



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**Τμήμα Μηχανικών**  
**Παραγωγής και διοίκησης**

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**  
**ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ**  
**ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του**

**ΛΕΟΝΤΑΡΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

Επιβλέπων

ΠΟΥΛΙΕΖΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Καθηγητής

Συνεπιβλέπων

ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Διδάκτορας

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2010

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2010 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2010, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Πουλιέζου Αναστάσιου και του Διδάκτορα κ. Κατσίγιαννη Ιωάννη.

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της εργασίας μου αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωσή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Πουλιέζο Αναστάσιο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με τον εξαιρετικά ενδιαφέρον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον κ. Κατσίγιαννη Ιωάννη για το εξαιρετικό ενδιαφέρον που έδειξε, την άρτια συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη καθοδήγηση του, χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Δούμπο Μιχάλη για τις πολύτιμες συμβουλές του στο κομμάτι του γραμμικού προγραμματισμού.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου καθώς και όλους τους δικούς μου ανθρώπους που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να με στηρίζουν.

*Στους γονείς μου*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>                                                 | <b>9</b>  |
| 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....                                                     | 9         |
| 1.1.1 Γενικά.....                                                                 | 9         |
| 1.1.2 Αιτίες κατασπατάλησης ενέργειας .....                                       | 10        |
| 1.1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα .....                                             | 12        |
| 1.1.4 Στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....                                | 13        |
| 1.1.5 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....                                        | 14        |
| 1.2 Σκοπός εργασίας.....                                                          | 15        |
| 1.3 Δομή εργασίας.....                                                            | 16        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>                           | <b>17</b> |
| 2.1 Αιολική ενέργεια.....                                                         | 17        |
| 2.1.1 Ταχύτητα ανέμου.....                                                        | 18        |
| 2.1.2 Ισχύς ανέμου.....                                                           | 20        |
| 2.1.3 Ανεμογεννήτριες.....                                                        | 20        |
| 2.1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών.....                                  | 22        |
| 2.1.5 Πραγματική ισχύς ανεμογεννήτριας.....                                       | 23        |
| 2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα .....                                                  | 26        |
| 2.2.1 Ηλιακό φάσμα .....                                                          | 26        |
| 2.2.2 Γωνία ύψους του ηλίου .....                                                 | 28        |
| 2.2.3 Ακτινοβολία ξάστερου ουρανού.....                                           | 30        |
| 2.2.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα .....                                                | 35        |
| 2.2.5 Καμπύλες I-V και P-V .....                                                  | 36        |
| 2.2.6 Προσανατολισμός συλλέκτη .....                                              | 39        |
| 2.2.7 Ισχύς φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....                                         | 39        |
| 2.3 Γεννήτριες .....                                                              | 40        |
| 2.3.1 Γεννήτρια Diesel.....                                                       | 41        |
| 2.4 Συστήματα αποθήκευσης .....                                                   | 42        |
| 2.4.1 Συσσωρευτές .....                                                           | 43        |
| 2.4.2 Συσσωρευτές μολύβδου-θεικού οξέος (Pb/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )..... | 43        |
| 2.5 Μετατροπείς .....                                                             | 46        |
| 2.6 Κατανομή φορτίου του αυτόνομου συστήματος.....                                | 47        |
| 2.6.1 Λειτουργική εφεδρεία .....                                                  | 47        |

|                                                                         |                                                                |           |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.2                                                                   | Βέλτιστη επιλογή λειτουργίας γεννητριών και συσσωρευτών.....   | 48        |
| 2.6.3                                                                   | Στρατηγικές συνεργασία μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών ..... | 49        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ.....</b> |                                                                | <b>51</b> |
| 3.1                                                                     | Εισαγωγή .....                                                 | 51        |
| 3.2                                                                     | Γραμμικός προγραμματισμός.....                                 | 52        |
| 3.2.1                                                                   | Κανονική μορφή ενός γραμμικού προγράμματος .....               | 53        |
| 3.2.2                                                                   | Πρότυπη μορφή .....                                            | 53        |
| 3.2.3                                                                   | Συνθήκες εφαρμογής.....                                        | 54        |
| 3.2.4                                                                   | Μοντελοποίηση .....                                            | 54        |
| 3.3                                                                     | Μέθοδοι επίλυσης.....                                          | 55        |
| 3.3.1                                                                   | Γραφική μέθοδος .....                                          | 55        |
| 3.3.2                                                                   | Μέθοδος simplex .....                                          | 56        |
| 3.3.3                                                                   | Δυϊκός αλγόριθμος simplex.....                                 | 59        |
| 3.3.4                                                                   | Μέθοδος κλάδου και φράγματος .....                             | 61        |
| 3.4                                                                     | Οικονομικές έννοιες.....                                       | 62        |
| 3.4.1                                                                   | Οικονομική ζωή.....                                            | 62        |
| 3.4.2                                                                   | Διττή αξία χρήματος .....                                      | 62        |
| 3.4.3                                                                   | Απλό επιτόκιο .....                                            | 63        |
| 3.4.4                                                                   | Βασικοί μετασχηματισμοί.....                                   | 64        |
| 3.4.5                                                                   | Πληθωρισμός.....                                               | 67        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....</b>                             |                                                                | <b>68</b> |
| 4.1                                                                     | Γενικά.....                                                    | 68        |
| 4.2                                                                     | Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.....                           | 69        |
| 4.3                                                                     | Αυτόνομα αιολικά συστήματα.....                                | 70        |
| 4.4                                                                     | Υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....                   | 71        |
| 4.5                                                                     | Μοντελοποίηση υβριδικού συστήματος .....                       | 73        |
| 4.5.1                                                                   | Οικονομικές εκτιμήσεις .....                                   | 74        |
| 4.5.2                                                                   | Ανεμογεννήτριες.....                                           | 75        |
| 4.5.3                                                                   | Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....                                     | 76        |
| 4.5.4                                                                   | Νηζελογεννήτριες.....                                          | 77        |
| 4.5.5                                                                   | Συσσωρευτές .....                                              | 79        |
| 4.5.6                                                                   | Περιορισμοί φορτίου.....                                       | 80        |
| 4.5.7                                                                   | Τελική μορφή .....                                             | 81        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΟ EXCEL SOLVER .....</b> | <b>83</b>  |
| 5.1 Εισαγωγή .....                                                           | 83         |
| 5.2 Παρουσίαση Excel Solver .....                                            | 84         |
| 5.3 Πρακτική μοντελοποίησης .....                                            | 85         |
| 5.4 Εξαγωγή του μοντέλου και εκτίμηση Ιακωβιανής μήτρας .....                | 86         |
| 5.5 Διαδικασία επίλυσης προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού.....           | 86         |
| 5.6 Βελτιστοποίηση με το Solver .....                                        | 88         |
| 5.6.1 Ανεμογεννήτρια.....                                                    | 88         |
| 5.6.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο .....                                             | 88         |
| 5.6.3 Ντηζελογεννήτρια.....                                                  | 89         |
| 5.6.4 Συσσωρευτές .....                                                      | 90         |
| 5.6.5 Αιολική ενέργεια.....                                                  | 90         |
| 5.6.6 Ηλιακή ενέργεια .....                                                  | 91         |
| 5.6.7 Ζήτηση φορτίου.....                                                    | 91         |
| 5.7 Δημιουργία γραμμικού προβλήματος στο Excel.....                          | 91         |
| 5.8 Βελτιστοποίηση γραμμικού προγράμματος .....                              | 100        |
| 5.9 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης γραμμικού μοντέλου .....                    | 104        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΟ HOMER .....</b>                          | <b>108</b> |
| 6.1 Εισαγωγή .....                                                           | 108        |
| 6.2 Προσομοίωση .....                                                        | 108        |
| 6.3 Βελτιστοποίηση .....                                                     | 110        |
| 6.4 Ανάλυση ευαισθησίας .....                                                | 112        |
| 6.5 Μοντελοποίηση με HOMER.....                                              | 112        |
| 6.5.1 Ζήτηση φορτίου.....                                                    | 115        |
| 6.5.2 Ανεμογεννήτριες.....                                                   | 116        |
| 6.5.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....                                             | 117        |
| 6.5.4 Ντηζελογεννήτριες.....                                                 | 119        |
| 6.5.5 Συσσωρευτές .....                                                      | 121        |
| 6.5.6 Μετατροπέας .....                                                      | 123        |
| 6.6 Πόροι συστήματος .....                                                   | 125        |
| 6.6.1 Ηλιακό δυναμικό .....                                                  | 126        |
| 6.6.2 Αιολικό δυναμικό .....                                                 | 127        |
| 6.6.3 Καύσιμο Diesel.....                                                    | 129        |

|                                                 |                                                 |            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------|
| 6.7                                             | Περιορισμοί λειτουργίας .....                   | 129        |
| 6.7.1                                           | Οικονομικά .....                                | 129        |
| 6.7.2                                           | Έλεγχος συστήματος.....                         | 130        |
| 6.7.3                                           | Περιορισμοί.....                                | 131        |
| 6.8                                             | Επίλυση μοντέλου υβριδικού συστήματος.....      | 132        |
| 6.9                                             | Αναλυτικά στοιχεία της βέλτιστης λύσης .....    | 133        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b> |                                                 | <b>138</b> |
| 7.1                                             | Εισαγωγή .....                                  | 138        |
| 7.2                                             | Διαφορές των δύο μεθόδων στη μοντελοποίηση..... | 138        |
| 7.2.1                                           | Δεδομένα γραμμικού μοντέλου .....               | 138        |
| 7.2.2                                           | Ανεμογεννήτριες.....                            | 139        |
| 7.2.3                                           | Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....                      | 140        |
| 7.2.4                                           | Ντηζελογεννήτριες.....                          | 141        |
| 7.2.5                                           | Μετατροπέας .....                               | 142        |
| 7.2.6                                           | Συσσωρευτές .....                               | 142        |
| 7.2.7                                           | Περιορισμοί.....                                | 144        |
| 7.3                                             | Ανάλυση αποτελεσμάτων.....                      | 144        |
| 7.3.1                                           | Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου .....           | 144        |
| 7.3.2                                           | Σχολιασμός ευαισθησίας στο πάνω όριο .....      | 145        |
| 7.3.3                                           | Παρουσίαση αποτελεσμάτων HOMER .....            | 146        |
| 7.4                                             | Σύγκριση αποτελεσμάτων .....                    | 147        |
| 7.5                                             | Τελικά συμπεράσματα .....                       | 148        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>                        |                                                 | <b>150</b> |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο περιλαμβάνει συνδυασμό συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το υβριδικό σύστημα που μελετάται αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πλαίσια, νηξελογεννήτριες και συσσωρευτές. Αρχικά για τη μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα μοντέλο χρονοσειρών, το HOMER. Τέλος, γίνονται οι συγκρίσεις ανάμεσα στις δύο μεθόδους και εξάγονται τα συμπεράσματα που αφορούν το κατά πόσον είναι εφικτή και ρεαλιστική η προσέγγιση της βελτιστοποίησης ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού.

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Εισαγωγικά στοιχεία**

#### **1.1.1 Γενικά**

Η ενέργεια αποτέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σε όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρείχε η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του.

Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει στην περισσότερη εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20ου αιώνα, ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, για ριζική επίλυση του παγκοσμίου ενεργειακού προβλήματος: η πυρηνική ενέργεια. Γρήγορα όμως, δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία διασφάλισης της ελεγχόμενης παραγωγής της πυρηνικής ενέργειας.

Συνάμα, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας κυρίως της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων.

Όλα τα μηνύματα έδειχναν καθαρά, ότι η συνέχιση της πορείας μας στο μέλλον επιβάλλει την αλλαγή της καθημερινής νοοτροπίας μας και αναθεώρηση των αξιών της ζωής, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της έννοιας και των στόχων της τεχνολογικής ανάπτυξης. Είναι πολύ σημαντικό και επιπλέον εξαιρετικά χρήσιμο για την ορθή επιλογή των μέτρων περιβαλλοντικής αποκατάστασης, να συνειδητοποιήσουμε το εντυπωσιακά μεγάλο μέγεθος της χρονικής απόκρισης του φυσικού μας κόσμου, σε κλιματικές μεταβολές. Απαιτούνται δεκαετίες για να διαπιστωθούν τα πρώτα ενθαρρυντικά θετικά αποτελέσματα, των όποιων σημερινών διορθωτικών επεμβάσεων στο οικολογικό σύστημα. Η αποδοχή των ριζικών αυτών αλλαγών στον τρόπο ζωής μας καθώς και στην τροποποίηση του είδους και του τρόπου παραγωγής ενέργειας και στόχων της τεχνολογίας, είναι η πιο δύσκολη φάση

προσαρμογής μας στην νέα κατάσταση. Η ανησυχία και ο σκεπτικισμός των ολίγων οικολόγων, κάποτε, αποτελεί σήμερα καθημερινό προβληματισμό των περισσοτέρων.

Η διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992, προσδιόρισε το πρόβλημα στις διαστάσεις του, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για την σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Η αιτία ήταν οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των ανεπτυγμένων χωρών. Ο στόχος να διατηρηθούν τα επίπεδα ρύπανσης μέχρι το 2000, σε αυτά του 1990, δεν φαίνεται, σήμερα, να έχει επιτευχθεί. Στην επόμενη, όμοια διάσκεψη, στο Κιότο της Ιαπωνίας, το Δεκέμβριο του 1997, καταβλήθηκε προσπάθεια για μια νέα συμφωνία, βασισμένη σε πιο δραστικά μέτρα, χωρίς τελικά να υπάρξει ομοφωνία.

Πάντως, παρά τις αντιδράσεις των ολίγων, αλλά ισχυρών αυτού του κόσμου, η ευαισθητοποίηση και η κινητοποίηση των πολιτών ολοένα και αυξάνει. Η εκφραζόμενη, ποικιλοτρόπως, πρόθεση αντιμετώπισης του θέματος σε διεθνή κλίμακα, δείχνει ότι συνειδητοποιούμε, πως η τεχνολογία, ως καρπός ανώτερης πνευματικής εργασίας, πρέπει να έχει στόχο να θεραπεύει και να υπηρετεί τον άνθρωπο, με σεβασμό προς το οικοσύστημα που τον φιλοξενεί. Αυτό το οικοσύστημα, χώρος ανάπτυξης και διαβίωσης όλων των μορφών ζωής, δεν είναι υπόθεση μερικών ανθρώπινων γενεών. Χρειάστηκαν 5 δισεκατομμύρια χρόνια για να εξιδανικευτούν οι κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη μας, σε τέτοιο βαθμό, που να συμβάλουν στη δημιουργία της ζωής.

Είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο, η σημαντική συμβολή των πηγών ενέργειας μεγάλης ισχύος στην τεχνολογική πρόοδο, από την οποία προέκυψαν πολλά θετικά αποτελέσματα. Μέσα από την ιστορική αναγκαιότητα των συμβατικών καυσίμων ξεπήδησαν νέες και συνεχώς βελτιώνονται παλαιότερες μέθοδοι, εξευγενισμένης παραγωγής ενέργειας, χωρίς πρακτικά οικολογικές επιβαρύνσεις. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες.

### **1.1.2 Αιτίες κατασπατάλησης ενέργειας**

Αν και η ανθρωπότητα τα τελευταία είκοσι χρόνια συνειδητοποίησε τον κίνδυνο του επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα, οπότε ξεκίνησε ορισμένες φιλότιμες προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης και ορθολογικότερης χρήσης των ενεργειακών αποθεμάτων, ωστόσο οι βασικότερες αιτίες αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας παραμένουν και είναι οι εξής:

1. **Συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας.** Η προσπάθεια του ανθρώπου για βελτίωση του βιοτικού του επιπέδου (π.χ. παραγωγή περισσότερων καταναλωτικών αγαθών), συνεχίζεται με αυξανόμενους ρυθμούς. Αν και γίνονται

προσπάθειες περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη μας, αυτές δεν αποδίδουν πάντοτε καρπούς. Πιο συγκεκριμένα, μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις της τελευταίας τριακονταετίας, οι ανεπτυγμένες χώρες έδειξαν ότι διαθέτουν τα περιθώρια κάποιας περιορισμένης μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως στον τομέα της βιομηχανίας. Αντίθετα, χώρες λιγότερο ανεπτυγμένες με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, έχουν μικρότερα ή και μηδενικά περιθώρια περιορισμού των ενεργειακών τους αναγκών.

2. **Ανομοιομορφία στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.** Είναι γεγονός πως υπάρχει τρομακτική ανομοιομορφία που διέπει την κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας. Για παράδειγμα, η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στις Η.Π.Α. και στον Καναδά, είναι περίπου εικοσαπλάσια, από αυτήν των υπό ανάπτυξη χωρών όπως το Μεξικό, η Βραζιλία, η Συρία κ.α. Η πραγματικότητα αυτή πρέπει να συνδυασθεί και με το γεγονός ότι η παραγωγικότητα ενός λαού, το κατά κεφαλήν ακαθάριστο εθνικό προϊόν (Α.Ε.Π.) και η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας μεταβάλλονται σχεδόν ανάλογα. Το συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, είναι ότι ορισμένοι λαοί καταναλώνουν αρκετά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από ορισμένους άλλους.
3. **Αύξηση του πληθυσμού της γης.** Η ανομοιογενής ενεργειακή κατανάλωση στις διάφορες περιοχές του πλανήτη μας συνοδεύεται και από τη διαρκή αύξηση του πληθυσμού της γης. Όμως το πλέον σημαντικό γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, είναι η πληθυσμιακή έκρηξη που παρατηρείται στις υπό ανάπτυξη χώρες του πλανήτη μας. Στις περιπτώσεις αυτές, ακόμα και με σταθερή κατά κεφαλήν κατανάλωση, παρατηρείται αύξηση της συνολικής κατανάλωσης ανάλογη με την αύξηση του πληθυσμού.
4. **Απώλειες συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας.** Στις παραπάνω αιτίες θα πρέπει να προστεθεί και ένας αριθμός τεχνολογικών λόγων, οι οποίοι οδηγούν αναπόφευκτα στην αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης των ενεργειακών αποθεμάτων. Σε κάθε μετατροπή ενέργειας έχουμε παραγωγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, η οποία δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και στη συνέχεια απορρίπτεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμικής ρύπανσης, συντελώντας ταυτόχρονα στο «θερμικό θάνατο» του πλανήτη μας. Παράλληλα σημαντικά ποσά ενέργειας χάνονται κατά τη μεταφορά και διανομή της ενέργειας από τον τόπο παραγωγής στην περιοχή κατανάλωσής της. Συνοψίζοντας, αναφέρεται ότι ο βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής κυμαίνεται σήμερα από 15% έως 45%, κάτι το οποίο αν συνδυαστεί με το πλήθος των θερμοηλεκτρικών σταθμών που τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πλανήτη μας, κάνει προφανή τη σημασία των ενεργειακών απωλειών των συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Φυσικά γίνονται σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών και αύξησης του βαθμού απόδοσης των ενεργειακών συστημάτων, γεγονός όμως το οποίο θα βελτιώσει ελάχιστα προς το παρόν το πλανητικό ενεργειακό ισοζύγιο.
5. **Μη ορθολογική χρήση της ενέργειας.** Η ενέργεια διατίθεται σε διάφορες ποιότητες, οι οποίες σχετίζονται με το βαθμό μετατρεψιμότητάς τους σε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας. Μορφές ενέργειας, όπως η ηλεκτρική, θεωρούνται εξευγενισμένες, λόγω της δυνατότητας μετατροπής της, σε κάθε άλλη επιθυμητή μορφή ενέργειας, με ελάχιστες απώλειες. Είναι συνεπώς σκόπιμο να αξιολογηθούν και να ιεραρχηθούν οι απαιτήσεις

της ανθρωπότητας στις μορφές ενέργειας διαφορετικής ποιότητας. Για παράδειγμα, κρίνεται ενεργειακά απαράδεκτο να χρησιμοποιείται για τη θέρμανση κατοικιών ή για οικιακή χρήση ηλεκτρική ενέργεια υψηλής ποιότητας, αφού ακόμα και χαμηλής ποιότητας θερμότητα καλύπτει πλήρως τις οικιακές απαιτήσεις. Παράλληλα με κατάλληλη διαχείριση της ζήτησης ενέργειας μπορούν να μειωθούν και να μετατεθούν οι αιχμές ζήτησης, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση εγκατεστημένης ισχύος.

6. **Αδιαφορία και σπατάλη ενέργειας.** Η επικράτηση της ψευδαίσθησης ότι τα αποθέματα ενέργειας και πρώτων υλών είναι απεριόριστα καθώς και η έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών, οδηγούν το μέσο άνθρωπο στην αδιαφορία για την κατασπατάληση της ενέργειας που προκαλεί. Μόλις πρόσφατα άρχισε να γίνεται αντιληπτό το περιορισμένο μέγεθος των ενεργειακών αποθεμάτων του πλανήτη, με αποτέλεσμα να ληφθούν κάποιες τιμολογιακές και διοικητικές αποφάσεις, που σκοπό έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ολοκληρώνοντας, πρέπει να τονιστεί ότι όλοι οι λόγοι που αναφέρθηκαν συντελούν στην εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων. Συνεπώς, κοινή προσπάθεια όλων των ανθρώπων πρέπει να είναι ο περιορισμός της σπατάλης και τελικά η σταδιακή εξάλειψη των αιτιών που οδηγούν σε αυτή.

### 1.1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στον φλοιό της γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σε αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια. Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον ήλιο ενέργεια, που φτάνει στην γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων). Καθώς απορροφάται από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυσικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

1. **Το κάρβουνο:** Αποτέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σε αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της

σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από την καύση ορυκτού άνθρακα.

2. **Το πετρέλαιο:** Η παγκόσμια παραγωγή και χρήση του πήρε εκρηκτικές διαστάσεις στα μέσα του 20ου αιώνα και μάλιστα τα συμβατικά καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο καλύπτουν το 85% της καταναλισκόμενης ενέργειας των ανεπτυγμένων χωρών. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πετρελαϊκών πηγών θα επαρκέσουν ακόμα για 50 χρόνια.
3. **Η πυρηνική ενέργεια:** Από το 1945 και μετά προστέθηκε στις πηγές ενέργειας μεγάλης ισχύος, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Όμως μετά τα ατυχήματα στους σταθμούς της Πενσυλβανίας και του Τσερνομπίλ, η ανθρωπότητα τρομοκρατήθηκε συνειδητοποιώντας την ανικανότητα της να αντιμετωπίσει έναν επικίνδυνο εχθρό, που μόνιμα απειλεί με αφανισμό.

Όλες οι μεγάλης πυκνότητας ισχύος, συμβατικές πηγές ενέργειας, εκτός από την αδιαμφισβήτητη προσφορά τους στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης και τη μεγάλη συμβολή τους στην βελτίωση της διαβίωσης του ανθρώπου, συνδέονται δυστυχώς με πολύ σοβαρές και εμφανώς αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Έτσι ενισχύεται η άποψη για μερική, σε πρώτη φάση αντικατάσταση τους με άλλες πηγές ενέργειας, που να μη ρυπαίνουν και να ενσωματώνονται φιλικά στο περιβάλλον, τις λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

#### 1.1.4 Στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Μετά τη δεύτερη ενεργειακή κρίση, στις αρχές του 1980, η διεθνής κοινότητα άρχισε να αναγνωρίζει το πεπερασμένο των παγκόσμιων αποθεμάτων των συμβατικών πηγών ενέργειας σε σύγκριση με την ανεξέλεγκτη αύξηση των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα στις ανεπτυγμένες χώρες του πλανήτη. Ίσως οι προβλέψεις της πρώτης έκθεσης της Λέσχης της Ρώμης (1970) με τίτλο «Τα όρια της ανάπτυξης» να μην πραγματοποιήθηκαν στο βαθμό που η έκθεση προέβλεπε, όμως οι αρνητικές επιπτώσεις που συνοδεύουν την αλόγιστη κατανάλωση ενέργειας εξακολουθούν να ισχύουν και να επιβεβαιώνονται από τα πορίσματα της δεύτερης έκθεσης, η οποία συνετάχθη το 1991. Δεν πρέπει συνεπώς, να αγνοείται το γεγονός ότι τα βεβαιωμένα αποθέματα των κυριότερων συμβατικών καυσίμων επαρκούν στην καλύτερη των περιπτώσεων για τα επόμενα εκατό χρόνια, ενώ ακόμη κι αν ανακαλυφθούν στο μέλλον χιλιαπλάσια αποθέματα συμβατικών καυσίμων, με τους σημερινούς ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας, θα παρατείνουν για άλλα εκατό πενήντα μόλις χρόνια την άφιξη του «ενεργειακού χειμώνα» στον πλανήτη.

Ταυτόχρονα η επιταχυνόμενη συσσώρευση επικίνδυνων ρυπαντών (τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα) και η αντίστοιχη καταστροφή του περιβάλλοντος, οδηγούν στην εμφάνιση σημαντικών προβλημάτων υγείας, υποβαθμίζοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής στις περισσότερες μεγαλουπόλεις.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω προβλήματα που πηγάζουν από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας, αρκετοί ειδικοί πρότειναν την αξιοποίηση των ήπιων ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Φυσικά οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι δυνατό τη στιγμή αυτή να επιλύσουν το συνολικό ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας, τουλάχιστον με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα. Εφόσον όμως η αξιοποίηση τους συνδυαστεί με την προσπάθεια εξοικονόμησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και με την ορθολογική διαχείριση των υφιστάμενων ενεργειακών πόρων, είναι δυνατή η σταδιακή απομάκρυνση του επερχόμενου «ενεργειακού χειμώνα».

### 1.1.5 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη βαρυτική δράση, κυρίως της σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της γης. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

1. **Υδατόπτωση:** Είναι ένας από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Έχει όμως περιορισμένη εφαρμογή και ταυτόχρονα το μειονέκτημα, σε πολλές περιπτώσεις, η δημιουργία των κατάλληλων εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, να καταστρέφει εύφορες εκτάσεις, που σχετίζονται με την ύπαρξη του υδάτινου αυτού πλούτου. Καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.
2. **Ενέργεια κυμάτων ή παλιρροϊκών κινήσεων:** Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, κυρίως στις βόρειες θάλασσες. Στη Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW.
3. **Βιομάζα:** Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκοσμίως απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.
4. **Γεωθερμική ενέργεια:** Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Βρίσκει εφαρμογές από την θέρμανση κτιρίων και θερμοκηπίων έως και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
5. **Αιολική ενέργεια:** Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Ειδικά σε περιοχές της Ελλάδας που το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, είναι αυξημένο έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικά MW. Ακόμα πρέπει να αναφερθεί, πως στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μία μέση τιμή ετησίως, από 7 έως 11 m/s, το οποίο υπερκαλύπτει την

αποδοτική για τις ανεμογεννήτριες, περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κατ' επέκταση τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών. Συνεπώς, ο νησιωτικός χώρος αποτελεί ιδανικό πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων.

6. **Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια:** Η φωτοβολταϊκή ενέργεια προέρχεται από την εκμετάλλευση της ιδιότητας που έχουν μερικά υλικά να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν έρθουν σε επαφή με το φως του ήλιου (φωτορεύμα), το οποίο αποδεικνύεται ευθέως ανάλογο της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει στην επιφάνεια του. Η τεχνολογία που αφορά αυτού του είδους την ενέργεια αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, παρά το ότι η παραπάνω ιδιότητα των υλικών είχε παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα από τον Becquerel, το 1839. Αρχικά το κόστος κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν αρκετά υψηλό και σε συνδυασμό με την σχετικά χαμηλή απόδοση καθιστούσαν τα συστήματα αυτά ασύμφορα. Όμως κατά την δεκαετία του 1980 η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των ΦΒ στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του ενεργού υλικού, με συνέπεια τη μείωση του κόστους κατασκευής ενός ΦΒ συστήματος. Αποτέλεσμα αυτής της μείωσης είναι η αύξηση που παρατηρήθηκε στην παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών συστημάτων, από 313.5 MW<sub>p</sub>, το 1991, σε 3.8 GW<sub>p</sub>, στο τέλος του 2004.

## 1.2 Σκοπός εργασίας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τα μικρά αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σκοπός των συστημάτων αυτών είναι να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε γεωγραφικά απομονωμένες ή μικρού πληθυσμού περιοχές όπου η ηλεκτροδότηση, από το ηλεκτρικό δίκτυο, δεν είναι δυνατή λόγω του μεγάλου κόστους που απαιτείται.

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, περισσότεροι από 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε χωριά τα οποία δεν έχουν συνδεθεί ακόμα με τις γραμμές μετάδοσης. Τα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν στην ικανοποίηση των αναγκών των απομονωμένων αυτών περιοχών. Ειδικότερα στη χώρα μας, η οποία παρουσιάζει μεγάλο αιολικό και ηλιακό δυναμικό, η ανάπτυξη των αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να λύσει το ενεργειακό πρόβλημα πολλών απομονωμένων νησιών, στα οποία η μεταφορά ενέργειας είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν πηγές μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της μεταβλητότητας που παρουσιάζουν οι φυσικοί πόροι σε μικρά χρονικά διαστήματα. Για αυτόν το λόγο δημιουργούνται τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία συνδυάζουν τα προτερήματα διαφορετικών πηγών. Αξιοποιούν, για παράδειγμα, διαφορετικές μορφές της φθηνής ανανεώσιμης ενέργειας και συμπληρώνουν την έλλειψή της, με συμβατικές πηγές όταν αυτή βρίσκεται σε έλλειψη.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η βελτιστοποίηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πλαίσια, νηξελογεννήτριες και συσσωρευτές, με τη χρήση της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού. Στην πραγματικότητα δημιουργείται ένα απλοποιημένο γραμμικό μοντέλο, το οποίο βασισμένο σε ορισμένες παραδοχές, απλοποιεί τις μη γραμμικές σχέσεις που διέπουν την παραγωγή και την λειτουργία του υβριδικού συστήματος παραγωγής, για την ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου. Επιπλέον, σκοπό της εργασίας αποτελεί και η διερεύνηση του κατά πόσο είναι εφικτή και ρεαλιστική μια τέτοια προσέγγιση. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το γραμμικό μοντέλο, γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν με τη χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης μοντέλων χρονοσειρών, του HOMER.

### 1.3 Δομή εργασίας

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή των κεφαλαίων της εργασίας:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται αναλυτικά τα συστατικά από τα οποία αποτελείται το αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πλαίσια, νηξελογεννήτρια και συσσωρευτές).

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι τρόποι βελτιστοποίησης και αναλύεται η μέθοδος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές οικονομοτεχνικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του συστήματος.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι αυτόνομων συστημάτων. Επιπλέον παρουσιάζεται ο τρόπος μοντελοποίησης του υβριδικού συστήματος για τη δημιουργία του γραμμικού μοντέλου.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του γραμμικού μοντέλου (Solver του Microsoft Excel) καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης χρονοσειρών, HOMER καθώς και ο τρόπος μοντελοποίησης του υβριδικού συστήματος σε αυτό. Ακόμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται οι συγκρίσεις ανάμεσα στις δύο μεθόδους που αναπτύχθηκαν, όσον αφορά τον τρόπο μοντελοποίησης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Τέλος παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.1 Αιολική ενέργεια

Η κινητική ενέργεια του ανέμου αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική πηγή ενέργειας, η οποία ονομάζεται «αιολική ενέργεια». Η αιολική ενέργεια ανήκει στις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεδομένου ότι αφενός δε ρυπαίνει το περιβάλλον και αφετέρου είναι θεωρητικά ανεξάντλητη, και αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη συνιστώσα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος.

Η αιολική ενέργεια προέρχεται από μετατροπή ενός μικρού ποσοστού της ηλιακής ενέργειας, που φθάνει στην ατμόσφαιρα του πλανήτη μας, σε κινητική ενέργεια του ανέμου. Η ισχύς του ανέμου σε ολόκληρο τον πλανήτη εκτιμάται σε  $3,6 \times 10^8$  MW, ενώ σύμφωνα με εκτιμήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας, ποσοστό περίπου 5% της αιολικής ενέργειας, που ανέρχεται σε  $175 \times 10^{12}$  kWh ετησίως, είναι διαθέσιμο για ενεργειακή αξιοποίηση σε διάφορα μέρη του κόσμου.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, ιδιαίτερα μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις και λόγω των οξυμένων περιβαλλοντικών προβλημάτων, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η αιολική ενέργεια αποτελεί την πλέον συμφέρουσα, από τεchnοοικονομικής πλευράς, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, δεδομένου ότι το κόστος παραγωγής της αιολικής kWh συναγωνίζεται το κόστος της συμβατικής kWh, χωρίς μάλιστα να συμπεριληφθεί το κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος από την συμβατική παραγωγή ενέργειας.

Αν και οι ισχυρισμοί αρκετών επιστημόνων, πως η αιολική ενέργεια μπορεί να επιλύσει τα ενεργειακά προβλήματα μιας χώρας, μπορούν να χαρακτηρισθούν υπερβολικοί, είναι τελείως ρεαλιστική η εκτίμηση πως η σωστή αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας θα βελτιώσει την παγκόσμια ενεργειακή ισορροπία, ενώ όσον αφορά τη χώρα μας θα «ανακουφίσει» σημαντικά το πλήρως εξαρτώμενο από εισαγόμενα καύσιμα ενεργειακό ισοζύγιο της, χωρίς ταυτόχρονα να επιβαρύνει με πρόσθετους ρύπους το ήδη βεβαρημένο περιβάλλον μας.

### 2.1.1 Ταχύτητα ανέμου

Οι άνεμοι προκαλούνται κυρίως από τις διαφορές θερμοκρασίας εντός της ατμόσφαιρας, οι οποίες προκαλούνται από τη διαφορά του γεωγραφικού πλάτους και τη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους.

