίνεται ότι ακόμα και η μικρή μεταβολή αυτών έχει σημαντική επίδραση.



**Εικόνα 3.32** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο καθαρό τρέχον κόστος στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

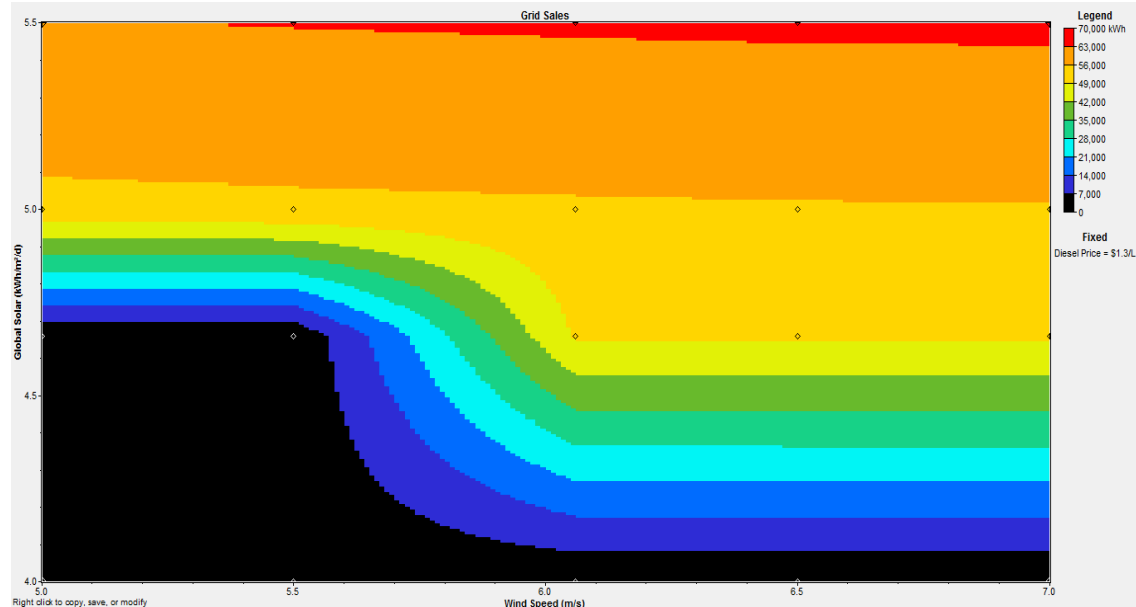
Το HOMER παρουσιάζει με αντίστοιχα διαγράμματα και την επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας σε πολλά άλλα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τα οποία είναι αδύνατον να αναλυθούν όλα στην παρούσα διπλωματική εργασία . Έτσι επιλέξαμε να παρουσιάσουμε τα πιο σημαντικά και στις εικόνες 3.33 , 3.34 και 3.35 απεικονίζονται η επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο συνολικό κόστος λειτουργίας , στην πώληση ενέργειας στο δίκτυο και στο κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντίστοιχα .



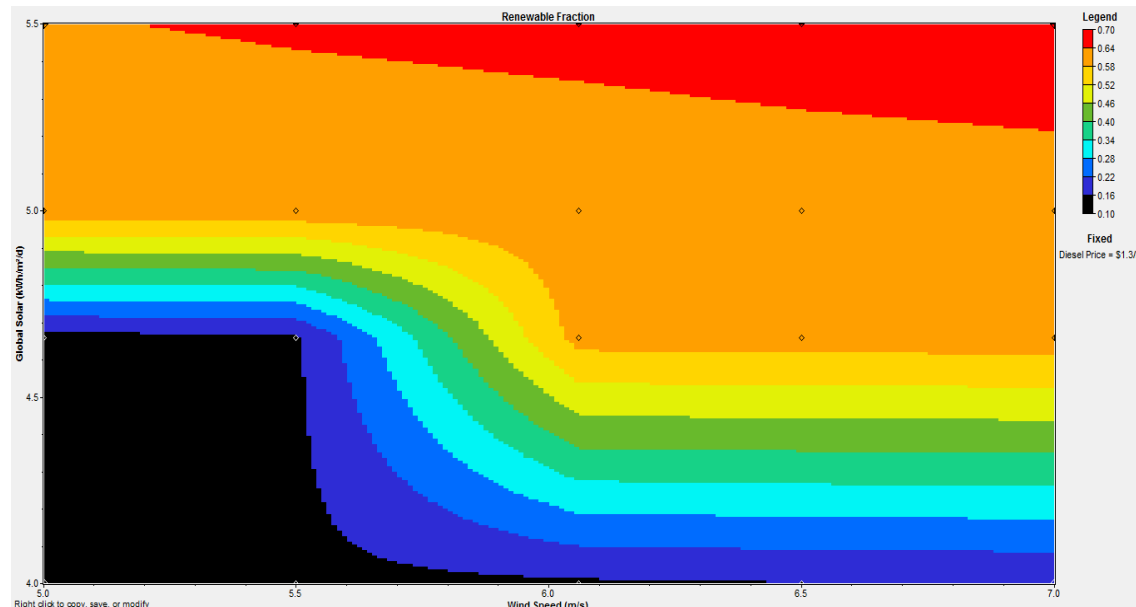
**Εικόνα 3.33** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο κόστος λειτουργίας στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι όλα τα διαγράμματα έχουν ομοιότητες και σε όλα γίνεται σαφής η επιρροή των μεταβλητών ευαισθησίας στη βέλτιστη διαμόρφωση του

συστήματος , καθώς όπως και στα προηγούμενα μικρές αλλαγές στις τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν άμεση επίδραση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Αύξηση , λοιπόν , της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει τα έσοδα από τη λειτουργία του μικροδικτύου , την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο και το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



**Εικόνα 3.34** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στη πώληση ενέργεια στο δίκτυο στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος



**Εικόνα 3.35** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Με τη βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων μπορούμε να έχουμε μια απάντηση για το πόσο πρέπει να αυξηθούν οι τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας εάν θέλουμε να επιτύχουμε συγκεκριμένους στόχους ,όπως η αύξηση του κλάσματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε κάποια συγκεκριμένα επίπεδα ή η πώληση ενέργειας στο δίκτυο

να ξεπεράσει ένα όριο που θα θέσουμε. Το βασικότερο όμως συμπέρασμα που μπορεί να βγει από αυτά είναι το αν ενδείκνυται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών μεγαλύτερης ισχύος , περισσότερων ανεμογεννητριών ή οποιασδήποτε άλλης διεσπαρμένης παραγωγής.

### **3.1.3 Συμπεράσματα από τη βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου**

Η βελτιστοποίηση και η ανάλυση ευαισθησίας του διασυνδεδεμένου μικροδικτύου που έγιναν παραπάνω οδήγησαν σε αρκετά συμπεράσματα που θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε εδώ:

- Αν η ηλιακή ακτινοβολία παραμείνει στα ίδια επίπεδα η εγκατάσταση παραπάνω φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν είναι επιβεβλημένη για να επιτύχουμε τη μείωση του καθαρού τρέχοντος κόστους του συστήματος.
- Αντίθετα η εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών ενδείκνυται σε κάθε περίπτωση.
- Με την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα να μην μεταβάλλονται το HOMER προτείνει δυο υλοποιήσεις με παρόμοια τρέχοντα κόστη. Η πρώτη έχει εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά 60 kW και 15 ανεμογεννήτριες και η δεύτερη έχει φωτοβολταϊκά 4.25 kW και 15 ανεμογεννήτριες.
- Στην πρώτη υλοποίηση παρατηρείται μεγάλη αύξηση του κλάσματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 60% καθώς τα φωτοβολταϊκά συνεισφέρουν το 53% και οι ανεμογεννήτριες το 7%. Στη δεύτερη υλοποίηση το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φτάνει το 16%, καθώς το 6% προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά και το 10% από τις ανεμογεννήτριες.
- Στην πρώτη υλοποίηση το 30% της ενέργειας που παράγεται πωλείται στο δίκτυο της ΔΕΗ κάτι αποφέρει έσοδα στο σύστημά μας ενώ στη δεύτερη υλοποίηση δεν πωλείται σχεδόν καθόλου ενέργεια .
- Το καθαρό τρέχον κόστος για την πρώτη υλοποίηση είναι 133,440€ και το αρχικό κεφάλαιο 180,000€ ενώ για την δεύτερη υλοποίηση έχουμε λίγο μεγαλύτερο τρέχον κόστος κατά 226€ αλλά πολύ μικρότερο αρχικό κεφάλαιο το οποίο είναι 5,600€. Οπότε στην πρώτη περίπτωση έχουμε μεγάλο αρχικό κεφάλαιο αλλά υπάρχουν έσοδα από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο κάθε χρόνο ενώ στη δεύτερη περίπτωση το αρχικό κεφάλαιο είναι μικρό αλλά υπάρχουν σημαντικά έξοδα λειτουργίας κάθε χρόνο από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα 5 kWh m<sup>-2</sup> και της ταχύτητας του ανέμου στα 6.5 m/s το HOMER κρίνει απαραίτητη την εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων και προτείνει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συνολικής ισχύος 60 kW , καθώς επίσης και 15 ανεμογεννητριών.
- Παρατηρείται σημαντική αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια σε σχέση με το ίδιο σύστημα χωρίς να έχει αυξηθεί η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία φτάνει τις 8,000 kWh. Ακόμη το κλάσμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φτάνει το 63% .
- Πλέον το μικροδίκτυο πουλά 6,000 περισσότερες kWh και αγοράζει 1,500 kWh κάτι που οδηγεί σε αυξημένα έσοδα από την αγοραπωλησία ενέργειας με το δίκτυο.

- Το καθαρό τρέχον κόστος είναι τώρα 112,264€ και τα έσοδα από την λειτουργία του μικροδικτύου είναι 5,337 € το χρόνο.
- Το HOMER μας έδειξε ότι όταν η ηλιακή ακτινοβολία ξεπεράσει τα 5 kWh m<sup>-2</sup> τότε η εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών ενδείκνυται . Αντίθετα όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλότερη η εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών εξαρτάται και από την ταχύτητα του ανέμου.
- Ακόμη η αύξηση των τιμών των μεταβλητών ευαισθησίας οδηγεί σε μείωση του κόστους του μικροδικτύου, σε αύξηση των εσόδων από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο και στην αύξηση του κλάσματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Συνοψίζοντας , από την ανάλυση ευαισθησίας έγινε αντιληπτό ότι μια μικρή αύξηση της μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας θα έκανε το σύστημα μας οικονομικά αποδοτικότερο, καθώς θα αυξανόταν κατακόρυφα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή με συνέπεια να υπήρχε μεγάλη άνοδος στη πώληση ενέργειας στο δίκτυο. Μετά από όλα αυτά δεν θα είχαμε καμία αμφιβολία για την αναγκαιότητα εγκατάστασης περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων για να βελτιστοποιήσουμε το σύστημα.

### 3.2 Βελτιστοποίηση του αυτόνομου μικροδικτύου

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο η υπάρχουσα διαμόρφωση του αυτόνομου μικροδικτύου έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό φορτίου που δεν εξυπηρετείται καθώς επίσης και έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας. Θα προσπαθήσουμε , λοιπόν , να βελτιστοποιήσουμε το αυτόνομο σύστημα και να εκμηδενίσουμε αυτούς τους δύο παράγοντες με τη βοήθεια του HOMER . Για να εκτελέσουμε τις προσομοιώσεις και να βρούμε τη βέλτιστη υλοποίηση του μικροδικτύου θεωρήσαμε έναν αριθμό επιλογών που έχουν νόημα από τα εξαρτήματα που υπάρχουν στο μικροδίκτυο οι οποίες φαίνονται στον επόμενο πίνακα. Το HOMER θα προσομοιώσει όλες τις πιθανές διαμορφώσεις και θα τις ταξινομήσει με βάση το καθαρό τρέχον κόστος.

|    | PV Array | ntua       | battery   | Converter |
|----|----------|------------|-----------|-----------|
|    | (kW)     | (Quantity) | (Strings) | (kW)      |
| 1  | 0.340    | 1          | 0         | 1.00      |
| 2  | 0.400    | 2          | 2         | 1.50      |
| 3  | 0.600    |            | 3         | 2.00      |
| 4  | 0.700    |            | 4         | 2.50      |
| 5  | 0.800    |            | 6         | 3.00      |
| 6  | 1.000    |            | 8         | 3.50      |
| 7  | 1.200    |            | 10        |           |
| 8  | 1.400    |            |           |           |
| 9  | 1.600    |            |           |           |
| 10 |          |            |           |           |

**Πίνακας 3.2** Τιμές των μεταβλητών

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Θεωρείται μια σειρά από διαφορετικές τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου για

μοντελοποίηση, με σκοπό την αξιολόγηση του αντίκτυπού τους στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Οι τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδιες με αυτές που θεωρήθηκαν για το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο. Η πραγματική τιμή για την ηλιακή ακτινοβολία είναι  $4.66 \text{ kWh m}^{-2}$  και θεωρήσαμε άλλες τρεις τιμές 4, 5 και  $5.5 \text{ kWh m}^{-2}$ . Ακόμη η ετήσια μέση τιμή για την ταχύτητα του ανέμου είναι  $6.06 \text{ m/s}$  και οι τιμές ευαισθησίας ορίστηκαν 5, 5.5, 6.5 και  $7 \text{ m/s}$ .

Το HOMER εκτέλεσε 12,096 προσομοιώσεις για να βελτιστοποιήσει το σύστημα και χρειάστηκε πενήντα-δύο δευτερόλεπτα για να τις ολοκληρώσει.

Σε πρώτη φάση θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος που μας προτείνει το HOMER κρατώντας σταθερές τις πραγματικές τιμές που μετρήσαμε για την ταχύτητα του ανέμου ( $6.06 \text{ m/s}$ ) και την ηλιακή ακτινοβολία ( $4.66 \text{ kWh m}^{-2}$ ). Εν συνεχεία θα παρουσιάσουμε την ανάλυση ευαισθησίας που εκτέλεσε το HOMER και θα γίνει αντιληπτό πόσο επηρεάζουν αυτές οι δυο μεταβλητές την βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος.

### **3.2.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση του βέλτιστου συστήματος**

Στο αυτόνομο μικροδίκτυο θεωρήσαμε μικρότερα πιθανά μεγέθη φωτοβολταϊκών και πολύ λιγότερες ανεμογεννήτριες σε σχέση με το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, καθώς το αυτόνομο σύστημα εξυπηρετεί μια κατοικία και υπάρχουν προφανείς περιορισμοί χώρου. Το HOMER αφού εκτέλεσε τις προσομοιώσεις για όλες τις πιθανές διαμορφώσεις του μικροδικτύου μας, τις κατέταξε όλες με βάση το συνολικό καθαρό τρέχον κόστος και η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την κατάταξη αυτή. Το πρόγραμμα θεωρεί ότι η εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι επιβεβλημένη για να πετύχουμε το σκοπό μας, καθώς όπως δείχνει η εικόνα 3.36 όλες οι υλοποιήσεις που έχουν τις πρώτες θέσεις στη λίστα έχουν φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος  $1.2 \text{ kW}$  και πάνω. Η προτεινόμενη διαμόρφωση του μικροδικτύου από το HOMER, λοιπόν, περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύος  $1.20 \text{ kW}$ ,  $860 \text{ W}$  παραπάνω από τα ήδη εγκατεστημένα, και την εγκατάσταση άλλης μιας ανεμογεννήτριας εκτός από την ήδη υπάρχουσα. Επίσης, το πρόγραμμα μας υποδεικνύει ότι δεν χρειάζεται η εγκατάσταση επιπλέον μπαταριών στο σύστημά μας για να εξαιρεθεί το φορτίο που δεν εξυπηρετείται. Ακόμη, η βέλτιστη υλοποίηση σύμφωνα με το HOMER έχει καθαρό τρέχον κόστος  $5,399 \text{ €}$  και αρχικό κεφάλαιο ίσο με  $3,397 \text{ €}$ .