Η κίνηση του ανέμου ακολουθεί τους νόμους της μηχανικής των ρευστών, οι οποίοι διέπουν τη τυρβώδη ροή συνεκτικού ρευστού. Συνεπώς η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος το οποίο παρουσιάζει διακυμάνσεις σε μικρά ή μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακολουθώντας την ανάλυση για τυρβώδη πεδία ροής η στιγμιαία ταχύτητα γράφεται σαν άθροισμα της μέσης ταχύτητας του ανέμου  $\bar{V}$  και μίας διακύμανσης  $V'(t)$ :

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (2.1)$$

Ενώ η μέση ταχύτητα του νέμου σε μια χρονική περίοδο  $T$  δίνεται από:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} V'(t') d't \quad (2.2)$$

Το μέτρο και η κατεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς, για αυτό το λόγο ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή και κατ' επέκταση της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας βασίζεται σε χρονοσειρές μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους. Για να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα συνήθως χρειάζονται στοιχεία άνω των 3 ή και 5 ετών.

Από τη μελέτη μεγάλου αριθμού χρονοσειρών μέσων ωριαίων τιμών της ταχύτητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα προέκυψε πως η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100 μέτρα. Η κατανομή αυτή προσδιορίζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή της ταχύτητας  $V$  βάσει δύο μόνο παραμέτρων. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας όταν ακολουθεί την κατανομή Weibull δίνεται:

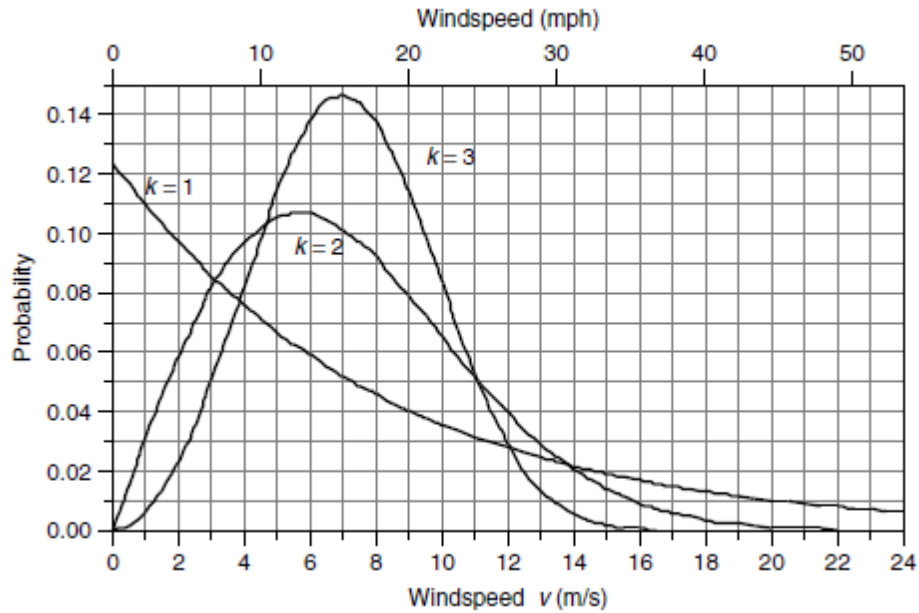
$$f(V) = p(V) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{V}{c} \right]^k \right\} \quad (2.3)$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου,  $c$  η παράμετρος κλίμακας ταχύτητας και  $k$  η παράμετρος μορφής.

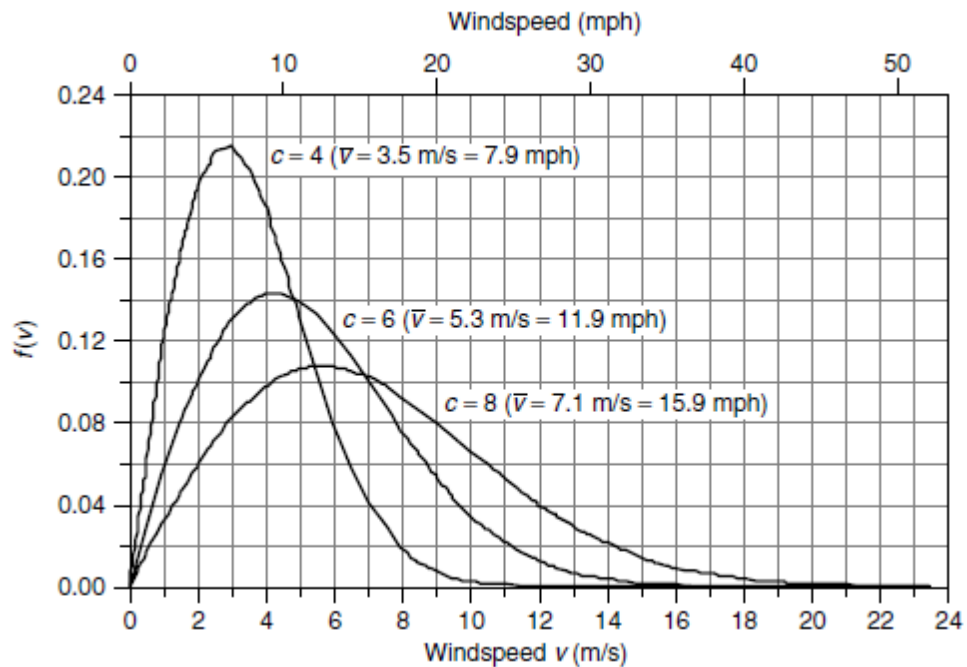
Εκτός της κατανομής Weibull συχνά χρησιμοποιείται μία ειδική μορφή της κατανομής αυτής, η κατανομή Rayleigh η οποία προκύπτει όταν η παράμετρος  $k$  ληφθεί ίση

με 2. Έτσι απλοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις και για τον προσδιορισμό της κατανομής χρειάζεται μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή:

$$f(V) = p(V) = \frac{2 \cdot V}{c^2} \cdot \exp \left\{ - \left[ \frac{V}{c} \right]^2 \right\} \quad (2.4)$$



**Σχήμα 2.1:** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Weibull με  $c=8$  και  $k=1, 2, 3$ .



**Σχήμα 2.2:** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κατανομής Rayleigh για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $c$ .

### 2.1.2 Ισχύς ανέμου

Θεωρώντας ένα δεδομένο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα μάζας  $m$  ο οποίος κινείται με ταχύτητα  $V$ , η κινητική του ενέργεια θα δίνεται από τη σχέση:

$$E_K = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.4)$$

Η ισχύς  $P$  του ανέμου ισούται με την κινητική ενέργεια του δεδομένου όγκου, ανά μονάδα χρόνου. Άρα η ισχύς της μάζας  $m$  ατμοσφαιρικού αέρα που κινείται με ταχύτητα  $V$  και διέρχεται από μία επιφάνεια εμβαδού  $A$  είναι:

$$P = \frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} V^2 \quad (2.5)$$

Όμως το μέγεθος μάζα ανά μονάδα χρόνου εκφράζει την παροχή μάζας η οποία ισούται με:

$$\frac{m}{t} = \dot{m} = \rho A V \quad (2.6)$$

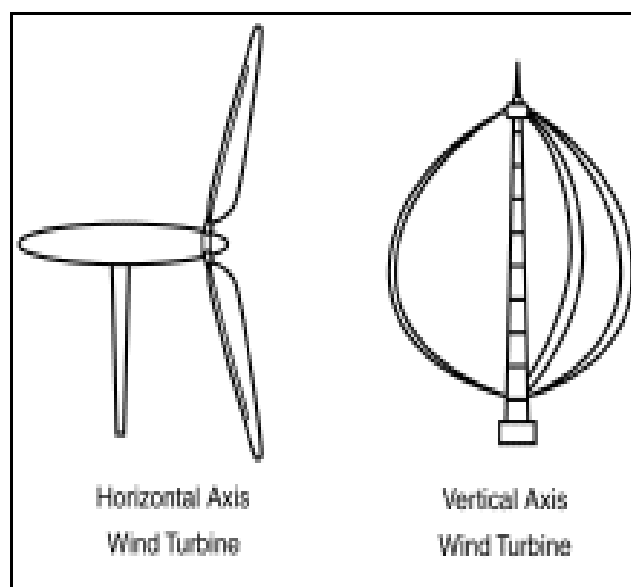
όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ανέμου.

Συνεπώς η ισχύς του ανέμου προκύπτει από συνδυασμό των σχέσεων (2.5) και (2.6) και είναι ίση με:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.7)$$

### 2.1.3 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν δύο κατηγορίες ανεμογεννητριών, οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε: Α/Γ οριζόντιου άξονα και Α/Γ κατακόρυφου άξονα (Σχήμα 2.3). Η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα και αυτή κυρίως αναπτύσσεται σήμερα.



**Σχήμα 2.3:** Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα.

Τα κύρια συστατικά μιας ανεμογεννήτριας είναι ο δρομέας, η γεννήτρια, το σύστημα διεύθυνσης, το σύστημα προστασίας και ο πυλώνας στήριξης.

**Δρομέας:** Ο δρομέας συλλέγει την ενέργεια του ανέμου. Αποτελείται συνήθως από δύο ή περισσότερες πτέρυγες, από φάϊμπεργκλας ή μεταλλικές, που περιστρέφονται γύρω από ένα άξονα (οριζόντιο ή κάθετο) σε ένα ποσοστό που καθορίζεται από την ταχύτητα του αέρα και τη μορφή των πτερύγων. Οι πτέρυγες είναι συνδεδεμένες με την πλήμνη, η οποία είναι στη συνέχεια συνδεδεμένη με τον κύριο άξονα, ο οποίος προκαλεί τη περιστροφή της γεννήτριας.

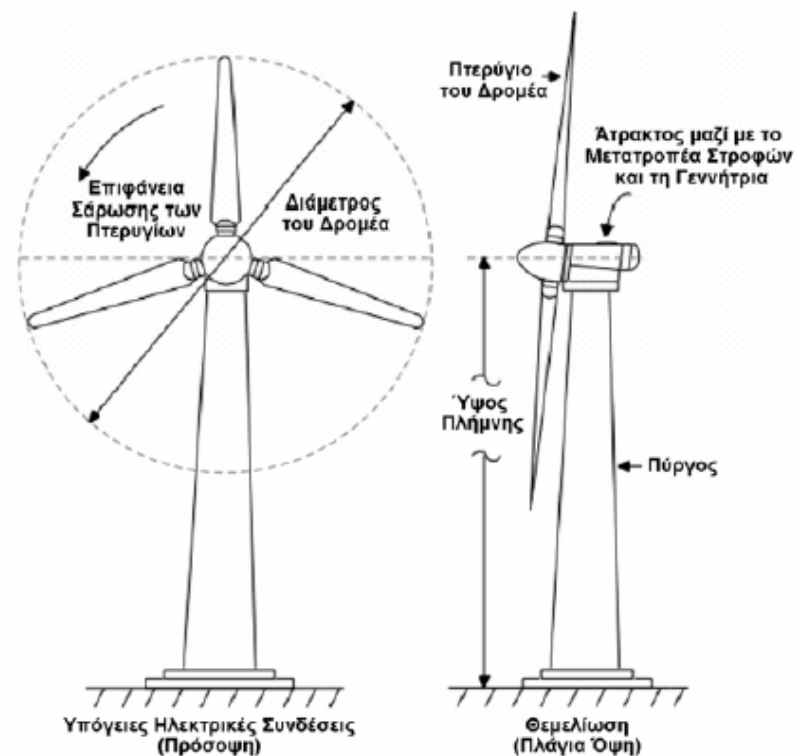
**Γεννήτριες:** Η γεννήτρια μετατρέπει τη κίνηση των πτερύγων της ανεμογεννήτριας σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν τρεις τύποι γεννητριών: οι ασύγχρονες, οι σύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος.

**Σύστημα διεύθυνσης:** Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα απαιτούν ένα μηχανισμό ο οποίος έχει τη δυνατότητα να τις φέρει σε τέτοια θέση ώστε το επίπεδο που σαρώνει ο δρομέας να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν έναν τέτοιο μηχανισμό στο ουραίο τμήμα, ενώ οι μεγάλες έχουν συνήθως έναν σερβοκινητήρα, ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και τις προσανατολίζει με τέτοιο τρόπο, ώστε να παράγουν τη μέγιστη ισχύ σχεδιασμού τους.

**Σύστημα προστασίας:** Οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με ένα ηλεκτρονικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου το οποίο λαμβάνοντας υπόψη τις ενδείξεις του ανεμομέτρου και τις προδιαγραφές της ανεμογεννήτριας τις ενεργοποιεί ή τις θέτει εκτός λειτουργίας ώστε να μην υποστούν κάποια πιθανή βλάβη από υπερβολικά υψηλούς ανέμους. Σε μικρότερες

μηχανές υπάρχει μεταβολή του προσανατολισμού των πτερύγων με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρεται μικρότερη επιφάνεια προς τον άνεμο ή υπάρχει κάποιο σύστημα πέδησης, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής και κατά συνέπεια ο κίνδυνος ζημιάς.

**Πύργος στήριξης:** Ο πύργος στήριξης στον οποίο τοποθετείται μια ανεμογεννήτρια αποτελεί τη δομή υποστήριξης, για αυτό κατά την κατασκευή του λαμβάνονται υπ' όψη η μάζα που θα στηρίζει, οι καταπονήσεις που δέχεται από κάμψεις και στρέψεις καθώς και η αντοχή του σε φυσικές φθορές. Η απόφαση για το πιο θα είναι το ύψος του πύργου που θα χρησιμοποιηθεί βασίζεται στο κόστος των πιο ψηλών πύργων σε αντιπαράθεση με την αξία της αύξησης της ενεργειακής παραγωγής ως αποτέλεσμα της χρήσης τους. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι το προστιθέμενο κόστος του αυξανόμενου ύψους των πύργων δικαιολογείται συχνά από την επιπρόσθετη ενέργεια που παράγεται από τους ισχυρότερους ανέμους που υπάρχουν σε μεγαλύτερα ύψη. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες τοποθετούνται συνήθως σε πύργους που κυμαίνονται από 40 έως 70 μέτρα ύψος.



Σχήμα 2.4: Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

#### 2.1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών

Κατά το σχεδιασμό και την επιλογή μιας εγκατάστασης αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας οι παράγοντες, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και χαρακτηρίζουν μια ανεμογεννήτρια που πρόκειται να επιλεγεί είναι:

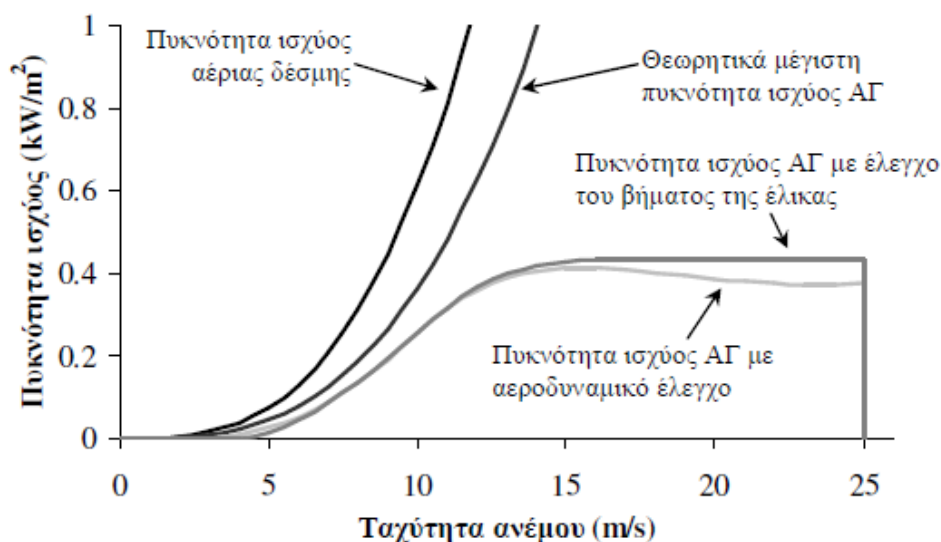
1. Η **διάμετρος**  $D$  της πτερωτής της ανεμογεννήτριας, η οποία καθορίζει το εμβαδόν το οποίο σαρώνει η πτερωτή και συνεπώς την ενεργό επιφάνεια διά μέσου της οποίας επιχειρούμε να αξιοποιήσουμε την αιολική ενέργεια. Εφόσον είναι γνωστή η απαιτούμενη ισχύς και έχοντας κάποιες εκτιμήσεις για τη μέση ροή ενέργειας μιας περιοχής, καθώς και για το ποσοστό το οποίο μπορούμε να αξιοποιήσουμε (σε  $W/m^2$ ) είναι δυνατός ο αρχικός προσδιορισμός της διαμέτρου της πτερωτής.
2. Το **ύψος τοποθέτησης**  $H$  για μηχανές οριζοντίου άξονα ή το ύψος του δρομέα για μηχανές κατακόρυφου άξονα. Αυξανόμενου του ύψους αυξάνεται το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, όμως αυξάνεται επίσης το βάρος και το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον υπάρχουν περιορισμοί ελάχιστου ύψους, που βασίζονται στο γεγονός ότι τα πτερύγια δεν πρέπει να βρίσκονται πολύ κοντά στο έδαφος, για να αποφεύγονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης του εδάφους.
3. Το **πλήθος των πτερυγίων**  $z$  της πτερωτής, το οποίο συνδέεται με τη στιβαρότητα της μηχανής. Στις σημερινές εφαρμογές χρησιμοποιούνται κατά κανόνα τριπτέρυγες ή διπτέρυγες πτερωτές.
4. Το **είδος των πτερυγίων** της πτερωτής, που περιλαμβάνει τον τύπο των πτερυγίων, το πάχος τους, τη συστοφή τους, καθώς και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους.
5. Η **ονομαστική ταχύτητα περιστροφής**  $n$  της πτερωτής, η οποία καθορίζεται από την αντοχή των πτερυγίων σε φυγοκεντρικές τάσεις και από τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, σε περιπτώσεις διασυνδεδεμένων μηχανών.
6. Ο **συντελεστής ισχύος**  $C_p$  της ανεμογεννήτριας αποτελεί στην πραγματικότητα το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εκμεταλλεύεται η πτερωτή της μηχανής. Ο συντελεστής  $C_p$  περιλαμβάνει όλες τις αεροδυναμικές απώλειες της ΑΓ και δεν είναι δυνατό να υπερβεί το όριο του Betz:  $C_p \leq \frac{16}{27} = 0.593$ . Στη πραγματικότητα, ο συντελεστής ισχύος είναι πάντα αρκετά μικρότερος του ορίου του Betz, λόγω της συνεκτικότητας του ανέμου, του πεπερασμένου αριθμού των πτερυγίων της πτερωτής και της απώλειας κινητικής ενέργειας, που δεν μετατρέπεται σε στατική πίεση λόγω της μη βέλτιστης σχεδίασης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.

### 2.1.5 Πραγματική ισχύς ανεμογεννήτριας

Εκτός από τις αεροδυναμικές απώλειες που περιλαμβάνονται στον συντελεστή  $C_p$ , υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που μειώνουν ακόμα περισσότερο την πραγματικά παραγόμενη ισχύ της ΑΓ  $P_{WT}$ :

1. Για μικρές ταχύτητες ανέμου η ΑΓ δεν περιστρέφεται, επειδή οι απώλειες κενού φορτίου (τριβές στον άξονα, μειωτήρα, κλπ) είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ της μηχανής. Η ταχύτητα στην οποία αρχίζει η λειτουργία της ΑΓ ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας  $V_{in}$ , με τυπικές τιμές από 2.5 m/s έως 5 m/s.

- Από μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και μετά, η ωφέλιμη ισχύς της ΑΓ παραμένει για λειτουργικούς λόγους περίπου σταθερή, με αποτέλεσμα να χάνεται ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του ανέμου, ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες (π.χ.,  $v > 12$  m/s). Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς από την ΑΓ ονομάζεται ονομαστική ισχύς  $P_R$ , ενώ η μικρότερη ταχύτητα του ανέμου στην οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς της ΑΓ ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας  $V_R$ . Η μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος  $P_R$  όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ορισμένη τιμή, μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικές αρχές ελέγχου: τον αεροδυναμικό έλεγχο και τον έλεγχο του βήματος της έλικας. Στον αεροδυναμικό έλεγχο, η παραγωγή ισχύος καθορίζεται από τις εγγενείς αεροδυναμικές ιδιότητες του πτερυγίου, και δεν υπάρχει κανένα κινούμενο μέρος που να ρυθμίζεται. Στον έλεγχο βήματος της έλικας, η γωνία των πτερυγίων του δρομέα μπορεί να ρυθμίζεται ενεργά από το σύστημα ελέγχου της μηχανής. Ο αεροδυναμικός έλεγχος εφαρμόζεται κυρίως στις μικρού μεγέθους ΑΓ λόγω της απλότητάς του, ενώ ο έλεγχος βήματος της έλικας εφαρμόζεται κυρίως στις μεσαίου και μεγάλου μεγέθους ΑΓ λόγω της καλύτερης ποιότητας ισχύος που προσφέρει, η οποία συνδυάζεται με μικρότερες μηχανικές καταπονήσεις των πτερυγίων.
- Σε πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για λόγους ασφάλειας της εγκατάστασης, επιβάλλεται η διακοπή λειτουργίας της ΑΓ. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας  $V_{out}$  κυμαίνεται μεταξύ 20 m/s για μικρές μηχανές έως και 30 m/s για ιδιαίτερα στιβαρές κατασκευές.
- Κατά τη λειτουργία της ΑΓ χρειάζεται να αφαιρεθούν οι μηχανικές απώλειες στον άξονα και το μειωτήρα, καθώς και οι ηλεκτρικές απώλειες της γεννήτριας, πριν τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος  $P_{WT}$ . Οι ηλεκτρομηχανολογικές απώλειες είναι σχετικά περιορισμένες, και κυμαίνονται ανάμεσα στο 3% και το 10% της ισχύος αέριας δέσμης  $P_{air}$ .



Σχήμα 2.5: Σύγκριση πυκνότητας ισχύος αέριας δέσμης και ΑΓ.

Η συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου  $V$  και της πραγματικά παραγόμενης ισχύος  $P_{WT}$  από μια ΑΓ δίνεται από την καμπύλη ισχύος της ΑΓ. Στο Σχήμα 2.5 συγκρίνεται η πυκνότητα ισχύος (σε  $\text{kW/m}^2$ ) της αέριας δέσμης σε σχέση με τη θεωρητικά μέγιστη πυκνότητα ισχύος μιας ΑΓ (για  $C_P = C_{Pmax}$ ), καθώς και με την πυκνότητα ισχύος που προκύπτει από πραγματικές καμπύλες ισχύος ΑΓ με αεροδυναμικό έλεγχο και με έλεγχο βήματος.

Η ταχύτητα του ανέμου όπως προαναφέρθηκε αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις, για αυτό η ταχύτητα του ανέμου χρειάζεται να τροποποιηθεί κατάλληλα. Για το σκοπό αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο εξισώσεις: ο **εκθετικός νόμος** και ο **λογαριθμικός νόμος**. Ο εκθετικός νόμος εμφανίζει ικανοποιητική ακρίβεια για ύψη έως 100 m και υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου  $V$  στο ύψος πλήμνης της ΑΓ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V = V_0 \left[ \frac{H}{H_0} \right]^a \quad (2.8)$$

όπου  $V_0$  το μέτρο της ταχύτητας σε ύψος  $H_0$  και  $a$  μία παράμετρος, της οποίας η ακριβής τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της παραμέτρου  $a$  κυμαίνονται κατά κανόνα από 0,08 για παγωμένες επιφάνειες ως και 0,45 για μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια.

Αρα η μορφή που παίρνει η καμπύλη της ισχύος της ΑΓ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου φαίνεται στο σχήμα και μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις διακριτές περιοχές και μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$P_W = \begin{cases} 0 & \text{για } V < V_{in} \\ f_{WT}(V) & \text{για } V_{in} < V < V_r \\ P_r & \text{για } V_r < V < V_{out} \\ 0 & \text{για } V > V_{out} \end{cases} \quad (2.9)$$

όπου  $P_r$  η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας, η οποία έχει θεωρηθεί ίση με:

$$P_r = 30 \text{ kW} \quad (2.10)$$

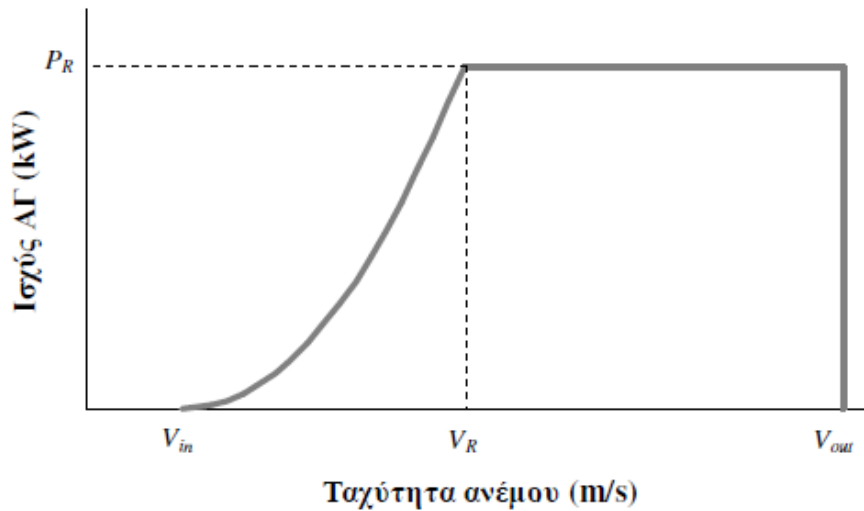
Ο όρος  $f_{WT}(V)$  αντιπροσωπεύει μια συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου  $V$ . Εάν είναι γνωστές οι παράμετροι  $V_{in}$ ,  $V_R$  και  $P_R$ , η τιμή της συνάρτησης  $f_{WT}(V)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{WT}(V) = a_{WT} \cdot V^3 - b_{WT} \cdot P_r \quad (2.11)$$

όπου  $a_{WT}$ , και  $b_{WT}$  είναι συντελεστές της καμπύλης ισχύος της ΑΓ, των οποίων οι τιμές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_{WT} = \frac{P_r}{V_r^3 - V_{in}^3} \quad (2.12)$$

$$b_{WT} = \frac{V_{in}^3}{V_r^3 - V_{in}^3} \quad (2.13)$$



Σχήμα 2.6: Καμπύλη ισχύος Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.

## 2.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα

### 2.2.1 Ηλιακό φάσμα

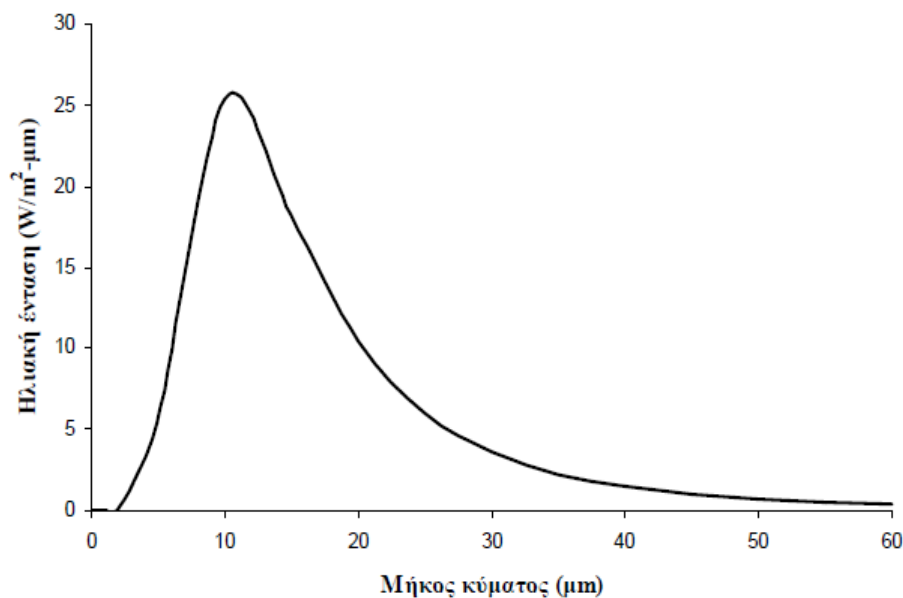
Η πηγή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο ήλιος, ο οποίος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένας γιγάντιος θερμοπυρηνικός λέβητας που τήκει άτομα υδρογόνου σε ήλιο. Η προκύπτουσα απώλεια μάζας μετατρέπεται σε περίπου  $3,8 \times 10^{20}$  MW ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ακτινοβολείται από την εξωτερική του ενέργεια στο διάστημα.

Κάθε αντικείμενο εκπέμπει ακτινοβολούμενη ενέργεια σε ποσότητα που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του. Ο συνηθής τρόπος για να περιγραφεί πόση ακτινοβολία εκπέμπει ένα σώμα είναι με σύγκρισή της με το μέλαν σώμα. Το μέλαν σώμα ορίζεται ως ένας τέλειος εκπομπός και επίσης ως ένας τέλειος απορροφητής. Σαν ένας τέλειος εκπομπός, ακτινοβολεί περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας από οποιοδήποτε πραγματικό αντικείμενο στην ίδια θερμοκρασία. Σαν ένας τέλειος απορροφητής, απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του, δηλαδή μηδενική ακτινοβολία ανακλάται και μηδενική ακτινοβολία μεταφέρεται μέσα του. Τα μήκη κύματος που εκπέμπονται από ένα

μέλαν σώμα εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του, όπως περιγράφεται από το νόμο του Planck:

$$E_{\lambda} = \frac{3,74 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left[ e^{\frac{14400}{\lambda \cdot T}} - 1 \right]} \quad (2.14)$$

όπου  $E_{\lambda}$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του μέλανος σώματος ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ ),  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος ( $^{\circ}\text{K}$ ), και  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ ).



**Σχήμα 2.7:** Εκπεμπόμενη ισχύς φάσματος μελανός σώματος θερμοκρασίας  $288^{\circ}\text{K}$ .

Αν μοντελοποιηθεί η γη σαν ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας  $288^{\circ}\text{K}$  ( $15^{\circ}\text{C}$ ) τότε από τον νόμο του Planck, προκύπτει το φάσμα εκπομπής του Σχήματος. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη Planck ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε μήκη κύματος είναι ίση με την εκπεμπόμενη ισχύ μεταξύ των δύο αυτών μηκών κύματος, οπότε η συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη είναι ίση με τη συνολική εκπεμπόμενη ισχύ φάσματος. Αυτή η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς φάσματος υπολογίζεται από το νόμο ακτινοβολίας Stefan-Boltzmann:

$$E = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.15)$$

όπου  $E$  είναι ο συνολικός ρυθμός εκπομπής του μέλανος σώματος ( $\text{W}$ ),  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann με  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του μέλανος σώματος ( $^{\circ}\text{K}$ ), και  $A$  είναι η επιφάνεια του μέλανος σώματος ( $\text{m}^2$ ).

Ακόμα ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της καμπύλης εκπομπής του μέλανος σώματος δίνεται από τον κανόνα μετατόπισης του Wien, σύμφωνα με τον οποίο το μήκος κύματος στο οποίο το φάσμα εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.16)$$

όπου  $\lambda_{max}$  το μήκος κύματος είναι σε μm και η θερμοκρασία  $T$  είναι σε  $^{\circ}\text{K}$ .

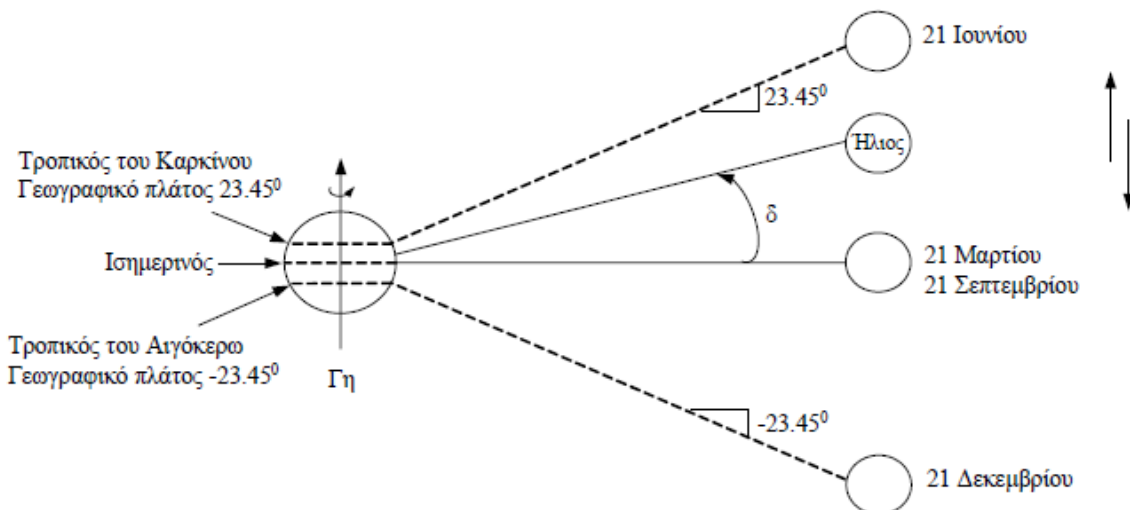
## 2.2.2 Γωνία ύψους του ηλίου

Ο ήλιος ανατέλλει στην ανατολή, δύει στη δύση και φτάνει στο ψηλότερο σημείο του το μεσημέρι. Σε πολλές περιπτώσεις είναι πολύ χρήσιμο να γνωρίζουμε, να μπορούμε να προβλέπουμε τη θέση του ήλιου στον ουρανό κάθε χρονική στιγμή, σε κάθε μέρος της γης και για κάθε μέρα του έτους. Γνωρίζοντας την πληροφορία αυτή μπορούμε, για παράδειγμα, να επιλέξουμε την καλύτερη γωνία κλίσης για τα φωτοβολταϊκά μας πλαίσια έτσι ώστε να εκτίθενται στη μεγαλύτερη δυνατή ακτινοβολία.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ισημερινού και της ευθείας γραμμής που ενώνει το κέντρο του ήλιου με το κέντρο της γης ονομάζεται ηλιακή απόκλιση,  $\delta$ . Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται από  $-23,45^{\circ}$  έως  $23,45^{\circ}$ , και προσεγγίζεται με πολύ καλή ακρίβεια από μια ημιτονοειδή συνάρτηση που υποθέτει έτος 365 ημερών και που τοποθετεί την εαρινή ισημερία τη μέρα  $n = 81$ , δηλ:

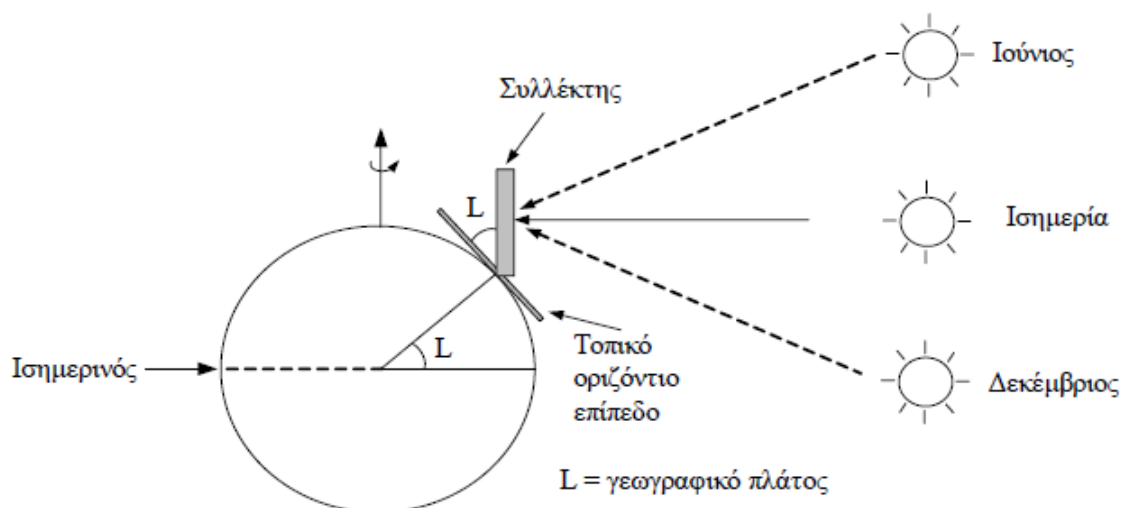
$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[ \frac{360 \cdot (n - 1)}{365} \right] \quad (2.17)$$

Το Σχήμα 2.8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί ποια μπορεί να είναι μία καλή γωνία κλίσης για ένα ηλιακό συλλέκτη.



**Σχήμα 2.8:** Εναλλακτική όψη, όπου η γη είναι σταθερή και ο ήλιος κινείται πάνω και κάτω

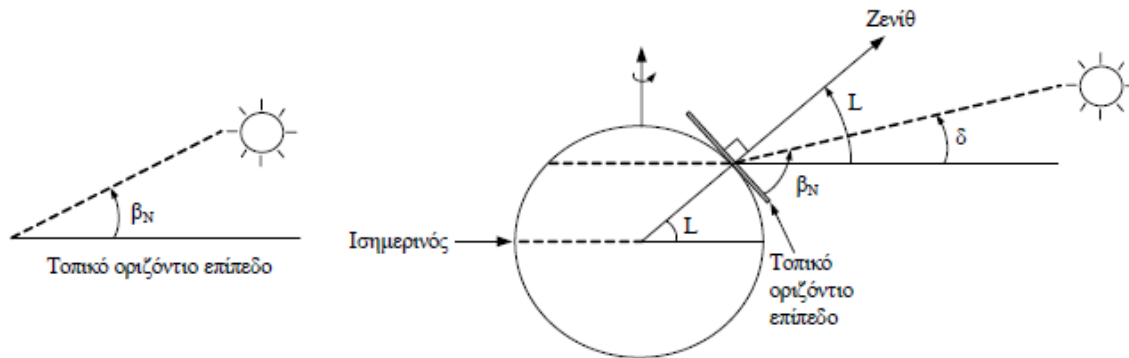
Στο Σχήμα 2.9 φαίνεται ένας ηλιακός συλλέκτης με νότιο προσανατολισμό στην επιφάνεια της γης τοποθετημένος σε γωνία ίση με τοπικό γεωγραφικό πλάτος,  $L$ . Με αυτή τη γωνία κλίσης ο συλλέκτης είναι παράλληλος με τον άξονα της γης. Κατά τη διάρκεια μίας ισημερίας, το ηλιακό μεσημέρι, όταν ο ήλιος πέφτει απευθείας πάνω στον τοπικό μεσημβρινό (γραμμή του γεωγραφικού πλάτους), οι ακτίνες του ήλιου θα προσπίπτουν στο συλλέκτη με την καλύτερη δυνατή γωνία, δηλαδή θα είναι κάθετες στην επιφάνεια του συλλέκτη. Στις άλλες περιόδους του έτους ο ήλιος είναι λίγο χαμηλά ή λίγο ψηλά για κανονική πρόσπτωση, αλλά κατά μέσω όρο η γωνία  $L$  φαίνεται να είναι μια καλή γωνία κλίσης.



**Σχήμα 2.9:** Ένας ηλιακός συλλέκτης με νότιο προσανατολισμό τοποθετημένος σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος είναι κάθετος στις ακτίνες του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι κατά τις ισημερίες.

Μία καλή εμπειρική μέθοδος είναι να τοποθετείται ο συλλέκτης προς τον ισημερινό (για το Βόρειο Ημισφαίριο, αυτό σημαίνει να τοποθετείται ο συλλέκτης με νότιο προσανατολισμό) και με γωνία κλίσης ίση με το τοπικό γεωγραφικό πλάτος, διότι έτσι εξασφαλίζεται μία καλή ετήσια απόδοση. Βέβαια, αν είναι επιθυμητό ο συλλέκτης να έχει

καλύτερη απόδοση το χειμώνα, τότε χρειάζεται λίγο μεγαλύτερη γωνία, και αντίθετα για καλύτερη απόδοση το καλοκαίρι.



**Σχήμα 2.10:** Η γωνία ύψους του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι.

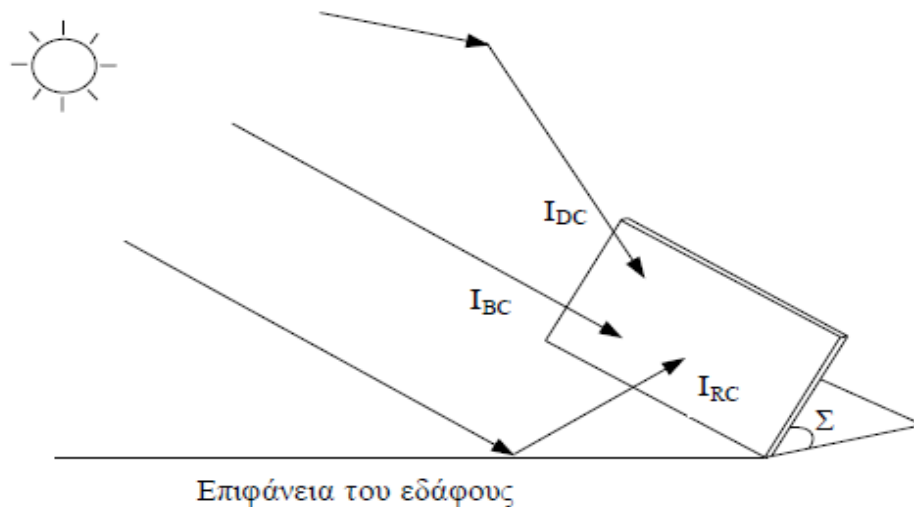
Έχοντας σχεδιάσει το σύστημα γης-ήλιου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10, είναι εύκολο να προσδιοριστεί μία πολύ σημαντική γωνία, η γωνία ύψους  $\beta_N$  του ήλιου το ηλιακό μεσημέρι. Η γωνία ύψους είναι η γωνία μεταξύ του ήλιου και του τοπικού οριζώντιου επιπέδου απευθείας κάτω από τον ήλιο. Από το Σχήμα προκύπτει η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της γωνίας ύψους  $\beta_N$  του ήλιου:

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (2.18)$$

όπου  $L$  το γεωγραφικό πλάτος και  $\delta$  η ηλιακή απόκλιση. Στο Σχήμα εισάγεται ο όρος του αζιμούθιου, ο οποίος αναφέρεται σε ένα άξονα κάθετο στο τοπικό οριζόντιο επίπεδο.

### 2.2.3 Ακτινοβολία ξάστερου ουρανού

Η ηλιακή ακτινοβολία,  $I_C$ , που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη θα είναι συνδυασμός απευθείας ακτινοβολίας,  $I_{BC}$ , που περνά σε ευθεία γραμμή μέσω της ατμόσφαιρας στο συλλέκτη, διάχυτης ακτινοβολίας,  $I_{DC}$ , που έχει διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα και ανακλώμενης ακτινοβολία,  $I_{RC}$ , που έχει αναπηδήσει από το έδαφος ή από άλλη επιφάνεια μπροστά από το συλλέκτη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



**Σχήμα 2.11:** Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη έχει ως συνιστώσες την απευθείας ακτινοβολία  $I_{BC}$ , τη διάχυτη  $I_{DC}$  και την ανακλώμενη ακτινοβολία  $I_{RC}$ .

Καθώς η ακτινοβολία περνά μέσα από την ατμόσφαιρα, ένα τμήμα της απορροφάται στην ατμόσφαιρα από διάφορα αέρια, ή διασκορπίζεται από μόρια αέρα. Στην πραγματικότητα, στη διάρκεια ενός έτους, λιγότερη από τη μισή ακτινοβολία που προσπίπτει στην κορυφή της ατμόσφαιρας φθάνει στην επιφάνεια της γης σαν απευθείας ακτινοβολία. Μία ξάστερη μέρα, όμως, με τον ήλιο ψηλά στον ουρανό, η απευθείας ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης μπορεί να ξεπεράσει το 70% της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας  $I_0$ , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_0 = SC \cdot \left[ 1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad (2.19)$$

όπου  $SC$  είναι η ηλιακή σταθερά που είναι ίση με  $1,377 \text{ kW/m}^2$  και  $n$  είναι ο αριθμός της μέρας.

Η εξασθένηση της εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι συνάρτηση της απόστασης που θα πρέπει να διανύσει η ακτινοβολία μέσα στην ατμόσφαιρα, η οποία υπολογίζεται εύκολα, καθώς και παραγόντων όπως η σκόνη, η μόλυνση του αέρα, η εξάτμιση των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, τα σύννεφα, και η θόλωση, που δεν είναι εύκολο να υπολογιστούν. Η εξασθένηση συνήθως μοντελοποιείται ως ακολούθως:

$$I_B = A \cdot e^{-q \cdot m} \quad (2.20)$$

όπου  $I_B$  είναι το τμήμα της ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη ( $\text{W/m}^2$ ),  $A$  είναι μια φαινόμενη εξωγήινη ροή ( $\text{W/m}^2$ ),  $q$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που ονομάζεται οπτικό βάθος, και  $AM$  είναι η αναλογία της μάζας του αέρα που υπολογίζεται ως εξής:

$$AM = \frac{1}{\sin \beta} \quad (2.21)$$

όπου  $\beta$  η γωνία ύψους του ήλιου. Η φαινόμενη εξωγήινη ροή  $A$  και το οπτικό βάθος  $q$  υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$A = 1160 + 75 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (n - 275) \right] \quad (2.22)$$

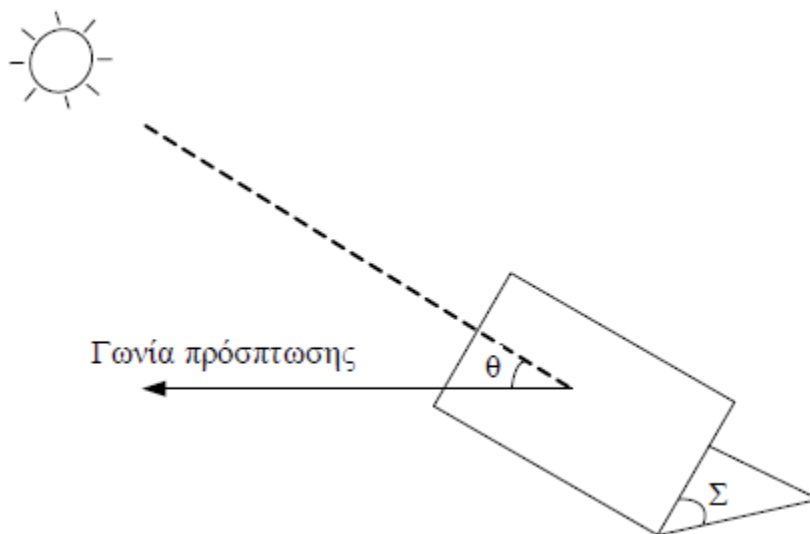
$$q = 0.174 + 0.035 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (n - 100) \right] \quad (2.23)$$

όπου  $n$  ο αριθμός της μέρας.

Η απευθείας ηλιακή ένταση στο συλλέκτη υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \quad (2.24)$$

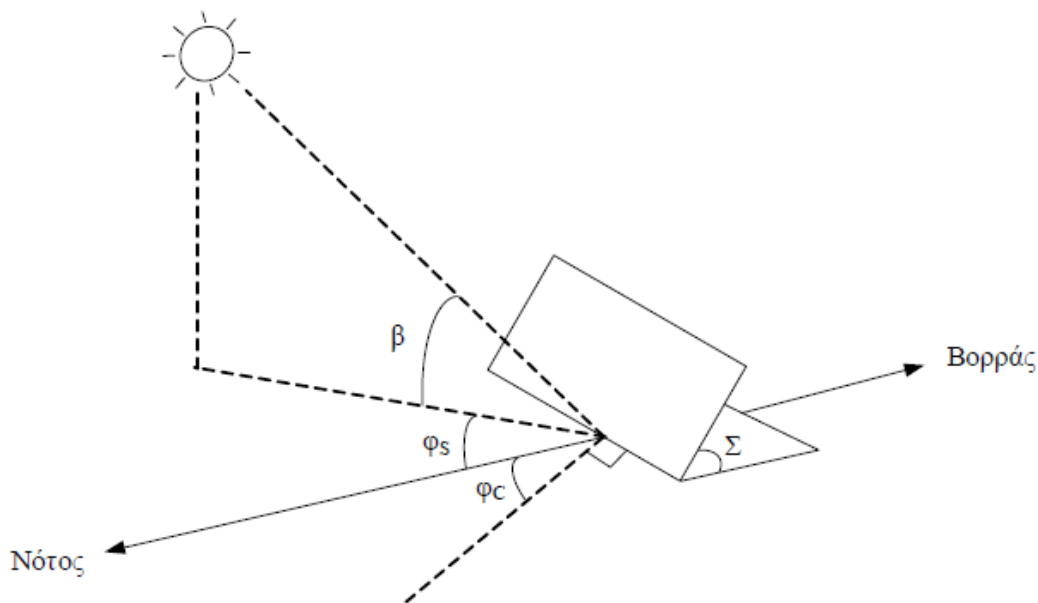
όπου  $I_{BC}$  η απευθείας ηλιακή ένταση που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη ( $\text{W/m}^2$ ),  $I_B$  η απευθείας ηλιακή ένταση μίας ξάστερης μέρας ( $\text{W/m}^2$ ), και  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της πρόσπτωσης του συλλέκτη και της διεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.12:** Γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  μεταξύ του συλλέκτη και της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta$  θα είναι συνάρτηση του προσανατολισμού του συλλέκτη και των γωνιών ύψους και αζιμούθιου του ήλιου κάθε χρονική στιγμή. Στο Σχήμα 2.13 φαίνονται οι σημαντικές αυτές γωνίες. Ο ηλιακός συλλέκτης τοποθετείται σε γωνία  $\Sigma$  και ατενίζει σε μία διεύθυνση που περιγράφεται από τη γωνία αζιμούθιου  $\varphi_C$  (μετρημένη ως προς το νότο, με θετικές τιμές στη νοτιοανατολική κατεύθυνση και αρνητικές τιμές στη νοτιοδυτική). Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \cos(\varphi_S - \varphi_C) \cdot \sin\Sigma + \sin\beta \cdot \cos\Sigma \quad (2.25)$$



**Σχήμα 2.13:** Γωνίες καθορισμού του προσανατολισμού του συλλέκτη ως προς την απευθείας προσπίπτουσα ηλιακή ένταση.

Η διάχυτη ηλιακή ένταση σε ένα συλλέκτη είναι πολύ πιο δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια από ότι η απευθείας ηλιακή ένταση. Η διάχυτη ηλιακή ένταση προκαλείται από διάφορους παράγοντες. Η εισερχόμενη ακτινοβολία μπορεί να διασκορπιστεί από σωματίδια της ατμόσφαιρας και σταγονίδια νερού, και μπορεί να ανακλαστεί από σύννεφα. Μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας ανακλάται από την επιφάνεια της γης πίσω στον ουρανό και διασκορπίζεται ξανά πίσω στη γη.

Η διάχυτη ηλιακή ένταση σε μία οριζόντια επιφάνεια,  $I_{DH}$ , είναι ανάλογη της απευθείας ηλιακής έντασης  $I_B$ :

$$I_{DH} = C \cdot I_B \quad (2.26)$$

όπου  $C$  ο συντελεστής διάχυσης του ουρανού ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = 0.095 + 0.04 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} \cdot (n - 100) \right] \quad (2.27)$$

Σε μία πλήρη μέρα με ξάστερο ουρανό προκύπτει ότι περίπου το 15% της συνολικής οριζόντιας ηλιακής έντασης μία ξάστερη μέρα θα είναι διάχυτη ηλιακή ένταση.

Είναι επιθυμητό να γνωρίζουμε πόση από αυτή την οριζόντια διάχυτη ηλιακή ένταση προσπίπτει στο συλλέκτη έτσι ώστε να την προσθέσουμε στην απευθείας ηλιακή ένταση. Σε μία πρώτη προσέγγιση υποθέτουμε ότι η διάχυτη ακτινοβολία φθάνει σε μία τοποθεσία με ίση ένταση από όλες τις κατευθύνσεις. Όταν η γωνία κλίσης του συλλέκτη  $\Sigma$  είναι μηδέν, δηλαδή ο συλλέκτης είναι σε οριζόντια θέση στη γη, τότε το πλαίσιο βλέπει όλο τον ουρανό και λαμβάνει ολόκληρη την οριζόντια διάχυτη ακτινοβολία  $I_{DH}$ . Όταν η γωνία κλίσης του συλλέκτη  $\Sigma$  είναι  $90^\circ$ , τότε το πλαίσιο βλέπει το μισό ουρανό και λαμβάνει τη μισή οριζόντια διάχυτη ακτινοβολία. Γενικά, όταν η γωνία κλίσης του συλλέκτη είναι  $\Sigma$ , η διάχυτη ηλιακή ένταση στο συλλέκτη,  $I_{DC}$ , δίνεται από τη σχέση:

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C \cdot I_B \cdot \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.28)$$

Η τελευταία συνιστώσα της ηλιακής έντασης που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη είναι η ακτινοβολία που ανακλάται από επιφάνειες μπροστά από το πλαίσιο. Αυτή η αντανάκλαση μπορεί να παρέχει μία σημαντική αύξηση στην απόδοση, όπως για παράδειγμα σε μία λαμπερή μέρα με χιόνι ή με νερό μπροστά από το συλλέκτη, ή μπορεί η αντανάκλαση να είναι τόσο μικρή ώστε ίσως να μπορεί να αγνοηθεί. Οι υποθέσεις που απαιτούνται για να μοντελοποιηθεί η ανακλώμενη ηλιακή ένταση είναι σημαντικές, και οι προκύπτουσες εκτιμήσεις είναι πολύ χονδρικές. Το απλούστερο μοντέλο υποθέτει μία μεγάλη οριζόντια επιφάνεια μπροστά από το συλλέκτη, με μία αντανάκλαση  $\rho$  που προκαλεί αναπήδηση στην ανακλώμενη ακτινοβολία με ίση ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις. Προφανώς, αυτή είναι μία πολύ απλοϊκή υπόθεση, ειδικά αν η επιφάνεια είναι λεία και φωτεινή.

Ο συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους  $\rho$  κυμαίνεται από 0,8 για φρέσκο χιόνι έως περίπου 0,1 για μία ασφαλτώδη και με αμμοχάλικο στέγη, με τυπική τιμή 0,2 για συνήθη επιφανειακό έδαφος ή γρασίδι. Η ανακλώμενη ηλιακή ένταση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως το γινόμενο της συνολικής οριζόντιας ηλιακής έντασης (απευθείας  $I_{BH}$ , και διάχυτης  $I_{DH}$ ) επί το συντελεστή αντανάκλασης του εδάφους  $\rho$ . Το τμήμα αυτής της οριζόντιας ανακλώμενης ηλιακής έντασης που θα αναχαιτίζεται από το συλλέκτη εξαρτάται από τη γωνία κλίσης  $\Sigma$  του συλλέκτη. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της ανακλώμενης ηλιακής έντασης στο συλλέκτη:

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.29)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της ανακλώμενης ηλιακής έντασης στο συλλέκτη:

$$I_{RC} = \rho \cdot I_B \cdot (\sin\beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos\Sigma}{2}\right) \quad (2.30)$$

Η συνολική ηλιακή ένταση στο συλλέκτη είναι ίση με το άθροισμα της απευθείας, της διάχυτης και της ανακλώμενης ηλιακής έντασης στο συλλέκτη:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC} \quad (2.31)$$

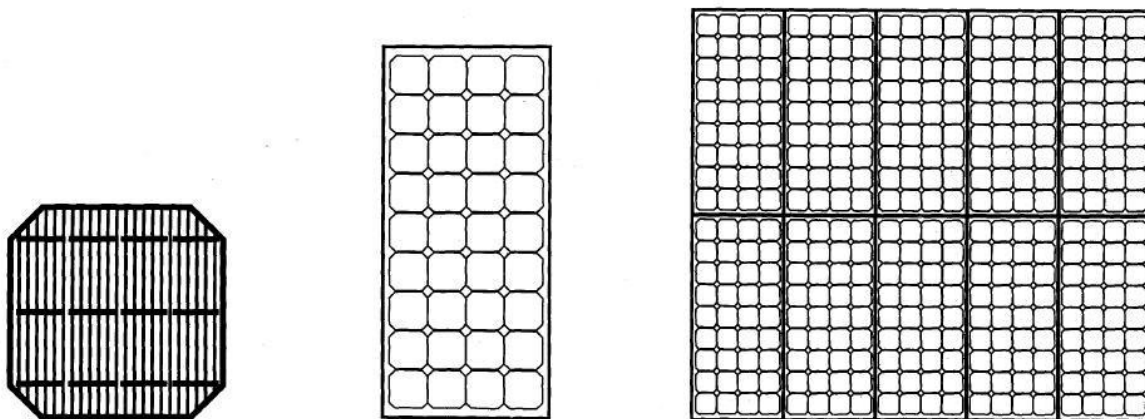
Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$I_C = A \cdot e^{-k \cdot m} \cdot \left[ \cos\beta \cdot \cos(\varphi_S - \varphi_C) \cdot \sin\Sigma + \sin\beta \cdot \cos\Sigma + C \cdot \left(\frac{1 + \cos\Sigma}{2}\right) + \rho \cdot (\sin\beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos\Sigma}{2}\right) \right] \quad (2.32)$$

## 2.2.4 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελούνται από διόδους ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου), οι οποίες καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, και το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές. Ο βαθμός απόδοσης ενός ΦΒ συστήματος σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να φτάσει έως 14%. Σε ένα ΦΒ σύστημα, η θεμελιώδης μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο.

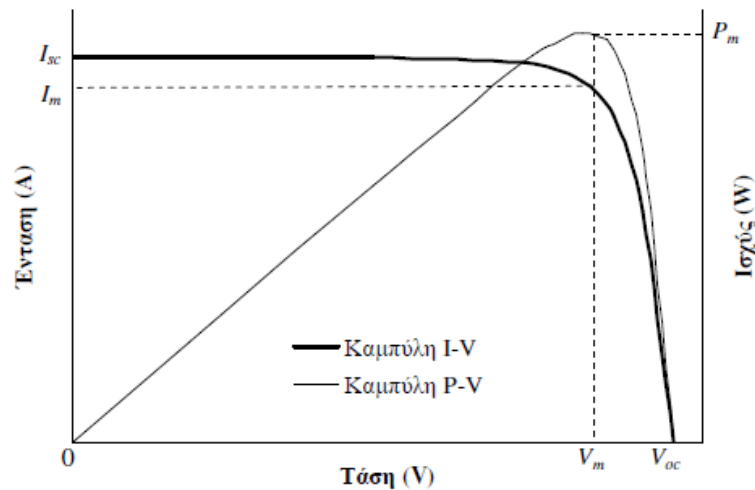
Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ενός ΦΒ στοιχείου βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 0.5 V και 0.6 V. Επειδή υπάρχουν ελάχιστες συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε τόσο χαμηλές τάσεις, τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα ΦΒ πλαίσια αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες ενός ΦΒ συστήματος, και αποτελούνται συνήθως από 36 ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Η ταξινόμηση των ΦΒ πλαισίων γίνεται ανάλογα με την ισχύ που αυτά αποδίδουν κάτω από τις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (ΠΣΔ), που αναφέρονται σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας 1 kW/m<sup>2</sup>, θερμοκρασία 25°C, και τιμή μάζας αέρα, η οποία σχετίζεται με το μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Η ισχύς εξόδου που μετράται υπό ΠΣΔ εκφράζεται σε "Watt αιχμής" ή W<sub>p</sub>. Ο συνδυασμός πολλών ΦΒ πλαισίων, σε σειρά ή παράλληλα, συνήθως σε μια επίπεδη επιφάνεια, αποτελεί τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στο σχήμα παρουσιάζεται η ιεραρχία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



**Σχήμα 2.14:** Η ιεραρχία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

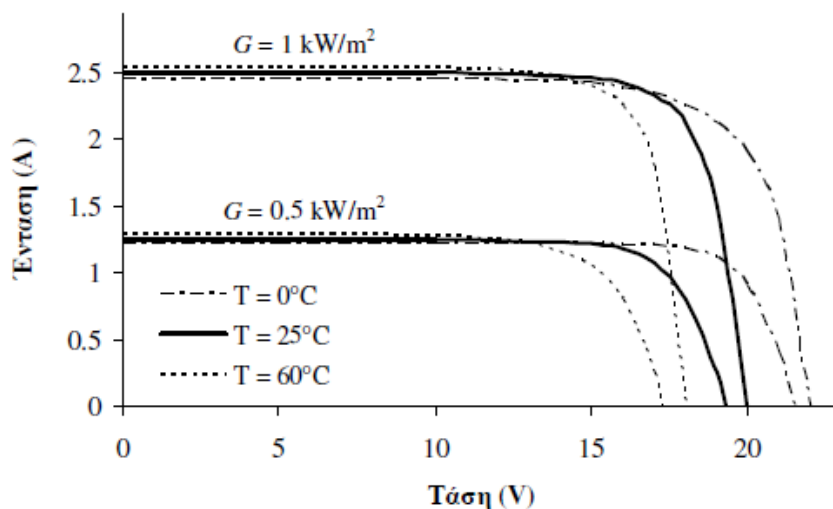
### 2.2.5 Καμπύλες I-V και P-V

Το ΦΒ στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές, οι οποίες διατηρούν σταθερή περίπου τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των ΦΒ στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, ακόμα και εάν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσης  $V$  σε συνάρτηση με την ένταση  $I$  ενός ΦΒ στοιχείου ορίζει την καμπύλη I-V. Στο Σχήμα απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη I-V για ένα ΦΒ στοιχείο πυριτίου, καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη P-V του ΦΒ στοιχείου που προκύπτει, όπου  $P$  είναι η ισχύς που αποδίδεται. Η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστή της τιμή  $I_{sc}$  και η τάση μηδενίζεται, σε κατάσταση βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου. Η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται, αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστή της τιμή  $V_{oc}$  Σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου. Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ισχύς  $P$  του ΦΒ στοιχείου μηδενίζεται. Στο υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης I-V, η ισχύς είναι μεγαλύτερη του μηδενός (αφού  $I > 0$  και  $V > 0$ ), επομένως υπάρχει ένα σημείο στη λειτουργία ενός ΦΒ στοιχείου στο οποίο η αποδιδόμενη ισχύς  $P$  μεγιστοποιείται. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς συμβολίζεται με  $P_m$  και αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης  $V_m$  και έντασης  $I_m$ . Η λειτουργία ενός ΦΒ συστήματος πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο μέγιστης ισχύος  $P_m$ , έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοσή του.



**Σχήμα 2.15:** Καμπύλες I-V και P-V ενός ΦΒ στοιχείου.

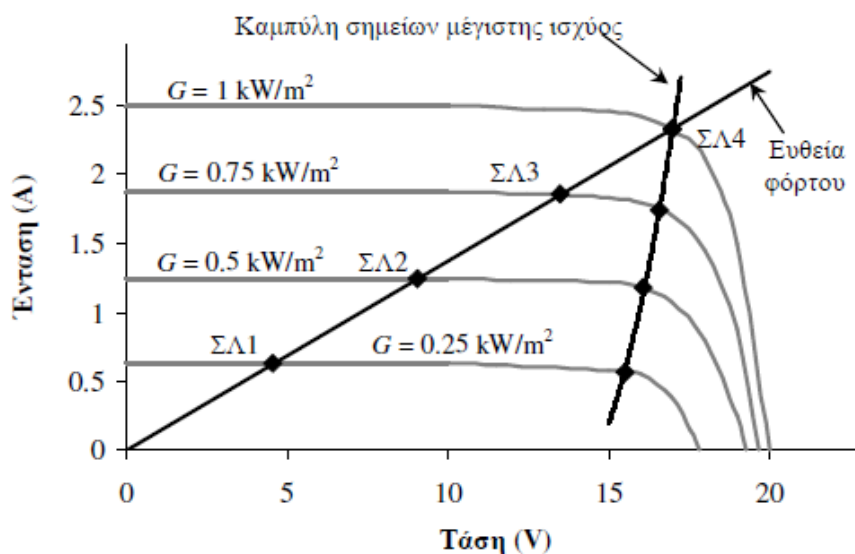
Οι καμπύλες I-V και P-V ενός ΦΒ πλαισίου έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτές που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 2.15 και αφορούν τα ΦΒ στοιχεία. Η μορφή των καμπυλών αυτών επηρεάζεται από μεταβολές στις συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 2.16 απεικονίζεται η εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός ΦΒ πλαισίου από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  και τη θερμοκρασία  $T$ . Παρατηρείται πως η ένταση βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ , ενώ και η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  επηρεάζεται αυξητικά με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση της θερμοκρασίας  $T$  παρατηρείται μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ , ενώ παρατηρείται αύξηση της έντασης βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , αν και είναι αρκετά μικρότερης τάξης μεγέθους, συγκριτικά με τη μεταβολή της τάσης.



**Σχήμα 2.16:** Εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός ΦΒ πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία.

Οι καμπύλες I-V ενός ΦΒ πλαισίου για διαφορετικές πυκνότητες ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ , καθώς επίσης και τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας (ΣΛ) του ΦΒ πλαισίου, που τροφοδοτεί μια σταθερή ωμική αντίσταση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.17. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η τάση  $V_m$  που αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης ισχύος δεν επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ . Αντίθετα, για δεδομένο ωμικό φορτίο και για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$ , η τιμή της τάσης  $V$  συνήθως αποκλίνει σημαντικά σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της  $V_m$ . Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, τα ΦΒ συστήματα συνεργάζονται με μια διάταξη που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος, η οποία διατηρεί το σημείο λειτουργίας του ΦΒ συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος υπό οποιεσδήποτε συνθήκες.

Στο Σχήμα 2.17 παρατηρείται επίσης, πως όταν αλλάζει η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα ΦΒ στοιχείο, που τροφοδοτεί μια ηλεκτρική αντίσταση, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. ΣΛ1, ΣΛ2, ΣΛ3 και ΣΛ4: τέσσερα σημεία λειτουργίας, αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το ΣΜΙ της I-V, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας  $E = 1 \text{ kW/m}^2$ .



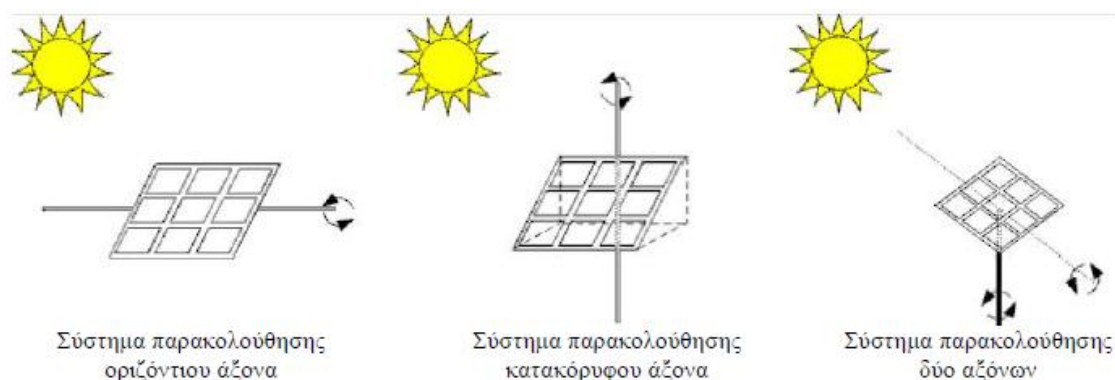
**Σχήμα 2.17:** Εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός ΦΒ πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και το σημείο λειτουργίας.

## 2.2.6 Προσανατολισμός συλλέκτη

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ΦΒ πλαίσια είναι μόνιμα στερεωμένα σε μια βάση που δεν μετακινείται. Επειδή τα ΦΒ στοιχεία βελτιστοποιούν την απόδοσή τους όταν οι ηλιακές ακτίνες είναι κάθετες σε αυτά, τα ΦΒ πλαίσια μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, τα οποία μετακινούν το ΦΒ πλαίσιο σε μια προκαθορισμένη τροχιά έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, και επομένως η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται. Τα συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. **Συστήματα παρακολούθησης οριζόντιου άξονα.** Στα συστήματα αυτά, τα ΦΒ πλαίσια παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου περιστρεφόμενα γύρω από έναν άξονα, ο οποίος είναι οριζόντιος και έχει συνήθως τη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης.
2. **Συστήματα παρακολούθησης κατακόρυφου άξονα.** Σε αυτά τα συστήματα, τα ΦΒ πλαίσια έχουν σταθερή κλίση και περιστρέφονται γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα.
3. **Συστήματα παρακολούθησης δύο αξόνων.** Σε αυτή την κατηγορία συστημάτων, η επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου τοποθετείται συνεχώς κάθετα στις ακτίνες του ήλιου, περιστρέφοντας το ΦΒ πλαίσιο γύρω από δύο άξονες.