#### **3.2.1.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της προσομοίωσης**

Με την εγκατάσταση των επιπλέον φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας η παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε κατακόρυφα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.37 τα φωτοβολταϊκά πλέον παράγουν  $1,818 \text{ kWh}$  από  $515 \text{ kWh}$  που παρήγαγαν με την υπάρχουσα κατάσταση ενώ και η εγκατάσταση της δεύτερης ανεμογεννήτριας

διπλασίασε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες συνεισφέρουν πλέον το 62% της παραγόμενης ενέργειας και τα φωτοβολταϊκά το υπόλοιπο 38%.

Global Solar (kWh/m<sup>2</sup>/d) 4.66 Wind Speed (m/s) 6.06

Double click on a system below for simulation results.

|  | PV (kW) | ntua | battery | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|------|---------|------------|-----------------|------------------------|-----------|--------------|------------|
|  | 1.20    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 3,397        | 157                    | \$ 5,399  | 0.207        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 3,647        | 163                    | \$ 5,734  | 0.220        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 3,897        | 170                    | \$ 6,069  | 0.232        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 4,094        | 164                    | \$ 6,192  | 0.237        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 1.0        | \$ 3,997        | 182                    | \$ 6,318  | 0.242        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 2.5        | \$ 4,147        | 177                    | \$ 6,404  | 0.245        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 1.0        | \$ 4,197        | 182                    | \$ 6,525  | 0.250        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 4,344        | 171                    | \$ 6,527  | 0.250        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 1.5        | \$ 4,247        | 188                    | \$ 6,653  | 0.255        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 3.0        | \$ 4,397        | 183                    | \$ 6,739  | 0.258        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 1.5        | \$ 4,447        | 189                    | \$ 6,860  | 0.263        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 4,594        | 177                    | \$ 6,862  | 0.263        | 1.00       |
|  | 1.60    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 4,791        | 172                    | \$ 6,984  | 0.267        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 2.0        | \$ 4,497        | 195                    | \$ 6,987  | 0.267        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 3.5        | \$ 4,647        | 190                    | \$ 7,074  | 0.271        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 12      | 1.0        | \$ 4,694        | 189                    | \$ 7,110  | 0.272        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 12      | 1.0        | \$ 4,991        | 172                    | \$ 7,192  | 0.275        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 2.0        | \$ 4,697        | 195                    | \$ 7,195  | 0.275        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 2.5        | \$ 4,844        | 184                    | \$ 7,197  | 0.275        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 16      | 1.0        | \$ 4,597        | 206                    | \$ 7,236  | 0.277        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 16      | 1.0        | \$ 4,894        | 190                    | \$ 7,318  | 0.280        | 1.00       |
|  | 1.60    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 5,041        | 178                    | \$ 7,319  | 0.280        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 2.5        | \$ 4,747        | 201                    | \$ 7,322  | 0.280        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 12      | 1.5        | \$ 4,944        | 196                    | \$ 7,445  | 0.285        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 12      | 1.5        | \$ 5,241        | 179                    | \$ 7,527  | 0.288        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 2.5        | \$ 4,947        | 202                    | \$ 7,530  | 0.288        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 3.0        | \$ 5,094        | 191                    | \$ 7,532  | 0.288        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 16      | 1.5        | \$ 4,847        | 213                    | \$ 7,571  | 0.290        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 16      | 1.5        | \$ 5,144        | 196                    | \$ 7,653  | 0.293        | 1.00       |
|  | 1.60    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 5,291        | 185                    | \$ 7,654  | 0.293        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 3.0        | \$ 4,997        | 208                    | \$ 7,657  | 0.293        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 12      | 2.0        | \$ 5,194        | 202                    | \$ 7,780  | 0.298        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 12      | 2.0        | \$ 5,491        | 185                    | \$ 7,862  | 0.301        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 3.0        | \$ 5,197        | 209                    | \$ 7,865  | 0.301        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 3.5        | \$ 5,344        | 197                    | \$ 7,866  | 0.301        | 1.00       |
|  | 1.60    | 2    | 12      | 1.0        | \$ 5,391        | 196                    | \$ 7,903  | 0.302        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 16      | 2.0        | \$ 5,097        | 220                    | \$ 7,906  | 0.303        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 16      | 2.0        | \$ 5,394        | 203                    | \$ 7,988  | 0.306        | 1.00       |
|  | 1.60    | 2    | 8       | 2.5        | \$ 5,541        | 192                    | \$ 7,989  | 0.306        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 3.5        | \$ 5,247        | 215                    | \$ 7,992  | 0.306        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 16      | 1.0        | \$ 5,294        | 214                    | \$ 8,028  | 0.307        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 16      | 1.0        | \$ 5,591        | 197                    | \$ 8,110  | 0.310        | 1.00       |

**Εικόνα 3.36** Κατάταξη των πιθανών υλοποιήσεων του συστήματος με βάση το καθαρό τρέχον κόστος

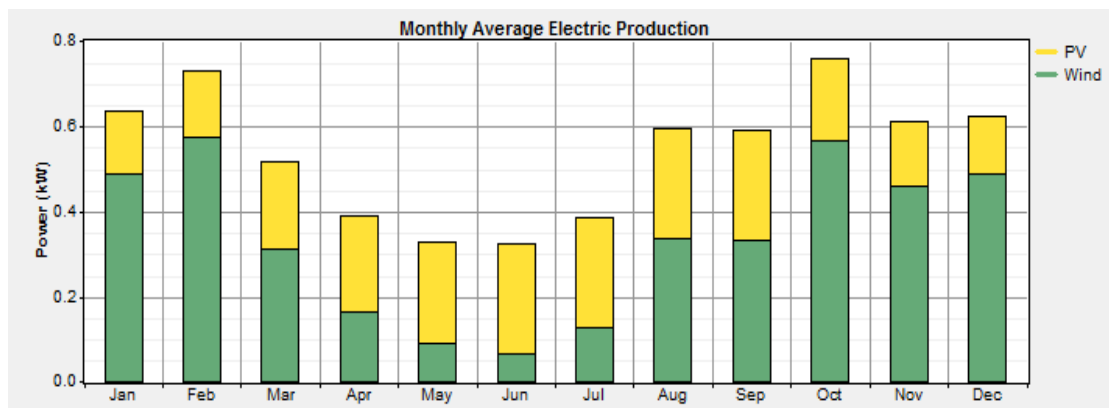
| Production    | kWh/yr | %   | Consumption     | kWh/yr | %   |
|---------------|--------|-----|-----------------|--------|-----|
| PV array      | 1,818  | 38  | AC primary load | 2,043  | 100 |
| Wind turbines | 2,909  | 62  | Total           | 2,043  | 100 |
| Total         | 4,727  | 100 |                 |        |     |

**Εικόνα 3.37** Ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ενέργειας και συνολική κατανάλωση.

Στην εικόνα 3.38 φαίνεται η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και της ανεμογεννήτριας στην παραγωγή ενέργειας κάθε μήνα, η οποία μας δείχνει ότι τη



μεγαλύτερη διάρκεια του έτους οι ανεμογεννήτριες παράγουν περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά . Από τον Απρίλιο μέχρι τον Ιούλιο όμως η αύξηση της ηλιοφάνειας σε συνδυασμό με την ελάττωση των ανέμων αντιστρέφουν αυτήν την κατάσταση.



Εικόνα 3.38 Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η επόμενη εικόνα δείχνει ότι ο στόχος που είχε τεθεί επετεύχθη με την νέα υλοποίηση του μικροδικτύου. Το φορτίο που δεν εξυπηρετείται έχει πλέον εξαλειφθεί όπως και το έλλειμμα παραγωγικής ικανότητας. Ακόμη παρατηρούμε ότι περίπου η μισή ενέργεια που παράγεται παραμένει ανεκμετάλλευτη και χάνεται. Το HOMER δεν προτείνει την εγκατάσταση και άλλων μπαταριών επειδή ανεβαίνει το κόστος και έτσι έχουμε αρκετά μεγάλο πλεόνασμα ενέργειας.

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 2,478  | 52.4 |
| Unmet electric load | 1.32   | 0.1  |
| Capacity shortage   | 1.69   | 0.1  |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 1.00  |

Εικόνα 3.39 Χαρακτηριστικά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η επόμενη εικόνα απεικονίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών. Αν τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα της υπάρχουσας διαμόρφωσης παρατηρούμε την αλματώδη αύξηση της μέσης ημερήσιας παραγωγής ενέργειας και κατ' επέκταση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας, πράγμα απόλυτα αναμενόμενο. Επίσης η διείσδυση των φωτοβολταϊκών στην παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο αγγίζει το 89% από 25 % που ήταν πριν. Κάποια στοιχεία ,όπως ο capacity factor και οι ώρες λειτουργίας παραμένουν σταθερά καθώς δεν επηρεάζονται από την μεγαλύτερη ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

| Quantity         | Value | Units  | Quantity           | Value | Units  |
|------------------|-------|--------|--------------------|-------|--------|
| Rated capacity   | 1.20  | kW     | Minimum output     | 0.00  | kW     |
| Mean output      | 0.21  | kW     | Maximum output     | 1.25  | kW     |
| Mean output      | 4.98  | kWh/d  | PV penetration     | 88.9  | %      |
| Capacity factor  | 17.3  | %      | Hours of operation | 4,384 | hr/yr  |
| Total production | 1,818 | kWh/yr | Levelized cost     | 0.154 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.40** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και για τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, τα οποία αποτυπώνονται στην εικόνα 3.41. Η μέση ισχύς εξόδου και η ετήσια παραγωγή ενέργειας αναμενόμενα διπλασιάστηκαν, όπως και η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Ο capacity factor όμως παρέμεινε και σ' αυτή την περίπτωση σταθερός αφού, όπως έχει ειπωθεί, δεν επηρεάζεται από την αύξηση της ισχύος των κατανεμημένων παραγωγών αλλά εξαρτάται από τη σχέση της μέσης ισχύος εξόδου με την ονομαστική ισχύ εξόδου.

| Quantity             | Value | Units  | Quantity           | Value  | Units  |
|----------------------|-------|--------|--------------------|--------|--------|
| Total rated capacity | 1.00  | kW     | Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Mean output          | 0.33  | kW     | Maximum output     | 1.05   | kW     |
| Capacity factor      | 33.2  | %      | Wind penetration   | 142    | %      |
| Total production     | 2,909 | kWh/yr | Hours of operation | 7,963  | hr/yr  |
|                      |       |        | Levelized cost     | 0.0275 | \$/kWh |

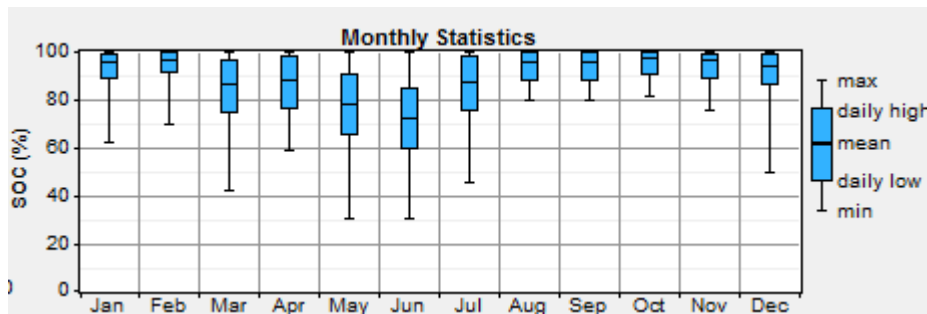
**Εικόνα 3.41** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Η εικόνα 3.42 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών. Οι μπαταρίες παρέμειναν ίδιες στον αριθμό στο νέο σύστημα αλλά η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας έφερε κάποιες μεταβολές στη λειτουργία τους. Μπορεί η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα, η αυτονομία και η διάρκεια ζωής να παρέμειναν σταθερά, όμως παρατηρείται μια σημαντική αύξηση στη ενέργεια που εισέρχεται και εξέρχεται από τις μπαταρίες σε έναν χρόνο. Ακόμη αυξήθηκε η ετήσια διακίνηση ενέργειας και οι απώλειες που έχουν οι μπαταρίες.

| Quantity                | Value  | Units  | Quantity          | Value | Units  |
|-------------------------|--------|--------|-------------------|-------|--------|
| Nominal capacity        | 10.1   | kWh    | Energy in         | 701   | kWh/yr |
| Usable nominal capacity | 7.06   | kWh    | Energy out        | 603   | kWh/yr |
| Autonomy                | 30.2   | hr     | Storage depletion | 0     | kWh/yr |
| Lifetime throughput     | 16,281 | kWh    | Losses            | 98    | kWh/yr |
| Battery wear cost       | 0.079  | \$/kWh | Annual throughput | 651   | kWh/yr |
| Average energy cost     | 0.000  | \$/kWh | Expected life     | 12.0  | yr     |

**Εικόνα 3.42** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών

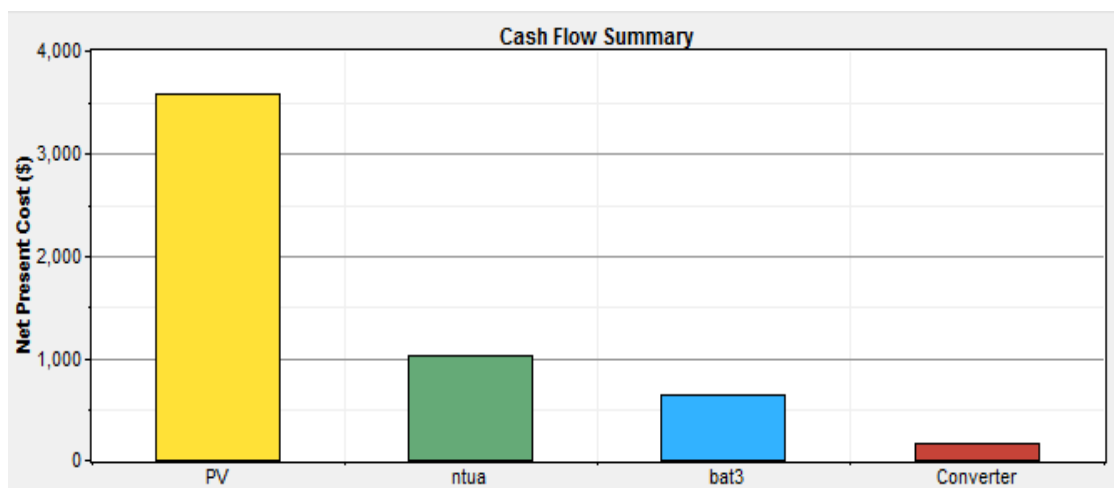
Από την επόμενη εικόνα που μας δείχνει την κατάσταση φόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Εδώ υπάρχει μια τελείως διαφορετική εικόνα σε σχέση με την πρότερη κατάσταση και πλέον οι μπαταρίες το μεγαλύτερο ποσοστό του έτους είναι φορτισμένες πάνω από το 80% ενώ πριν, όπως ειπώθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κυμαίνονταν μεταξύ του 40 με 80% το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου.