Στο Σχήμα 2.18 απεικονίζονται σχηματικά οι τρεις τύποι συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Τα συστήματα αυτά αυξάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΦΒ συστοιχία, αλλά παράλληλα αυξάνουν το κόστος και τη διαδικασία συντήρησης. Για το λόγο αυτό, η εγκατάστασή τους δεν είναι πάντοτε συμφέρουσα, και πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 2.18: Λειτουργία συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου.

## 2.2.7 Ισχύς φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Η ισχύς εξόδου μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας  $P_{PV}$  (kW) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot P_{STC} \cdot \frac{G_T}{G_{STC}} \cdot (1 - (T_c - T_{STC}) \cdot C_T) \quad (2.33)$$

όπου  $f_{PV}$  είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών της ΦΒ συστοιχίας,  $P_{STC}$  είναι η ονομαστική ισχύς της ΦΒ συστοιχίας (σε kW<sub>p</sub>) κάτω από ΠΣΔ,  $G_T$  είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας (σε kW/m<sup>2</sup>),  $G_{STC}$  είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από ΠΣΔ (1 kW/m<sup>2</sup>),  $T_c$  είναι η θερμοκρασία σε °C των ΦΒ στοιχείων,  $T_{STC}$  η θερμοκρασία κάτω από ΠΣΔ (25°C), και  $C_T$  είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής των ΦΒ στοιχείων (/°C), ο οποίος δείχνει τον τρόπο που μεταβάλλεται η απόδοση του ΦΒ στοιχείου σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Στους περισσότερους τύπους ΦΒ στοιχείων παρατηρείται μείωση της απόδοσής τους όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται. Ο συνολικός συντελεστής απωλειών  $f_{PV}$  προσμετρά τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στην ονομαστική επίδοση και την πραγματική επίδοση ενός ΦΒ πλαισίου, και λαμβάνει υπόψη απώλειες όπως η κάλυψη του πλαισίου από σκόνη και η ηλικία του πλαισίου. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για το ΦΒ πλαίσιο είναι 0.90 λόγω κάλυψης του πλαισίου από σκόνη, 0.90 λόγω γήρανσης και 0.99 λόγω λοιπών απωλειών, επομένως η τιμή του  $f_{PV}$  που θεωρείται στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται ίση με 0.80, που είναι ίση με το γινόμενο των τριών παραπάνω συντελεστών. Η θερμοκρασία  $T_c$  μπορεί να υπολογιστεί από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα  $T_a$  (σε °C) και την πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  (σε kW/m<sup>2</sup>) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$T_c = T_a + \left( \frac{NOCT - 20^0}{0.8} \right) \cdot G \quad (2.34)$$

όπου  $NOCT$  είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου. Η  $NOCT$  αποτελεί τη συμβατική θερμοκρασία λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης, υπό πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 0.8 kW/m<sup>2</sup>, θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Τυπική τιμή της  $NOCT$  είναι οι 48°C.

## 2.3 Γεννήτριες

Μια γεννήτρια είναι μια συσκευή που καταναλώνει καύσιμο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις παράγει και θερμική ενέργεια. Στις γεννήτριες παρουσιάζεται το χαρακτηριστικό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τη ζήτηση, καθώς και εκείνο της γρήγορης απόκρισής τους στη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζεται στα απομονωμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες συνδυάζονται με μονάδες μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (π.χ., ΑΓ ή ΦΒ), έτσι ώστε να προσφέρουν εφεδρική ενέργεια στις περιόδους

όπου η παραγωγή ενέργειας των τεχνολογιών ΑΠΕ δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης. Στις γεννήτριες συμπεριλαμβάνονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου, και οι μικρογεννήτριες. Η ποικιλία καυσίμων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι μεγάλη, και περιλαμβάνει το πετρέλαιο (ντίζελ), τη βενζίνη, το φυσικό αέριο, το υδρογόνο, τη μεθανόλη, την αιθανόλη, το προπάνιο, το βιοντίζελ, και το βιοαέριο.

Η πιο συνηθισμένη πηγή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας είναι η νηζελογεννήτρια, που αποτελείται από μια ηλεκτρική γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος, που καθοδηγείται από μια παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης που ακολουθεί τον κύκλο του Diesel. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι συνήθως το πετρέλαιο, και τα μεγέθη των νηζελογεννητριών ποικίλουν ανάμεσα σε λίγα kW και το 1 MW. Για μεγέθη νηζελογεννητριών κάτω από 25 kW, διαδεδομένη λύση αποτελούν και οι μηχανές εσωτερικής καύσης με καύσιμο τη βενζίνη ή το προπάνιο. Οι μικρογεννήτριες έχουν γίνει εμπορικά διαθέσιμες τα τελευταία χρόνια και τα μεγέθη τους κυμαίνονται ανάμεσα στα 25 kW και τα 250 kW.

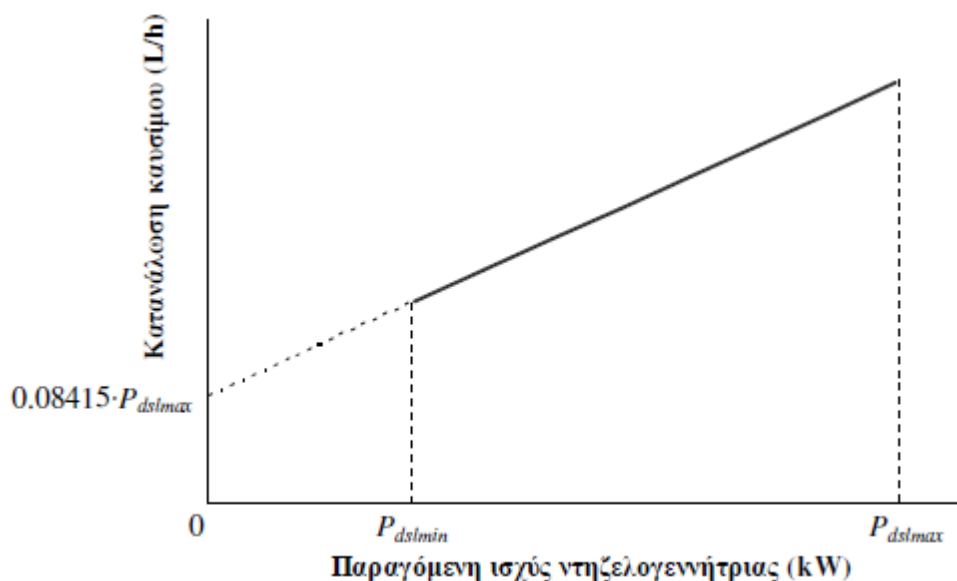
Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που μοντελοποιούνται σε μια γεννήτρια είναι η μέγιστη και ελάχιστη παραγόμενη ισχύς, ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείται και η καμπύλη κατανάλωσης, που σχετίζει την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Η κατανάλωση καυσίμου μιας γεννήτριας απαρτίζεται από δύο συνιστώσες: την πάγια κατανάλωση καυσίμου, η οποία καταναλώνεται σε συνθήκες μηδενικού φορτίου, και την οριακή κατανάλωση, η οποία εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ της γεννήτριας.

### 2.3.1 Γεννήτρια Diesel

Για τη μοντελοποίηση των νηζελογεννητριών γίνεται η θεώρηση ότι η κατανάλωση καυσίμου (πετρελαίου) είναι γραμμική συνάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, για να αποφευχθεί η πρόωρη φθορά του κινητήρα, η ελάχιστη παραγόμενη ισχύς μιας νηζελογεννήτριας  $P_{dslmin}$  τίθεται συνήθως ίση με το 30% της μέγιστης (ονομαστικής) ισχύος  $P_{dslmax}$ . Η κατανάλωση καυσίμου μιας νηζελογεννήτριας  $F_{dsl}$  (σε L/h) δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{dsl} = 0.08415 \cdot P_{dslmax} + 0.246 \cdot P_{dsl} \quad \text{για } P_{dslmin} \leq P_{dsl} \leq P_{dslmax} \quad (2.35)$$

όπου  $P_{dsl}$  είναι η ισχύς της νηζελογεννήτριας (σε kW). Στην παραπάνω σχέση ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την πάγια κατανάλωση καυσίμου και ο δεύτερος όρος την οριακή κατανάλωση του καυσίμου. Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζεται γραφικά η καμπύλη κατανάλωσης μιας νηζελογεννήτριας.



**Σχήμα 2.19:** Καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου diesel για μια νηζελογεννήτρια.

## 2.4 Συστήματα αποθήκευσης

Τα συστήματα αποθήκευσης συμβάλουν στη βελτίωση της λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς:

1. επιτρέπουν την ευσταθή λειτουργία του συστήματος, παρά την πιθανή, μεγάλη μεταβολή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με γρήγορους ρυθμούς.
2. παρέχουν ενέργεια τις περιόδους που κάποια μονάδα του συστήματος δεν είναι διαθέσιμη, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της νύχτας για ένα ΦΒ σύστημα, καθώς και στην περίπτωση που κάποια μονάδα συντηρείται ή επισκευάζεται.
3. επιτρέπουν σε μονάδες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (π.χ., ΑΓ ή ΦΒ), να προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τη ζήτηση, καθώς η ισχύς που αυτές παράγουν σε κάθε χρονική στιγμή μπορεί πλέον να διαφέρει από την ισχύ που διατίθεται στον καταναλωτή.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται ή αναμένεται να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον είναι οι συσσωρευτές, η αποθήκευση υδρογόνου, οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές. Η τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο στις μέρες μας, για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτή των συσσωρευτών.

### 2.4.1 Συσσωρευτές

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τις δυνατότητες ενός συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση στους πόλους του, που εκφράζεται με την έννοια της ΗλεκτρΕργετικής Δύναμης (ΗΕΔ) και η ονομαστική χωρητικότητα του,  $C$ . Η ΗΕΔ μετρείται σε Volt και ισούται με την πολική τάση του συσσωρευτή, όταν δεν είναι συνδεδεμένος σε καταναλωτή. Η χωρητικότητα,  $C$ , ενός συσσωρευτή αφορά το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του, με την μορφή χημικής ενέργειας, κάτω από ορισμένες συνθήκες, καθορισμένες κυρίως από την θερμοκρασία και εκφράζεται σε Ah (Αμπερώριο).

Στη βασική του μορφή, ένα στοιχείο ηλεκτρικού συσσωρευτή αποτελείται από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, συνήθως, με τη μορφή επίπεδων πλακών, εμβαπτισμένα σε ορισμένο διάλυμα ηλεκτρολύτη, ο οποίος αντιδρά επιφανειακά με τις πλάκες. Κατά το στάδιο της φόρτισης του, μια ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως, συνδέεται στα άκρα του και δημιουργεί στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο κινεί ευκίνητα ιόντα του ηλεκτρολύτη, προς τις αντίθετα πολωμένες πλάκες του συσσωρευτή (+ και -), όπου αποδίδουν το φορτίο τους. Αποτέλεσμα των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στα μεταλλικά ηλεκτρόδια, είναι η αλλοίωση της δομής τους, σε βάθος μερικών μικρών, μετατρεπόμενα σε νέα, διαφορετικά μεταξύ τους σώματα. Τα αλλοιωμένα ηλεκτρόδια εμφανίζουν διαφορετικά ηλεκτροχημικά δυναμικά ως προς το διάλυμα, η δε διαφορά τους ισούται με την ΗΕΔ του συσσωρευτή.

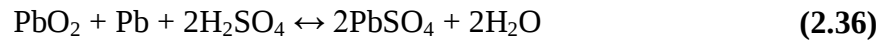
Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσσωρευτών, όπως: μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου, νικελίου μεταλλικού υδριδίου, λιθίου-ιόντος, λιθίου-πολυμερούς και νικελίου-ψευδαργύρου. Από αυτούς, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, λόγω μικρότερου κόστους ανά μονάδα χωρητικότητας είναι εκείνοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρύτερα και μόνο οι νικελίου-καδμίου, αν και σημαντικά ακριβότεροι, είναι ελάχιστα ανταγωνιστικοί, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας που έχουν καθώς και της καλύτερης συμπεριφοράς που παρουσιάζουν σε δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες.

### 2.4.2 Συσσωρευτές μολύβδου-θεικού οξέος ( $Pb/H_2SO_4$ )

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι ίσως ο δημοφιλέστερος τύπος ηλεκτρικού συσσωρευτή γνωστός από τις αρχές του εικοστού αιώνα. Είναι υψηλής μηχανικής αντοχής και συνακόλουθα, αυξημένης δυνατότητας για βαθιές εκφορτίσεις, με δυνατότητα παροχής μεγάλων ρευμάτων. Τα ηλεκτρόδιά του είναι πλάκες από κράματα μολύβδου οι οποίες είναι βυθισμένες σε διάλυμα θεικού οξέος ή αποσταγμένο νερό. Διακρίνονται στους συσσωρευτές με ηλεκτρολύτη υγρής κατάστασης και σε συσσωρευτές με παχύρευστο ηλεκτρολύτη (*gel*) αεροστεγώς σφραγισμένους (*sealed*) οι οποίοι δεν απαιτούν συμπλήρωση νερού. Οι συσσωρευτές αυτοί πλεονεκτούν των πρώτων, γιατί δεν απαιτούν συντήρηση και έχουν τη δυνατότητα χρήσης σε κλειστούς χώρους, που περιέχουν ευαίσθητα μηχανήματα ή ηλεκτρονικά όργανα. Μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές υπό κλίση, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος διαρροής ηλεκτρολυτικού υγρού. Υστερούν σε σχέση με τους

συσσωρευτές υγρής κατάστασης, όσον αφορά την αξιοποιήσιμη χωρητικότητά τους σε θερμοκρασίες κάτω από τους 0 °C.

Οι βασικές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό ενός συσσωρευτή Μολύβδου – θεικού οξέος και ιδιαίτερα στην επιφάνεια των μολύβδινων πλακών του περιγράφονται από την ακόλουθη αμφίδρομη αντίδραση:



Η κατεύθυνση προς τα δεξιά αντιστοιχεί στη διαδικασία της εκφόρτισης, ενώ η αντίθετη, στη φόρτιση του συσσωρευτή. Αναλυτικότερα, κατά την αρχική επαφή των μολύβδινων πλακών με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , λεπτό επιφανειακό στρώμα των ηλεκτροδίων μετατρέπεται από Pb σε  $\text{PbSO}_4$ . Κατά τη φόρτιση υπό τάση λίγο μεγαλύτερη της ονομαστικής τάσης της διάταξης, το ηλεκτρόδιο, που είναι συνδεδεμένο στον αρνητικό πόλο της πηγής φόρτισης, ανάγεται σε μεταλλικό μόλυβδο (Pb), με σπογγώδη μορφή και το άλλο, που είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής, οξειδώνεται προς  $\text{PbO}_2$ , φαιού χρώματος.

Οι τέσσερις πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση ενός συσσωρευτή είναι 1) η χωρητικότητα, 2) η απόδοση, 3) ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης, και 4) η διάρκεια ζωής. Ακόμα, δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση ενός συσσωρευτή είναι η θερμοκρασία και η αυτοεκφόρτιση.

Η χωρητικότητα  $C_{bat}$  μετράται σε Ah και δείχνει το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή. Επειδή όμως η τάση του συσσωρευτή  $V_{bat}$  έχει σχεδόν σταθερή τιμή κατά τη λειτουργία του, είναι πιο χρήσιμο αντί της χωρητικότητας  $C_{bat}$  να υπολογίζεται η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή  $E_{bat}$  (σε kWh), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E_{bat} = \frac{C_{bat} \cdot V_{bat}}{1000} \quad (2.37)$$

Η απόδοση δίνει το κλάσμα της ενέργειας που αρχικά αποθηκεύεται στο συσσωρευτή και στη συνέχεια μπορεί να ανακτηθεί. Τυπική τιμή απόδοσης για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος είναι 80%.

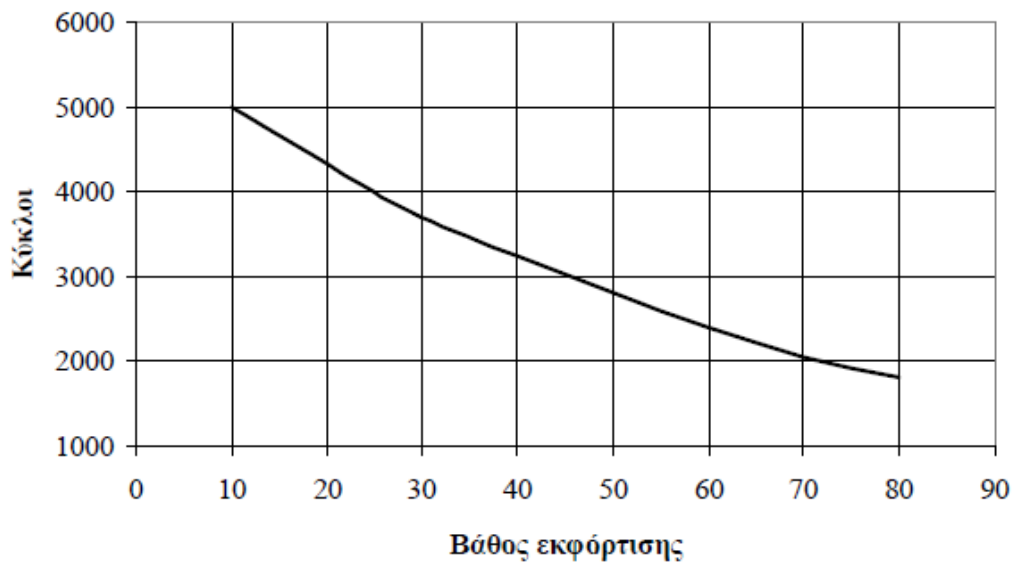
Οι μέγιστοι ρυθμοί φόρτισης και εκφόρτισης αποτελούν ένα μέτρο του πόσο γρήγορα μπορεί να απορροφήσει και να απελευθερώσει ενέργεια ο συσσωρευτής. Τα ρεύματα φόρτισης  $I_{batc}$  (σε A) και εκφόρτισης  $I_{batd}$  (σε A) ενός συσσωρευτή εκφράζονται στη μορφή  $C_{bat}/t_{bat}$ , όπου  $C_{bat}$  είναι η χωρητικότητα (σε Ah) και  $t_{bat}$  είναι ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης (σε h). Σε ένα συσσωρευτή μολύβδου-οξέος, τα μέγιστα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή  $C_{bat}/5$ . Επιπλέον, στη μοντελοποίηση των συσσωρευτών χρειάζεται να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις,

αυτοί δεν επιτρέπεται να εκφορτιστούν κάτω από μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης. Για τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος που χρησιμοποιούνται σε απομονωμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης  $\beta_{dismax}$  ορίζεται στο 80% της χωρητικότητάς τους. Ο περιορισμός του μέγιστου βάθους εκφόρτισης μειώνει την αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $C_{batr}$  (σε Ah) και την αξιοποιήσιμη ενέργεια  $E_{batr}$  (σε kWh) ως εξής:

$$C_{batr} = \beta_{dismax} \cdot C_{bat} = 0.8 \cdot C_{bat} \quad (2.38)$$

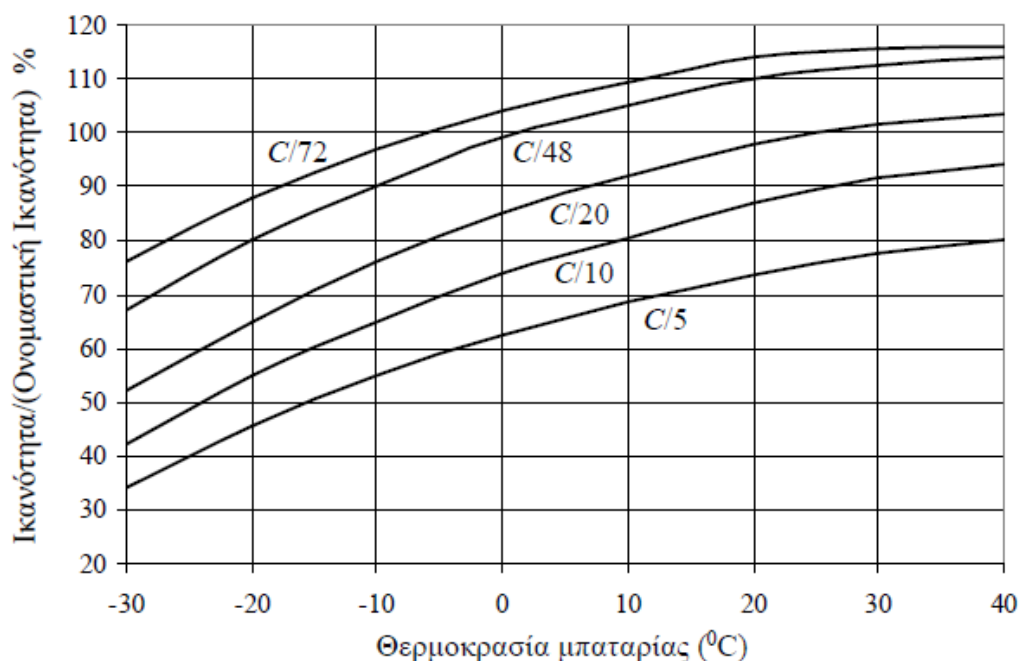
$$E_{batr} = \beta_{dismax} \cdot E_{bat} = 0.8 \cdot E_{bat} \quad (2.39)$$

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι: ο αριθμός κύκλων λειτουργίας και το βάθος εκφόρτισης που αντιστοιχεί σε καθέναν από αυτούς. Κάθε κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει τη διαδοχική διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Με καλή προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ότι το γινόμενο του βάθους εκφόρτισης  $\beta_{dis}$  και του αριθμού των κύκλων λειτουργίας  $N_{cycle}$  παραμένει σταθερό. Η θεώρηση αυτή ουσιαστικά αντιστοιχεί σε κάθε συσσωρευτή μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας  $E_{batlife}$  (σε kWh), η οποία μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί πριν ο συσσωρευτής χρειαστεί να αντικατασταθεί.



**Σχήμα 2.20:** Επίδραση του βάθους εκφόρτισης στον αριθμό των κύκλων που μπορεί να παρέχει μια τυπική μπαταρία μολύβδου-θειικού οξέος βαθιάς εκφόρτισης.

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός συσσωρευτή επηρεάζει σημαντικά το χρόνο ζωής και τη χωρητικότητα του. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας μειώνουν το χρόνο ζωής του. Στη πραγματικότητα, η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή μειώνεται κατά 50% για κάθε 10°C πάνω από τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας των 25°C. Οι χαμηλές θερμοκρασίες περιορίζουν ισχυρά, τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου. Ακόμα σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος παγώματος του ηλεκτρολύτη. Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να εξαιρεθεί με την τοποθέτηση των συσσωρευτών σε μέρη που προφυλάσσονται από υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες.



**Σχήμα 2.21:** Η ικανότητα του συσσωρευτή μολύβδου-οξέος εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης και τη θερμοκρασία.

Η αυτοεκφόρτιση του συσσωρευτή, περιγράφει το γεγονός ότι ένας φορτισμένος συσσωρευτής εκφορτίζεται ακόμη και αν δεν είναι συνδεδεμένος σε εξωτερικό φορτίο-κατανάλωση. Οφείλεται στη συνεχή δράση του  $H_2SO_4$  στα ηλεκτρόδια, κατά την οποία, ο Pb και ο  $PbO_2$  μετατρέπονται σε  $PbSO_4$ , με ταυτόχρονη έκλυση των αερίων  $H_2$  και  $O_2$ . Η αυτοεκφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Παρόλα αυτά ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι συνήθως μικρός σε σχέση με τους τυπικούς ρυθμούς εκφόρτισης που παρατηρούνται σε συσσωρευτές και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη.

## 2.5 Μετατροπείς

Στα απομονωμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εμπεριέχεται, συνήθως, συνδυασμός τεχνολογιών και φορτίων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε ένα τέτοιο σύστημα απαιτείται μετατροπή από συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και

αντιστρόφως, η οποία επιτυγχάνεται με χρήση μετατροπέων. Ανάλογα με τη δομή του προς μελέτη συστήματος, ένας μετατροπέας μπορεί να είναι αντιστροφέας (ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο), ανορθωτής (ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές), ή συνδυασμός και των δύο.

Η απόδοση του αντιστροφέα είναι συνάρτηση του φορτίου που συμβαίνει να τροφοδοτείται τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του φορτίου). Οι περισσότεροι αντιστροφέες σήμερα λειτουργούν με απόδοση γύρω στο 90% για το μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας τους.

Ο αντιστροφέας προδιαγράφεται από την τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος και από την τάση εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος του αντιστροφέα, την ποσότητα ισχύος που μπορεί να χειριστεί συνεχώς, και την ποσότητα μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει για σύντομα χρονικά διαστήματα. Η τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος του αντιστροφέα, η οποία είναι ίδια με την τάση της συστοιχίας μπαταριών και του ΦΒ συλλέκτη, ονομάζεται *τάση συστήματος*. Το πιο σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό ενός αντιστροφέα είναι η ποσότητα ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος που μπορεί να παρέχει σε συνεχή βάση. Όμως, είναι επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό και η ποσότητα μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει ο αντιστροφέας για σύντομα χρονικά διαστήματα, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εκκίνηση ηλεκτρικών κινητήρων, όπου το ρεύμα εκκίνησης είναι πολλαπλάσιο του ρεύματος μόνιμης κατάστασης.

## **2.6 Κατανομή φορτίου του αυτόνομου συστήματος**

Στην προσομοίωση λειτουργίας ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πέραν της μοντελοποίησης των μεμονωμένων εξαρτημάτων που το απαρτίζουν, είναι σημαντικός και ο καθορισμός του τρόπου συνεργασίας τους. Η επίλυση αυτού του προβλήματος απαιτεί αποφάσεις που πρέπει να λαμβάνονται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, οι οποίες θα καθορίζουν τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται σε λειτουργία, την ισχύ που αυτές χρειάζεται να παράγουν, τον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης των συσσωρευτών (εάν υπάρχουν), κλπ. Μια παράμετρος που επιδρά σημαντικά στις αποφάσεις για την κατανομή ενέργειας στο σύστημα είναι η λειτουργική εφεδρεία.

### **2.6.1 Λειτουργική εφεδρεία**

Η λειτουργική εφεδρεία είναι η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να εξυπηρετήσει άμεσα μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ή μια ξαφνική μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τεχνολογίες Α.Π.Ε. Η λειτουργική εφεδρεία προσφέρει ένα περιθώριο ασφαλείας που βοηθά στην εξασφάλιση της αξιοπιστίας

παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, παρά τη μεταβλητότητα του ηλεκτρικού φορτίου και την αβεβαιότητα ως προς την παραγόμενη ενέργεια από τεχνολογίες Α.Π.Ε. μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής.

Η κάλυψη της συνολικά ζητούμενης ενέργειας ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι ίση με το άθροισμα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και της λειτουργικής εφεδρείας, μπορεί να γίνει από τις τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, από τις γεννήτριες και από τους συσσωρευτές. Για τις τεχνολογίες ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής (ΑΓ, ΦΒ), η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι αυτή που παράγουν κατά τη τρέχουσα χρονική στιγμή. Στις γεννήτριες, η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει από τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να παράγουν. Στους συσσωρευτές, η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή, το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και την απόδοση εκφόρτισης.

Η απαιτούμενη ποσότητα λειτουργικής εφεδρείας  $OR_{\Delta t}$  (σε kWh) υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης διάρκειας  $\Delta t$  (σε h) από την ακόλουθη εξίσωση:

$$OR_{\Delta t} = r_{load}P_{load}\Delta t + r_{WT}P_{WT}\Delta t + n_{inv}r_{PV}P_{PV}\Delta t \quad (2.40)$$

όπου  $r_{load}$  είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα τιμή του ηλεκτρικού φορτίου  $P_{load}$  (σε kW),  $r_{WT}$  είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα παραγόμενη ισχύ της ΑΓ  $P_{WT}$  (σε kW),  $r_{PV}$  είναι το απαιτούμενο ποσοστό της λειτουργικής εφεδρείας σε σχέση με την τρέχουσα παραγόμενη ισχύ του ΦΒ συστήματος  $P_{PV}$  (σε kW), ενώ  $n_{inv}$  είναι η απόδοση του μετατροπέα που περιλαμβάνεται μεταξύ του φορτίου εναλλασσόμενου ρεύματος και του ΦΒ συστήματος

Στην περίπτωση που η συνολικά παραγόμενη ισχύς του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή δεν καλύπτει το φορτίο και τις απαιτήσεις σε εφεδρεία, τότε υπάρχει απώλεια ισχύος, η οποία αντιστοιχεί στην απώλεια της παραγόμενης ισχύος που μπορεί να προκαλέσει ή όχι απώλεια φορτίου του συστήματος.

## 2.6.2 Βέλτιστη επιλογή λειτουργίας γεννητριών και συσσωρευτών

Η απόφαση για τη λειτουργία των γεννητριών και συσσωρευτών του συστήματος σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης, εξαρτάται από το εάν οι τεχνολογίες Α.Π.Ε. μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής μπορούν από μόνες τους να καλύψουν το ηλεκτρικό φορτίο και τη λειτουργική εφεδρεία. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, χρειάζεται να προσφερθεί ενέργεια στο σύστημα από τις γεννήτριες και/ή τους συσσωρευτές. Ο βέλτιστος συνδυασμός αυτών των εξαρτημάτων επιλέγεται με βάση την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Στην περίπτωση των γεννητριών, το συνολικό κόστος προκύπτει ως το άθροισμα του πάγιου κόστους λειτουργίας και του οριακού κόστους λειτουργίας. Το πάγιο κόστος λειτουργίας είναι το κόστος που απαιτείται για να τεθεί σε λειτουργία η γεννήτρια χωρίς να παράγει καθόλου ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού βήματος. Το οριακό κόστος λειτουργίας της γεννήτριας, σε ένα χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , εξαρτάται από την οριακή κατανάλωση καυσίμου της γεννήτριας (σε μονάδες μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου ανά ώρα) και από την τιμή του καυσίμου (σε € ανά μονάδα μέτρησης της ποσότητας του καυσίμου).

Στην περίπτωση των συσσωρευτών, το πάγιο κόστος είναι ίσο με μηδέν, καθώς δεν υπάρχει κόστος λειτουργίας των συσσωρευτών έτσι ώστε αυτοί να είναι έτοιμοι να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Το οριακό κόστος των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος είναι ίσο με το άθροισμα του κόστους φθοράς και του κόστους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.6.3 Στρατηγικές συνεργασία μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών

Αν κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος της προσομοίωσης ο βέλτιστος συνδυασμός εξαρτημάτων απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών, χρειάζεται να εξεταστεί ένα επιπλέον ζήτημα, το οποίο σχετίζεται με τον τρόπο που θα φορτιστούν οι συσσωρευτές από τις γεννήτριες του συστήματος. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος υπάρχουν δύο συνήθεις στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών είναι η **στρατηγική παρακολούθησης φορτίου** και η **στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή**.

Κατά τη στρατηγική παρακολούθησης φορτίου, οι συσσωρευτές φορτίζονται μόνο από την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας των τεχνολογιών ΑΠΕ μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής. Η μόνη περίπτωση κατά την οποία μια γεννήτρια φορτίζει το συσσωρευτή είναι όταν η ζητούμενη ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί από τη γεννήτρια είναι μικρότερη της ελάχιστης ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από αυτήν, ενώ ταυτόχρονα ο συσσωρευτής δεν είναι πλήρως φορτισμένος.

Κατά τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή, όταν μια γεννήτρια χρειάζεται να εξυπηρετήσει το φορτίο παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, και η περίσσεια ενέργειας (εάν υπάρχει) αποθηκεύεται στο συσσωρευτή. Η στρατηγική αυτή προϋποθέτει και τον καθορισμό ενός σημείου κατάστασης φόρτισης  **$SOC_{CC}$** , που δείχνει το επίπεδο φόρτισης που πρέπει να φτάσει ο συσσωρευτής πριν σταματήσει να λειτουργεί η γεννήτρια. Η τιμή του  **$SOC_{CC}$**  πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στην ελάχιστη και στη μέγιστη κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.

Η επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής συνεργασίας μεταξύ γεννητριών και συσσωρευτών προκύπτει από την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος και για τις δύο στρατηγικές, και κατόπιν την επιλογή εκείνης της λύσης που παρουσιάζει το ελάχιστο

κόστος. Γενικότερα όμως, έχει παρατηρηθεί πως η στρατηγική παρακολούθησης φορτίου τείνει να είναι η βέλτιστη επιλογή σε συστήματα με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ τεχνολογιών Α.Π.Ε. μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, ενώ η στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή τείνει να είναι η βέλτιστη επιλογή σε συστήματα με μικρή εγκατεστημένη ισχύ τεχνολογιών Α.Π.Ε. μη ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής.

Η στρατηγική συνεργασίας μεταξύ των γεννητριών και των συσσωρευτών επηρεάζει και τον υπολογισμό του κόστους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση της στρατηγικής παρακολούθησης φορτίου, οι γεννήτριες δεν παράγουν επιπλέον ενέργεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών, και επομένως το κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μηδενικό. Αντίθετα, κατά τη στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή, οι γεννήτριες παράγουν επιπλέον ενέργεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών, και επομένως το κόστος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίσο με το κόστος του επιπλέον καυσίμου που καταναλώνεται για το σκοπό αυτό.

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι μία μέθοδος μοντελοποίησης, η οποία αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων. Καταρχάς, για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος απόφασης, πρέπει να προσδιοριστούν οι πιθανές αποφάσεις, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία των μεταβλητών απόφασης. Στη συνέχεια, πρέπει να οριστούν ποιες αποφάσεις είναι αποδεκτές, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία των περιορισμών, οι οποίοι καθορίζονται σύμφωνα με τη φύση του προβλήματος που τίθεται υπό βελτιστοποίηση. Τέλος, υπολογίζεται η αναλογία κόστους/κέρδους για κάθε πιθανή απόφαση, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αποδίδει την τιμή της αναλογίας κόστους/κέρδους για κάθε σύνολο τιμών της εκάστοτε απόφασης.

Τα προβλήματα απόφασης αποτελούν στην ουσία προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου ο σκοπός είναι να καθοριστούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης, οι οποίες θα βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση, ενώ παράλληλα θα ικανοποιούν τους περιορισμούς. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες με βάση τον τύπο των μεταβλητών απόφασης, της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και των περιορισμών:

1. **Γραμμικός προγραμματισμός (ΓΠ):** Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν γραμμικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές απόφασης είναι μονόμετρα μεγέθη και παίρνουν συνεχείς τιμές.
2. **Μη γραμμικός προγραμματισμός (ΜΓΠ):** Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν μη γραμμικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές απόφασης είναι μονόμετρα μεγέθη και παίρνουν συνεχείς τιμές.
3. **Ακέραιος προγραμματισμός (ΑΠ):** Οι μεταβλητές απόφασης είναι μονόμετρα μεγέθη και παίρνουν ακέραιες τιμές.
4. **Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (ΜΑΓΠ):** Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν γραμμικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές απόφασης είναι μονόμετρα μεγέθη και μερικές από αυτές παίρνουν ακέραιες τιμές, ενώ άλλες παίρνουν συνεχείς τιμές.
5. **Μικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (ΜΑΜΠ):** Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν μη γραμμικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές

απόφασης είναι μονόμετρα μεγέθη και μερικές από αυτές παίρνουν ακέραιες τιμές, ενώ άλλες παίρνουν συνεχείς τιμές.

6. **Διακριτή Βελτιστοποίηση:** Αναφέρεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης που περιέχουν διακριτές (ακέραιες) μεταβλητές απόφασης. Αυτή η κατηγορία περιέχει τον ΑΠ, τον ΜΑΓΠ και τον ΜΑΜΠ.
7. **Βέλτιστος έλεγχος:** Οι μεταβλητές απόφασης είναι διανύσματα.
8. **Στοχαστικός προγραμματισμός:** Αναφέρεται ακόμα και ως βελτιστοποίηση υπό αβεβαιότητα. Σε αυτά τα προβλήματα η αντικειμενική συνάρτηση και/ή οι περιορισμοί έχουν τυχαίες (αβέβαιες) μεταβλητές. Συχνά περιέχει τις παραπάνω κατηγορίες ως υποκατηγορίες.
9. **Πολυκριτήρια ανάλυση:** Αναφέρεται σε προβλήματα που περιέχουν πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις υπό βελτιστοποίηση. Συχνά περιέχει τις παραπάνω κατηγορίες ως υποκατηγορίες.

### 3.2 Γραμμικός προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο επιχειρείται η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) μίας ή περισσότερων γραμμικών συναρτήσεων (κριτήρια βελτιστοποίησης) άγνωστων πραγματικών μεταβλητών των οποίων το πεδίο τιμών οριοθετείται έμμεσα από γραμμικούς περιορισμούς (ανισοεξισώσεις) συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν (μοντελοποιούν) το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται για το σκοπό αυτό μεταβλητές απόφασης.

Η θεωρία του ΓΠ, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 70, εξελίχθηκε ως μεθοδολογία βελτιστοποίησης ενός και μόνο κριτηρίου απόφασης με την ονομασία αντικειμενική συνάρτηση. Αναλυτικά ένα μονοκριτήριο γραμμικό πρόγραμμα ορίζεται με τη βοήθεια των μητρών ως εξής:

Να βρεθεί το διάνυσμα  $x$  για το οποίο έχουμε:

$$[\max] \text{ ή } [\min] z = c^t x \quad (3.1)$$

υπό τους περιορισμούς

$$Ax \leq b \quad (3.2)$$

$$x \geq 0 \quad (3.3)$$

όπου  $A$ , η μήτρα των συντελεστών ( $a_{ij}$ ) διαστάσεων  $m \times \ell$  και  $b, c, x$  διανύσματα – μήτρες αντίστοιχων διαστάσεων  $m \times 1, \ell \times 1, \ell \times 1$  και  $c^t$  η ανάστροφη μήτρα της  $c$ . Ένα τέτοιο γραμμικό πρόγραμμα είναι διαστάσεων  $m \times \ell$  (δεν υπολογίζονται οι περιορισμοί μη αρνητικότητας  $x \geq 0$ ).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1\ell} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2\ell} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m\ell} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}$$

**Σχήμα 3.1:** Μήτρες συντελεστών ενός γραμμικού προγράμματος.

### 3.2.1 Κανονική μορφή ενός γραμμικού προγράμματος

Ένα γραμμικό πρόγραμμα συναντάται συνήθως στην κανονική του μορφή, η οποία έχει μία από τις δύο παρακάτω μαθηματικές εκφράσεις:

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| $[max] \ z = c^t x$ | $[min] \ z = c^t x$ |
| υ.π.                | υ.π.                |
| $Ax \leq b$         | $Ax \geq b$         |
| $x \geq 0$          | $x \geq 0$          |

**Σχήμα 3.2:** Μαθηματικές εκφράσεις ενός γραμμικού προγράμματος.

### 3.2.2 Πρότυπη μορφή

Ένα γραμμικό πρόγραμμα βρίσκεται στην πρότυπη μορφή του όταν όλοι οι περιορισμοί του είναι εξισώσεις και τα δεύτερα μέλη αυτών των εξισώσεων είναι μη αρνητικά ( $b \geq 0$ ). Για την περίπτωση της μεγιστοποίησης έχουμε:

$$[max] \ z = c^t x \tag{3.4}$$

$$\text{υ.π.}$$

$$Ax = b \tag{3.5}$$

$$x \geq 0 \tag{3.6}$$

### 3.2.3 Συνθήκες εφαρμογής

Για να είναι θεμιτή η προσέγγιση ενός προβλήματος απόφασης μέσω ενός κλασσικού μοντέλου γραμμικού προγράμματος πρέπει να ισχύουν οι τέσσερις παρακάτω προϋποθέσεις:

1. **Γραμμικότητα:** Το αποτέλεσμα, είτε αυτό είναι όρος περιορισμού  $a_{ij}x_j$  είτε όρος αντικειμενικής συνάρτησης  $c_jx_j$ , είναι γραμμική συνάρτηση του αιτίου  $x_j$  που το προκαλεί. Στην αντίθετη περίπτωση, για παράδειγμα όταν ισχύει  $c_jx_j^2$ , το μοντέλο εμπίπτει στη κατηγορία του ΜΓΠ.
2. **Διαιρετότητα:** Οι μεταβλητές  $x_j$  είναι άπειρα διαιρετές, παίρνουν δηλαδή συνεχείς πραγματικές τιμές. Σε αντίθετη περίπτωση το πρόβλημα εμπίπτει στη κατηγορία του ΑΠ ή στην κατηγορία του ΜΑΓΠ, αν δεν δεσμεύονται όλες οι μεταβλητές να είναι ακέραιες.
3. **Βεβαιότητα:** Τα δεδομένα του προβλήματος, τα αριθμητικά στοιχεία δηλαδή των μητρών  $A$ ,  $b$ ,  $c$ , είναι γνωστά με βεβαιότητα. Στη περίπτωση που ορισμένα από αυτά δεν είναι γνωστά με βεβαιότητα, αλλά ακολουθούν γνωστούς στατιστικούς νόμους, το πρόβλημα εμπίπτει στη κατηγορία του στοχαστικού προγραμματισμού.
4. **Μονοδιάσταση:** Αφορά το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων που μοντελοποιούν τους στόχους του προβλήματος απόφασης. Στον ΓΠ η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να είναι μία και μοναδική. Στην αντίθετη περίπτωση το πρόβλημα εμπίπτει στην κατηγορία της πολυκριτήριας ανάλυσης.

### 3.2.4 Μοντελοποίηση

Η διαδικασία διαμόρφωσης ενός μοντέλου ΓΠ ονομάζεται μοντελοποίηση. Πρόκειται για το βασικότερο στάδιο προσέγγισης του προβλήματος απόφασης, το οποίο επιτρέπει στον αναλυτή να αποκτήσει και να επεξεργαστεί λύσεις για το πρόβλημα.

Ο αναλυτής του προβλήματος οφείλει να διαγνώσει, εάν το πρόβλημα απόφασης που μελετά επιδέχεται μοντελοποίηση με ΓΠ. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό εφόσον οι αποφάσεις μπορούν να αναλυθούν σε δραστηριότητες κατανομής πόρων, μέσων, ενεργειών, προϊόντων, υπηρεσιών, κ.λπ.

Κατά συνέπεια, όταν κάνουμε λόγο για μοντελοποίηση προβλήματος απόφασης, αναφερόμαστε στην τέχνη διάγνωσης, αξιοποίησης εμπειρίας, κατασκευής, καθώς και διαχείρισης μαθηματικών σχέσεων με στόχο τη δημιουργία ενός κατάλληλου, αποτελεσματικού και οικονομικά διαχειρίσιμου μαθηματικού μοντέλου.

Μια τυπική διαδικασία διαμόρφωσης ενός μοντέλου ΓΠ μπορεί να παρασταθεί μέσα από τέσσερα διαδοχικά αλλά αλληλεπιδρώντα μεθοδολογικά στάδια:

1. Εξαντλητική απαρίθμηση όλων των επιμέρους δραστηριοτήτων κατανομής, που αριθμούμε από 1 έως  $\ell$ .

2. Καθορισμός των μεταβλητών απόφασης:  $\{x_1, x_2, \dots, x_\ell\}$ , όπου κάθε μεταβλητή  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, \ell$  εκφράζει τη στάθμη της δραστηριότητας κατανομής  $j$ , στις αντίστοιχες μονάδες της.

3. Μοντελοποίηση των περιορισμών της μορφής:

$$\alpha_{i1}x_1 + \alpha_{i2}x_2 + \dots + \alpha_{i\ell}x_\ell \leq \text{ή} = \text{ή} \geq b_i, i = 0, 1, \dots, m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_\ell \geq 0$$

Με το στάδιο αυτό ολοκληρώνεται η οριοθέτηση του αντικειμένου απόφασης.

4. Μοντελοποίηση των κριτηρίων απόφασης:

$$[max] g_i(x) = c_{i1}x_1 + c_{i2}x_2 + \dots + c_{i\ell}x_\ell, i=1, 2, \dots, n$$

Όπου,  $g_i$  η  $i$ -οστή, υπό μεγιστοποίηση, αντικειμενική συνάρτηση ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) και  $c_{ij}$  οι αντίστοιχοι συντελεστές ( $j = 1, 2, \dots, \ell$ ). Όταν το κριτήριο είναι ένα και μοναδικό, η μοναδική αντικειμενική συνάρτηση συμβολίζεται με  $z = g(x)$ .

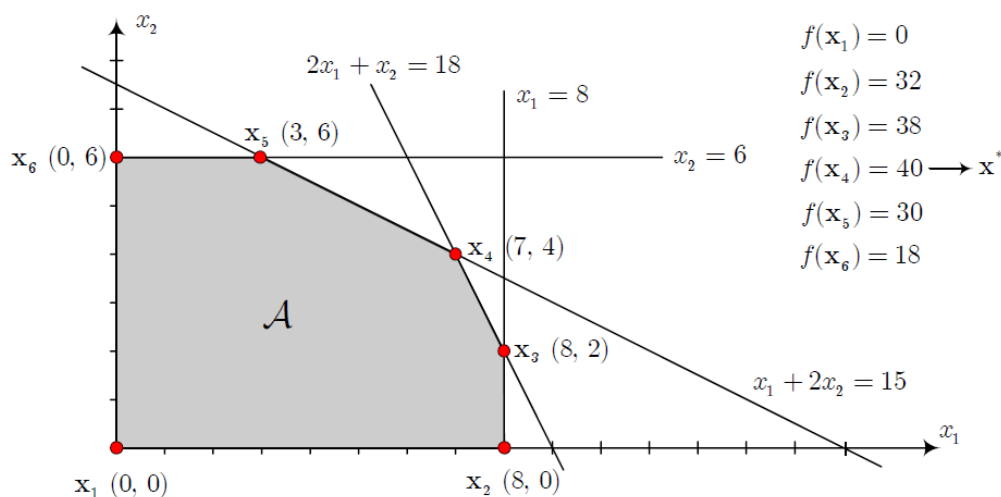
### 3.3 Μέθοδοι επίλυσης

#### 3.3.1 Γραφική μέθοδος

Η επίλυση ενός γραμμικού προγράμματος απαιτεί γενικά την ύπαρξη ηλεκτρονικού υπολογιστή και κατάλληλου λογισμικού. Όταν όμως ένα γραμμικό πρόγραμμα είναι δισδιάστατο, έχει δηλαδή 2 μεταβλητές απόφασης ή το πολύ τρισδιάστατο μπορεί να επιλυθεί γραφικά. Για το σκοπό αυτό, αρκεί να σχεδιαστεί προσεκτικά το σύνολο των περιορισμών του γραμμικού προγράμματος, ώστε να οριοθετηθεί το σύνολο των δυνατών λύσεων  $\mathcal{A}$  και να καθοριστεί η έννοια βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η μέθοδος περιλαμβάνει τρία διαδοχικά στάδια:

1. Σχεδίαση όλων ανεξάρτητα των περιορισμών ώστε να καθοριστεί απόλυτα το σύνολο  $\mathcal{A}$  των δυνατών λύσεων.
2. Σχεδίαση της αντικειμενικής συνάρτησης  $z$  για μια συγκεκριμένη τιμή του  $z$  και καθορισμός της έννοιας βελτιστοποίησης.
3. Παράλληλη μετατόπιση της αντικειμενικής συνάρτησης κατά την έννοια βελτιστοποίησης, βελτιώνοντας προοδευτικά την τιμή του  $z$ , μέχρις ότου προσδιοριστεί η βέλτιστη ή βέλτιστες λύσεις.



**Σχήμα 3.3:** Παρουσίαση της μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης  $z = 4x_1 + 3x_2$  με τη χρήση της γραφικής μεθόδου.

Η γραφική μέθοδος δεν μπορεί να επεκταθεί σε ρεαλιστικά προβλήματα γραμμικών προγραμμάτων με αριθμό μεταβλητών απόφασης μεγαλύτερο του 3, διότι εκεί το σύνολο  $\mathcal{A}$  είναι ένα υπερπολύεδρο και δεν υπάρχει πλέον εποπτεία. Πέραν αυτού όμως υπάρχει αντικειμενικά ένα υπολογίσιμο πρόβλημα συνδυαστικής, το οποίο δεν επιτρέπει την απαρίθμηση των κορυφών του υπερπολύεδρου των λύσεων και την εν συνεχεία σύγκριση τους βάσει των τιμών που παίρνει η  $z$ .

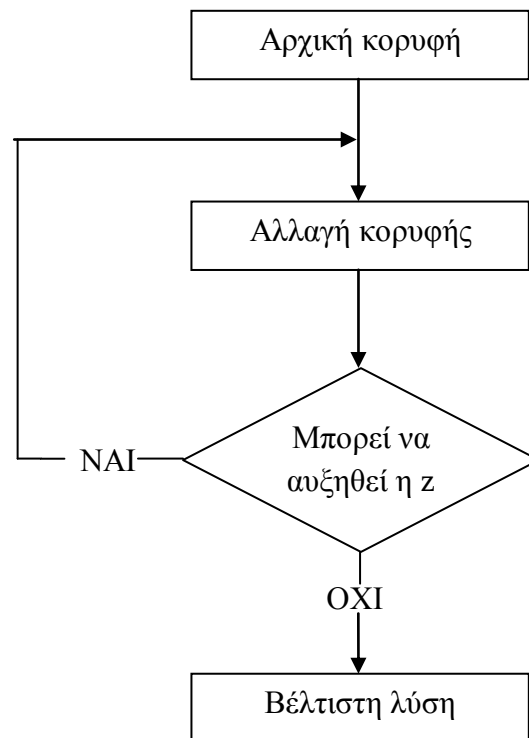
Για τους παραπάνω λόγους έπρεπε να επινοηθεί μια αλγεβρική μέθοδος συστηματικής όδευσης προς τη βέλτιστη κορυφή του υπερπολύεδρου των δυνατών λύσεων. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος simplex.

### 3.3.2 Μέθοδος simplex

Η μέθοδος simplex αποτελεί μέχρι τις μέρες μας το σημαντικότερο εργαλείο του ΓΠ. Πρόκειται για μία ταχεία και αποτελεσματική μέθοδο προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης ενός γραμμικού προγράμματος. Ανακαλύφθηκε από τον Αμερικανό George Dantzig το 1947. Η φιλοσοφία της μεθόδου simplex είναι η εξής: πρόκειται για ένα «περίπατο» στις κορυφές του υπερπολύεδρου  $\mathcal{A}$  των λύσεων του γραμμικού προγράμματος βελτιώνοντας σε κάθε βήμα (από κορυφή σε κορυφή) την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $z$ . Επειδή το υπερπολύεδρο  $\mathcal{A}$  είναι ένα κυρτό σύνολο, αυτός ο περίπατος θα σταματήσει σε μία κορυφή πέραν της οποίας δεν υπάρχει άλλη βελτίωση, δηλαδή σε μία βέλτιστη λύση του γραμμικού προγράμματος.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται γραφικά η φιλοσοφία της μεθόδου. Κάθε κορυφή καθώς και αλλαγή κορυφής του υπερπολύεδρου  $\mathcal{A}$  υπολογίζεται αλγεβρικά. Κάθε αλλαγή

κορυφής καθοδηγείται από τα δύο κριτήρια Dantzig έτσι ώστε να βελτιώνεται η τιμή της  $z$  και να επιβεβαιώνεται η κατάληξη σε νέα κορυφή.



**Σχήμα 3.4:** Αρχή λειτουργίας της μεθόδου simplex.

Η μέθοδος simplex απαιτεί, καταρχήν, το σχηματισμό όλων των ανισοεξισώσεων του γραμμικού προγράμματος σε ισότητες, ώστε να πάρει αυτό την πρότυπη μορφή:

$$[max] z = c^t x \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &\text{υ.π.} \\ &Ax = b \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$x \geq 0 \quad (3.9)$$

Για το λόγο αυτό πρέπει να εισαχθεί σε κάθε ανισοεξίσωση μια θετική μεταβλητή απόκλισης, η οποία προστίθεται όταν ο περιορισμός είναι του τύπου  $\leq$  και αφαιρούμενη όταν ο περιορισμός είναι του τύπου  $\geq$ . Οι νέες αυτές μεταβλητές έχουν μηδενικό συντελεστή στην αντικειμενική συνάρτηση. Οι μεταβλητές απόκλισης συμβολίζονται με  $x_1, x_2, \dots, x_m$  για τους περιορισμούς από 1, 2, ..., m. Για να γίνει κατανοητή η επαναληπτική διαδικασία, που αποτελεί τη μέθοδο simplex και παρουσιάζεται στη συνέχεια, πρέπει να οριστούν ακόμα τα ακόλουθα στοιχεία:

1. **Εφικτή λύση** ορίζεται κάθε λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς του γραμμικού προγράμματος.

2. **Βάση** λέγεται μια τετραγωνική μήτρα  $B$ , η οποία προκύπτει από τη μήτρα  $A$  και αποτελείται από  $m$  γραμμικά ανεξάρτητα διανύσματα της  $A$ .
3. Οι μεταβλητές που στοιχειοθετούν τη βάση λέγονται **βασικές μεταβλητές**, ενώ οι υπόλοιπες καλούνται **μη βασικές**.
4. **Βασική εφικτή λύση** ενός συστήματος γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων ως προς μία βάση  $B$ , λέγεται μια δυνατή λύση η οποία έχει το πολύ όλες τις βασικές μεταβλητές θετικές και όλες ανεξάρτητα τις μη βασικές μηδέν. Στη περίπτωση που ορισμένες από τις βασικές είναι μηδέν τότε η λύση ονομάζεται εκφυλισμένη βασική δυνατή λύση.
5. Το **οριακό καθαρό εισόδημα** μιας μη βασικής μεταβλητής  $\bar{x}_j$  την ποσότητα  $\bar{c}_j$ , η οποία εκφράζει την ποσότητα κατά την οποία αυξάνει η αντικειμενική συνάρτηση εάν εισέλθει στη βάση η αντίστοιχη μεταβλητή  $x_j$  σε μοναδιαία στάθμη. Για τις μεταβλητές που βρίσκονται στη βάση το οριακό καθαρό εισόδημα θα είναι μηδέν. Το οριακό καθαρό εισόδημα δίνεται από τις σχέσεις:

$$\bar{c}_j = c_j - z_j \quad (3.10)$$

$$z_j = c_B^t y_j = c_B^t B^{-1} \bar{a}_j \quad (3.11)$$

Η μέθοδος simplex ακολουθεί την παρακάτω επαναληπτική διαδικασία:

1. **Μετατροπή του γραμμικού προγράμματος στην πρότυπη μορφή.**  
Όλοι οι περιορισμοί πρέπει να είναι γραμμικές εξισώσεις με μη αρνητικά δεξιά μέλη και όλες οι μεταβλητές πρέπει να είναι μη αρνητικές. Σε περίπτωση που υπάρχουν αρνητικές μεταβλητές, γίνεται μετατροπή προσθέτοντας και αφαιρώντας δύο μεταβλητές. Ακόμα γίνεται μετατροπή των ανισοεξισώσεων των περιορισμών σε εξισώσεις ισότητας, με τη χρήση των μεταβλητών απόκλισης.
2. **Προσδιορισμός της αρχικής εφικτής λύσης.**  
Μια αρχική λύση δίνεται αφού τεθούν οι μη βασικές μεταβλητές ίσες με μηδέν και λυθεί το σύστημα των εξισώσεων ως προς τις υπόλοιπες μεταβλητές.
3. **Επιλογή της εισερχόμενης μεταβλητής.**  
Υπολογίζονται τα οριακά καθαρά εισοδήματα για κάθε μη βασική μεταβλητή  $x_j$  με βάσει τις παραπάνω σχέσεις.  
Έλεγχος βελτιστότητας.  
Αν το οριακό καθαρό εισόδημα είναι αρνητικό ( $\bar{c}_j \leq 0$ ) για κάθε  $j$  τότε η λύση είναι βέλτιστη και ισχύει  $z^* = c_B^t x_B$ . Ο αλγόριθμος περατώνεται.  
Αλλιώς, βάσει του τύπου:  $\bar{c}_j = \max \bar{c}_k$ , επιλέγεται η μεταβλητή  $x_j$  (η οποία έχει το μέγιστο οριακό καθαρό εισόδημα) για να εισέλθει στη βάση.
4. **Καθορισμός της εξερχόμενης μεταβλητής.**  
Η βασική μεταβλητή  $x_{B_r}$  η οποία εξέρχεται από τη βάση κι γίνεται πλέον μη βασική είναι αυτή η οποία έχει το μικρότερο, μη αρνητικό λόγο του δεξιού μέλους του πίνακα

διαιρεμένου με τον αντίστοιχο συντελεστή της εισερχόμενης μεταβλητής. Περιγράφεται από τη σχέση:  $\theta = \frac{x_{Br}}{y_{rj}} = \min \left\{ \frac{x_{Bi}}{y_{ij}} \mid y_{ij} \geq 0 \right\}$  όπου j ο δείκτης της εισερχόμενης μεταβλητής.

5. **Έλεγχος εφικτότητας.**

Αν ισχύει  $y_{ij} \leq 0 \forall i$ , τότε το πρόβλημα δεν έχει πεπερασμένη λύση και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης απειρίζεται ( $\max z = +\infty$ ). Ο αλγόριθμος περατώνεται.

6. **Καθορισμός της νέας βασικής εφικτής λύσης με τη χρήση της απαλοιφής Gauss – Jordan.**

Αφού εισαχθεί η μεταβλητή  $x_j$  στη θέση της μεταβλητής  $x_{Br}$  χρησιμοποιείται η απαλοιφή Gauss – Jordan, έτσι ώστε οι συντελεστές των συντελεστών των βασικών μεταβλητών να σχηματίζουν μοναδιαίο πίνακα.

7. Πήγαινε στο βήμα 2.

### 3.3.3 Δυϊκός αλγόριθμος simplex

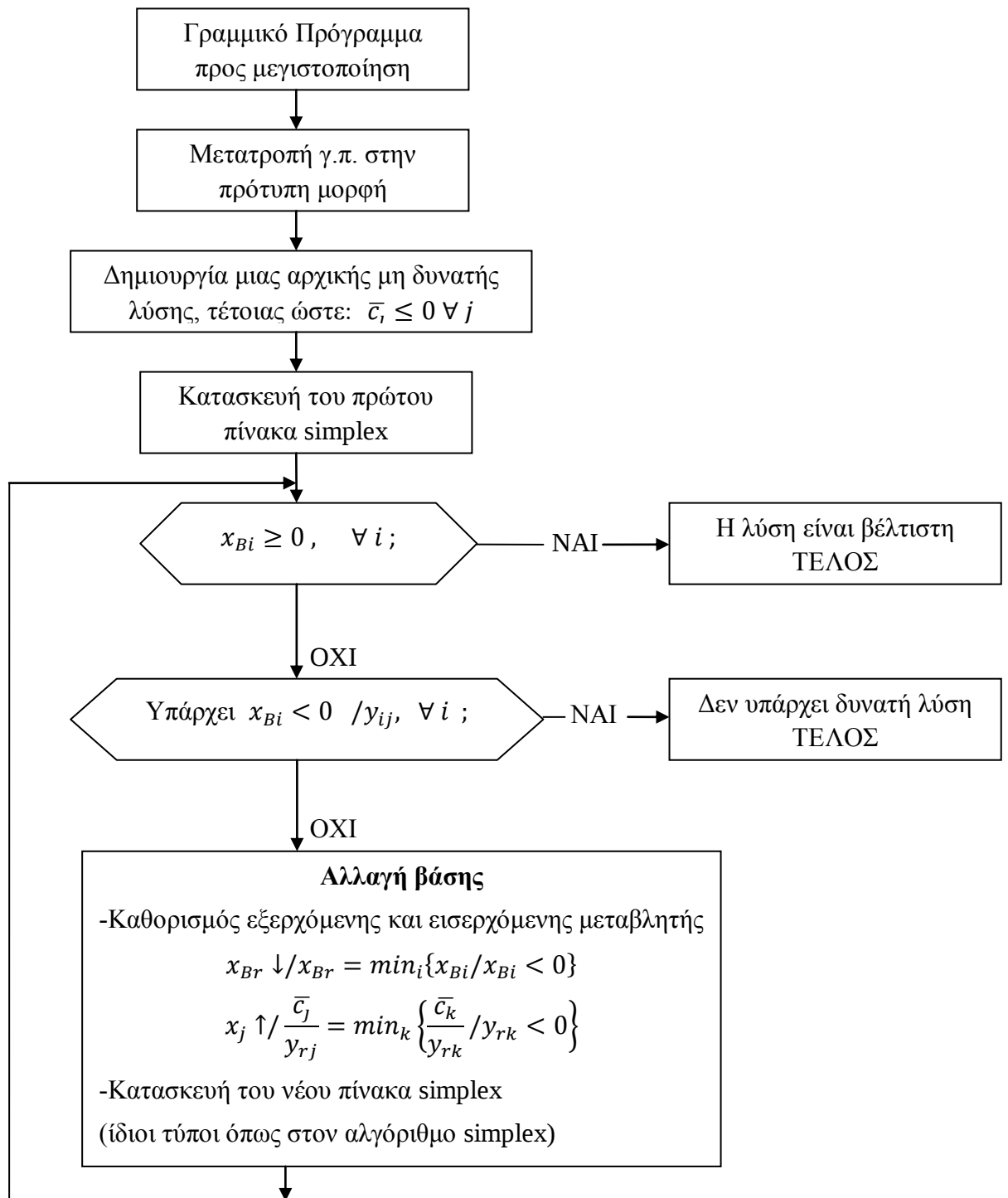
Για κάθε γραμμικό πρόγραμμα ορίζεται ένα δυϊκό γραμμικό πρόγραμμα, το οποίο έχει τόσες μεταβλητές  $u \geq 0$ , όσοι οι περιορισμοί του αρχικού και περιορισμούς όσες και οι μεταβλητές του αρχικού γραμμικού προγράμματος. Το αρχικό γραμμικό πρόγραμμα ονομάζεται στην περίπτωση αυτή πρωτεύον. Αν το πρωτεύον γραμμικό πρόγραμμα βρίσκεται στην κανονική του μορφή και είναι πρόβλημα μεγιστοποίησης, τότε το αντίστοιχο δυϊκό βρίσκεται επίσης στην κανονική του μορφή, αλλά ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Ακόμα υπάρχει εναλλαγή ρόλων μεταξύ του δεύτερου μέλους και των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης ανάμεσα στα δύο γραμμικά προγράμματα.

Οι σχέσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δυϊκού υπό καθεστώς βελτιστότητας δημιούργησαν την ιδέα ενός νέου αλγορίθμου, ουσιαστικά συμπληρωματικού της κλασσικής simplex, με το όνομα **δυϊκός αλγόριθμος simplex**. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε κάθε γραμμικό πρόγραμμα το οποίο πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

1. Το πρωτεύον γραμμικό πρόγραμμα δε διαθέτει μια αρχική βασική εφικτή λύση.
2. Το δυϊκό του γραμμικού προγράμματος διαθέτει μία αρχική βασική εφικτή λύση.

Σύμφωνα με το θεώρημα της δυϊκότητας, σε κάθε βασική μεταβλητή του δυϊκού αντιστοιχεί μία μη βασική μεταβλητή του πρωτεύοντος και συνεπώς, η αρχική βάση του δυϊκού είναι δυνατή ( $u_b \geq 0$ ) εάν και μόνο εάν  $\bar{c}_j \leq 0 \forall j$  στο πρωτεύον. Το σημείο εκκίνησης του αλγορίθμου προϋποθέτει την ύπαρξη βασικής εφικτής λύσης στο δυϊκό.

Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται με μορφή οργανογράμματος στο Σχήμα 3.5. Οι κανόνες αλλαγής βάσης του αλγορίθμου προκύπτουν λογικά από εκείνους για τον αλγόριθμο simplex, με μόνη διαφορά ότι το κριτήριο εξόδου προηγείται του κριτηρίου εισόδου. Τέλος ο αλγόριθμος περατώνεται όταν  $x_{Bi} \geq 0 \forall i$ .



Σχήμα 3.5: Ο δυϊκός αλγόριθμος simplex.

### 3.3.4 Μέθοδος κλάδου και φράγματος

Σε περιπτώσεις που οι μεταβλητές απόφασης είναι φραγμένες, παίρνουν δηλαδή περιορισμένο αριθμό ακέραιων τιμών, οι ιδεώδεις μέθοδοι επίλυσης ακέραιων γραμμικών προγραμμάτων είναι οι μέθοδοι τύπου κλάδου και φράγματος (branch and bound methods) οι οποίες στηρίζονται σε μια έμμεση απαρίθμηση των δυνατών ακέραιων λύσεων που επιδέχεται το πρόβλημα.

Για το πρόβλημα μεγιστοποίησης:

$$[max] z = c^t x \quad (3.12)$$

υ.π

$$x \in \mathcal{A} = \{x \in R^{\ell} \mid Ax \leq b, x \geq 0 \text{ και ακέραιες}\} \quad (3.13)$$

Η γενική μέθοδος κλάδου και φράγματος μπορεί να αναπτυχθεί στα εξής τέσσερα στάδια:

1. Στάδιο 1: Επιλύεται το πρόβλημα του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τη γνωστή μέθοδο simplex χωρίς περιορισμούς ακεραιότητας των μεταβλητών απόφασης.
2. Στάδιο 2: Εάν η λύση που επιλέχθηκε στο Στάδιο 1, ικανοποιεί τους περιορισμούς ακεραιότητας των μεταβλητών, η λύση είναι η ζητούμενη και ο αλγόριθμος περατώνεται. Εάν η λύση δεν ικανοποιεί τους περιορισμούς ακεραιότητας, καθορίζεται ενδεχομένως μία πρώτη ακέραιη λύση (συνήθως μετά από στρογγυλεύσεις), της οποίας η τιμή  $z$  αποτελεί το αρχικό κάτω φράγμα. Πήγαινε στο Στάδιο 3.
3. Στάδιο 3: Το σύνολο των πραγματοποιήσιμων μη ακέραιων λύσεων διακλαδίζεται σε δύο υποσύνολα, εισάγοντας αλληλοαποκλειόμενους περιορισμούς οι οποίοι απαιτούνται για να ικανοποιήσει τον περιορισμό ακεραιότητας μια βασική μεταβλητή με ρητή τιμή. Εάν δηλαδή η βέλτιστη λύση του γραμμικού προγράμματος είναι η  $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{\ell}^*)^t$  και η τιμή  $x_i^*$  της μεταβλητής  $x_i$  δεν είναι ακέραιη, δημιουργούνται τα εξής δύο υποπροβλήματα:  
Υποπρόβλημα A:  $[max] z = c^t x$ , υ.π.  $x \in \mathcal{A} \ x \leq [x_i^*]$   
Υποπρόβλημα B:  $[max] z = c^t x$ , υ.π.  $x \in \mathcal{A} \ x \leq [x_i^*] + 1$   
όπου  $[x_i^*]$  είναι το ακέραιο μέρος του ρητού αριθμού  $x_i^*$ .
4. Στάδιο 4: Για κάθε υποσύνολο λύσεων η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της βέλτιστης μη ακέραιης λύσης ορίζεται ως το άνω φράγμα. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της καλύτερης μέχρι τώρα ακέραιης λύσης ορίζεται ως το κάτω φράγμα. Εκείνα τα υποσύνολα των οποίων τα άνω φράγματα είναι κατώτερα από το ισχύον κάτω

φράγμα δεν εξετάζονται για περαιτέρω διακλάδωση. Εάν υπάρχει πραγματοποιήσιμη ακέραιη λύση με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ίση ή μεγαλύτερη του άνω φράγματος κάθε υποσυνόλου, η λύση αυτή αποτελεί τη βέλτιστη του ακέραιου γραμμικού προγράμματος. Εάν όχι, επιλέγεται ένα υποσύνολο με το καλύτερο άνω φράγμα για περαιτέρω διακλάδωση. Πήγαινε στο Στάδιο 3.