Εικόνα 3.43 Κατάσταση φόρτισης

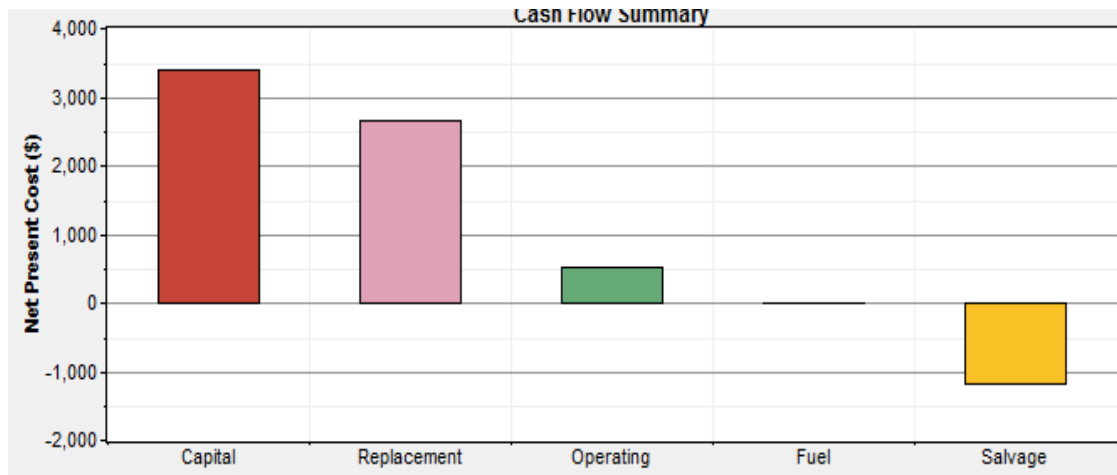
### 3.2.1.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης

Μετά την ολοκλήρωση της παρουσίασης των ηλεκτρικών αποτελεσμάτων σειρά έχουν τα οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με βάση τα οποία το HOMER κατατάσσει τα συστήματα. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το καθαρό τρέχον κόστος για το βέλτιστο σύστημα για ένα σχέδιο με διάρκεια ζωής 25 έτη είναι 5,399 €. Το αρχικό κεφάλαιο που χρειάζεται είναι 3,397€ και το ετήσιο κόστος λειτουργίας του βέλτιστου μικροδικτύου είναι 157€. Τα διαγράμματα που χρησιμοποιεί το HOMER για να δείξει τα αποτελέσματα αυτά και να εξηγήσει πως δαπανήθηκαν τα χρήματα είναι τα ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Έτσι στην εικόνα 3.44 αποτυπώνεται το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των χρημάτων που απαιτούνται για το σύστημα προορίζονται για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών. Αντίθετα η ανεμογεννήτρια είναι αρκετά φτηνότερη καθώς πρόκειται για ένα project του ΕΜΠ.



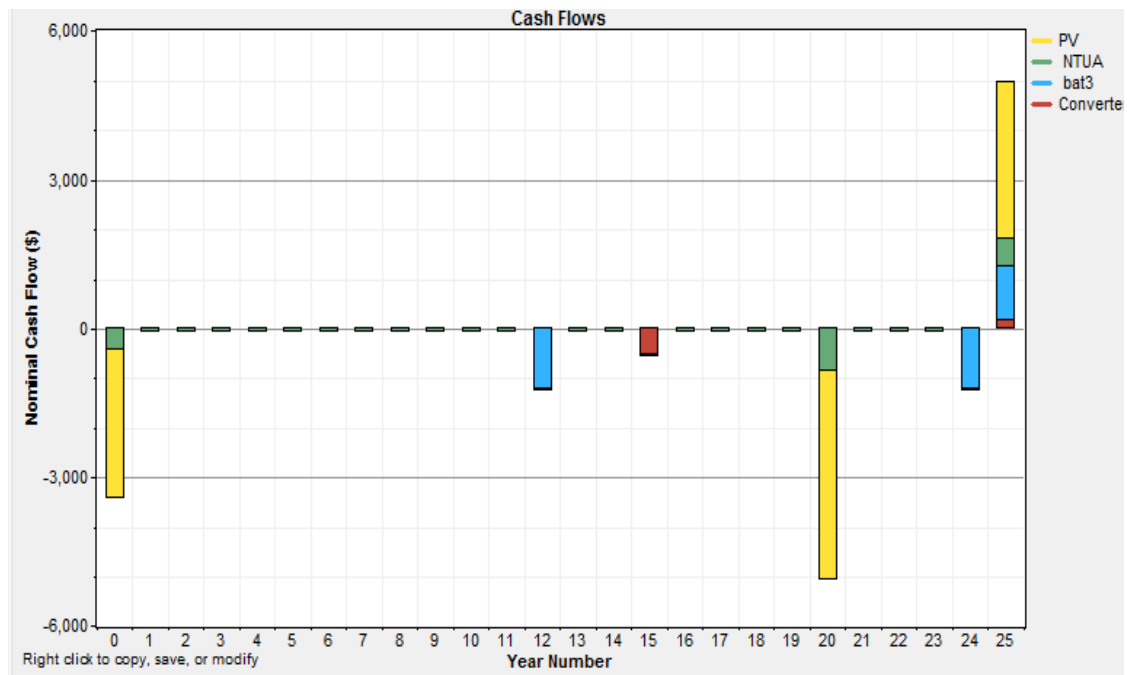
Εικόνα 3.44 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου

Η εικόνα 3.45 μας δείχνει σχηματικά ότι το μεγαλύτερο μέρος του κόστους οφείλεται στο αρχικό κεφάλαιο και στην αντικατάσταση κάποιων εξαρτημάτων με τη πάροδο του χρόνου. Αντίθετα τα λειτουργικά έξοδα είναι ελάχιστα και αναλογούν στα έξοδα συντήρησης του μικροδικτύου.



Εικόνα 3.45 Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους

Οι ταμειακές ροές με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου κατά τη διάρκεια των 25 χρόνων φαίνονται στην εικόνα 3.46. Μπορούμε να δούμε και σε αυτό το σχεδιάγραμμα ότι η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και η αντικατάστασή τους μετά από 20 χρόνια έχουν τη μερίδα του λέοντος στο συνολικό κόστος της βέλτιστης διαμόρφωσης του συστήματός μας. Τα λειτουργικά έξοδα είναι σχεδόν μηδενικά και τα έξοδα που παρατηρούμε με το πέρασμα των χρόνων οφείλονται στην αντικατάσταση κάποιων εξαρτημάτων του μικροδικτύου.



Εικόνα 3.46 Περίληψη των ταμειακών ροών με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου

Τελειώνοντας την ανάλυση των οικονομικών αποτελεσμάτων έχουμε τον πίνακα που απεικονίζεται στην εικόνα 3.47, όπου παρουσιάζει αναλυτικά τα έσοδα και τα έξοδα του μικροδικτύου. Μπορούμε να δούμε πως επιμερίστηκαν τα έξοδα του συστήματος με βάση το είδος του εξοπλισμού αλλά και το είδος του κόστους. Όπως και στα διαγράμματα, έτσι και εδώ είναι φανερό, και μάλιστα σε απόλυτα νούμερα, ότι τα

φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν τη μεγαλύτερη δαπάνη για το σύστημα, καθώς είναι υπεύθυνα για τα δύο τρίτα του καθαρού τρέχοντος κόστους.

| Component | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|-----------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV        | 2,997        | 1,309            | 0        | 0         | -733         | 3,572      |
| NTUA      | 400          | 249              | 511      | 0         | -140         | 1,021      |
| bat3      | 0            | 893              | 0        | 0         | -256         | 636        |
| Converter | 0            | 209              | 0        | 0         | -39          | 170        |
| System    | 3,397        | 2,659            | 511      | 0         | -1,168       | 5,399      |

**Εικόνα 3.47** Αναλυτικά χρήματα που δαπανήθηκαν

### 3.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως είδαμε και στο διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, εκτός των προσομοιώσεων για την εύρεση της βέλτιστης διαμόρφωσης του συστήματος το HOMER πραγματοποίησε και ανάλυση ευαισθησίας έτσι ώστε να δούμε τον αντίκτυπο συγκεκριμένων μεταβλητών στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Οι μεταβλητές ευαισθησίας και σε αυτήν την περίπτωση είναι η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Η εικόνα 3.48 μας δείχνει τη βέλτιστη διαμόρφωση του μικροδικτύου και κάποια χαρακτηριστικά αυτού για κάθε συνδυασμό τιμών των δυο μεταβλητών ευαισθησίας. Είναι φανερό ότι με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου τα απαιτούμενα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά γίνονται λιγότερα. Κάτι τέτοιο μας οδηγεί στη μείωση του αρχικού κεφαλαίου και του καθαρού τρέχοντος κόστους. Ακόμη παρατηρούμε ότι ο αριθμός των ανεμογεννητριών δεν αλλάζει παρά τις αλλαγές που ενδεχομένως να υπάρχουν στην ταχύτητα του ανέμου. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις μεταβλητές ευαισθησίας να έχουν μια μικρή αύξηση και θα δούμε πόσο διαφέρουν με τα αυτά της προηγούμενης προσομοίωσης με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.

| Solar<br>(kWh/m <sup>2</sup> /d) | Wind<br>(m/s) |  |  |  |  | PV<br>(kW) | ntua | battery | Conv.<br>(kW) | Initial<br>Capital | Operating<br>Cost (\$/yr) | Total<br>NPC | COE<br>(\$/kWh) | Ren.<br>Frac. |
|----------------------------------|---------------|--|--|--|--|------------|------|---------|---------------|--------------------|---------------------------|--------------|-----------------|---------------|
| 4.656                            | 6.060         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 4.656                            | 5.500         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 12      | 1.0           | \$ 3,997           | 182                       | \$ 6,318     | 0.242           | 1.00          |
| 4.656                            | 6.500         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 4.656                            | 7.000         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 4.000                            | 6.060         |  |  |  |  | 1.40       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 4,094           | 164                       | \$ 6,192     | 0.237           | 1.00          |
| 4.000                            | 5.500         |  |  |  |  | 1.40       | 2    | 12      | 1.0           | \$ 4,694           | 189                       | \$ 7,110     | 0.272           | 1.00          |
| 4.000                            | 6.500         |  |  |  |  | 1.40       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 4,094           | 164                       | \$ 6,192     | 0.237           | 1.00          |
| 4.000                            | 7.000         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 5.000                            | 6.060         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 5.000                            | 5.500         |  |  |  |  | 1.40       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 4,094           | 164                       | \$ 6,192     | 0.237           | 1.00          |
| 5.000                            | 6.500         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 5.000                            | 7.000         |  |  |  |  | 1.00       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 2,700           | 149                       | \$ 4,607     | 0.176           | 1.00          |
| 5.500                            | 6.060         |  |  |  |  | 1.20       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 3,397           | 157                       | \$ 5,399     | 0.207           | 1.00          |
| 5.500                            | 5.500         |  |  |  |  | 1.00       | 2    | 12      | 1.0           | \$ 3,300           | 174                       | \$ 5,525     | 0.212           | 1.00          |
| 5.500                            | 6.500         |  |  |  |  | 1.00       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 2,700           | 149                       | \$ 4,607     | 0.176           | 1.00          |
| 5.500                            | 7.000         |  |  |  |  | 1.00       | 2    | 8       | 1.0           | \$ 2,700           | 149                       | \$ 4,607     | 0.176           | 1.00          |

**Εικόνα 3.48** Οι βέλτιστες υλοποιήσεις του συστήματος για όλους τους συνδυασμούς των τιμών μεταβλητών ευαισθησίας

Στην εικόνα 3.49 φαίνεται πως κατέταξε το HOMER τα συστήματα αν έχουμε μια μικρή αύξηση στην ηλιακή ακτινοβολία και στην ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτή τη κατάταξη, λοιπόν, έχουμε θεωρήσει ότι η ηλιακή ακτινοβολία έχει αυξηθεί στο 5 kWh m<sup>-2</sup> και η ταχύτητα του ανέμου στο 7 m/s. Με αυτές τις αλλαγές παρατηρείται μείωση του καθαρού τρέχοντος κόστους στα 4,607€ αφού πλέον η βέλτιστη υλοποίηση που προτείνει το HOMER έχει φωτοβολταϊκά μικρότερης ισχύος. Κατά τα άλλα η καινούρια διαμόρφωση δεν διαφέρει σε κάτι από την προηγούμενη, καθώς ο αριθμός των ανεμογεννητριών και των μπαταριών παρέμεινε ίδιος.

### 3.2.2.1 Τα ηλεκτρικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η νέα διαμόρφωση του συστήματος περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια 1kW, 2 ανεμογεννήτριες και 8 μπαταρίες. Η εικόνα 3.50 δείχνει τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρούμε ότι οι ανεμογεννήτριες παράγουν πλέον 500 kWh περισσότερες ως αποτέλεσμα της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου. Τα φωτοβολταϊκά όμως παρά την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας παράγουν λιγότερη ενέργεια, κάτι που ήταν αναμενόμενο καθώς μειώθηκε η ισχύς τους κατά 16.6%. Αυτά τα δεδομένα αυξάνουν το ποσοστό των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ενέργειας στο 68% και μειώνουν αυτό των φωτοβολταϊκών στο 32%. Το αποτέλεσμα αυτό απεικονίζεται και στο διάγραμμα που φαίνεται στην εικόνα 3.52 και δείχνει τη συνεισφορά των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ενέργειας κάθε μήνα.

Sensitivity variables

Global Solar (kWh/m<sup>2</sup>/d)  Wind Speed (m/s)

Double click on a system below for simulation results.

|  | PV (kW) | ntua | battery | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. |
|--|---------|------|---------|------------|-----------------|------------------------|-----------|--------------|------------|
|  | 1.00    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 2,700        | 149                    | \$ 4,607  | 0.176        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 2,950        | 156                    | \$ 4,942  | 0.189        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 3,200        | 162                    | \$ 5,277  | 0.202        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 3,397        | 157                    | \$ 5,399  | 0.207        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 8       | 1.0        | \$ 3,694        | 140                    | \$ 5,481  | 0.210        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 12      | 1.0        | \$ 3,300        | 174                    | \$ 5,525  | 0.211        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 12      | 1.0        | \$ 3,597        | 157                    | \$ 5,607  | 0.215        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 8       | 2.5        | \$ 3,450        | 169                    | \$ 5,612  | 0.215        | 1.00       |
|  | 1.00    | 1    | 16      | 1.0        | \$ 3,500        | 175                    | \$ 5,733  | 0.219        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 3,647        | 163                    | \$ 5,734  | 0.219        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 8       | 1.5        | \$ 3,944        | 146                    | \$ 5,816  | 0.223        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 12      | 1.5        | \$ 3,550        | 181                    | \$ 5,860  | 0.224        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 12      | 1.5        | \$ 3,847        | 164                    | \$ 5,942  | 0.227        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 8       | 3.0        | \$ 3,700        | 176                    | \$ 5,947  | 0.228        | 1.00       |
|  | 1.00    | 1    | 16      | 1.5        | \$ 3,750        | 181                    | \$ 6,068  | 0.232        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 3,897        | 170                    | \$ 6,069  | 0.232        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 8       | 2.0        | \$ 4,194        | 153                    | \$ 6,151  | 0.235        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 1.0        | \$ 4,094        | 164                    | \$ 6,192  | 0.237        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 12      | 2.0        | \$ 3,800        | 187                    | \$ 6,195  | 0.237        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 8       | 1.0        | \$ 4,391        | 147                    | \$ 6,274  | 0.240        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 12      | 2.0        | \$ 4,097        | 171                    | \$ 6,277  | 0.240        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 8       | 3.5        | \$ 3,950        | 182                    | \$ 6,281  | 0.240        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 1.0        | \$ 3,997        | 182                    | \$ 6,318  | 0.242        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 12      | 1.0        | \$ 4,294        | 165                    | \$ 6,400  | 0.245        | 1.00       |
|  | 1.00    | 1    | 16      | 2.0        | \$ 4,000        | 188                    | \$ 6,403  | 0.245        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 2.5        | \$ 4,147        | 177                    | \$ 6,404  | 0.245        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 16      | 1.0        | \$ 3,900        | 199                    | \$ 6,443  | 0.247        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 8       | 2.5        | \$ 4,444        | 160                    | \$ 6,486  | 0.248        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 1.0        | \$ 4,197        | 182                    | \$ 6,525  | 0.250        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 1.5        | \$ 4,344        | 171                    | \$ 6,527  | 0.250        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 12      | 2.5        | \$ 4,050        | 194                    | \$ 6,530  | 0.250        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 8       | 1.5        | \$ 4,641        | 154                    | \$ 6,609  | 0.253        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 12      | 2.5        | \$ 4,347        | 177                    | \$ 6,612  | 0.253        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 12      | 1.5        | \$ 4,247        | 188                    | \$ 6,653  | 0.255        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 12      | 1.5        | \$ 4,544        | 171                    | \$ 6,735  | 0.258        | 1.00       |
|  | 1.00    | 1    | 16      | 2.5        | \$ 4,250        | 195                    | \$ 6,738  | 0.258        | 1.00       |
|  | 1.20    | 2    | 8       | 3.0        | \$ 4,397        | 183                    | \$ 6,739  | 0.258        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 16      | 1.5        | \$ 4,150        | 206                    | \$ 6,778  | 0.259        | 1.00       |
|  | 1.40    | 1    | 8       | 3.0        | \$ 4,694        | 166                    | \$ 6,821  | 0.261        | 1.00       |
|  | 1.20    | 1    | 16      | 1.5        | \$ 4,447        | 189                    | \$ 6,860  | 0.263        | 1.00       |
|  | 1.40    | 2    | 8       | 2.0        | \$ 4,594        | 177                    | \$ 6,862  | 0.263        | 1.00       |
|  | 1.00    | 2    | 12      | 3.0        | \$ 4,300        | 201                    | \$ 6,865  | 0.263        | 1.00       |
|  | 1.60    | 1    | 8       | 2.0        | \$ 4,891        | 161                    | \$ 6,944  | 0.266        | 1.00       |

Εικόνα 3.49 Κατάταξη των πιθανών υλοποιήσεων του συστήματος με βάση το καθαρό τρέχον κόστος

Στην εικόνα 3.51 βλέπουμε την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε η οποία σημειώνει μια μικρή αύξηση, από 52 % που ήταν αγγίζει το 56%.

| Production    | kWh/yr | %   |
|---------------|--------|-----|
| PV array      | 1,641  | 32  |
| Wind turbines | 3,429  | 68  |
| Total         | 5,070  | 100 |

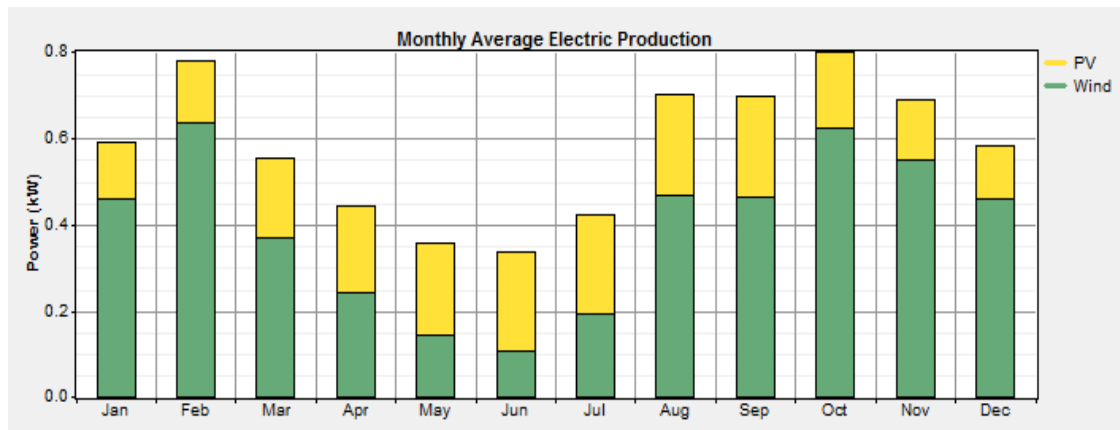
Εικόνα 3.50 Ποσοστό συνεισφοράς ηλεκτρικής στην παραγωγή ενέργειας

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 2,834  | 55.9 |
| Unmet electric load | 0.427  | 0.0  |
| Capacity shortage   | 0.865  | 0.0  |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 1.00  |

Εικόνα 3.51 Χαρακτηριστικά της παραγωγής ενέργειας



**Εικόνα 3.52** Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών τα οποία φαίνονται στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζουν μια αναμενόμενη μείωση αφού, όπως ειπώθηκε, μειώθηκε η παραγωγή ενέργειας από αυτά. Εξαιρέση αποτελεί ο capacity factor ο οποίος έχει μια μικρή αύξηση ως αποτέλεσμα της αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

| Quantity         | Value | Units  |
|------------------|-------|--------|
| Rated capacity   | 1.00  | kW     |
| Mean output      | 0.19  | kW     |
| Mean output      | 4.50  | kWh/d  |
| Capacity factor  | 18.7  | %      |
| Total production | 1,641 | kWh/yr |

| Quantity           | Value | Units  |
|--------------------|-------|--------|
| Minimum output     | 0.00  | kW     |
| Maximum output     | 1.06  | kW     |
| PV penetration     | 80.3  | %      |
| Hours of operation | 4,384 | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.133 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.53** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

Αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδήγησε σε ανάλογη αύξηση και των χαρακτηριστικών λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Εκτός από την παραγωγή ενέργειας παρατηρείται αύξηση στον capacity factor, στη μέση ισχύ εξόδου αλλά και στη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Ακόμη, οι ανεμογεννήτριες με τα νέα δεδομένα λειτουργούν περισσότερες ώρες το χρόνο.

| Quantity             | Value | Units  |
|----------------------|-------|--------|
| Total rated capacity | 1.00  | kW     |
| Mean output          | 0.39  | kW     |
| Capacity factor      | 39.1  | %      |
| Total production     | 3,429 | kWh/yr |

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum output     | 0.00   | kW     |
| Maximum output     | 1.05   | kW     |
| Wind penetration   | 168    | %      |
| Hours of operation | 8,296  | hr/yr  |
| Levelized cost     | 0.0233 | \$/kWh |

**Εικόνα 3.54** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Η εικόνα 3.55 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών. Οι μπαταρίες παρέμειναν ίδιες στον αριθμό στο νέο σύστημα, ωστόσο υπάρχουν διαφορές στη λειτουργία τους. Μπορεί η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα, η αυτονομία και η διάρκεια ζωής να παρέμειναν σταθερά, όμως παρατηρείται μια



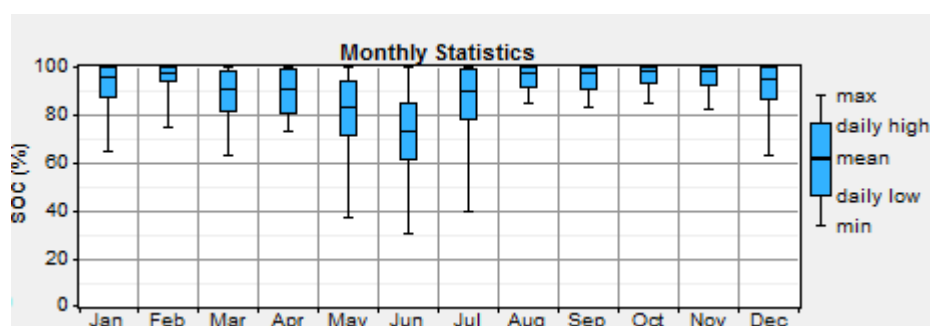
σημαντική μείωση στην ενέργεια που εισέρχεται και εξέρχεται από τις μπαταρίες σε έναν χρόνο, γεγονός που είναι απόρροια της μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Ακόμη μειώθηκαν η ετήσια διακίνηση ενέργειας και οι απώλειες που έχουν οι μπαταρίες.

| Quantity                | Value  | Units  |
|-------------------------|--------|--------|
| Nominal capacity        | 10.1   | kWh    |
| Usable nominal capacity | 7.06   | kWh    |
| Autonomy                | 30.2   | hr     |
| Lifetime throughput     | 16,281 | kWh    |
| Battery wear cost       | 0.079  | \$/kWh |
| Average energy cost     | 0.000  | \$/kWh |

| Quantity          | Value | Units  |
|-------------------|-------|--------|
| Energy in         | 604   | kWh/yr |
| Energy out        | 519   | kWh/yr |
| Storage depletion | 0     | kWh/yr |
| Losses            | 85    | kWh/yr |
| Annual throughput | 560   | kWh/yr |
| Expected life     | 12.0  | yr     |

**Εικόνα 3.55** Χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μπαταριών

Το διάγραμμα της εικόνας 3.56 δείχνει το ποσοστό φόρτισης των μπαταριών κάθε μήνα, το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρές αλλαγές σε σχέση αυτό που περιγράψαμε παραπάνω για την προσομοίωση με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας.



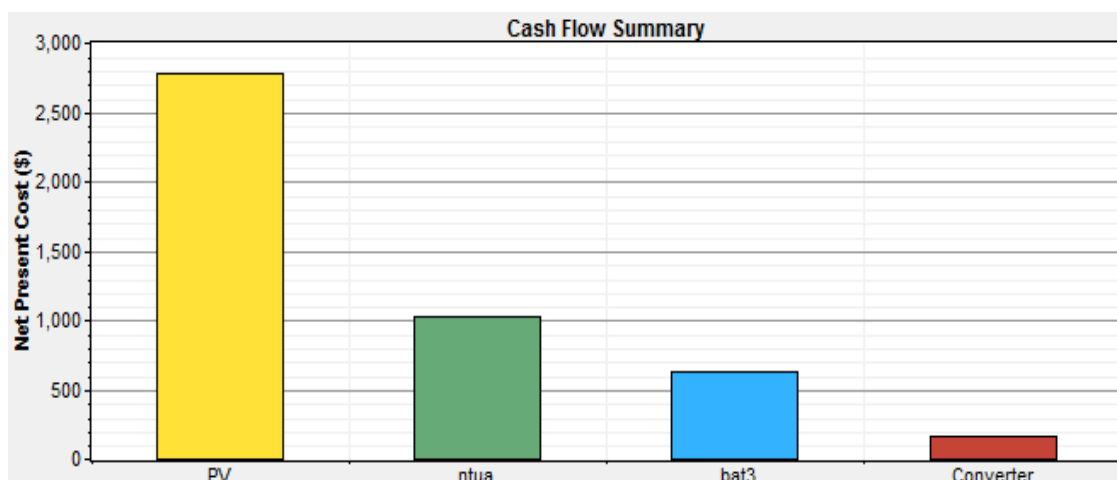
**Εικόνα 3.56** Κατάσταση φόρτισης

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι η μικρή αυτή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου έφερε μιας σημαντική αύξηση της παραγωγής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες και πλέον χρειάζονται λιγότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια για να εξυπηρετηθεί το φορτίο. Είναι απαραίτητο όμως να αναφερθούν και τα οικονομικά στοιχεία της νέας διαμόρφωσης για να διευκρινιστεί πόσο αποδοτικότερο είναι το μικροδίκτυο με αυξημένες τις μεταβλητές ευαισθησίας.

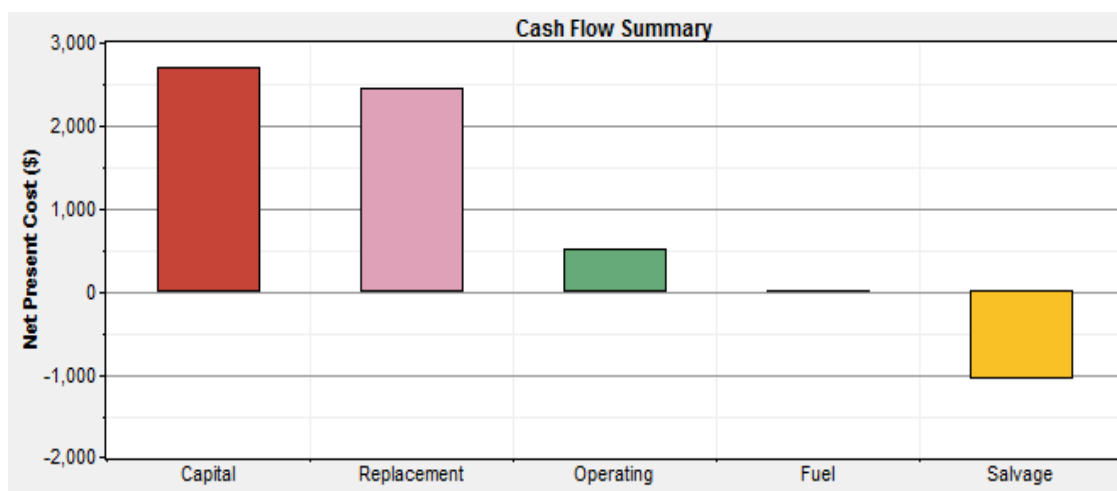
### 3.2.2.2 Τα οικονομικά αποτελέσματα της υλοποίησης με αυξημένες τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας

Με την αύξηση των τιμών των μεταβλητών ευαισθησίας καταφέραμε να μειώσουμε το καθαρό τρέχον στα 4,607 €, είχαμε μια μείωση δηλαδή κοντά στα 800€ καθώς στην προηγούμενη περίπτωση ήταν 5,399€. Ακόμη παρατηρείται μια μείωση σχεδόν 700€ στο αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται. Από τα δυο παραπάνω δεδομένα γίνεται σαφές ότι το σύστημα έγινε αποδοτικότερο με την αύξηση των μεταβλητών ευαισθησίας.