### **3.4 Οικονομικές έννοιες**

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες βασικές οικονομοτεχνικές έννοιες, απαραίτητες για την μοντελοποίηση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

#### **3.4.1 Οικονομική ζωή**

Εφόσον κάποιος αναφέρεται στο μέλλον πρέπει να προσδιορίσει τον ορίζοντα του προγραμματισμού. Ο ορίζοντας του προγραμματισμού προσδιορίζει το χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του οποίου μία επένδυση αναμένεται να χρησιμοποιηθεί, με άλλα λόγια την οικονομική ζωή της επένδυσης. Η οικονομική ζωή δεν είναι αναγκαστικά ταυτόσημη με την τεχνική ζωή, η οποία αναφέρεται στο πόσο, τεχνικά, είναι δυνατόν να διαρκέσει μία επένδυση. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια της οικονομικής ζωής είναι:

1. Η τεχνολογική ανταγωνιστικότητα.
2. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος.
3. Η πιθανότητα εμφάνισης υποκατάστατου ή εναλλακτικού προϊόντος.
4. Οι δυνάμεις της αγοράς, η επίδραση στην συμπεριφορά του καταναλωτικού κοινού.

Ο προσδιορισμός της οικονομικής ζωής πέρα από την εξέταση των παραγόντων που την επηρεάζουν θα στηριχθεί σε συγκριτικά (ή ανάλογα) στοιχεία του παρελθόντος. Η οικονομική ζωή, σαν μεταβλητή του προβλήματος, δεν είναι πάντοτε σταθερή, ούτε είναι απαραίτητη η διατήρηση της λειτουργίας μίας επένδυσης καθ' όλη τη διάρκεια της αρχικά υπολογισμένης οικονομικής ζωής.

#### **3.4.2 Διττή αξία χρήματος**

Το χρήμα έχει διττή αξία, ήτοι την αριθμητική τιμή του καθώς και την χρονική στιγμή στην οποία αναφερόμαστε. Γύρω από αυτό το οπτικό πρίσμα αναλύεται μέσω μαθηματικών τύπων η έννοια του επιτοκίου και οι βασικές αρχές της διαχρονικής αξίας του χρήματος.

### 3.4.3 Απλό επιτόκιο

Στο τέλος της κάθε περιόδου το ποσό που θα πληρωθεί ισούται με το αρχικό ποσό στο οποίο αναφερόμαστε συν το ποσοστό του επιτοκίου πολλαπλασιασμένο επί το αρχικό ποσό επί τον συνολικό αριθμό των περιόδων  $N$  που έχει επιλεχθεί. Το ποσοστό του επιτοκίου θεωρείται ότι δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις.

Γενίκευση για απλό επιτόκιο:

$$F_N = P + i \cdot P \cdot N \quad (3.14)$$

όπου  $F_N$  το πληρωτέο ποσό της περιόδου  $N$  μετά το δανεισμό,  $P$  το σημερινό πληρωτέο ποσό,  $N$  ο αριθμός περιόδων και  $i$  το ποσοστό επιτοκίου.

Ο ανατοκισμός διαφέρει από τον απλό τόκο διότι το επιτόκιο πληρώνεται στο αρχικό ποσό επαυξημένο με τον τόκο της προηγούμενης περιόδου. Στην περίπτωση του ανατοκισμού, βάσει του προηγούμενου τύπου, για  $N$  περιόδους προκύπτει στον ακόλουθο τύπο:

$$F_N = P \cdot (1 + i)^N \quad (3.15)$$

ο τύπος αυτός συμβολίζεται ως  $(F/P, i, N)$  και ονομάζεται μετασχηματιστής  $F/P$  ή αλλιώς «συντελεστής μελλοντικής συσσώρευσης μοναδικού ποσού» γιατί μας υπολογίζει το μελλοντικό ποσό  $F$ , μετά από  $N$  χρονικές περιόδους, δοθέντος ενός αρχικού ποσού  $P$ .



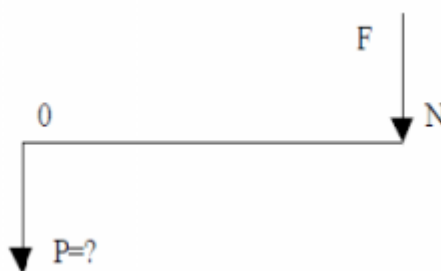
Σχήμα 3.5: Μετασχηματιστής  $F/P$ .

### 3.4.4 Βασικοί μετασχηματισμοί

#### 3.4.4.1 Μετασχηματιστής $P/F$

Αντίστοιχα μπορεί να υπολογιστεί το ισοδύναμο σημερινό ποσό  $P$ , ενός δοθέντος μελλοντικού ποσού  $F$  το οποίο είναι διαθέσιμο μετά από  $N$  χρονικές περιόδους. Ο μετασχηματισμός ενός μελλοντικού ποσού σε ένα ισοδύναμο σημερινό ποσό γίνεται μέσω του μετασχηματιστή με την ονομασία «**συντελεστής παρούσας αξίας μοναδικού ποσού**» ή αλλιώς μετασχηματιστή  $P/F$ , ο οποίος συμβολίζεται ως  $(P/F, i, N)$  και προκύπτει από τον τύπο:

$$P = F_N \cdot \left( \frac{1}{1+i} \right)^N \quad (3.16)$$

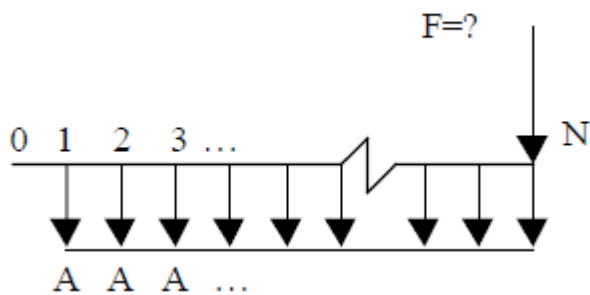


Σχήμα 3.6: Μετασχηματιστής  $P/F$ .

#### 3.4.4.2 Μετασχηματιστής $F/A$

Για τον υπολογισμό ενός ισοδύναμου μελλοντικού ποσού  $F$  το οποίο είναι διαθέσιμο μετά από  $N$  περιόδους, για ένα γνωστό ετήσιο ομοιόμορφα καταναμημένο ποσό  $A$  χρησιμοποιείται ο συντελεστής με την ονομασία «**συντελεστής μελλοντικής συσσώρευσης σειριακά καταναμημένου ομοιόμορφου ποσού**» ή αλλιώς μετασχηματιστής  $F/A$ , συμβολίζεται  $(F/A, i, N)$ , ο οποίος προκύπτει από τον τύπο:

$$F_N = A \cdot \left[ \frac{(1+i)^N - 1}{i} \right] \quad (3.17)$$

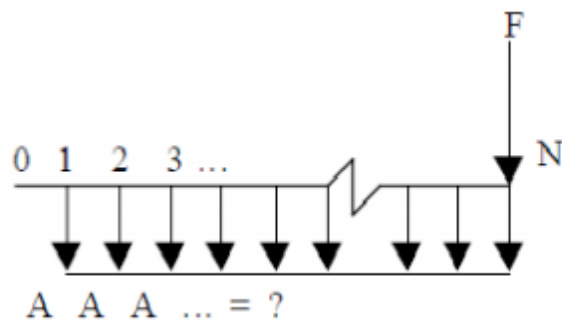


Σχήμα 3.7:Μετασχηματιστής  $F/A$

### 3.4.4.3 Μετασχηματιστής $A/F$

Αντίστροφα, για τον μετασχηματισμό ενός γνωστού μελλοντικού ποσού  $F$ , το οποίο είναι διαθέσιμο μετά από  $N$  έτη, σε ένα ισόποσο ετήσιο ομοιόμορφα κατανεμημένο ποσό χρησιμοποιείται ο μετασχηματιστής «χρεολυτικού κεφαλαίου» ή απλούστερα μετασχηματιστής  $A/F$ , ο οποίος συμβολίζεται  $(A/F, i, N)$  και υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$A = F_N \cdot \left[ \frac{i}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (3.18)$$

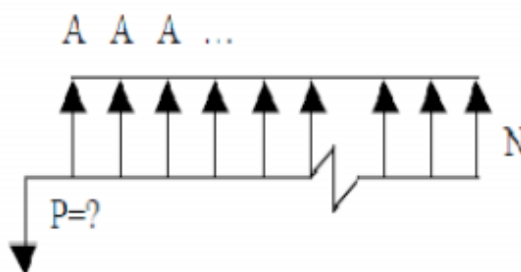


Σχήμα 3.8:Μετασχηματιστής  $A/F$ .

#### 3.4.4.4 Μετασχηματιστής $P/A$

Με τον συγκεκριμένο μετασχηματιστή μπορεί να υπολογιστεί από ένα γνωστό ετήσιο ισόποσο ομοιόμορφα κατανεμημένο ποσό  $A$ , το ισοδύναμο σημερινό του  $P$ . Ουσιαστικά είναι εφικτός ο υπολογισμός της παρούσας αξίας μίας σειράς πληρωμών ενός ποσού  $A$ . Ο μετασχηματιστής ονομάζεται  $P/A$ , συμβολίζεται  $(P/A, i, N)$  και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = A \cdot \left[ \frac{(1+i)^N - 1}{i \cdot (1+i)^N} \right] \quad (3.19)$$

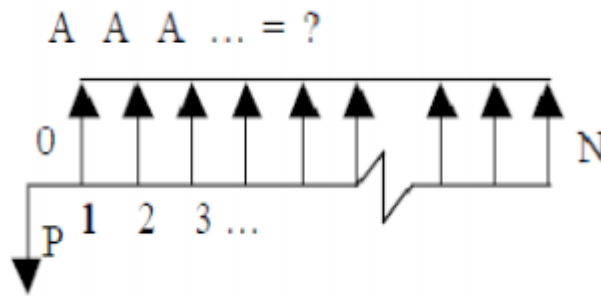


Σχήμα 3.9: Μετασχηματιστής  $P/A$

#### 3.4.4.5 Μετασχηματιστής $A/P$

Με τον συντελεστή αυτόν υπολογίζεται ένα ισόποσο ομοιόμορφα κατανεμημένο στο χρόνο ποσό (π.χ. μια ετήσια δόση) από το ισοδύναμο σημερινό ποσό  $P$ . Αναφέρεται ως «**συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου**» ή απλούστερα μετασχηματιστής  $A/P$  ο οποίος συμβολίζεται  $(A/P, i, N)$  και δίνεται από τον τύπο:

$$A = P \cdot \left[ \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (3.20)$$



Σχήμα 3.10: Μετασχηματιστής  $A/P$

### 3.4.5 Πληθωρισμός

Ο πληθωρισμός εκφράζει το ρυθμό αύξησης των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών μέσα σε ένα οικονομικό σύστημα με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, λέγοντας ότι παρατηρήθηκε 2% αύξηση του πληθωρισμού τον μήνα Μάρτιο, σημαίνει ότι το επίπεδο των προσφερόμενων αγαθών και υπηρεσιών έχει αυξηθεί κατά 2% από το επίπεδο τιμών του Φεβρουαρίου. Ο πληθωρισμός παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με τον τόκο και το επιτόκιο. Ως ρυθμός αύξησης του πληθωρισμού  $j$ , ορίζεται ο ποσοστιαίος δείκτης μεταβολής της τιμής των αγαθών και υπηρεσιών σε διάστημα ενός έτους.

Στο έτος  $N$  για την μετατροπή σταθερών τιμών από τρέχουσες στο ίδιο έτος έχουμε:

$$F_D = F_I \cdot (1 + j)^{-N} \quad (3.21)$$

Αντίστοιχα, για την μετατροπή από σταθερές σε τρέχουσες τιμές, σε μελλοντικό χρόνο έχουμε:

$$F_I = F_D \cdot (1 + j)^N \quad (3.22)$$

Για την παρούσα αξία των σταθερών τιμών στο έτος  $N$  έχουμε:

$$P = F_I \cdot \left[ \frac{1}{(1 + j)} \cdot \frac{1}{(1 + i)} \right]^N \quad (3.23)$$

όπου  $P$  το ποσό στο έτος μηδέν,  $N$  οι χρονικές περίοδοι,  $F_I$  οι τρέχουσες τιμές (πληθωρισμένες) στο έτος  $N$ ,  $F_D$  οι σταθερές τιμές (αποπληθωρισμένες) στο έτος  $N$ ,  $i$  η τιμή του επιτοκίου για σταθερά ποσά στο χρόνο αναφοράς και  $j$  ο ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού.

## ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 4.1 Γενικά

Αυτόνομο ή απομονωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται ένα σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την κάλυψη μιας κοντινής γεωγραφικά ζήτησης, μη συνδεδεμένης σε κάποιο κεντρικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται πρωτίστως στις απομονωμένες περιοχές, όπου οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι αντισυμβαλτικές να εγκατασταθούν, λόγω της μορφής του εδάφους, των δυσκολιών στη διέλευση των γραμμών μετάδοσης ή των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η οικοδόμηση νέων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακριβή ακόμη και χωρίς αυτούς τους περιορισμούς. Μια γραμμή 230-kV κοστίζει περισσότερα από \$1 εκατομμύριο ανά μίλι. Για αυτό το λόγο, ένα αυτόνομο σύστημα αιώλικής ενέργειας θα ήταν πιο οικονομικά συμφέρον για τα απομακρυσμένα χωριά που απέχουν αρκετά μίλια από την κοντινότερη γραμμή μετάδοσης. Για την ικανοποίηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια του ίδιου απομακρυσμένου χωριού, το αντίστοιχο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα θα χρειαστεί να επενδυθεί μεγαλύτερο κεφάλαιο, καθώς σύμφωνα με την υπάρχουσα κατάσταση, η ενέργεια που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα είναι ακριβότερη από αυτή που παράγεται από ένα αιώλικό.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά και αιώλικα αυτόνομα συστήματα μπορεί να μεταβάλλεται σε ωριαία ή καθημερινή βάση. Επομένως, το αυτόνομο σύστημα πρέπει να έχει μερικά μέσα αποθήκευσης, έτσι ώστε να αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια που προκύπτει, για παράδειγμα μια ηλιόλουστη ημέρα, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια βροχερή ημέρα. Η αποθήκευση αυτή είναι εφικτή με τη χρήση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Ακόμα το αιώλικό ή το φωτοβολταϊκό αυτόνομο σύστημα ή και τα δύο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαμόρφωση ενός υβριδικού συστήματος με μια γεννήτρια diesel στις απομονωμένες περιοχές ή με μία κυψέλη καυσίμου στις αστικές περιοχές.

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, περισσότεροι από 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε χωριά τα οποία δεν έχουν συνδεθεί ακόμα με τις γραμμές μετάδοσης. Αυτά τα χωριά είναι η μεγαλύτερη πιθανή αγορά για τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν μια γεννήτρια diesel, ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πλαίσια για την ικανοποίηση των

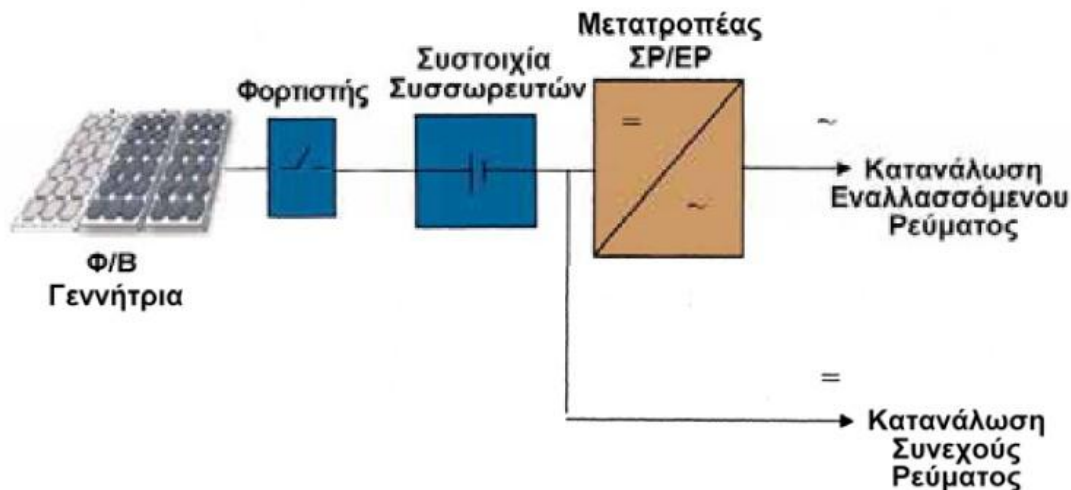
ενεργειακών αναγκών τους. Επιπλέον, τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα δημιουργούν περισσότερες θέσεις εργασίας ανά επενδύόμενο δολάριο, σε σχέση με πολλές άλλες βιομηχανίες. Ακόμα, συμβάλλουν στην ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις αγροτικές περιοχές καθώς και στη μείωση της μετανάστευσης προς τα ήδη πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα.

Επειδή οι πηγές παραγωγής ενέργειας έχουν σημαντικά διαφορετικά χαρακτηριστικά απόδοσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν παράλληλα. Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι στην ουσία πιο δύσκολο και ακριβό να σχεδιαστεί από το διασυνδεδεμένο σύστημα που χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο.

## **4.2 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Η απαιτούμενη από την εφαρμογή, ηλεκτρική ενέργεια, καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τη ΦΒ συστοιχία, χωρίς τη συμμετοχή άλλων Α.Π.Ε. ή γεννητριών και μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Αφορούν εφαρμογές μη συνδεδεμένες στο εθνικό δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς (DC) είτε εναλλασσόμενης (AC) τάσεως. Τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε:

1. Αυτόνομα ΦΒ συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής (Direct-coupled PV systems), στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η ΦΒ συστοιχία, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άντληση για πότισμα καλλιεργειών που δεν απαιτούν αυστηρά τακτική λειτουργία του συστήματος.
2. Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα αυτόνομα ΦΒ συστήματα φωτισμών οδών, αλσυλλίων, υποστήριξη συστημάτων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών κ.α. Η ΦΒ συστοιχία, κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας, ικανοποιεί τη ζήτηση του φορτίου από την εφαρμογή, ενώ παράλληλα φορτίζει τους συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές ικανοποιούν τη ζήτηση φορτίου όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή όταν δεν επαρκεί η παραγόμενη ενέργεια από τη ΦΒ συστοιχία. Ακόμα υπάρχει ένας μετατροπέας ο οποίος αναλαμβάνει τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος, από τη ΦΒ συστοιχία και τους συσσωρευτές, σε εναλλασσόμενο. Συνήθως η συστοιχία έχει διόδους απομόνωσης, έτσι ώστε να αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος. Τα συστήματα αυτά, σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών.

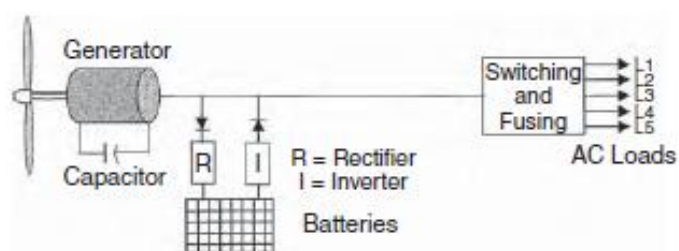


Σχήμα 4.1: Διάταξη αυτόνομου ΦΒ συστήματος με συσσωρευτές.

### 4.3 Αυτόνομα αιολικά συστήματα

Ένα τυπικό αυτόνομο αιολικό σύστημα που χρησιμοποιεί μια γεννήτρια σταθερής ταχύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Έχει πολλά παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα με το αυτόνομο ΦΒ σύστημα. Για ένα μικρό αυτόνομο αιολικό σύστημα που ικανοποιεί τα τοπικά φορτία, μια ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες κάνει το σύστημα περισσότερο απλό και εύκολο να λειτουργήσει. Από την άλλη μεριά η επαγωγική γεννήτρια παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο χρησιμοποιείται από τους περισσότερους καταναλωτές σήμερα. Η γεννήτρια είναι αυτοτροφοδοτούμενη από τους πυκνωτές που είναι συνδεδεμένοι στη διακλάδωση με τα τερματικά παραγωγής. Η συχνότητα ελέγχεται με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής της πτερωτής. Οι συσσωρευτές φορτίζονται από έναν μετατροπέα AC-DC και εκφορτίζονται μέσω ενός μετατροπέα DC-AC. Η απόδοση της ανεμογεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση περιλαμβάνει τον καθορισμό του κατάλληλου πυκνωτή έτσι ώστε η ανεμογεννήτρια να μπορεί να αυτοτροφοδοτείται για την επιθυμητή τάση και συχνότητα.

Τα αυτόνομα αιολικά συστήματα χρησιμοποιούνται συχνά για την άντληση νερού και την άρδευση αγροτικών καλλιεργειών. Στη Γερμανία, σχεδόν τα μισά από τα αυτόνομα αιολικά συστήματα που εγκαθίστανται είναι σε αγροκτήματα και ανήκουν είτε σε ιδιώτες αγρότες είτε σε κάποιον οργανισμό.



Σχήμα 4.2: Διάταξη αυτόνομου αιολικού συστήματος με συσσωρευτές.

## 4.4 Υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει ως στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς δυσμενείς συνέπειες για το περιβάλλον. Όμως, πρέπει να διασφαλίζεται εξίσου η αξιοπιστία και η ποιότητα. Για αυτό οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να συνδυάζονται με τις ήδη υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ή και μεταξύ τους. Τα συστήματα που αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται υβριδικά συστήματα.

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται για την παραγωγή και τη διαχείριση της ηλεκτρικής ισχύος. Είναι ανεξάρτητα από τα μεγάλα εθνικά δίκτυα και ενσωματώνουν πολλούς και διαφορετικούς τύπους πηγών ισχύος που συνίστανται κυρίως από Α.Π.Ε. αλλά και από πηγές συμβατικών καυσίμων (H/Z). Το μέγεθός τους από πλευράς ισχύος μπορεί να κυμαίνεται από πολλά MW όπως για παράδειγμα στα αυτόνομα δίκτυα απομονωμένων νησιών, μέχρι λίγα kW όπως στις περιπτώσεις απομονωμένων εξοχικών κατοικιών. Μικρά υβριδικά συστήματα που τροφοδοτούν μόνο φορτία DC ισχύος λίγων kW μπορούν να χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, όπως για παράδειγμα σε αναμεταδότες τηλεπικοινωνιών. Τα υβριδικά πάρκα είναι το πρώτο βήμα για μια εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς μπορούν να συνδυάζουν αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια με τις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ρεύματος (με ορυκτά καύσιμα ή πετρέλαιο).

Τα υβριδικά συστήματα ισχύος είναι μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε ώστε να είναι εφικτή η τροφοδοσία με ηλεκτρική ισχύ AC καθορισμένης συχνότητας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στο σημείο κατανάλωσης μας απαλλάσσει από τη δαπάνη κατασκευής του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ελαχιστοποιεί τις απώλειες ισχύος που εμφανίζονται στο δίκτυο αυτό, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για δίκτυα μεγάλων αποστάσεων.

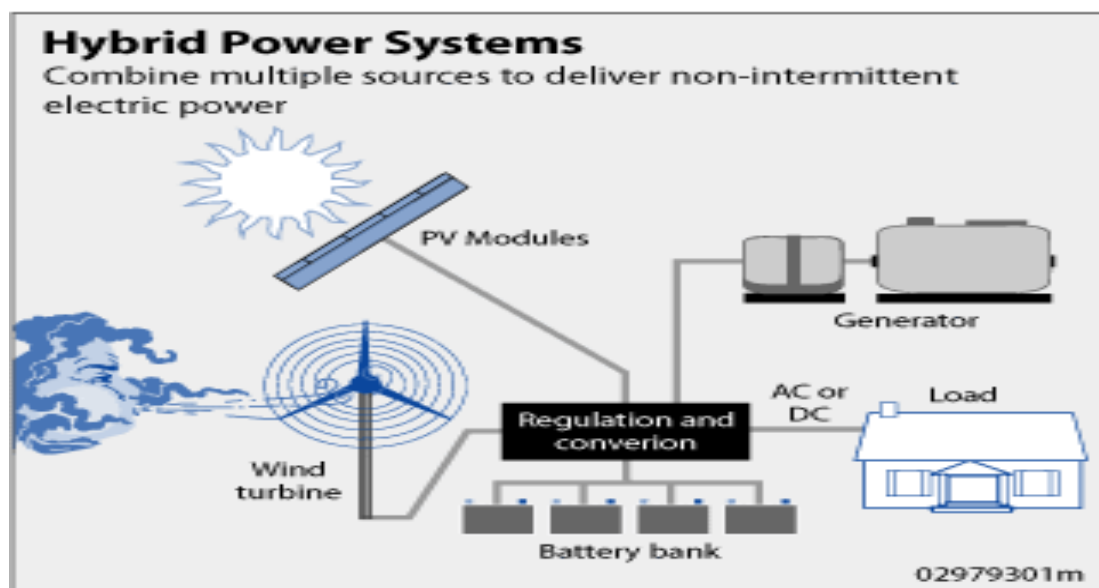
Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα εμπερικλείουν τουλάχιστον μια συμβατική γεννήτρια ντίζελ AC, ένα σύστημα διανομής, ένα διανεμημένο φορτίο AC, συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και κάποιες ανανεώσιμες πηγές ισχύος όπως ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά κ.α. Ας σημειωθεί ότι οι συσκευές αποθήκευσης λειτουργούν σε ορισμένες περιπτώσεις και σαν φορτία. Γενικά ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτριες ντίζελ AC, γεννήτριες ντίζελ DC, ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας AC ή DC, φορτία, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικά, φωτοβολταϊκά), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, μετατροπείς ισχύος, σύγχρονους πυκνωτές, διατάξεις αυτόματης απόρριψης φορτίου και ένα σύστημα διαχείρισης και εποπτικού ελέγχου του αυτόνομου δικτύου. Οι σταθμοί που παράγουν ηλεκτρική ισχύ από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λειτουργούν όχι μόνο όταν η ενέργειά τους μπορεί άμεσα να απορροφηθεί από το δίκτυο αλλά και εκτός από αυτήν την χρονική περίοδο, προκειμένου π.χ. να αντλήσουν νερό και να ανυψώσουν τη στάθμη του νερού σε ένα ταμιευτήρα από τον οποίο μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια σε ώρες αιχμής φορτίου, ώστε να

απορροφηθεί αυτή από το δίκτυο. Προκειμένου τα έργα αυτά να είναι οικονομικά πιο αποδοτικά, μπορεί επίσης να χρησιμοποιούν κατά τις ώρες βασικού φορτίου επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια είτε από το δίκτυο είτε από συμβατικές πηγές ενέργειας έτσι ώστε να αποθηκεύεται ακόμη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα να συνεισφέρουν περισσότερο σε ώρες αιχμής φορτίου κατά τις οποίες η ενέργεια είναι ακριβότερη.

Συνήθως, ο προσδιορισμός του μεγέθους της κάθε συνιστώσας του υβριδικού συστήματος γίνεται με κριτήριο τη βέλτιστη, από τεχνοοικονομικής πλευράς, κάλυψη των ηλεκτρικών ενεργειακών απαιτήσεων μιας εφαρμογής. Έχουν προταθεί διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού των συνιστωσών ενός υβριδικού συστήματος, οι διαφορές των οποίων εντοπίζονται σε εξειδικευμένα οικονομοτεχνικά και λειτουργικά κριτήρια βελτιστοποίησης της αποδιδόμενης από το σύστημα, ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεθοδολογίες αυτές οδήγησαν στη δημιουργία λογισμικών, για τον προσδιορισμό των συνιστωσών των υβριδικών συστημάτων.

Γενικότερα, οι ενεργειακοί υπολογισμοί σε ένα υβριδικό σύστημα αποσκοπούν στον προσδιορισμό των υποσυστημάτων του, με βάση την απαίτηση για ολική ή μερική κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων των καταναλώσεων της εφαρμογής, ανά μήνα ή ετησίως. Λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες κατά τις ενεργειακές μετατροπές και την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, από το χώρο παραγωγής στο χώρο εκμετάλλευσης. Αναλυτικότερα ενδιαφερόμαστε για τον προσδιορισμό:

1. Του μεγέθους των επιμέρους ανανεώσιμων ενεργειακών πηγών (ΦΒ συστοιχίας και ανεμογεννήτριας).
2. Της χωρητικότητας του συσσωρευτή, αν απαιτείται.
3. Των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονικών διατάξεων προσαρμογής και μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας (μετατροπείς), όσων η παρουσία κρίνεται επιβεβλημένη.
4. Των τεχνικών χαρακτηριστικών της συμβατικής πηγής, σύμφωνα με το βαθμό συμμετοχής της στην κάλυψη των ενεργειακών καταναλώσεων της εφαρμογής.



**Σχήμα 4.3:** Αυτόνομο υβριδικό σύστημα με ΦΒ, ΑΓ, συσσωρευτές και νηξελογεννήτρια.

## 4.5 Μοντελοποίηση υβριδικού συστήματος

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση των αρχών του γραμμικού προγραμματισμού, έτσι ώστε να βρεθεί η λύση που ελαχιστοποιεί το κόστος του υβριδικού συστήματος. Το υβριδικό σύστημα που μελετάται αποτελείται από φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, νηζελογεννήτρια και συσσωρευτές.

Το έργο της τεχνικής βελτιστοποίησης είναι να καθοριστεί το μέγεθος κάθε μίας από τις συνιστώσες που απαρτίζουν το σύστημα, έτσι ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση του φορτίου όσο το δυνατόν οικονομικότερα. Για αυτό το λόγο, οι μεταβλητές ελέγχου θα αντιπροσωπεύει το μέγεθος ή το βαθμό των συνιστωσών του συστήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία τίθεται προς ελαχιστοποίηση, εκφράζει το καθαρό παρόν κόστος και οι περιορισμοί εκφράζουν τις απαιτήσεις σε φορτίο.

Η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει αφαιρώντας την παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης, του εξοπλισμού της κάθε συνιστώσας του συστήματος, από το άθροισμα του κόστους συντήρησης με το αρχικό επενδύσιμο κεφάλαιο. Η αντικειμενική συνάρτηση γράφεται ως εξής:

$$z = \left( \sum_{k=1}^4 I_k - S_{pk} + OM_{pk} \right) \quad (4.1)$$

όπου  $k$  δείκτης που παίρνει τις τιμές 1, 2, 3, 4 που αντιστοιχούν σε ΑΓ, ΦΒ, νηζελογεννήτρια και συσσωρευτές,  $I_k$  το αρχικό επενδύσιμο κεφάλαιο για κάθε συνιστώσα  $k$  του συστήματος,  $S_{pk}$  η παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης κάθε συνιστώσας  $k$ ,  $OM_{pk}$  η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης και λειτουργίας κάθε συνιστώσας  $k$ .

Οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται, κατά την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, πρέπει να εξασφαλίζουν ότι η ζήτηση ικανοποιείται, σύμφωνα με τα κριτήρια αξιοπιστίας που έχουν τεθεί. Η έκταση της αξιοπιστίας του συστήματος υπολογίζεται από τον δείκτη  $EENS$ , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ζήτησης του φορτίου, που είναι αποδεκτό να μην ικανοποιηθεί σε κάθε υποπερίοδο της εφαρμογής. Η τιμή του δείκτη  $EENS$  ορίζεται από τον αναλυτή, με κριτήριο τις προτεραιότητες που έχουν τεθεί και αφορούν τη ζήτηση του φορτίου και την στρατηγική της τιμολόγησης. Οπότε οι περιορισμοί μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$\sum_{k=1}^4 E_k(i) \geq (1 - EENS) \cdot Load(i) \quad (4.2)$$

Και

$$\sum_{k=1}^4 E_k(i) \leq Load(i) \quad (4.3)$$

για όλες τις υποπεριόδους  $i$  όπου  $E_k$  η παραγόμενη ενέργεια από τη συνιστώσα  $k$  κατά τη διάρκεια της υποπεριόδου  $i$  και  $Load(i)$  η απαιτούμενη ενέργεια κατά την υποπερίοδο  $i$ .

#### 4.5.1 Οικονομικές εκτιμήσεις

Όπως είναι φανερό από την αντικειμενική συνάρτηση, χρειάζεται να καθοριστούν τα μεγέθη της παρούσας αξίας της αξίας μεταπώλησης καθώς και ορισμένων ετήσιων πληρωμών. Υποθέτοντας χρονικό ορίζοντα  $N$  ετών, επιτόκιο  $r$  καθώς και ρυθμό αύξησης του πληθωρισμού  $j$ , έχουμε:

Αν μία συνιστώσα του υβριδικού συστήματος έχει αξία  $S$  στο τέλος της οικονομικής της ζωής, τότε η αξία μεταπώλησης της σε  $N$  χρόνια από το έτος σχεδίαση και δεδομένου ότι ξεκινάει τη λειτουργία της άμεσα, θα είναι  $S_k \cdot (1+j)^N$ . Η παρούσα αξία της αξία μεταπώλησης, λαμβάνοντας υπόψη το επιτόκιο θα είναι:

$$S_{pk} = \frac{S_k \cdot (1+j)^N}{(1+r)^N} \quad (4.4)$$

Αν τεθεί  $fac_1 = (1+j)^N / (1+r)^N$  τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως:

$$S_{pk} = S_k \cdot fac_1 \quad \forall k = 1,2,3,4 \quad (4.5)$$

Αν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης κάθε συνιστώσας είναι  $OM_k$ , αυτό τείνει να κλιμακώνεται κάθε χρόνο με ένα ρυθμό, ο οποίος δεν είναι απαραίτητα ίσος με το ρυθμό μεταβολής του πληθωρισμού. Αν θεωρηθεί ένας ρυθμός κλιμάκωσης  $es$ , το κόστος συντήρησης και λειτουργίας που προκύπτει το έτος  $y$  θα είναι  $OM_k \cdot (1+es)^y$  και η παρούσα αξία θα είναι:

$$\frac{OM \cdot (1+es)^y}{(1+r)^y} \quad (4.6)$$

Το άθροισμα της παρούσας αξίας όλων των ετήσιων πληρωμών θα δίνεται από τον τύπο:

$$\sum_{y=1}^N \frac{OM \cdot (1 + es)^y}{(1 + r)^y} = OM \cdot fac_2 \quad (4.7)$$

όπου

$$fac_2 = \sum_{y=1}^N \frac{(1 + es)^y}{(1 + r)^y} = \frac{(1 + es)}{(1 + r)} \cdot \left( 1 - \left( \frac{1 + es}{1 + r} \right)^N \right) \quad \text{για } r \neq es \quad (4.8)$$

και προφανώς  $fac_2 = N$  για  $r = es$ .