Στις εικόνες 3.57 και 3.58 βλέπουμε τα διαγράμματα που χρησιμοποιεί το HOMER για να παρουσιάσει τα οικονομικά δεδομένα. Το στοιχείο που διαφοροποιεί το διάγραμμα της εικόνας 3.57 από το αντίστοιχο στην εικόνα 3.44 που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι ποσό των χρημάτων που δαπανάται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών . Παρατηρείται μια σημαντική μείωση η οποία είναι απόρροια της μικρότερης ισχύος φωτοβολταϊκών . Η διαφορά αυτή στα φαίνεται και στην εικόνα 3.58 καθώς υπάρχει μια παρόμοια μείωση στο αρχικό κεφάλαιο με την αντίστοιχη εικόνα 3.45 που παρουσιάσαμε παραπάνω. Κατά τα άλλα, τα υπόλοιπα δεδομένα που αποτυπώνονται στα διαγράμματα δεν έχουν μεταβολές .



Εικόνα 3.57 Περίληψη του κόστους με βάση το εξάρτημα του μικροδικτύου



Εικόνα 3.58 Περίληψη του κόστους με βάση το είδος του κόστους

Τελειώνοντας την ανάλυση των οικονομικών αποτελεσμάτων έχουμε τον πίνακα που απεικονίζεται στην εικόνα 3.59 , όπου παρουσιάζει αναλυτικά τα έσοδα και τα έξοδα του μικροδικτύου. Μπορούμε να δούμε πως επιμερίστηκαν τα έξοδα του συστήματος με βάση το είδος του εξοπλισμού αλλά και το είδος του κόστους. Όπως και στα διαγράμματα , έτσι και εδώ είναι φανερό ,και μάλιστα σε απόλυτα νούμερα, ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν ακόμα τη μεγαλύτερη δαπάνη για το σύστημα αλλά πλέον έχει μειωθεί αισθητά το κόστος τους, καθώς μειώθηκε η ισχύς τους .

Από την ανάλυση των οικονομικών αποτελεσμάτων φάνηκε ότι η αύξηση των μεταβλητών ευαισθησίας μείωσε το καθαρό τρέχον κόστος και το αρχικό κεφάλαιο και το σύστημα γίνεται αποδοτικότερο.

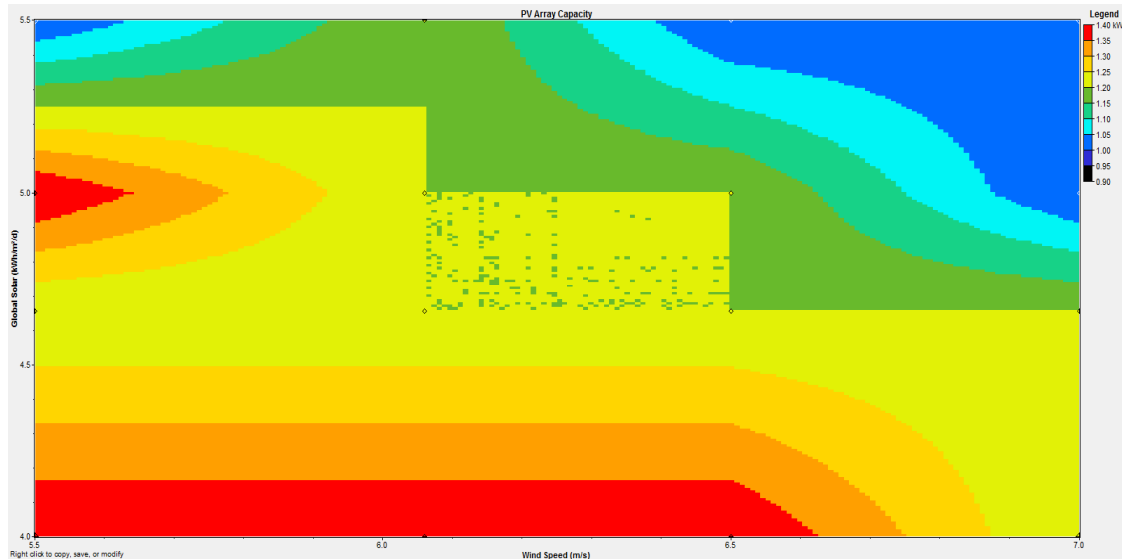
| Component | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$) | Fuel (\$) | Salvage (\$) | Total (\$) |
|-----------|--------------|------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| PV        | 2,300        | 1,091            | 0        | 0         | -612         | 2,780      |
| NTUA      | 400          | 249              | 511      | 0         | -140         | 1,021      |
| bat3      | 0            | 893              | 0        | 0         | -256         | 636        |
| Converter | 0            | 209              | 0        | 0         | -39          | 170        |
| System    | 2,700        | 2,442            | 511      | 0         | -1,047       | 4,607      |

**Εικόνα 3.59** Αναλυτικά χρήματα που δαπανήθηκαν

### 3.2.2.3 Παρουσίαση της επιρροής των μεταβλητών ευαισθησίας στη διαμόρφωση του μικροδικτύου

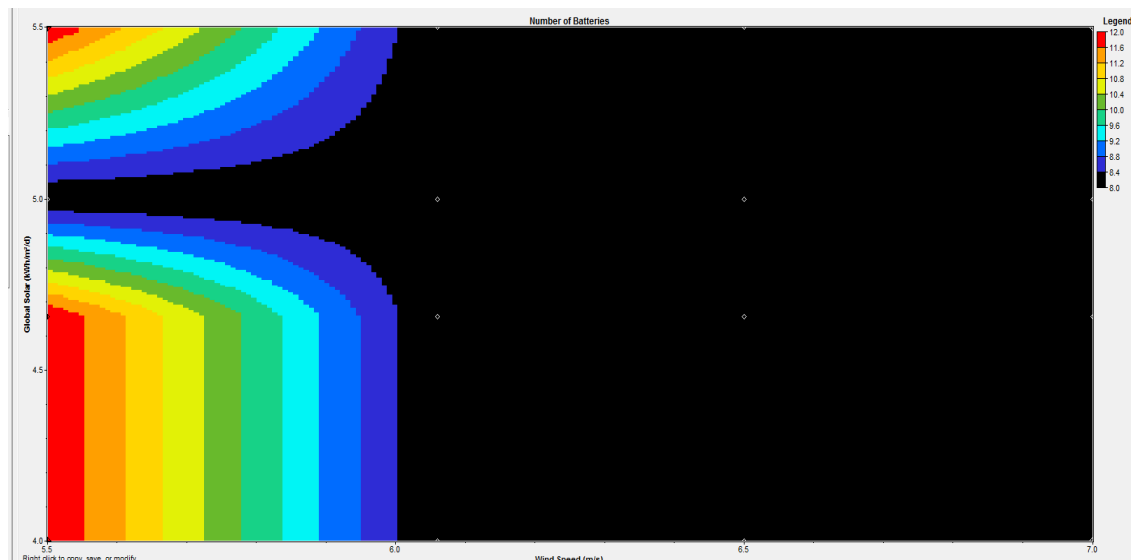
Αυτή η μείωση του κόστους επετεύχθη αλλάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία από  $4.66\text{kWh m}^{-2}$  σε  $5\text{ kWh m}^{-2}$  και την ταχύτητα του ανέμου από  $6.06\text{ m/s}$  σε  $7\text{ m/s}$ . Όπως είδαμε και στο διασυνδεδεμένο σύστημα το HOMER μας δείχνει με διαγράμματα πως αλλάζουν τα δεδομένα του μικροδικτύου ανάλογα με τις αλλαγές των μεταβλητών ευαισθησίας. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε μια σειρά από τέτοια διαγράμματα για να δούμε την επίδραση των μεταβλητών αυτών στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος.

Αρχικά, στην εικόνα 3.60 φαίνεται το πως η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζουν τη συνολική ισχύ των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών που έχει η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος. Στον κατακόρυφο άξονα είναι η ηλιακή ακτινοβολία και στον οριζόντιο η ταχύτητα του ανέμου. Κάθε διαφορετικό χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών πλαισίων. Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι κάπως μπερδεμένο και ότι μικρή αλλαγή στις μεταβλητές ευαισθησίας επηρεάζει άμεσα την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών. Όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία αλλά και η ταχύτητα του ανέμου το μικροδίκτυο χρειάζεται λιγότερα φωτοβολταϊκά για να εξυπηρετηθεί το φορτίο. Βέβαια, αυτό δεν ισχύει πάντα γιατί φαίνεται ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι σε χαμηλά επίπεδα μπορεί η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας να οδηγήσει σε αύξηση των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών. Το HOMER σχεδιάζει αυτά τα διαγράμματα λαμβάνοντας υπόψη το ελάχιστο καθαρό τρέχον κόστος. Η αύξηση λοιπόν των φωτοβολταϊκών μπορεί να συνοδεύεται με την μείωση του αριθμού των μπαταριών και έτσι να βγαίνει το βέλτιστο σύστημα.



**Εικόνα 3.60** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στην εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

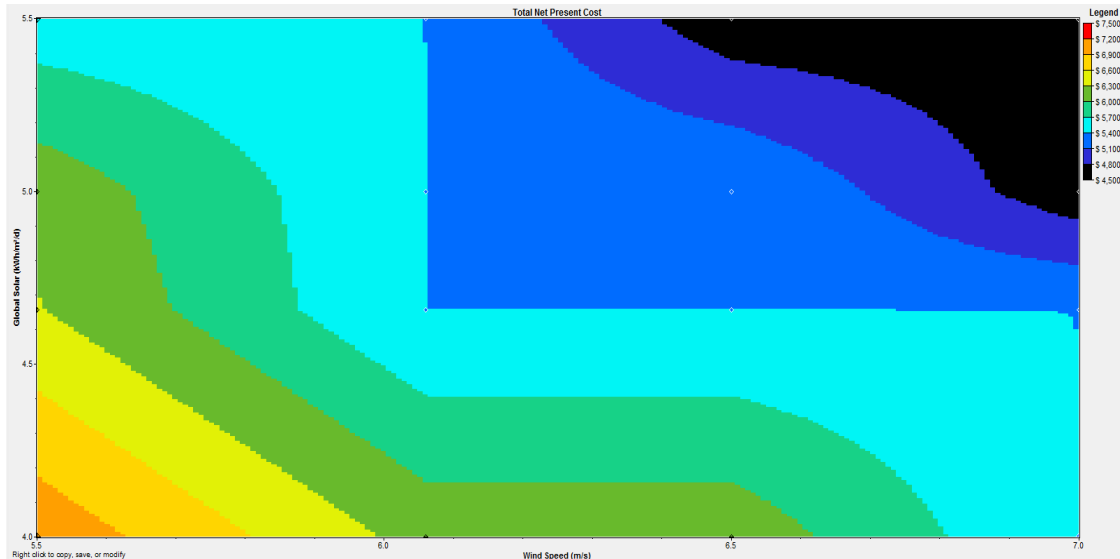
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας στον αριθμό των μπαταριών που έχει το σύστημά μας. Είναι φανερό ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί στην μείωση του αριθμού των μπαταριών που απαιτούνται. Ακόμη βλέπουμε ότι για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 6.5 m/s ο αριθμός των μπαταριών παραμένει σταθερός. Αντίθετα, η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν σημαίνει απαραίτητα μείωση του αριθμού των μπαταριών. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία ξεπεράσει τα 5 kWh m<sup>-2</sup> η περαιτέρω αύξησή της οδηγεί σε αύξηση και του αριθμού των μπαταριών.



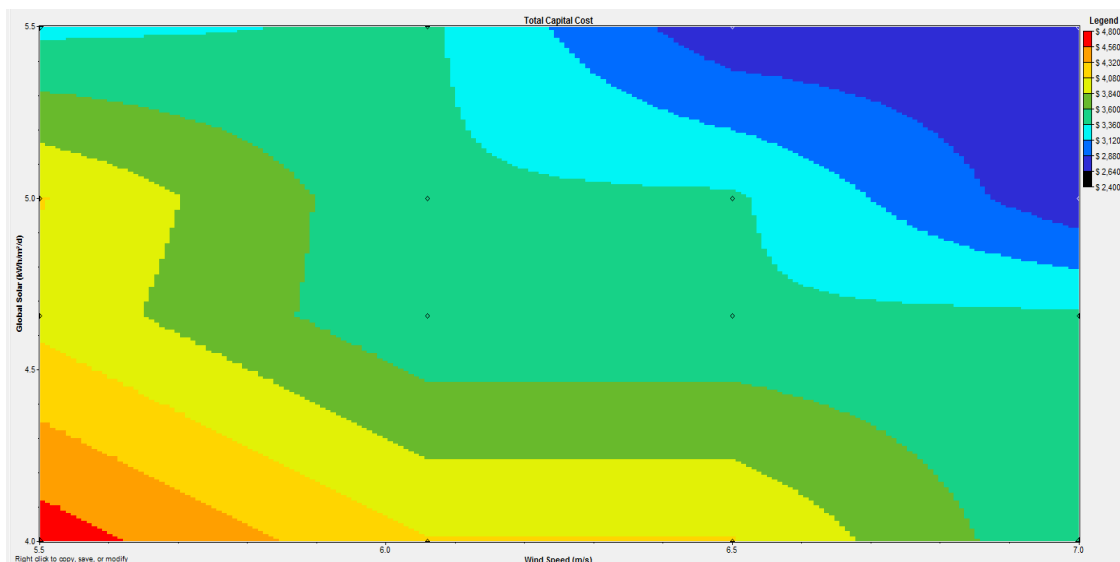
**Εικόνα 3.61** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στον αριθμό των μπαταριών στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Οι επόμενες δυο εικόνες 3.62 και 3.63, οι οποίες απεικονίζουν την επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο καθαρό τρέχον κόστος και στο αρχικό κεφάλαιο αντίστοιχα, έχουν αρκετές ομοιότητες. Όπως διαπιστώσαμε και στην ανάλυση που πραγματοποιήσαμε παραπάνω όσο αυξάνονται η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή

ακτινοβολία τόσο μειώνονται το καθαρό τρέχον κόστος και το αρχικό κεφάλαιο. Τα διαγράμματα αυτά επιβεβαιώνουν το γεγονός αυτό και μας δείχνουν ακριβώς τη σχέση των μεταβλητών ευαισθησίας με τα δυο αυτά οικονομικά χαρακτηριστικά του μικροδικτύου.



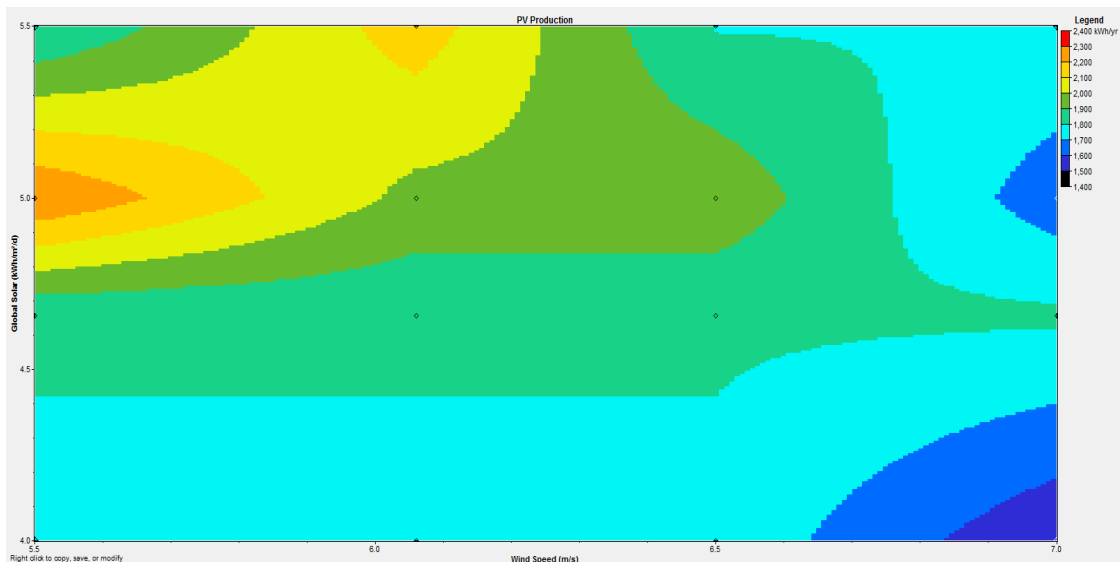
**Εικόνα 3.62** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο καθαρό τρέχον κόστος στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος



**Εικόνα 3.63** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στο αρχικό κεφάλαιο στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

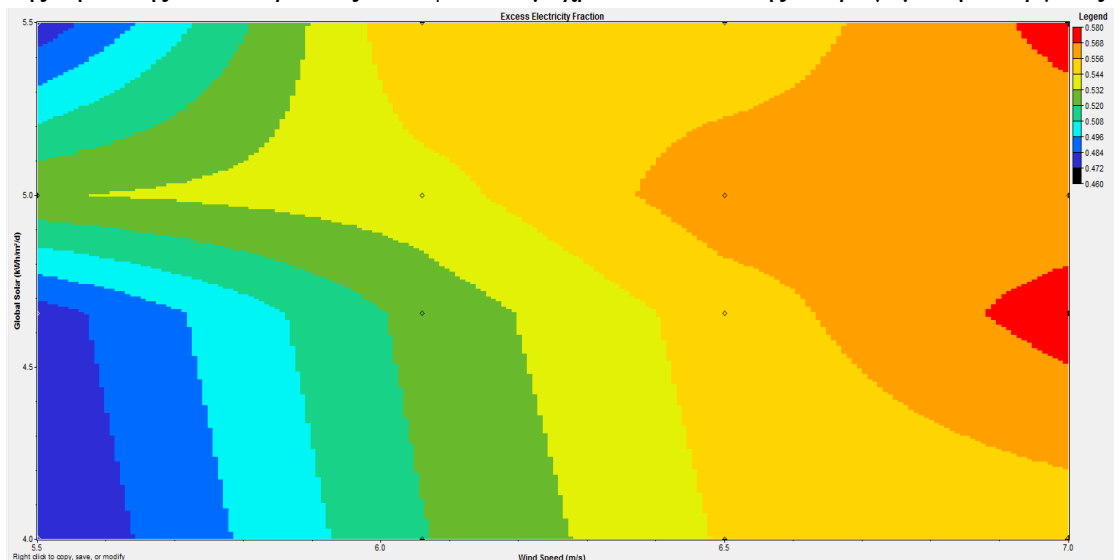
Στη συνέχεια, βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα την επιρροή των μεταβλητών ευαισθησίας στην παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δεν υπάρχει μια σαφής σχέση μεταξύ των μεταβλητών ευαισθησίας με την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Άλλοτε η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγεί σε αύξηση και της παραγωγής ενέργειας και άλλοτε συμβαίνει

το αντίθετο. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και με την ταχύτητα του ανέμου. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση των μεταβλητών ευαισθησίας πάνω από ένα όριο οδηγεί σε μείωση της ισχύος των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών που έχει ως συνέπεια την μείωση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας από αυτά.



**Εικόνα 3.64** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Το τελευταίο διάγραμμα που θα παρουσιάσουμε από τα πολλά που μας προσφέρει το HOMER φαίνεται στην εικόνα 3.65 και αφορά την πλεονάζουσα παραγόμενη ενέργεια. Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου έχει συνέπεια να μεγαλώνει το ποσοστό της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας και σε συνδυασμό με την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάνει μέχρι το 58% της παραγόμενης ενέργειας.



**Εικόνα 3.65** Επίδραση των μεταβλητών ευαισθησίας στην παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας στη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος

Όπως είπαμε και στην ανάλυση του διασυνδεδεμένου συστήματος, το HOMER έχει παρόμοια διαγράμματα και για άλλα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου. Επιλέξαμε την παρουσίαση των πιο σημαντικών από αυτών καθώς είναι αδύνατον να

παρουσιαστούν όλα στην παρούσα διπλωματική εργασία. . Γενικά , τα παραπάνω διαγράμματα μας έδειξαν σχηματικά την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας στα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου. Επίσης, με τη βοήθεια των διαγραμμάτων πήραμε μια απάντηση για το πόσο πρέπει να αυξηθούν οι τιμές των μεταβλητών ευαισθησίας εάν θέλουμε να επιτύχουμε το στόχο μας με λιγότερο κόστος

### **3.2.3 Συμπεράσματα από τη βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας του αυτόνομου μικροδικτύου**

Η βελτιστοποίηση και η ανάλυση ευαισθησίας του αυτόνομου μικροδικτύου που έγιναν παραπάνω οδήγησαν σε αρκετά συμπεράσματα που θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε εδώ:

- Με την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου αμετάβλητες το HOMER προτείνει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συνολικής ισχύος 1.2kW( 860 W παραπάνω) και άλλης μιας ανεμογεννήτριας.
- Το καθαρό τρέχον κόστος είναι 5,399€
- Οι ανεμογεννήτριες παράγουν το 62% της παραγόμενης ενέργειας και τα φωτοβολταϊκά το 38%.
- Το φορτίο που δεν εξυπηρετείται είναι πλέον μηδέν, άρα έχουμε πετύχει το στόχο που θέσαμε
- Υπάρχει πλεόνασμα παραγομένης ενέργειας που ξεπερνά το 50% αλλά το HOMER δεν προτείνει την εγκατάσταση περισσότερων μπαταριών καθώς αυξηθεί το καθαρό τρέχον κόστος.
- Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι , πλέον , μεγαλύτερη του 80% καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Το μεγαλύτερο μέρος του κόστους είναι απόρροια της εγκατάστασης των περαιτέρω φωτοβολταϊκών.
- Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα 5 kWh m<sup>-2</sup> και της ταχύτητας του ανέμου στα 7 m/s τα φωτοβολταϊκά που χρειάζονται για να επιτευχθεί ο στόχος μας είναι 1kW ενώ πάλι το HOMER προτείνει την εγκατάσταση μιας ακόμη ανεμογεννήτριας.
- Οι ανεμογεννήτριες πλέον παράγουν 500kWh περισσότερες ενώ τα φωτοβολταϊκά παράγουν λιγότερες από πριν καθώς μειώθηκε η ισχύς τους κατά 16.6%. Οι ανεμογεννήτριες συνεισφέρουν το 68% και τα φωτοβολταϊκά το υπόλοιπο 32%.
- Το καθαρό τρέχον κόστος έχει μειωθεί πλέον στα 4,607€ και υπάρχει μια μείωση του αρχικού κεφαλαίου κατά 700 €, λόγω της μείωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Από την ανάλυση ευαισθησίας είδαμε ότι μικρή αλλαγή των μεταβλητών ευαισθησίας επηρεάζει άμεσα την εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών.
- Αύξηση της ταχύτητας ανέμου οδηγεί σε μείωση του αριθμού των μπαταριών, Αντίθετα, η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν σημαίνει απαραίτητα μείωση του αριθμού των μπαταριών.
- Όσο αυξάνονται η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία τόσο μειώνονται το καθαρό τρέχον κόστος και το αρχικό κεφάλαιο.

- Δεν υπάρχει μια σαφής σχέση μεταξύ των μεταβλητών ευαισθησίας με την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά.
- Συνοψίζοντας , το βασικότερο συμπέρασμα που έγινε αντιληπτό από την ανάλυση ευαισθησίας είναι ότι μια μικρή αύξηση της μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου θα έκανε το σύστημα μας οικονομικά αποδοτικότερο, καθώς θα απαιτούνταν λιγότερα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά για να εξυπηρετήσουν το φορτίο.

### **Αναφορές**

[1]Bindu UKansara, B.R. Parekh, “Modelling and Simulation of Distributed Generation System Using HOMER Software”, International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, pp. 328-332, 2011.



## 4.Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις-Προοπτικές συνέχισης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετηθήκαν με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER δυο μικροδίκτυα που υπάρχουν στην περιοχή «Μελτέμι». Η τεχνοοικονομική ανάλυση έδειξε ότι και τα δύο μπορούν να βελτιωθούν, να γίνουν αποδοτικότερα και οικονομικά βιώσιμα. Αρχικά για το διασυνδεδεμένο σύστημα μπορούμε να πούμε ότι :

- Με την υπάρχουσα κατάσταση η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολύ μικρή.
- Η εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών είναι επιβεβλημένη.
- Αν θεωρήσουμε σταθερές τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου τότε η εγκατάσταση περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μην θεωρηθεί απαραίτητη καθώς αν και είναι η αποδοτικότερη θα έχει το τίμημα του μεγάλου αρχικού κεφαλαίου , χωρίς συνάμα να εξασφαλίζεται αρκετή μείωση στο καθαρό τρέχον κόστος.
- Αν έχουμε μια μικρή αύξηση στην τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας το HOMER μας προτείνει ξεκάθαρα την εγκατάσταση επιπλέον φωτοβολταϊκών πλαισίων, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά , την αύξηση κατ' επέκταση του κλάσματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αύξηση των εσόδων από την πώληση ενέργειας στο δίκτυο.
- Ακόμη η ανάλυση ευαισθησίας μας έδειξε την επιρροή της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου στη βέλτιστη υλοποίηση του συστήματος. Έγινε αντιληπτό ότι η εγκατεστημένη ισχύ των φωτοβολταϊκών δεν εξαρτάται μόνο από την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και από την τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Για το αυτόνομο σύστημα θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι :

- Ότι με την υπάρχουσα κατάσταση δεν δύναται να καλυφθούν οι ανάγκες της κατοικίας που εξυπηρετεί το μικροδίκτυό μας. Υπάρχει ένα μέρος του φορτίου που ξεπερνά το 22% το οποίο δεν εξυπηρετείται .
- Για να γίνει το σύστημα μας ανεξάρτητο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση επιπλέον φωτοβολταϊκών και ακόμη μιας ανεμογεννήτριας.
- Αν αυξηθούν οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου η απαραίτητη εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων για να είναι το σύστημά μας ανεξάρτητο μειώνεται.
- Ακόμη η ανάλυση ευαισθησίας μας έδειξε την επιρροή της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου στη βέλτιστη υλοποίηση του αυτόνομου συστήματος. Μια μικρή αύξηση της μέσης τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου θα έκανε το σύστημα μας οικονομικά αποδοτικότερο. Όσο αυξάνονται η ταχύτητα του ανέμου και η

ηλιακή ακτινοβολία τόσο μειώνονται το καθαρό τρέχον κόστος και το αρχικό κεφάλαιο.

Ένα σημείο που μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε μελλοντική εργασία είναι η ενδεχόμενη εγκατάσταση επιπλέον διεσπαρμένων παραγωγών , όπως κυψέλες καυσίμου και κάτω υπό ποιες συνθήκες θα ενδείκνυται ένα τέτοιο εγχείρημα. Ακόμα , θα μπορούσε να εξεταστεί το ενδεχόμενο να υπάρξει μια αύξηση του φορτίου που καλείται να εξυπηρετήσει το διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο και να μελετηθούν οι ενέργειες που είναι απαραίτητες να γίνουν για να παραμείνει το σύστημα οικονομικά βιώσιμο. Επιπρόσθετα κάτι παρόμοιο θα μπορούσε να μελετηθεί και για το αυτόνομο μικροδίκτυο, καθώς θα είχε ενδιαφέρον το ενδεχόμενο το αυτόνομο σύστημα να εξυπηρετούσε δυο ή τρία σπίτια αντί για ένα .

## **Παράρτημα**

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής έχουν δημοσιευθεί στα πρακτικά του συνεδρίου Medpower 2014 όπου και παρουσιάστηκαν και πρόκειται να δημοσιευτούν στο IET digital library. Στη συνέχεια παρατίθεται το κείμενο της δημοσίευσης.

# Optimization & Sensitivity Analysis of Microgrids using HOMER software- A Case Study

D. I. Papaioannou<sup>a</sup>, C. N. Papadimitriou<sup>a</sup>, A. L. Dimeas<sup>a</sup>, E. I. Zountouridou<sup>a</sup>, G. C. Kiokas<sup>b</sup> and N. D. Hatziaargyriou<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), University Campus, 15780 Zografou, Athens, Greece (e-mail: di\_pap@hotmail.com, chpapadi@mail.ntua.gr { adimeas, erietta, nh }@power.ece.ntua.gr)

<sup>b</sup> Department of Electronics, Electric Power and Telecommunications, Hellenic Air-Force Academy, Dekeleia, 10100, Attica, Greece (e-mail: gkiokas@iccs.gr).

**Keywords-** HOMER, Microgrid, Optimization, PV, Wind turbine

**Abstract** -Microgrids are low-voltage (LV) distribution networks comprising various distributed generators (DGs), storage devices, and controllable loads that can operate either interconnected or isolated from the main distribution grid as a controlled entity. In this paper, two real microgrids-one interconnected and one autonomous- are set under study. Both of the systems are located at the pilot site of Meltemi, a seaside camping in Rafina near the Athens coast. The microgrids are simulated and analyzed using HOMER (Hybrid Optimization Models for Energy Resources) power optimization software by NREL (National Renewable Energy Laboratory). The results of the techno-economic and sensitivity analysis, suggest the integration of new DGs or new operation patterns of the existing ones.

## 1. Introduction

Microgrids are mostly low-voltage (LV) distribution networks that may use any combination of generation, load and storage technologies and can operate in grid connected mode or autonomous mode [1]. The distributed generation (DGs) or the storage systems in the microgrid can be of different technologies, depending on the system characteristics and expectations. Some examples are photovoltaic modules (PV), wind turbines (WG), small hydro, biomass power generation, fuel cells, batteries or supercapacitors. These technologies have lower emission and potential to have lower cost [2].

The analysis and the design of the microgrid do not only take under consideration the system requirements but also some uncertain factors such as the load variation, the fuel price or fuel sufficiency. The uncertainty gets bigger as many DGs such as PVs and WGs have variant output due to seasonal or incidental insolation and wind power change respectively[2].

This paper studies two real microgrids that operate at the pilot site of Meltemi. The two systems are evaluated from a techno-economic point of view, using the Homer software. This work is also a technical and economic feasibility study

for new concepts of operation of the existing DGs or new ones.