Συνεπώς για κάθε συνιστώσα  $k$  στο σύστημα προκύπτει:

$$OM_{pk} = OM_k \cdot fac_2 \quad (4.9)$$

#### 4.5.2 Ανεμογεννήτριες

Η μεταβλητή ελέγχου της ανεμογεννήτριας αντιπροσωπεύει τη συνολική επιφάνεια της πτερωτής της ΑΓ, μετρούμενη σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ) και συμβολίζεται ως  $A_w$ . Η τιμή που θα μπορεί να πάρει η μεταβλητή αυτή, περιορίζεται από τη διαθέσιμη έκταση, για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος, καθώς και από το προϋπολογισμό του έργου. Αριθμητικά, η μεταβλητή  $A_w$  παίρνει τη τιμή της μέσω της βελτιστοποίησης με χρήση γραμμικού προγραμματισμού, ωστόσο ο αναλυτής θα πρέπει να διανείμει κατάλληλα τη τιμή της μεταβλητής  $A_w$  ανάμεσα σε διάφορες ΑΓ.

Δοθέντος του  $a_w$  το αρχικό κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο της ΑΓ, ο όρος  $I_1$  της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος αναφέρεται στο συνολικό αρχικό κόστος των ΑΓ είναι ίσος με  $I_1 = a_w \cdot A_w$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι αν η τιμή της ανεμογεννήτριας δίνεται σε €/kW, τότε η τιμή του συντελεστή  $a_w$  μπορεί να βρεθεί, βρίσκοντας πόσα kW παράγει η ΑΓ ανά τετραγωνικό μέτρο ( $m^2$ ) για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και να πολλαπλασιαστεί με το κόστος ανά kW.

Αν η αξία μεταπώλησης ανά τετραγωνικό μέτρο είναι  $S_w$  (€/m<sup>2</sup>), η συνολική αξία μεταπώλησης θα είναι  $S_1 = S_w \cdot A_w$  και η παρούσα αξία θα είναι:

$$S_{p1} = S_1 \cdot fac_1 \quad (4.10)$$

Τέλος, αν το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά τετραγωνικό μέτρο είναι  $a_{OMW}$  ( $\text{€}/\text{m}^2 \cdot \text{year}$ ), τότε το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ΑΓ θα είναι  $OM_1 = a_{OMW} \cdot A_w$  και η παρούσα αξία θα είναι:

$$OM_{p1} = OM_1 \cdot fac_2 = a_{OMW} \cdot A_w \cdot fac_2 \quad (4.11)$$

Σε περίπτωση που το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης δίνεται σε € ανά kW, τότε αυτή η τιμή πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των kW που παράγεται ανά τετραγωνικό μέτρο για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, έτσι ώστε να προκύψει η τιμή του συντελεστή  $a_{OMW}$ .

Συμπερασματικά, για τις ΑΓ έχουμε:

$$I_1 = a_w \cdot A_w = c_1 \cdot A_w \quad (4.12)$$

$$S_{p1} = S_w \cdot fac_1 \cdot A_w = c_2 \cdot A_w \quad (4.13)$$

$$OM_{p1} = a_{OMW} \cdot fac_2 \cdot A_w = c_3 \cdot A_w \quad (4.14)$$

### 4.5.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Για τη μοντελοποίηση της συστοιχίας των ΦΒ πλαισίων ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτή που ακολουθήθηκε για τις ΑΓ. Η μεταβλητή ελέγχου των ΦΒ πλαισίων είναι η συνολική επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων μετρούμενη σε τετραγωνικά μέτρα και συμβολίζεται με  $A_s$ . Η μεταβλητή  $A_s$  περιορίζεται από τη μέγιστη διαθέσιμη έκταση για τη εγκατάσταση των ΦΒ πλαισίων (για παράδειγμα η επιφάνεια της οροφής του κριτηρίου που θα γίνει η εγκατάσταση) καθώς και από τον προϋπολογισμό για την επένδυση στα ΦΒ πλαίσια.

Αν το αρχικό κόστος της επένδυσης σε ΦΒ πλαίσια ανά τετραγωνικό μέτρο είναι  $a_s$  ( $\text{€}/\text{m}^2$ ), τότε η συνολική αρχική επένδυση θα είναι  $I_2 = a_s \cdot A_s$ . Η συνολική αξία μεταπώλησης βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας την αξία μεταπώλησης ανά τετραγωνικό μέτρο  $S_s$  με την συνολική επιφάνεια  $A_s$ . Η παρούσα αξία της συνολικής αξίας μεταπώλησης θα είναι:

$$S_{p2} = S_2 \cdot fac_1 = S_s \cdot A_s \cdot fac_1 \quad (4.15)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας των ΦΒ πλαισίων ανά τετραγωνικό μέτρο είναι  $a_{OMS}$ , τότε το συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας θα είναι  $OM_2 = a_{OMS} \cdot A_s$ . Η παρούσα αξία του ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας είναι:

$$OM_{p2} = OM_2 \cdot fac_2 = a_{OMS} \cdot A_s \cdot fac_2 \quad (4.16)$$

Συμπερασματικά, για τα ΦΒ πλαίσια έχουμε:

$$I_2 = a_s \cdot A_s = c_4 \cdot A_4 \quad (4.17)$$

$$S_{p2} = S_s \cdot fac_1 \cdot A_s = c_5 \cdot A_s \quad (4.18)$$

$$OM_{p2} = a_{OMS} \cdot fac_2 \cdot A_s = c_6 \cdot A_s \quad (4.19)$$

#### 4.5.4 Ντηζελογεννήτριες

Η μεταβλητή απόφασης για τις ντηζελογεννήτριες είναι η συνολική απόδοση  $R_d$  σε kW. Αν και μεταβλητή  $R_d$  παίρνει τιμές από τη βελτιστοποίηση με γραμμικό προγραμματισμό, ο αναλυτής μπορεί να κατανείμει την τιμή αυτή σε περισσότερες από μία γεννήτριες, αρκεί η συνολική τους απόδοση να ισούται με  $R_d$ . Πρέπει να σημειωθεί, ακόμα ότι ο χρόνος ζωής μιας ντηζελογεννήτριας είναι συνήθως μικρότερος από αυτή μιας ΑΓ ή ενός ΦΒ πλαισίου. Συνεπώς, κατά πάσα πιθανότητα, θα είναι απαραίτητο να αγοραστεί κάποια καινούργια ντηζελογεννήτρια πριν το τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου. Η μεταβλητή  $x_d$ , η οποία εκφράζει πόσες φορές θα χρειαστεί να αγοραστεί καινούργια ντηζελογεννήτρια, μέσα στο χρονικό ορίζοντα  $N$  ετών του έργου, δίνεται από τη σχέση:  $x_d = N/L_d$ , αφού το αποτέλεσμα στρογγυλοποιηθεί στον μεγαλύτερο ακέραιο. Αν η σημερινή τιμή αγοράς της ντηζελογεννήτριας ανά kW είναι  $a_d$  τότε η τιμή τη χρονική στιγμή  $y$  θα είναι:  $a_d \cdot (1 + es)^y$  και η παρούσα αξία της τιμής αυτής θα είναι:

$$a_d \cdot \frac{(1 + es)^y}{(1 + r)^y} \quad (4.20)$$

Άρα η παρούσα αξία όλων των αρχικών επενδύσεων στις νηξελογεννήτριες θα είναι:

$$I_3 = a_d \cdot R_d \cdot \sum_{x=1}^{x_d} \left( \frac{1 + es}{1 + r} \right)^{(x-1) \cdot L_d} \quad (4.21)$$

όπου  $es$  ο ρυθμός κλιμάκωσης,  $r$  το επιτόκιο,  $L_d$  ο χρόνος ζωής της νηξελογεννήτριας και  $x_d$  οι φορές που θα αγοραστεί καινούργια νηξελογεννήτρια.

Σε περίπτωση που ο χρόνος ζωής της νηξελογεννήτριας είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το χρονικό ορίζοντα του έργου ( $L_d \geq N$ ), τότε η μεταβλητή  $x_d$  είναι ίση με 1 και άρα ισχύει  $I_3 = a_d \cdot R_d$ , αφού η νηξελογεννήτρια αγοράζεται μία φορά, στην αρχή του έργου.

Για την αξία μεταπώλησης της νηξελογεννήτριας γίνεται η υπόθεση ότι μειώνεται γραμμικά από την τιμή  $a_d$  αν η γεννήτρια δεν έχει λειτουργήσει, μέχρι την τιμή  $S_d$  αν η νηξελογεννήτρια έχει λειτουργήσει για ολόκληρο το χρόνο ζωής της. Αν ο χρονικός ορίζοντας του έργου είναι μικρότερος από το χρόνο ζωής της νηξελογεννήτριας, τότε η αξία μεταπώλησης της νηξελογεννήτριας ανά kW θα είναι  $S_{pd}$ , η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή  $S_d$ . Η τιμή της  $S_{pd}$  θα είναι:

$$S_{pd} = \left( \frac{S_d - a_d}{L_d} \right) \cdot years + a_d \quad (4.22)$$

όπου η μεταβλητή  $years$  υποδεικνύει των αριθμό των ετών λειτουργίας ανάμεσα στην εγκατάσταση της νηξελογεννήτριας και το τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Η παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης θα είναι:

$$S_{p3} = S_d \cdot R_d \cdot \sum_{x=1}^{x_d-1} \left( \frac{1 + j}{1 + r} \right)^{x \cdot L_d} + S_{pd} \cdot R_d \cdot \left( \frac{1 + j}{1 + r} \right)^N \quad (4.23)$$

Αν ο χρονικός ορίζοντας του έργου  $N$ , είναι πολλαπλάσιο του χρόνου ζωής της νηξελογεννήτριας τότε ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$S_{p3} = S_d \cdot R_d \cdot \sum_{x=1}^{x_d} \left( \frac{1 + j}{1 + r} \right)^{x \cdot L_d} \quad (4.24)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας της νηξελογεννήτριας μπορεί να χωριστεί στα εξής δύο επιμέρους κόστη:

1. Κόστος λειτουργίας και εξαρτημάτων ανά kWh,  $a_{MCD}$ .
2. Κόστος κατανάλωσης καυσίμου diesel ανά kWh,  $a_{OCD}$ .

Αν και το κόστος της αποδοτικότητας και συντήρησης του καυσίμου ποικίλει ανάλογα με το επίπεδο παραγωγής των νηζελογεννητριών, οι μεταβλητές  $a_{MCD}$  και  $a_{OCD}$  αντιστοιχούν στην εκτιμημένη ενέργεια  $R_d$ . Για λόγους σχεδίασης γίνεται η υπόθεση πως όταν είναι διαθέσιμα  $R_d$  kW τότε χρησιμοποιούνται στην εξυπηρέτηση του φορτίου.

Το συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι:

$$OM_3 = (a_{MCD} + a_{OCD}) \cdot R_d \cdot hours \quad (4.25)$$

όπου η μεταβλητή  $hours$  αναφέρεται στις συνολικές ώρες λειτουργίας ετησίως και παίρνει την τιμή 4000 h.

Η παρούσα αξία του συνολικού ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας της νηζελογεννήτριας είναι:

$$OM_{p3} = OM_3 \cdot fac_2 \quad (4.26)$$

Συμπερασματικά, για τις νηζελογεννήτριες έχουμε:

$$I_3 = a_d \cdot \sum_{x=1}^{x_d} \left( \frac{1+es}{1+r} \right)^{(x-1) \cdot L_d} \cdot R_d = c_7 \cdot R_d \quad (4.27)$$

$$S_{p3} = \left[ S_d \cdot \sum_{x=1}^{x_d-1} \left( \frac{1+j}{1+r} \right)^{x \cdot L_d} + S_{pd} \cdot \left( \frac{1+j}{1+r} \right)^N \right] \cdot R_d = c_8 \cdot R_d \quad (4.28)$$

$$OM_{p3} = OM_3 \cdot fac_2 = c_9 \cdot R_d \quad (4.29)$$

#### 4.5.5 Συσσωρευτές

Η μεταβλητή ελέγχου  $R_b$  αφορά την περίπτωση των συσσωρευτών και αναφέρεται στο μέγεθος τους σε kWh. Όπως και στην περίπτωση της νηζελογεννήτριας, έτσι και στην

περίπτωση των συσσωρευτών ο χρόνος ζωής τους αναμένεται να είναι μικρότερος από τον χρονικό ορίζοντα του έργου. Ως εκ τούτου, αναμένεται η αγορά συσσωρευτών με μέγεθος  $R_b$  σε ορισμένα χρονικά διαστήματα. Η συνολική παρούσα αξία του επενδυόμενου κεφαλαίου στους συσσωρευτές δίνεται από τη σχέση:

$$I_4 = a_b \cdot R_b \sum_{x=1}^{x_b} \left( \frac{1 + es}{1 + r} \right)^{(x-1) \cdot L_b} \quad (4.30)$$

όπου  $L_b$  ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών,  $x_b$  ο αριθμός των αντικαταστάσεων των συσσωρευτών, κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα του έργου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:  $x_b = N/L_b$  (στρογγυλοποιημένος στον μεγαλύτερο ακέραιο) και  $a_b$  το κόστος κεφαλαίου αποθήκευσης μίας kWh.

Η αξία μεταπώλησης των συσσωρευτών θεωρείται αμελητέα ( $S_{p4} = 0$ ). Αν το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των συσσωρευτών ανά κιλοβατώρα είναι  $a_{OMB}$ , τότε το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης θα είναι  $OM_4 = a_{OMB} \cdot R_b$  και η παρούσα αξία θα είναι:

$$OM_{p4} = OM_4 \cdot fac_2 \quad (4.31)$$

Συμπερασματικά, για τους συσσωρευτές έχουμε:

$$I_4 = a_b \cdot \sum_{x=1}^{x_b} \left( \frac{1 + es}{1 + r} \right)^{(x-1) \cdot L_b} \cdot R_b = c_{10} \cdot R_b \quad (4.32)$$

$$OM_{p4} = OM_4 \cdot fac_2 = c_{11} \cdot R_b \quad (4.33)$$

#### 4.5.6 Περιορισμοί φορτίου

Έστω ότι  $e_w(i)$  και  $e_s(i)$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη διαθέσιμη αιολική και ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο, κατά τη διάρκεια της υποπεριόδου  $i$ . Ακόμα θεωρούμε πως η ενέργεια που παράγει η νηξελογεννήτρια προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της μεταβλητής  $R_d$  με τη διάρκεια της υποπεριόδου, η οποία εκφράζεται από τη μεταβλητή  $duration$ . Άρα τα στοιχεία των περιορισμών προκύπτουν:

$$\left. \begin{aligned} E_1(i) &= e_w(i) \cdot A_w = c_{12}(i) \cdot A_w \\ E_2(i) &= e_s(i) \cdot A_s = c_{13}(i) \\ E_3(i) &= duration \cdot R_d \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

Για την ενέργεια που παράγουν οι συσσωρευτές έχουμε  $E_4(i) = x \cdot R_b$  όπου  $x$  ο αριθμός των πλήρων εκφορτίσεων του συσσωρευτή σε κάθε υποπερίοδο  $i$ . Σύμφωνα με τα παραπάνω, για κάθε υποπερίοδο  $i$  θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής περιορισμοί:

$$e_w(i) \cdot A_w + e_s(i) \cdot A_s + duration \cdot R_d + x \cdot R_b \geq (1 - EENS) \cdot Load(i) \quad (4.35)$$

και

$$e_w(i) \cdot A_w + e_s(i) \cdot A_s + duration \cdot R_b + x \cdot R_b \leq up_{bound} \cdot Load(i) \quad (4.36)$$

όπου  $up_{bound}$  ο συντελεστής που εκφράζει το όριο της μέγιστης παραγόμενης ενέργειας.

Ακόμα πρέπει να προστεθούν και οι ακόλουθοι περιορισμοί, που ορίζουν το εύρος των τιμών των μεταβλητών ελέγχου του γραμμικού προγράμματος:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq A_w \leq A_{wmax} \\ 0 &\leq A_s \leq A_{smax} \\ 0 &\leq R_d \leq R_{dmax} \\ 0 &\leq R_b \leq R_{bmax} \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

#### 4.5.7 Τελική μορφή

Πλέον το γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να πάρει την τελική του μορφή:

Ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης  $z$ :

$$\text{Min } (c_1 - c_2 + c_3) \cdot A_w + (c_4 - c_5 + c_6) \cdot A_s + (c_7 - c_8 + c_9) \cdot R_d + (c_{10} + c_{11}) \cdot R_b \quad (4.38)$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$\left. \begin{aligned}
e_w(i) \cdot A_w + e_s(i) \cdot A_s + duration \cdot R_d + x \cdot R_b &\geq (1 - EENS) \cdot Load(i) \\
e_w(i) \cdot A_w + e_s(i) \cdot A_s + duration \cdot R_b + x \cdot R_b &\leq up_{bound} \cdot Load(i) \\
0 \leq A_w &\leq A_{wmax} \\
0 \leq A_s &\leq A_{smax} \\
0 \leq R_d &\leq R_{dmax} \\
0 \leq R_b &\leq R_{bmax}
\end{aligned} \right\} (4.39)$$

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΤΟ EXCEL SOLVER

### 5.1 Εισαγωγή

Στην πράξη, τα προβλήματα βελτιστοποίησης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, περιέχουν μεγάλο αριθμό μεταβλητών και περιορισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να κρίνεται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και εξειδικευμένων προγραμμάτων για την επίλυση αυτών των μαθηματικών προγραμμάτων. Υπάρχει μεγάλος αριθμός προσφερόμενων προγραμμάτων για την μοντελοποίηση και την επίλυση μαθηματικών προγραμμάτων (για παράδειγμα MATLAB, LINGO, EXCEL SOLVER, AMPL, GAMS κ.α.). Τα προγράμματα αυτά παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις σε παραμέτρους όπως:

1. Ταχύτητα επίλυσης προβλημάτων.
2. Μέγεθος προβλημάτων.
3. Φιλικότητα επικοινωνίας με το χρήστη.
4. Ευελιξία.

Γενικότερα, υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ΓΠ:

1. **Λογιστικά φύλλα (Spreadsheets).** Τα λογιστικά φύλλα είναι προγράμματα γενικής χρήσης με ευρεία διάδοση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων ΓΠ με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ο συγκεκριμένος τρόπος αποτελεί την οικονομικότερη εναλλακτική λύση, αλλά απαιτεί μεγάλη επένδυση χρόνου από την πλευρά του χρήστη, για την ανάπτυξη του προβλήματος. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία και διόρθωση γίνεται δυσκολότερη, όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος.
2. **Γλώσσες Μοντελοποίησης (Modeling Languages).** Οι γλώσσες μοντελοποίησης προσφέρουν ένα αυτόνομο φιλικό περιβάλλον εργασίας για την ανάπτυξη ενός μοντέλου ΓΠ. Είναι εξειδικευμένα προγράμματα τα οποία περιλαμβάνουν τα εξής μέρη: διαχείριση δεδομένων, αλγόριθμους βελτιστοποίησης και παρουσίαση αποτελεσμάτων. Τα συγκεκριμένα προγράμματα αποτελούν τη λιγότερο οικονομική λύση αλλά και τον πλέον εύκολο τρόπο για την ανάπτυξη και επίλυση ενός μοντέλου ΓΠ. Ακόμα, θα πρέπει να τονιστεί πως οι γλώσσες μοντελοποίησης μπορούν να αναπτύσσουν και να επιλύουν

προβλήματα μεγάλων διαστάσεων, αλλά δεν έχουν τα χαρακτηριστικά της ευελιξίας και της αυτονομίας.

3. **Γλώσσες Προγραμματισμού (Programming Languages).** Η τελευταία εναλλακτική λύση αφορά τη χρησιμοποίηση οποιασδήποτε γλώσσας προγραμματισμού για την ανάπτυξη και την επίλυση ενός προβλήματος ΓΠ. Τα πλεονεκτήματα αυτής της εναλλακτικής εστιάζονται στην ταχύτητα επίλυσης, την ευελιξία και την αυτονομία των μοντέλων που αναπτύσσονται. Είναι όμως σημαντικό, να αναφερθεί πως οι γλώσσες προγραμματισμού απαιτούν σημαντικό χρόνο για την ανάπτυξη του μοντέλου, καθώς και εξειδικευμένες γνώσεις.

## 5.2 Παρουσίαση Excel Solver

Το πιο διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα βελτιστοποίησης είναι το Solver του Excel το οποίο συνοδεύει, από το 1991, κάθε αντίτυπο του Microsoft Excel και του Microsoft Office. Το Microsoft Excel Solver συνδυάζει τις λειτουργίες ενός γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής με το χρήστη (GUI), μιας αλγεβρικής γλώσσας μοντελοποίησης όπως GAMS ή AMPL, καθώς και εργαλείων βελτιστοποίησης για γραμμικά, μη γραμμικά, και προγράμματα ακέραιου προγραμματισμού. Κάθε μία από αυτές τις λειτουργίες είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ενσωματωμένη στο πρόγραμμα υπολογισμών με λογιστικά φύλλα (spreadsheets).

Η βελτιστοποίηση στο Microsoft Excel αρχίζει με ένα συνηθισμένο πρότυπο υπολογισμών με λογιστικό φύλλο. Η δυνατότητα εισαγωγής συναρτήσεων, που περιέχεται στα λογιστικά φύλλα, λειτουργεί σαν αλγεβρική γλώσσα που χρησιμοποιείται για να καθορίσει το μοντέλο. Μέσω του γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής, που διαθέτει το Solver, ο χρήστης καθορίζει την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς με την χρήση του κέρσorra και τη συμπλήρωση των πλαισίων διαλόγου. Στη συνέχεια, το Solver αναλύει το ολοκληρωμένο μοντέλο που τίθεται προς βελτιστοποίηση και παράγει, στην κατάλληλη μορφή, τις μήτρες που απαιτούνται από τα υποπρογράμματα βελτιστοποίησης με παρόμοιο τρόπο όπως το GAMS και το AMPL.

Το εργαλείο Solver του Microsoft Office Excel χρησιμοποιεί τον κώδικα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, μειωμένης γενικευμένης κλίσης (Generalized Reduced Gradient ή GRG2), που ανέπτυξαν ο Leon Lasdon του Πανεπιστημίου του Texas στο Austin και ο Alan Waren του Πανεπιστημίου του Cleveland. Στα γραμμικά και ακέραια προβλήματα χρησιμοποιείται η μέθοδος simplex με οριακές συνθήκες μεταβλητών και η μέθοδος κλάδου-φράγματος, όπως εφαρμόζεται από τους John Watson και Daniel Fylstra της εταιρείας Frontline Systems, Inc. Το Solver χρησιμοποιεί τις τιμές που προέκυψαν από την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου για να ανασυγκροτήσει το μαθηματικό μοντέλο και να παρουσιαστεί η βέλτιστη λύση στο λογιστικό φύλλο. Ακόμα, παρέχει την ανάλυση ευαισθησίας και άλλες συνοπτικές πληροφορίες σε επιπρόσθετα λογιστικά φύλλα.

Λόγω της αρχιτεκτονικής των προγραμμάτων υπολογισμών με λογιστικό φύλλο είναι εύκολο να δημιουργηθούν μοντέλα που περιέχουν ασυνεχείς συναρτήσεις ή ακόμα και μη αριθμητικές τιμές τα οποία συνήθως δεν μπορούν να λυθούν με τις κλασσικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Ο τρόπος εισαγωγής των συναρτήσεων σε λογιστικό φύλλο έχει σχεδιαστεί για γενικούς υπολογισμούς και όχι μόνο για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης. Έτσι, το Excel υποστηρίζει μεγάλη ποικιλία μηχανισμών λειτουργίας και ενσωματωμένων συναρτήσεων, καθώς επίσης και συναρτήσεις που έχουν συνταχθεί από τον χρήστη. Σε αντίθεση, το GAMS, το AMPL και οι παρόμοιες γλώσσες μοντελοποίησης περιλαμβάνουν μόνο ένα μικρό σύνολο μηχανισμών και λειτουργιών, ικανοποιητικών για την έκφραση των γραμμικών, ομαλών μη γραμμικών, και ακέραιων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Εξ ορισμού, το Solver υποθέτει ότι το μαθηματικό μοντέλο που τίθεται προς βελτιστοποίηση είναι μη γραμμικό. Ο χρήστης πρέπει να επιλέξει την επιλογή «Assume linear model» στο παράθυρο ελέγχου, που εμφανίζεται, έτσι ώστε το Solver να αγνοήσει αυτήν την υπόθεση. Το Solver δεν προσπαθεί αυτόματα να καθορίσει εάν το πρότυπο είναι γραμμικό με την επιθεώρηση των συναρτήσεων που αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι περισσότερες από τις ενσωματωμένες συναρτήσεις του Excel και όλες οι συναρτήσεις που έχουν συνταχθεί από τον χρήστη θα έπρεπε να αντιμετωπιστούν ως μη γραμμικές. Συνήθως οι χρήστες δημιουργούν τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιώντας τις ενσωματωμένες συναρτήσεις και προσθέτουν έπειτα τους περιορισμούς που οδηγούν σε ένα γραμμικό πρότυπο πέρα από την εφικτή περιοχή. Για αυτό το λόγο, η Microsoft θέλησε την υπόθεση της μη γραμμικότητας του μοντέλου ως προεπιλογή και την ύπαρξη του παραθύρου ελέγχου, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή της γραμμικότητας από το χρήστη.

### 5.3 Πρακτική μοντελοποίησης

Το Excel, συμπεριλαμβανομένου του Solver, προσφέρει πολλούς κατάλληλους τρόπους να επιλεχτούν και να χειριστούν τα σύνολα των κελιών που περιέχουν τις μεταβλητές και τους περιορισμούς. Οι αναλυτές μπορούν να εκμεταλλευτούν αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα για την παρουσίαση των μοντέλων προς βελτιστοποίηση με συνταγμένα σύνολα (π.χ. προϊόντα, περιοχές, ή χρονικές περίοδοι) κατά μήκος των στηλών και των σειρών των πινάκων ή των κελιών. Τα κελιά που περιέχουν τις τιμές των περιορισμών μπορούν συχνά να υπολογιστούν ευκολότερα με τις συναρτήσεις του Excel, που παρέχουν μερικά από τα υψηλού επιπέδου χαρακτηριστικά γνωρίσματα των αλγεβρικών γλωσσών διαμόρφωσης, εν τούτοις χωρίς όλη την ευελιξία τέτοιων γλωσσών.

Ακόμα πρέπει να αναφερθεί η δυνατότητα προγραμματισμού από το χρήστη που προσφέρεται από το Solver του Excel, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για πολλούς χρήστες που χρησιμοποιούν το Excel και το Microsoft Office ως πλατφόρμα για την ανάπτυξη αυτοσχέδιων εφαρμογών. Κάθε διαδραστική, βασισμένη στο γραφικό περιβάλλον διεπαφής, ενέργεια που υποστηρίζεται από το Solver του Excel έχει μια αντίστοιχη συνάρτηση προγραμματισμένη σε γλώσσα Visual Basic (VBA), η οποία αποτελεί την

ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού του Excel. Η προηγούμενη γλώσσα προγραμματισμού του Excel υποστηρίζεται επίσης, για λόγους συμβατότητας.

## 5.4 Εξαγωγή του μοντέλου και εκτίμηση Ιακωβιανής μήτρας

Όπως ένα αλγεβρικό σύστημα μοντελοποίησης σαν το GAMS ή το AMPL, έτσι και το Solver του Excel εξάγει το πρόβλημα βελτιστοποίησης από τους τύπους του λογιστικού φύλλου και χτίζει ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο κατάλληλο για τα υποπρογράμματα βελτιστοποίησης. Για ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, το αντιπροσωπευτικό αυτό μοντέλο εστιάζει στη διαμόρφωση της μήτρας που περιέχει τους συντελεστές του ΓΠ. Η μήτρα αυτή είναι η Ιακωβιανή μήτρα και περιέχει τις μερικές παραγώγους των συναρτήσεων του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) ως προς τις μεταβλητές απόφασης. Στα προβλήματα του ΓΠ οι καταχωρήσεις στην Ιακωβιανή μήτρα είναι σταθερές, και έτσι χρειάζεται να αξιολογηθούν μόνο μια φορά στην έναρξη της βελτιστοποίησης. Αντίθετα, στα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού, οι καταχωρήσεις στην Ιακωβιανή μήτρα μεταβάλλονται και πρέπει να επαναυπολογιστούν σε κάθε νέο δοκιμαστικό σημείο. Η Ιακωβιανή μήτρα μπορεί να προσεγγιστεί είτε αναλυτικά, με συμβολική διαφοροποίηση των συναρτήσεων του λογιστικού φύλλου, είτε κατά τη διάρκεια της εκτίμησης των συναρτήσεων, με χρήση των αποκαλούμενων αυτόματων μεθόδων διαφοροποίησης, είτε με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Το Solver του Excel, όπως και το GAMS και το AMPL, χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών έτσι ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη όλων των ενσωματωμένων συναρτήσεων του Excel καθώς και αυτών που συντάσσονται από τους χρήστες.

## 5.5 Διαδικασία επίλυσης προβλημάτων Γραμμικού Προγραμματισμού

Αρχικά, ο χρήστης πρέπει να έχει εισάγει σε διαφορετικές περιοχές του λογιστικού φύλλου όλα τα συστατικά του γραμμικού προγράμματος: τις μεταβλητές απόφασης (διάνυσμα  $x$ ), τους συντελεστές των μεταβλητών στην αντικειμενική συνάρτηση (διάνυσμα  $c$ ), τους συντελεστές των μεταβλητών στους περιορισμούς (πίνακας  $A$ ) και τα δεξιά μέλη των περιορισμών (διάνυσμα  $b$ ).

Στη συνέχεια, πρέπει να επιλεγεί μία περιοχή του λογιστικού φύλλου, όπου θα αποθηκευτούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης, όπως αυτές προκύψουν μετά από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο καθορισμός της συγκεκριμένης περιοχής είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς για να μπορέσει το Solver να λύσει το γραμμικό πρόβλημα θα πρέπει να μπορεί να υπολογίσει τα αριστερά μέλη των περιορισμών και την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ανάλογα με τις τιμές των μεταβλητών απόφασης. Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και του αριστερού μέλους των περιορισμών χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι συναρτήσεις του Excel: `sumproduct`, η οποία υπολογίζει το

άθροισμα των γινομένων των τιμών των μεταβλητών επί τους συντελεστές στην αντικειμενική συνάρτηση και `mmult`, η οποία υπολογίζει το γινόμενο του πίνακα που περιέχει τους συντελεστές των περιορισμών επί τις τιμές των μεταβλητών. Αφού το γραμμικό πρόβλημα έχει καθοριστεί, ο χρήστης εισάγει στο Solver τα κελιά που περιέχουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, τις τιμές των μεταβλητών απόφασης καθώς και τους περιορισμούς.

Ακόμα, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει από το μενού των επιλογών του Solver τις επιλογές «Υπόθεση μη αρνητικού», έτσι ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί μη αρνητικότητας των μεταβλητών απόφασης και «Υπόθεση γραμμικού μοντέλου», που προσδιορίζει τη μορφή του μοντέλου ενημερώνοντας το Excel πως πρόκειται για ένα γραμμικό πρόγραμμα. Όταν ο χρήστης επιλέξει την επιλογή «Υπόθεση γραμμικού μοντέλου», το Solver του Excel χρησιμοποιεί μία απλή εφαρμογή της μεθόδου `simplex` με φραγμένες μεταβλητές, για να βρει τη βέλτιστη λύση. Αυτός ο κώδικας υπολογίζει αμέσως την Ιακωβιανή μήτρα, η οποία περιέχει τους συντελεστές του γραμμικού προγράμματος, με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Το Solver αποθηκεύει τη μήτρα στη πλήρη μορφή της, συμπεριλαμβανομένων των μηδενικών στοιχείων, αν και καμία σειρά μητρών δεν απαιτείται για μεταβλητά όρια.

Τέλος, αφού γίνει η αποδοχή της λύσης η οποία πλέον έχει αποθηκευτεί στις περιοχές που προεπιλέχθηκαν στο λογιστικό φύλλο, γίνεται η αποθήκευση των αναφορών σε αντίστοιχα λογιστικά φύλλα που δημιουργούνται αυτόματα. Οι αναφορές αναλύονται ως εξής:

1. **Ανάλυση της λύσης (answer report):** Η αναφορά αυτή περιλαμβάνει τρεις πίνακες. Ο πρώτος παρουσιάζει την αρχική και βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αντίστοιχα, ο δεύτερος παρουσιάζει τις αρχικές και βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης. Τέλος, ο τρίτος πίνακας παρουσιάζει τις τιμές για τα αριστερά μέλη των περιορισμών, τη μορφή των περιορισμών, τις τιμές των μεταβλητών απόκλισης και τον χαρακτηρισμό των περιορισμών στη βέλτιστη λύση ως ενεργών ή μη ενεργών.
2. **Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity report):** Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας παρουσιάζονται σε δύο πίνακες. Ο πρώτος αφορά τους συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση. Για κάθε μεταβλητή καταγράφονται η τιμή της στη βέλτιστη λύση, το οριακό της καθαρό εισόδημα, ο συντελεστής της στην αντικειμενική συνάρτηση, καθώς και το διάστημα τιμών μέσα στο οποίο μπορεί να μεταβληθεί ο συντελεστής αυτός, χωρίς να μεταβληθεί η βέλτιστη λύση. Ο δεύτερος πίνακας αποτελεί τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τα δεξιά μέλη των περιορισμών. Για κάθε περιορισμό παρουσιάζονται η τιμή του αριστερού του μέλους στη βέλτιστη λύση, η βέλτιστη λύση της αντίστοιχης δυικής μεταβλητής, το δεξιό μέλος του περιορισμού, καθώς και το διάστημα τιμών στο οποίο μπορεί να μεταβληθεί.
3. **Αναφορά ορίων (limits report):** Στην αναφορά αυτή παρουσιάζονται οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης καθώς και το διάστημα στο οποίο μπορεί να κυμανθεί η τιμή κάθε μεταβλητής χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί. Ανάλογα με τα όρια που

προκύπτουν καταγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (target result).