## 2. Meltemi Microgrids: The case study

Meltemi is a seaside camping in Rafina near the Athens coast, consisting of 220 cottages used mostly for summer holidays. For this reason, the site has an interesting load curve which varies a lot between summer and winter. Due to the small size of each cottage, its electrical consumption is lower than an ordinary house in Greece. A typical cottage in the camp is a single floor building of 70 m<sup>2</sup> surface [3]-[4]. The ecological awareness of its habitants and the electrical structure (all houses connected to the same MV/LV transformer) of the settlement make it ideal for use as a test bed, for functions related to emergency and critical grid situations [3]. Fig.1 shows a general view of the pilot site. In the camp there are two microgrids, one autonomous and one interconnected.



Fig. 1. A view of the camp.

The *autonomous system* under study consists of photovoltaic panels (PVs) combined with a battery stack and a wind generator (WG) combined also with a battery stack. These two hybrid systems cover the load needs of one residence.

The *interconnected system* consists of a number of Distributed Generators (DGs) that can partially support the

Meltemi camping load in case of islanded Microgrid operation. The Interconnected system includes PVs, WG, batteries and a diesel generator. The latter is used mostly in case of fire emergency. In Tables 1 and 2 the parameters of the modules of the two systems are shown.

### 3. Homer Software Tool

The software tool used for this analysis is the Homer software for the design and analysis of renewable energy systems [5]. Homer's flexibility makes it useful in the evaluation of design issues in the planning and early decision-making phase of rural electrification projects. Homer can evaluate a range of equipment options over varying constraints to optimize small power systems [6]. It simulates the operation of a simplified model of the system in a depth of time and it derives outcome for the produced energy, the cost, the fuel consumption and the emitted pollutants.

### 4. Resources

In this study we used actual meteorological data which were necessary for HOMER software tool [7] to make the analysis and optimization of the systems.

TABLE1: THE AUTONOMOUS SYSTEM PARAMETERS.

| Autonomous System |         | Nominal characteristics | Brand name    |
|-------------------|---------|-------------------------|---------------|
| Hybrid System 1   | PV      | 0.34 kW                 | Yingli Solar  |
|                   | battery | 4 x 12 V (105 Ah)       | Delphi BE 64M |
| Hybrid System 2   | WG      | 0.600 kW                | NTUA          |
|                   | battery | 4x 12V (100Ah)          | Banner        |

TABLE 2: THE INTERCONNECTED SYSTEM PARAMETERS.

| Interconnected System |          | Nominal characteristics | Brand name               |
|-----------------------|----------|-------------------------|--------------------------|
| DG1:                  | PVs      | 2.720 kW                | Yingli Solar             |
|                       | inverter | 3.000kW                 | Wurth solergy            |
| DG2:                  | PVs      | 0.680 kW                | Yingli Solar             |
|                       | inverter | 0.600 kW                | Mastervolt Soladin 600   |
| DG3:                  | PVs      | 0.850 kW                | Yingli Solar             |
|                       | inverter | 2.000 kW                | Steca grid 2000 Master-M |
| DG4(hybrid system):   | PV       | 0.115 kW                |                          |
|                       | baterry  | 2x 12 V (105 Ah)        | DELPHI BE 105 64 M       |
|                       | charger  | 12V, 10 A               | Mastervolt IVO 12/10     |
| DG5:                  | WG       | 0.400 kW                | NTUA                     |
|                       | inverter | 0.600 kW                | Mastervolt soladin 600   |

Hourly solar radiation measurements for a period of 1 year (8760 points) were imported into HOMER in order to calculate monthly average values of clearness index and daily radiation. Solar radiation data from Rafina, namely clearness index and daily radiation are given in Fig. 2.

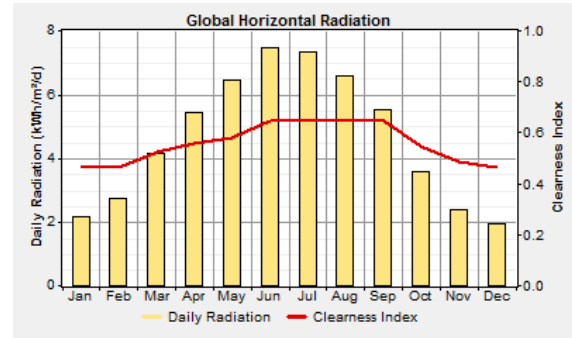


Fig.2 Average daily solar radiation and clearness index of Rafina for a 1-year period.

As it can be seen, the solar radiation is high, especially between May and August. For this location, the average annual clearness index is 0.579 and the average daily radiation is 4.656 kWh m<sup>-2</sup>.

The hourly wind speed measurements for a period of a year (8760 points) for this location were also imported into HOMER in order to calculate annual average wind speed and the wind resource every month which is shown in Fig.3.

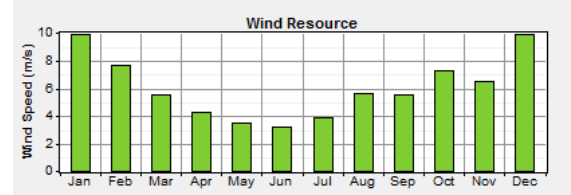


Fig. 3 Wind Resource.

Information about the diesel generator is required in order to perform the analysis. Price per liter of diesel is defined at 1.3€.

## 5. Interconnected System Simulation.

### 5.1. Description

First of all, actual data of load is required in order that HOMER makes the analysis and the optimization of the system. In Fig.4 the load profile of the interconnected system for an average day of the year is shown. HOMER needs 8760 points, one for each hour of a year, in order to make the calculations. The electrical load has a seasonal variation with July and August as peak months and almost no load in the winter months. This fact has an explanation as Meltemi is a holiday camp and it is very crowded during summer and empty of residents in the winter. This variation is depicted in Fig. 5.

The annual average of the electrical load is 317kWh day<sup>-1</sup> and the annual daily peak is 79.7 kW. As mentioned previously, the interconnected system consists of PVs, wind

generator and a diesel generator. The interconnected system is schematically presented in Fig.6.

All the DGs that compose the interconnected system are already installed in Meltemi and for this reason we have considered the initial capital equal to zero. So, the initial capital of the wind turbine is considered zero and the replacement cost equals to 400€ The operation and maintenance (O&M) cost was set at 20 euros per year. The lifetime is taken as 20 years and hub height is considered 12 meters for the wind turbine. The power curve for the wind turbine is shown in Fig.7.

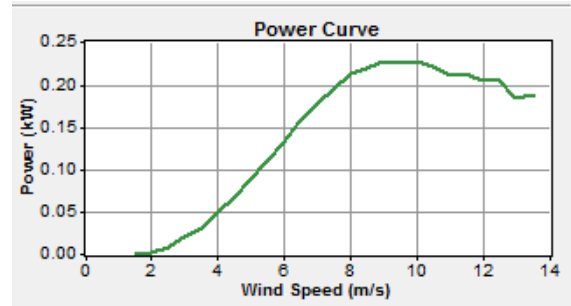


Fig.7 Power curve of the wind turbine

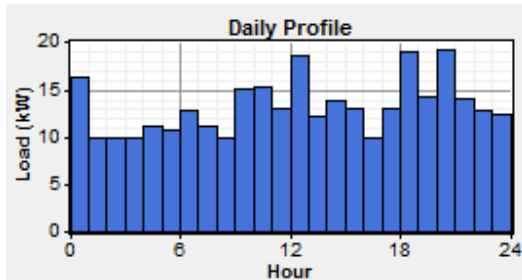


Fig.4 Daily load profile.

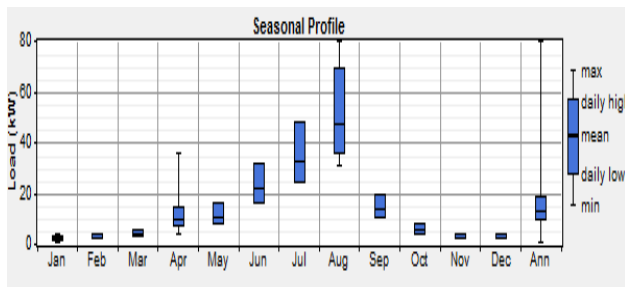


Fig. 5 Seasonal load profile.

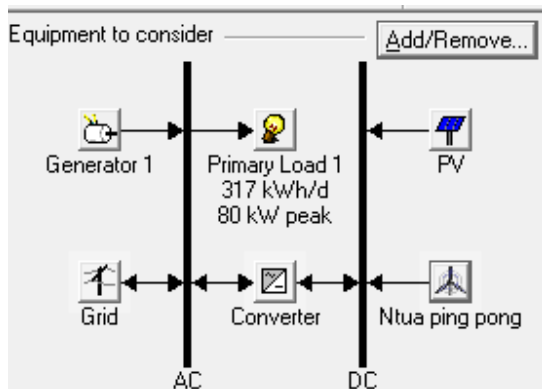


Fig.6 HOMER implementation of the interconnected system

Installation cost for the PVs is considered zero and the O&M cost is practically zero. Replacement cost of the PVs is 3500€ per kW and their lifetime is 20 years. Moreover, interconnected system contains a diesel generator of 36 kW. As mentioned previously this is used mostly in case of fire emergency and its operation is not cost effective. The replacement cost was taken equal to 7000€ whereas the initial capital is zero. Also, generator’s lifetime is defined as 15000 hours and the minimum load ration equals to 30%. HOMER requires the fuel consumption to perform the calculations which is 0.25L/ kWh. To operate the system, a power converter is needed. HOMER uses a power converter for the whole system to perform the calculations and find the optimal configuration. Despite there are different converters in each DG, a power converter of 6.2 kW (aggregating all inverters) is considered, in order to simulate the system using HOMER. Inverter’s efficiency is defined at 95% and its lifetime 15 years.

## 5.2. Simulation of the current situation.

Interconnected system was simulated by HOMER in order to evaluate its operational and economic characteristics, namely annual electrical energy production, annual electrical loads served, excess electricity, renewable energy fraction, capacity shortage, unmet load etc. Some environmental impact parameters of the system (carbon emissions, annual diesel consumption) were also calculated. HOMER performs the simulation and try to optimize the system, taking into account the technical characteristics of system operation and minimizing total net present cost of the system [8]. In this stage the system was simulated at the current situation and was evaluated from a techno-economic point of view. Subsequently the aim is to improve system’s effectiveness and economic viability.

As it is seen in the next figures the largest percentage of the electrical production comes from the grid. Fig.8 indicates how each DG contributes to the electrical load.

In Fig.9 renewable fraction is shown. This is a very important factor and indicates how much energy comes from renewable resources (wind, solar). Their contribution is small and we have to think ways to increase it.

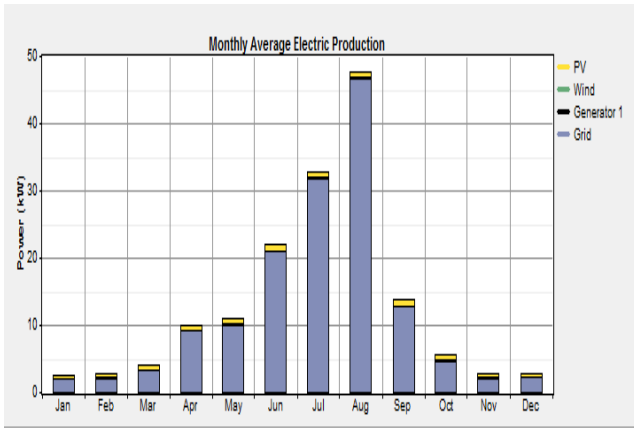


Fig. 8 Monthly average electrical production.

| Quantity            | kWh/yr  | %    |
|---------------------|---------|------|
| Excess electricity  | 0.00128 | 0.00 |
| Unmet electric load | 0.00    | 0.00 |
| Capacity shortage   | 0.00    | 0.00 |

| Quantity           | Value  |
|--------------------|--------|
| Renewable fraction | 0.0626 |

Fig. 9 Renewable fraction and excess electricity.

In Fig. 10 the percentage of energy that comes from every DG is depicted. 94% of energy is produced by the grid and only 6% by the PVs and the wind turbine.

In addition the diesel generator did not contribute to the energy production and HOMER proves that its use is inexpedient, as expected.

In Fig. 11 and 12, the cost summary is shown by cost type and by component respectively. It is observed that the operating cost is the largest percentage of the cost because of the grid. At this point it should be reminded that the initial capital is considered equal to zero.

The Total Net Present Cost is 140,677 € and the operating cost is 11,005 €/yr for a lifetime project of 25 years. Fig.13 shows the cash flow summary by cost type during the years.

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 6,445   | 6   |
| Wind turbine   | 826     | 1   |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 108,872 | 94  |
| Total          | 116,142 | 100 |

Fig. 10 Contribution percentage of each DG

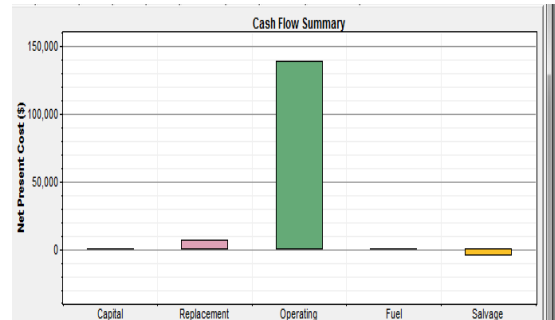


Fig. 11 Cost summary by cost type

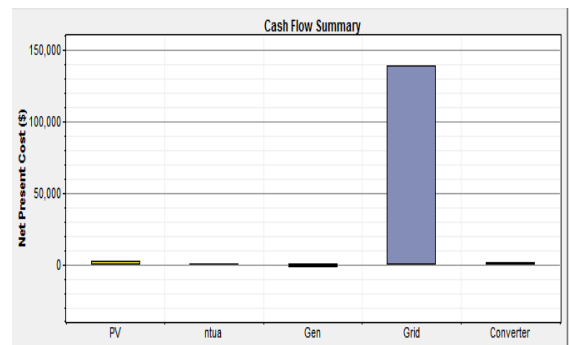


Fig.12 Cost summary by component

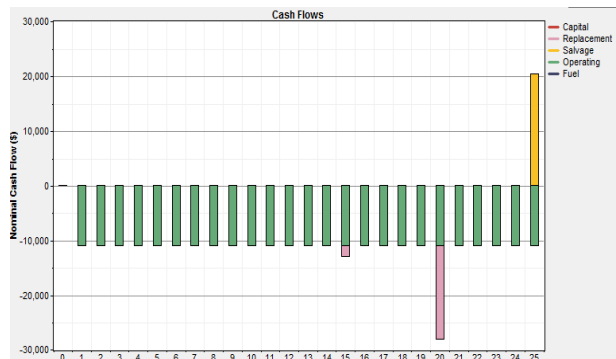


Fig.13 Cash flow summary

From all the above, it is concluded that the interconnected system could be improved and it could be more cost effective and economic viable.

### 5.3. Optimization of the interconnected system.

In this section the optimization of the operation of the interconnected Microgrid is conducted. Large numbers of options are available for different sizes of the components used and components to be added to the system which make sense. Also a sensitivity analysis is performed. Range of different fuel prices, different wind speeds and different solar radiation are considered for modeling and in order to evaluate their impact on the optimal system configuration [2]. Table 3 displays the values of each optimization variable. It shows different sets of all possible variables in the system configuration. HOMER simulates all possible configurations and sorts them according to net present cost.

TABLE 3: VALUES OF EACH VARIABLE.

|   | PV Array<br>(kW) | ntua<br>(Quantity) | Gen<br>(kW) | Grid<br>(kW) | Converter<br>(kW) |
|---|------------------|--------------------|-------------|--------------|-------------------|
| 1 | 0.000            | 0                  | 0.00        | 1,000.000    | 0.00              |
| 2 | 4.250            | 1                  | 36.00       |              | 6.20              |
| 3 | 14.000           | 2                  |             |              | 10.00             |
| 4 | 30.000           | 4                  |             |              | 20.00             |
| 5 | 60.000           | 8                  |             |              | 30.00             |
| 6 |                  | 10                 |             |              | 70.00             |
| 7 |                  | 15                 |             |              |                   |

In this simulation, sensitivity variables are solar radiation, wind speed and diesel price. Four discrete values were used in the sensitivity analysis for solar radiation. Actual annual average is 4.66 kWh m<sup>-2</sup> and 4, 5 and 6 kWh m<sup>-2</sup> are considered as sensitivity values. Also annual average wind speed is 6.06 m/s and the sensitivity values set as 5, 5.5, 6.5 and 7 m/s. Moreover three discrete values (1, 1.1 and 1.3€/per liter) were used for diesel in the sensitivity analysis even if diesel generator's use is unprofitable.

The number of simulations that HOMER performed to optimize the system and find the optimal configuration is 25,200 and they are completed in 7 minutes.

The simulation shows that the installation of more PVs makes the system more cost-effective only if the solar radiation is bigger than 5 kWh m<sup>-2</sup>. Fig.14 and 15 display the cost summary by component and by type respectively, for a system configuration which includes PVs of 60 kW and 15 wind turbines. Solar radiation is 5 kWh m<sup>-2</sup> and wind speed is 7 m/s. It is obvious that PVs offer a large amount of cash flow to the system and make their installation economic viable.

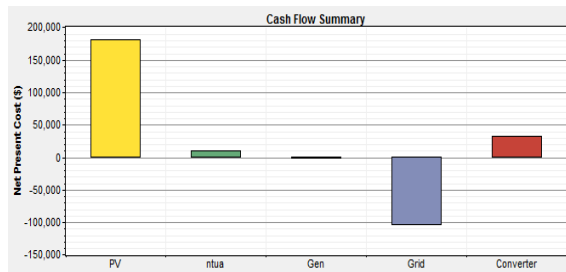


Fig.14 Cost summary by component

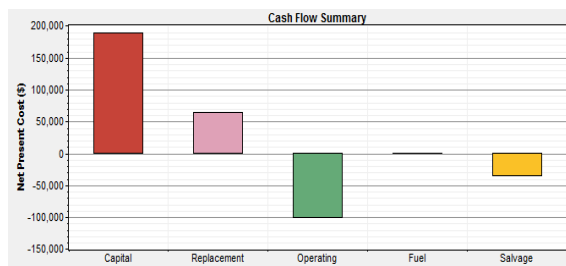


Fig.15 Cost summary by cost type

Monthly average electric production is shown in Fig.16 and we have to notice that the electric production of PVs was increased.

In Fig.17 the energy production of each DG is depicted, where it should be marked that the PVs contribute 55% to the energy production. Wind turbines have a

contribution of 8% and the renewable fraction has increased to 0.63. Total net present cost has decreased to 118,523 € Of course, the results are much better if solar radiation is 6 kWh m<sup>-2</sup>.

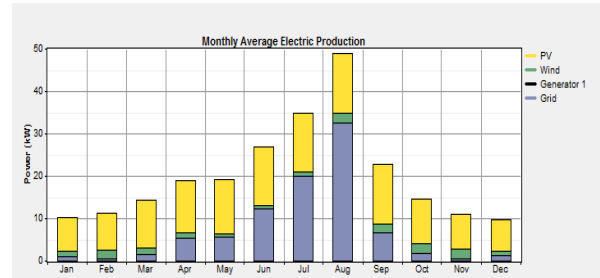


Fig.16 Monthly average electric production

| Production     | kWh/yr  | %   |
|----------------|---------|-----|
| PV array       | 98,464  | 55  |
| Wind turbines  | 13,751  | 8   |
| Generator 1    | 0       | 0   |
| Grid purchases | 65,694  | 37  |
| Total          | 177,909 | 100 |

Fig.17 Contribution percentage of each DG

Also, it should be mentioned, that the addition of wind generators improved the system's effectiveness despite sensitivity variables. Last but not least, the use of diesel generator is not cost effective in all simulations and the diesel generator is unnecessary in interconnected mode.

## 6. Autonomous System Simulation

### 6.1. Description

Autonomous microgrid consists of PVs, wind turbine and batteries. Fig. 18 presents the daily load profile.

The annual average of the electrical load is 5.6kWh day<sup>-1</sup> and the annual daily peak is 765W. The autonomous system is schematically presented in Fig.19

All the DGs that compose the autonomous system are already installed in Meltemi and for this reason the initial capital equal to zero. So, the initial capital of the wind turbine is considered zero and the replacement cost equal to 400€ The O&M cost was set at 20 €/per year. The lifetime is taken as 20 years and hub height is considered 12 meters for the wind turbine. The power curve for the wind turbine is shown in Fig.20.

In autonomous system there are already installed PVs of 340 W, so the initial capital is zero and the replacement cost is 1200€ Also the O&M cost is practically zero and their lifetime is considered 20 years. Moreover, there are two stacks of four batteries. Both stacks are considered that have initial capital equal to zero and replacement cost 600€ To operate the system a power converter of 1kW is needed. Converter's efficiency is defined at 95% and its lifetime 20 years.



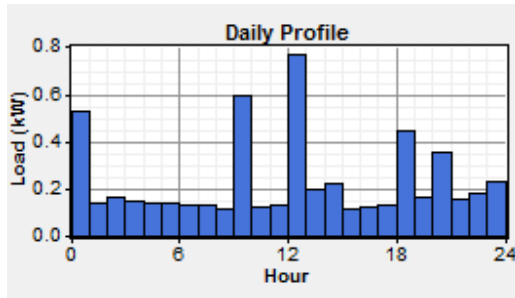


Fig. 18 Daily load profile

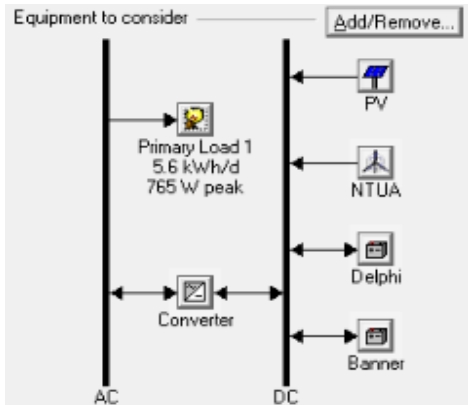


Fig. 19 HOMER implementation of the autonomous system

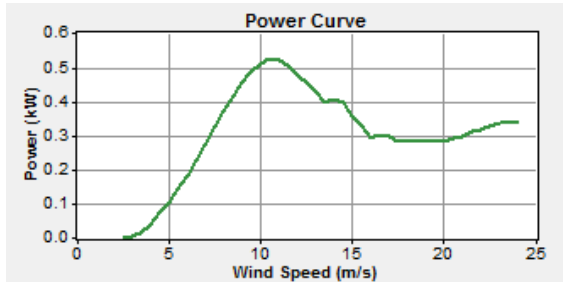


Fig.20 Wind turbine power curve

### 6.2. Simulation of the current situation

As it is depicted in the next figures the existing components are not adequate to meet the whole electrical load. Fig. 21 indicates that there is an amount of unmet load and a capacity shortage. This fact indicates that the system's configuration should be improved. Furthermore, in Fig. 22 the cost summary by cost type is depicted and it can be observed that largest amount of money is wasted for replacement since initial capital is zero.

Fig.23 indicates that the largest percentage of the energy production comes from the wind turbine. 74% of the electric production comes from wind turbine and 24% from PVs. Also, HOMER presents some characteristics of the batteries operation in Fig.24. Total NPC is 862 € and the operating cost is 67€ per year for a project lifetime of 25 years.

| Quantity            | kWh/yr | %    |
|---------------------|--------|------|
| Excess electricity  | 95.3   | 4.8  |
| Unmet electric load | 387    | 18.9 |
| Capacity shortage   | 496    | 24.3 |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 1.00  |

Fig.21 Capacity shortage and unmet electric load

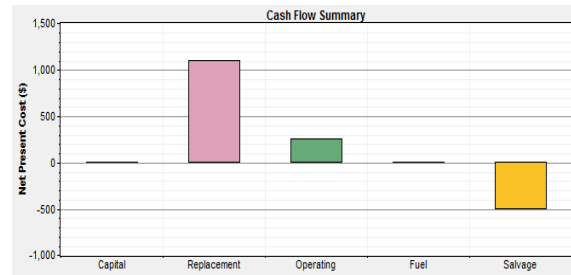


Fig.22 Cost summary by cost type

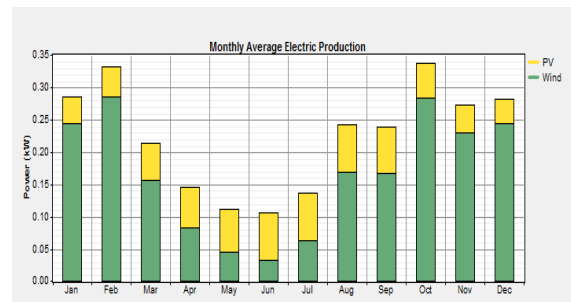


Fig.23 Monthly average electric production

| Quantity          | Value | Units  |
|-------------------|-------|--------|
| Energy in         | 707   | kWh/yr |
| Energy out        | 577   | kWh/yr |
| Storage depletion | 1     | kWh/yr |
| Losses            | 129   | kWh/yr |
| Annual throughput | 645   | kWh/yr |
| Expected life     | 12.0  | yr     |

Fig.24 Batteries operation

### 6.3. Optimization of the autonomous system

As noticed previously, the current system configuration needs to be improved in order to decrease the unmet load and the capacity shortage. So, in this section the optimization of the autonomous system operation is presented, by adding some components and perform sensitivity analysis for a number of variables (wind speed, solar radiation). Table 4 displays the values of each optimization variable. It shows set of all possible variables in the system configuration.

TABLE 4 : VALUES OF EACH VARIABLE

|   | PV Array<br>(kW) | ntua<br>(Quantity) | Battery<br>(Quantity) | Converter<br>(kW) |
|---|------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| 1 | 0.000            | 0                  | 0                     | 0.00              |
| 2 | 0.340            | 1                  | 4                     | 1.00              |
| 3 | 0.600            | 2                  | 8                     | 1.50              |
| 4 | 0.700            |                    | 12                    | 2.00              |
| 5 | 0.800            |                    | 16                    | 2.50              |
| 6 | 1.000            |                    | 20                    | 3.00              |
| 7 |                  |                    | 30                    |                   |
| 8 |                  |                    | 40                    |                   |

In this simulation, sensitivity variables are solar radiation and wind speed. Actual annual average is 4.66 kWh m<sup>-2</sup> and 5 and 5.5 kWh m<sup>-2</sup> are considered as sensitivity values. Also annual average wind speed is 6.06 m/s, setting sensitivity values 5.5, 6.5 and 7 m/s.

The number of simulations that HOMER performed to optimize the system and find the optimal configuration is 10,368 and they are completed in 38 seconds. The simulation shows that with further installation of PVs (700W) and a wind turbine the goal is achieved with the minimum cost. In Fig.25 the monthly average electric production is shown where it can be seen the contribution of each DG.

Fig.26 displays the capacity shortage and the unmet load. As mentioned previously, these two characteristics were eliminated, achieving our goal. Fig.27 indicates that the installation of new PVs costs the largest amount of money. Total NPC is 3,917€ and the operating cost is 130€/year.

Last but not least, it should be mentioned that the elimination of unmet load can be achieved with less PVs (600W) if solar radiation and wind speed are increased. This fact is shown by the sensitivity analysis which HOMER performed.

### 7. Conclusion

In this paper, two real microgrid systems- interconnected and autonomous- were set under testing via the HOMER software. The results show that the configuration of both microgrids could be improved, making them more cost-effective and economic viable. For the interconnected system, the installation of more PVs and wind turbines is suggested in order to optimize its operation. Moreover, the autonomous system could be totally independent with the increase of PVs and the installation of one more wind turbine. Also, sensitivity analysis indicated how solar radiation and wind speed affect systems operation.

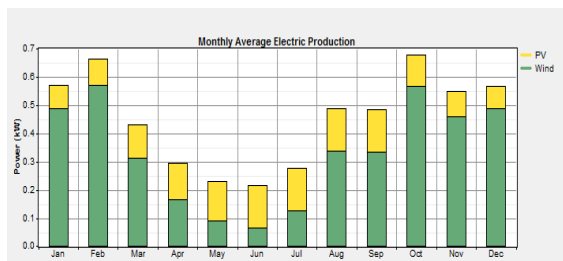


Fig.25 Monthly average electric production

| Quantity            | kWh/yr     | %    |
|---------------------|------------|------|
| Excess electricity  | 1,652      | 41.6 |
| Unmet electric load | 0.00000685 | 0.0  |
| Capacity shortage   | 0.00       | 0.0  |

| Quantity           | Value |
|--------------------|-------|
| Renewable fraction | 1.00  |

Fig.26 Capacity shortage and unmet load

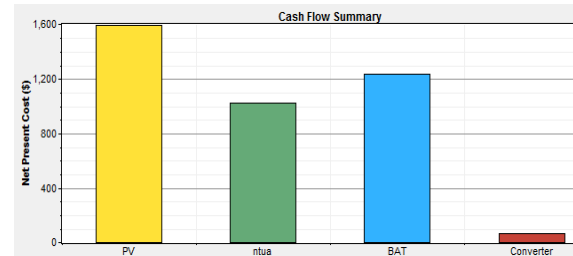


Fig.27 Cost summary by cost type

### References

- [1] Tsikalakis A.G., Hatziaargyriou N.D.: ‘Centralized Control for Optimizing Microgrids Operation’, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23, (1), pp.241-248.
- [2] Bindu U Kansara, Parekh B.R.: ‘Modeling and Simulation of Distributed Generation System Using HOMER Software’, International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, 2011, pp. 328-332.
- [3] Dimeas A. L., Hatziaargyriou N. D.: ‘Intelligent Applications for Consumer Management’, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, pp. 1-6.
- [4] Dimeas A.L., Hatzivasiliadis S.I. and Hatziaargyriou N. D.: ‘Control agents for enabling customer-driven Microgrids’, IEEE Power & Energy Society General Meeting(PES), 2009 , pp.1-7.
- [5] Givler T. and Lilienthal P.: ‘Using HOMER® Software, NREL’s Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems Case Study: Sri Lanka’, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report. [http://civil. colorado.edu /classes /cven5080/Homer-Sri-lanka.pdf](http://civil.colorado.edu/classes/cven5080/Homer-Sri-lanka.pdf) , accessed 2005.
- [6] A. Perez-Santiago, M. Reyes-Carrasquillo, E. I. Ortiz-Rivera: ‘Work in progress-HOMER: An educational tool to learn about the design of renewable energy systems at the undergraduate level’, Frontiers in Education Conference (FIE), 2012, pp.1-6.
- [7] Getting Started Guide for HOMER
- [8] Zoulias E.I., Lymberopoulos N.: ‘Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems’, Renewable Energy, 2007, 32, pp. 680–696.