## 5.6 Βελτιστοποίηση με το Solver

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος και αφορούν τα χαρακτηριστικά και τα κόστη των συστημάτων που αποτελούν το υβριδικό σύστημα (ΑΓ, ΦΒ πλαίσια, νηζελογεννήτριες και συσσωρευτές) καθώς και τις τιμές της ζήτησης του φορτίου, της ταχύτητας του ανέμου και της ακτινοβολίας.

### 5.6.1 Ανεμογεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια, η οποία έχει θεωρηθεί για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος έχει τα εξής χαρακτηριστικά: ονομαστική ισχύ  $P_r = 30 \text{ kW}$ , ύψος πλήμνης  $H = 30 \text{ m}$ , διάμετρο περωτής  $D = 13 \text{ m}$ , ταχύτητα έναρξης λειτουργίας  $V_{in} = 4 \text{ m/s}$ , ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας  $V_r = 15 \text{ m/s}$ , ταχύτητα παύσης λειτουργίας  $V_{out} = 25 \text{ m/s}$ , διάρκεια ζωής 25 έτη και τιμή αγοράς ίση με 60000 €. Επομένως, το κόστος της ΑΓ ανά τετραγωνικό μέτρο προκύπτει από τη σχέση:

$$a_w = \frac{60000}{\frac{\pi \cdot 13^2}{4}} = 452,04 \text{ €/m}^2 \quad (5.1)$$

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης  $a_{OMW}$  της ΑΓ έχει θεωρηθεί ίσο με το 3% του κόστους της ΑΓ ανά τετραγωνικό μέτρο ( $a_{OMW} = 0,03 \cdot 452,04 = 13,56 \text{ €/m}^2$ ), ενώ η αξία μεταπώλησης  $S_w$  της ΑΓ έχει θεωρηθεί ίση με το 10% του κόστους της ΑΓ ανά τετραγωνικό μέτρο ( $S_w = 0,1 \cdot 452,04 = 45,2 \text{ €/m}^2$ ).

### 5.6.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το ΦΒ πλαίσιο, το οποίο έχει θεωρηθεί για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος έχει τα εξής χαρακτηριστικά: ισχύ αιχμής ίση με 55  $W_p$ , απόδοση  $effs_{PV} = 12,5\%$ , διάρκεια ζωής 25 έτη και τιμή ίση με 3000 €/kW. Έχοντας θεωρήσει τον συντελεστή απόδοσης ίσο με 0,125 και χρησιμοποιώντας τη σχέση:  $effs_{PV} = \frac{P_m}{E \cdot S}$  όπου  $P_m$  η μέγιστη αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς,  $S$  η επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου και  $E$  η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου, η οποία είναι ίση με 1 kW/m<sup>2</sup> υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (ΠΣΔ), έχουμε:

$$\frac{S}{P_m} = \frac{1}{0,125} = 8 \text{ m}^2/\text{kW} \quad (5.2)$$

Επειδή το ΦΒ πλαίσιο που έχει θεωρηθεί παράγει συνεχές ρεύμα και η ζήτηση αφορά φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη ενός μετατροπέα DC-AC, ο οποίος θεωρείται πως έχει κόστος 500 €/kW. Ο μετατροπέας δεν έχει μοντελοποιηθεί στο γραμμικό πρόγραμμα του υβριδικού συστήματος, όμως το κόστος του δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο και πρέπει να συνυπολογιστεί στη συνολική επένδυση. Για αυτό το λόγο το κόστος του μετατροπέα προστίθεται σε αυτό του ΦΒ συστήματος, έτσι ώστε να υπολογίζεται στο συνολικό κόστος της επένδυσης. Επομένως το κόστος του ΦΒ πλαισίου ανά τετραγωνικό μέτρο προκύπτει από τη σχέση:

$$a_s = \frac{3500}{8} = 437,5 \text{ €/m}^2 \quad (5.3)$$

Ο μετατροπέας που προστίθεται στο σύστημα έχει θεωρηθεί πως έχει ένα βαθμό απόδοσης ίσο με:  $effs_{conv} = 0,85$ . Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα πολλαπλασιάζεται με τον βαθμό απόδοσης των ΦΒ πλαισίων ώστε να προκύψει ο συνολικός βαθμός απόδοσης του ΦΒ συστήματος:  $effs = 0.11$ .

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του ΦΒ πλαισίου έχει θεωρηθεί ίσο με το 1% του κόστους του ΦΒ πλαισίου ανά τετραγωνικό μέτρο ( $a_{OMS} = 4,375 \text{ €/m}^2$ ) και η αξία μεταπώλησης  $S_s$  του ΦΒ πλαισίου έχει θεωρηθεί ίση με το 10% του κόστους ανά τετραγωνικό μέτρο ( $S_s = 43,75 \text{ €/m}^2$ ).

### 5.6.3 Ντηζελογεννήτρια

Η ντηζελογεννήτρια, η οποία έχει θεωρηθεί για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος έχει ονομαστική ισχύ  $P_{dslmax} = 40 \text{ kW}$ , ελάχιστη παραγόμενη ισχύ ίση με το 30% της ονομαστικής ισχύος ( $P_{dslmin} = 0.3 \cdot 40 = 12 \text{ kW}$ ), διάρκεια ζωής 8 έτη και τιμή ίση με 8000 €. Επομένως το κόστος της ντηζελογεννήτριας ανά kW δίνεται από τη σχέση:

$$a_d = \frac{8000}{40} = 200 \text{ €/kW} \quad (5.4)$$

Ακόμα έχει θεωρηθεί πως η ντηζελογεννήτρια λειτουργεί στη μέγιστη απόδοση της, για 4000 ώρες ανά έτος και πως το κόστος συντήρησης της είναι ίσο με 0,01 €/h. Επομένως το ετήσιο κόστος συντήρησης της ντηζελογεννήτριας ανά kWh θα δίνεται:

$$a_{MCD} = \frac{0,01}{40} = 0,00025 \text{ €/kWh} \quad (5.5)$$

Το ετήσιο κόστος από την κατανάλωση καυσίμου diesel  $a_{OCD}$ , έχοντας θεωρήσει την τιμή του diesel ίση με 1,3 €/kW, προκύπτει χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.35, από την οποία προκύπτει  $F_{dsl} = 13,206 \text{ L/h}$ . Επομένως το ετήσιο κόστος από την κατανάλωση καυσίμου είναι ίσο:

$$a_{OCD} = 1,3 \cdot \frac{F_{dsl}}{P_{dslmax}} = 1,3 \cdot \frac{13,206}{40} = 0,43 \text{ €/kWh} \quad (5.6)$$

#### 5.6.4 Συσσωρευτές

Ο συσσωρευτής ο οποίος έχει θεωρηθεί για την εγκατάσταση του υβριδικού συστήματος έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χωρητικότητα 1900 Ah, τάση λειτουργίας 4 V και κόστος αγοράς ίσο με 760 €. Επομένως κόστος αγοράς του συσσωρευτή ανά kWh είναι:

$$a_b = \frac{760}{1900 \cdot 4} \cdot 1000 = 100 \text{ €/kWh} \quad (5.7)$$

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης έχει θεωρηθεί ίσο με 15 € για κάθε συσσωρευτή, επομένως το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά kWh είναι ίσο με:

$$a_{OMB} = \frac{15 \cdot 1000}{1900 \cdot 4} = 2 \text{ €/kWh} \quad (5.8)$$

#### 5.6.5 Αιολική ενέργεια

Τα δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της αιολικής ενέργειας, αντιστοιχούν σε μετρήσεις οι οποίες έχουν γίνει στο νομό Χανίων και αναφέρονται στη ταχύτητα του ανέμου στο καθορισμένο ύψος αναφοράς ( $H_0 = 10 \text{ m}$ ) για κάθε ώρα του έτους.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΓ, τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να αναχθούν στο ύψος της πλήμνης της ΑΓ που έχει θεωρηθεί. Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση του εκθετικού νόμου (σχέση 2.8) για τιμή της παραμέτρου  $\alpha$ , η οποία εκφράζει την τραχύτητα του εδάφους, ίση με:  $\alpha = 0,2$ . Έτσι προκύπτουν οι

πραγματικές τιμές της ταχύτητας για το ύψος της πλήμνης της ΑΓ ( $H = 30\text{ m}$ ), για τις οποίες υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς από τις ΑΓ σύμφωνα με την σχέση 2.9, η οποία εκφράζει την καμπύλη ισχύος που έχει θεωρηθεί (Σχήμα 2.6) για κάθε ώρα του έτους.

#### 5.6.6 Ηλιακή ενέργεια

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας αντιστοιχούν σε μετρήσεις οι οποίες έχουν γίνει στο νομό Χανίων και αντιστοιχούν στις τιμές της πραγματικής ακτινοβολίας ( $\text{kW/m}^2$ ) για κάθε ώρα ενός έτους. Η παραγόμενη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο από το ΦΒ σύστημα για κάθε ώρα, προκύπτει από τη σχέση:  $P_s = I \cdot effs$  όπου  $I$  η πραγματική ακτινοβολία και  $effs$  η συνολική απόδοση του ΦΒ συστήματος, η οποία περιέχει και την απόδοση του μετατροπέα.

#### 5.6.7 Ζήτηση φορτίου

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη ζήτηση του φορτίου σε kW βασίζονται στο ενεργειακό προφίλ της Κρήτης και αντιστοιχούν σε ποσοστά μίας μέγιστης ετήσιας ζήτησης φορτίου για κάθε ώρα του έτους. Η ωριαία ζήτηση υπολογίζεται από το γινόμενο των ποσοστών αυτών με την ετήσια μέγιστη ζήτηση του απομονωμένου υβριδικού συστήματος, η οποία έχει θεωρηθεί ίση με 100 kW.

### 5.7 Δημιουργία γραμμικού προβλήματος στο Excel

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο πίνακας που συγκεντρώνει τις τιμές των παραμέτρων, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των συντελεστών, στην αντικειμενική συνάρτηση και στους περιορισμούς, των μεταβλητών απόφασης του γραμμικού προβλήματος που μοντελοποιήθηκε.

**Πίνακας 5.1:** Οι τιμές των παραμέτρων για τον υπολογισμό των συντελεστών του γραμμικού προβλήματος.

| Παράμετρος                                                             | Τιμή                   |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Απόδοση ΦΒ πλαισίων ( $effs_{pv}$ )                                    | 0,125                  |
| Απόδοση μετατροπέα ( $effs_{conv}$ )                                   | 0,85                   |
| Συνολική απόδοση ΦΒ συστήματος ( $effs$ )                              | 0,11                   |
| Πληθωρισμός ( $j$ )                                                    | 2%                     |
| Ονομαστικό επιτόκιο ( $r$ )                                            | 6%                     |
| Ρυθμός κυλιόμενου φόρου ( $es$ )                                       | 3%                     |
| Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό ανικανοποίητης ζήτησης φορτίου ( $EENS$ ) | 5%                     |
| Χρονικός Ορίζοντας του έργου ( $N$ )                                   | 20 έτη                 |
| Χρόνος ζωής συσσωρευτών ( $L_b$ )                                      | 10 έτη                 |
| Χρόνος ζωής νηζελογεννήτριας ( $L_d$ )                                 | 8 έτη                  |
| Μέγιστη διαθέσιμη επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής της ΑΓ                | 1200 m <sup>2</sup>    |
| Μέγιστη διαθέσιμη επιφάνεια ΦΒ πλαισίων                                | 800 m <sup>2</sup>     |
| Τιμή αγοράς ΦΒ πλαισίου ( $a_s$ )                                      | 437,5 €/m <sup>2</sup> |
| Τιμή αγοράς ΑΓ ( $a_w$ )                                               | 452 €/m <sup>2</sup>   |
| Τιμή αγοράς συσσωρευτή ( $a_b$ )                                       | 100 €/kWh              |
| Τιμή αγοράς νηζελογεννήτριας ( $a_d$ )                                 | 200 €/kW               |
| Αξία μεταπώλησης ΦΒ πλαισίου ( $S_s$ )                                 | 43,75 €/m <sup>2</sup> |
| Αξία μεταπώλησης ΑΓ ( $S_w$ )                                          | 45,2 €/m <sup>2</sup>  |
| Αξία μεταπώλησης νηζελογεννήτριας ( $S_d$ )                            | 20 €/kW                |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ΦΒ πλαισίων ( $a_{oms}$ )     | 4,375 €/m <sup>2</sup> |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ΑΓ ( $a_{omw}$ )              | 13,56 €/m <sup>2</sup> |
| Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης συσσωρευτών ( $a_{omb}$ )     | 2 €/kWh                |
| Ετήσιο κόστος συντήρησης εξαρτημάτων νηζελογεννήτριας ( $a_{mcd}$ )    | 0,00025 €/kWh          |
| Ετήσιο κόστος κατανάλωσης καυσίμου diesel ( $a_{ocd}$ )                | 0,43 €/kWh             |

Εν συνεχεία, υπολογίζονται οι τιμές των μεγεθών  $fac_1$  και  $fac_2$ , οι οποίες είναι απαραίτητες για τους υπολογισμούς των υπόλοιπων συντελεστών του γραμμικού προγράμματος. Ο μετασχηματιστής  $fac_1$  συμβάλει στην εύρεση της παρούσας αξίας ενός ποσού το οποίο καταβάλλεται ύστερα από  $N$  έτη, ενώ ο μετασχηματιστής  $fac_2$  συμβάλει στον υπολογισμό της παρούσας αξίας ενός μεταβαλλόμενου ποσού το οποίο καταβάλλεται σε ετήσια βάση για  $N$  έτη. Οι τιμές των δύο μετασχηματιστών προκύπτουν:

$$fac_1 = \frac{(1+j)^N}{(1+r)^N} = \frac{(1+0,02)^{20}}{(1+0,06)^{20}} = 0,4633 \quad (5.9)$$

$$fac_2 = \frac{(1 + es)}{(r - es)} \cdot \left(1 - \left(\frac{1 + es}{1 + r}\right)^N\right) = \frac{1 + 0,03}{0,06 - 0,03} \cdot \left(1 - \left(\frac{1 + 0,03}{1 + 0,06}\right)^{20}\right) = 14,9983 \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια, για να υπολογιστούν οι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση, πρώτα πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των συντελεστών  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}$ .

Ο συντελεστής  $c_1$  αντιστοιχεί στο κόστος αγοράς της ΑΓ ανά τετραγωνικό μέτρο και είναι ίσος με:

$$c_1 = a_w = 452 \text{ €/m}^2 \quad (5.11)$$

Ο συντελεστής  $c_2$  αντιστοιχεί στην παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης της ΑΓ στο τέλος του έργου και προκύπτει από τη σχέση:

$$c_2 = S_w \cdot fac_1 = 45,2 \cdot 0,4633 = 20,94 \text{ €/m}^2 \quad (5.12)$$

Ο συντελεστής  $c_3$  αντιστοιχεί στην παρούσα αξία του ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας της ΑΓ, το οποίο μεταβάλλεται με ρυθμό κυλιόμενου φόρου  $es$ , και δίνεται από τη σχέση:

$$c_3 = a_{OMW} \cdot fac_2 = 13,56 \cdot 14,9983 = 203,39 \text{ €/m}^2 \quad (5.13)$$

Άρα ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $A_w$ , που αναφέρεται στις ΑΓ, θα έχει την εξής τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$(c_1 - c_2 + c_3) = 634,48 \text{ €/m}^2 \quad (5.14)$$

Ο συντελεστής  $c_4$  αντιστοιχεί στο κόστος αγοράς του ΦΒ πλαισίου ανά τετραγωνικό μέτρο και είναι ίσος με:

$$c_4 = a_s = 437,5 \text{ €/m}^2 \quad (5.15)$$

Ο συντελεστής  $c_5$  αντιστοιχεί στην παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης του ΦΒ πλαισίου στο τέλος του έργου και προκύπτει από τη σχέση:

$$c_5 = S_s \cdot fac_1 = 43,75 \cdot 0,4633 = 20,27 \text{ €/m}^2 \quad (5.16)$$

Ο συντελεστής  $c_6$  αντιστοιχεί στην παρούσα αξία του μεταβαλλόμενου ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας του ΦΒ πλαισίου και δίνεται από τη σχέση:

$$c_6 = a_{OMS} \cdot fac_2 = 4,375 \cdot 14,9983 = 65,62 \text{ €/m}^2 \quad (5.17)$$

Άρα ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $A_s$ , που αναφέρεται στα ΦΒ πλαίσια, θα έχει την εξής τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$(c_4 - c_5 + c_6) = 482,85 \text{ €/m}^2 \quad (5.18)$$

Επειδή ο χρόνος ζωής της νηζελογεννήτριας είναι μικρότερος από το χρονικό ορίζοντα του έργου, θα αγοραστούν περισσότερες από μία νηζελογεννήτριες κατά τη διάρκεια του έργου. Συγκεκριμένα θα αγοραστούν τρεις νηζελογεννήτριες, όπως προκύπτει από τη σχέση:  $x_d = \frac{N}{L_d} = \frac{20}{8} = 2,5$  και τη στρογγυλοποίηση στο μεγαλύτερο ακέραιο. Ο συντελεστής  $c_7$  αντιστοιχεί στη παρούσα αξία του κόστους αγοράς των νηζελογεννητριών ανά kW και δίνεται από τη σχέση:

$$c_7 = a_d \cdot \sum_{x=1}^3 \left( \frac{1+es}{1+r} \right)^{(x-1) \cdot L_d} = 485,29 \text{ €/kW} \quad (5.19)$$

Ο συντελεστής  $c_8$  αντιστοιχεί στη παρούσα αξία της αξίας μεταπώλησης των νηζελογεννητριών και δίνεται από τη σχέση:

$$c_8 = S_d \cdot \left( \frac{1+j}{1+r} \right)^{L_d} + S_{pd} \cdot \left( \frac{1+j}{1+r} \right)^N = 65,66 \text{ €/kW} \quad (5.20)$$

Ο συντελεστής  $c_9$  αντιστοιχεί στη παρούσα αξία του συνολικού ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης ανά kW, συμπεριλαμβανομένου του κόστους της κατανάλωσης καυσίμου και δίνεται από τη σχέση:

$$c_9 = (a_{MCD} + a_{OCD}) \cdot hours \cdot fac_2 = 0,429 \cdot 4000 \cdot 14,9983 = 25737,91 \text{ €/kW} \quad (5.21)$$

Άρα ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $A_d$ , που αναφέρεται στην νηζελογεννήτρια θα έχει την εξής τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$(c_7 - c_8 + c_9) = 26183,54 \text{ €/kW} \quad (5.22)$$

Οι συσσωρευτές έχουν διάρκεια ζωής  $L_b = 10$  χρόνια, συνεπώς σύμφωνα με τη σχέση:  $x_b = \frac{N}{L_b} = \frac{20}{10} = 2$ , θα πρέπει να αγοραστούν δύο φορές νέοι συσσωρευτές κατά τη διάρκεια του έργου. Ακόμα έχει θεωρηθεί πως οι συσσωρευτές έχουν μηδενική αξία μεταπώλησης επομένως δεν υπολογίζεται ο συντελεστής που αντιστοιχεί στα έσοδα από την μεταπώληση. Άρα ο συντελεστής  $c_{10}$ , ο οποίος εκφράζει τη παρούσα αξία της επένδυσης που θα γίνει για την αγορά των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έργου θα είναι:

$$c_{10} = a_b \cdot \sum_{x=1}^2 \left( \frac{1+es}{1+r} \right)^{(x-1) \cdot L_b} = 175,05 \text{ €/kWh} \quad (5.23)$$

Ο συντελεστής  $c_{11}$ , ο οποίος εκφράζει τη παρούσα αξία του ετήσιου μεταβαλλόμενου κόστους συντήρησης και λειτουργίας των συσσωρευτών δίνεται από τη σχέση:

$$c_{11} = a_{OMB} \cdot fac_2 = 29,99 \text{ €/kWh} \quad (5.24)$$

Άρα ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $A_b$ , που αναφέρεται στους συσσωρευτές, θα έχει την εξής τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$(c_{10} + c_{11}) = 175,05 + 29,99 = 205,04 \text{ €/kWh} \quad (5.25)$$

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης, που εμφανίζονται στους περιορισμούς του γραμμικού προγράμματος. Έχοντας ως δεδομένα για την περίοδο ενός έτους τις ωριαίες τιμές για την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και τη ζήτηση του φορτίου και θεωρώντας ως υποπερίοδο  $i$  της μοντελοποίησης τον ένα μήνα, υπολογίζονται οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ενέργειας, της αιολικής ενέργειας και της ζήτησης του φορτίου.

Οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο προκύπτουν από το άθροισμα των ωριαίων τιμών της ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο, για το σύνολο των ωρών που αντιστοιχεί στον κάθε μήνα. Η ηλιακή ενέργεια που προκύπτει από το ΦΒ σύστημα δίνεται από τον τύπο:

$$P_s = I \cdot effs \cdot A_s \quad (5.26)$$

Συνεπώς, οι τιμές της ηλιακής ενέργειας που παράγει το ΦΒ σύστημα ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε ώρα προκύπτουν από την σχέση:

$$P_s = I \cdot effs \quad (5.27)$$

όπου  $I$  η πραγματική ακτινοβολία ( $kW/m^2$ ) και  $effs$  η απόδοση του ΦΒ συστήματος.

Έχοντας θεωρήσει απόδοση του ΦΒ συστήματος της τάξεως του 11% ( $effs = 0,11$ ), η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε μήνα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2:** Τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ σύστημα ανά τετραγωνικό μέτρο.

| Μήνας       | Παραγόμενη ενέργεια<br>από το ΦΒ σύστημα<br>( $kWh/m^2$ ) |
|-------------|-----------------------------------------------------------|
| Ιανουάριος  | 9.887651                                                  |
| Φεβρουάριος | 11.72272                                                  |
| Μάρτιος     | 17.82022                                                  |
| Απρίλιος    | 19.39971                                                  |
| Μάιος       | 19.33109                                                  |
| Ιούνιος     | 23.09561                                                  |
| Ιούλιος     | 23.07494                                                  |
| Αύγουστος   | 23.5628                                                   |
| Σεπτέμβριος | 17.76177                                                  |
| Οκτώβριος   | 16.16969                                                  |
| Νοέμβριος   | 10.89928                                                  |
| Δεκέμβριος  | 9.590516                                                  |

Οι μηνιαίες τιμές της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΓ προκύπτει από την άθροιση των ωριαίων τιμών της παραγόμενης ενέργειας από ΑΓ, για τις ώρες που αντιστοιχούν σε κάθε μήνα. Μία ΑΓ παράγει ισχύ όταν η ταχύτητα του ανέμου  $V$  είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ΑΓ  $V_{in}$  και σταματάει να λειτουργεί όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ταχύτητα παύσης λειτουργίας της ΑΓ  $V_{out}$ . Γίνεται η παραδοχή πως για ταχύτητα ανέμου ανάμεσα στο διάστημα  $V_r < V < V_{out}$  (όπου  $V_r$  η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου) η ΑΓ παράγει την ονομαστική ισχύ της  $P_r$ . Ενώ για ταχύτητα ανέμου στο διάστημα  $V_{in} < V < V_r$  η παραγόμενη ενέργεια από την ΑΓ ποικίλει ανάλογα με τον κυβικό νόμο. Συνεπώς η παραγόμενη ενέργεια εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_W = \begin{cases} 0 & \text{για } V < V_{in} \\ a_{WT} \cdot V^3 - b_{WT} \cdot P_r & \text{για } V_{in} < V < V_r \\ P_r & \text{για } V_r < V < V_{out} \\ 0 & \text{για } V > V_{out} \end{cases} \quad (5.28)$$

Έχοντας θεωρήσει τις εξής τιμές:  $V_{in} = 4 \text{ m/s}$ ,  $V_r = 15 \text{ m/s}$ ,  $V_{out} = 25 \text{ m/s}$  καθώς και ΑΓ ονομαστικής ισχύος  $P_r = 30 \text{ kW}$ , υπολογίζονται από τις σχέσεις (του κεφαλαίου 2) οι τιμές των παραμέτρων  $a_{WT}$  και  $b_{WT}$ .

$$a_{WT} = 0,009061 \quad (5.29)$$

$$b_{WT} = 0,01933 \quad (5.30)$$

Εν συνεχεία, οι πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, που υπολογίστηκαν με χρήση του εκθετικού νόμου, χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των ωριαίων τιμών της παραγόμενης ενέργειας από ΑΓ που δίνεται από τη σχέση:

$$P_W = \begin{cases} 0 & \text{για } V < 4 \\ 0,009061 \cdot V^3 - 0,5799 & \text{για } 4 < V < 15 \\ 30 & \text{για } 15 < V < 25 \\ 0 & \text{για } V > 25 \end{cases} \quad (5.31)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι μηνιαίες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από την άθροιση των ωριαίων τιμών που αντιστοιχούν για κάθε μήνα. Αφού διαιρεθούν με το εμβαδόν της επιφάνειας της πτερωτής, το οποίο για διάμετρο πτερωτής ίση με 13 m είναι  $\pi \cdot \frac{D^2}{4} = 132,73 \text{ m}^2$ , προκύπτουν οι τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

**Πίνακας 5.3:** Τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο από ΑΓ.

| Μήνας       | Παραγόμενη ενέργεια<br>από ΑΓ(kWh/m <sup>2</sup> ) |
|-------------|----------------------------------------------------|
| Ιανουάριος  | 45,357817                                          |
| Φεβρουάριος | 54,665938                                          |
| Μάρτιος     | 32,288119                                          |
| Απρίλιος    | 49,744527                                          |
| Μάιος       | 28,905373                                          |
| Ιούνιος     | 38,129059                                          |
| Ιούλιος     | 38,54619                                           |
| Αύγουστος   | 39,579789                                          |
| Σεπτέμβριος | 23,043598                                          |
| Οκτώβριος   | 40,175493                                          |
| Νοέμβριος   | 30,251984                                          |
| Δεκέμβριος  | 45,847378                                          |

Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $R_d$  στους περιορισμούς, ο οποίος εκφράζει τη διάρκεια λειτουργίας της νηζελογεννήτριας σε ώρες για την υποπερίοδο  $i$ , υπολογίζεται από τη συνολική διάρκεια που έχει υποτεθεί για ένα έτος διαιρεμένη με το πλήθος των υποπεριοδών για ένα έτος. Αφού η υποπερίοδος  $i$  αντιστοιχεί σε περίοδο ενός μήνα, ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της νηζελογεννήτριας έχει θεωρηθεί ίσος με 4000 h ανά έτος και αφού ο συντελεστής της μεταβλητής  $R_d$  έχει θεωρηθεί στη μοντελοποίηση πως έχει σταθερή τιμή για κάθε υποπερίοδο τότε θα είναι ίσος με:

$$duration = \frac{4000}{12} = 333,33 \text{ h} \quad (5.32)$$

Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης  $R_b$  στους περιορισμούς εκφράζει το πλήθος των πλήρων εκφορτίσεων των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια της υποπεριόδου  $i$ . Ο συντελεστής αυτός έχει θεωρηθεί ίσος με:  $x = 11,5$ .

Οι τιμές της συνολικής μηνιαίας ζήτησης του φορτίου προκύπτουν από το άθροισμα των ωριαίων τιμών για την περίοδο που αντιστοιχεί σε κάθε μήνα. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

**Πίνακας 5.4:** Συνολική μηνιαία ζήτηση φορτίου.

| Μήνας       | Ζήτηση Φορτίου (kWh) |
|-------------|----------------------|
| Ιανουάριος  | 37577,4              |
| Φεβρουάριος | 31256,28             |
| Μάρτιος     | 33221,02             |
| Απρίλιος    | 31735,82             |
| Μάιος       | 37169,08             |
| Ιούνιος     | 39584,69             |
| Ιούλιος     | 47779,58             |
| Αύγουστος   | 47431,71             |
| Σεπτέμβριος | 44177,13             |
| Οκτώβριος   | 38159,85             |
| Νοέμβριος   | 33594,16             |
| Δεκέμβριος  | 34161,79             |

Οι μηνιαίες τιμές της ζήτησης του φορτίου χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του δεξιού μέλους των περιορισμών του γραμμικού προγράμματος. Επομένως όσον αφορά τους περιορισμούς που αναφέρονται στην ελάχιστη αποδεκτή ικανοποίηση της ζήτησης, το δεξί μέλος τους υπολογίζεται από τη σχέση:  $Load(i) \cdot (1 - EENS)$  όπου  $Load(i)$  η ζήτηση του φορτίου για την αντίστοιχη υποπερίοδο  $i$ . Όσον αφορά τους περιορισμούς που αναφέρονται στη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, το δεξί τους μέλος υπολογίζεται από τη σχέση:  $Load(i) * up_{bound}$  όπου  $up_{bound}$  μία παράμετρος η οποία εκφράζει το ποσοστό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα σε σχέση με τη ζήτηση του φορτίου. Η παράμετρος  $up_{bound}$  πήρε την τιμή 1,75 καθώς θεωρήθηκε απαραίτητη η πλεονάζουσα παραγόμενη ενέργεια για να αντισταθμίσει την απουσία της μοντελοποίησης της απαιτούμενης ενέργειας για τη φόρτιση των συσσωρευτών, στο γραμμικό μοντέλο. Οι τιμές του δεξιού μέλους των περιορισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

**Πίνακας 5.5:** Τιμές δεξιού μέλους των περιορισμών της ελάχιστης αποδεκτής και της μέγιστης αποδεκτής μηνιαία παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

| Μήνας       | Ελάχιστη αποδεκτή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) | Μέγιστη αποδεκτή παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) |
|-------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Ιανουάριος  | 35698,53                                              | 65760,46                                             |
| Φεβρουάριος | 29693,47                                              | 54698,5                                              |

|             |          |          |
|-------------|----------|----------|
| Μάρτιος     | 31559,97 | 58136,78 |
| Απρίλιος    | 30149,03 | 55537,68 |
| Μάιος       | 35310,63 | 65045,9  |
| Ιούνιος     | 37605,46 | 69273,21 |
| Ιούλιος     | 45390,6  | 83614,26 |
| Αύγουστος   | 45060,12 | 83005,49 |
| Σεπτέμβριος | 41968,28 | 77309,98 |
| Οκτώβριος   | 36251,86 | 66779,74 |
| Νοέμβριος   | 31914,45 | 58789,78 |
| Δεκέμβριος  | 32453,7  | 59783,13 |

Για την ολοκλήρωση του δεξιού μέλους των περιορισμών πρέπει ακόμα να εισαχθούν στο λογιστικό φύλλο οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές των μεταβλητών απόφασης, οι οποίες αντιστοιχούν σε: 9 ΑΓ (1200 m<sup>2</sup>), 1818 ΦΒ πλαίσια ή 100 kW<sub>p</sub> (800 m<sup>2</sup>), 4 νητζελογεννήτριες (120 kW) και 180 συσσωρευτές (1368 kWh). Οι μέγιστες τιμές των μεταβλητών συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.6.

**Πίνακας 5.6:** Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές των μεταβλητών απόφασης.

| Μεταβλητή | Μέγιστη τιμή        |
|-----------|---------------------|
| $A_w$     | 1200 m <sup>2</sup> |
| $A_s$     | 800 m <sup>2</sup>  |
| $R_d$     | 120 kW              |
| $R_b$     | 1368 kWh            |

Τέλος, αφού όλοι οι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση και στους περιορισμούς καθώς και τα δεξιά μέλη των περιορισμών έχουν υπολογιστεί, το γραμμικό πρόγραμμα παίρνει την τελική του μορφή. Η ολοκληρωμένη μορφή του γραμμικού προγράμματος στο λογιστικό φύλλο του Excel φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Τα ονόματα των μεταβλητών απόφασης εμφανίζονται στη περιοχή των κελιών B1:E1, οι αντίστοιχοι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση βρίσκονται στη περιοχή B2:E2 και οι συντελεστές των μεταβλητών απόφασης στους περιορισμούς βρίσκονται στον πίνακα A που αποτελείται από τα κελιά της περιοχής B3:E30. Τα δεξιά μέλη των περιορισμών, τα οποία αποτελούν το διάνυσμα  $b$ , εμφανίζονται στην περιοχή I3:I30 του λογιστικού φύλλου και ο τύπος των περιορισμών εμφανίζεται στην περιοχή H3:H30.

|    | A             | B        | C        | D         | E        | F | G    | H     | I        | J |
|----|---------------|----------|----------|-----------|----------|---|------|-------|----------|---|
| 1  | Μεταβλητές    | Aw       | As       | Rd        | Rb       |   |      |       |          |   |
| 2  | Αντικειμενική | 634.4886 | 482.8474 | 26183.542 | 205.0403 |   | Ax   | typos | b        |   |
| 3  | Περιορισμοί   | 45.35782 | 9.887651 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 35698.53 |   |
| 4  |               | 54.66594 | 11.72272 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 29693.47 |   |
| 5  |               | 32.28812 | 17.82022 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 31559.97 |   |
| 6  |               | 49.74453 | 19.39971 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 30149.03 |   |
| 7  |               | 28.90537 | 19.33109 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 35310.63 |   |
| 8  |               | 38.12906 | 23.09561 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 37605.46 |   |
| 9  |               | 38.54619 | 23.07494 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 45390.6  |   |
| 10 |               | 39.57979 | 23.5628  | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 45060.12 |   |
| 11 |               | 23.0436  | 17.76177 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 41968.28 |   |
| 12 |               | 40.17549 | 16.16969 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 36251.86 |   |
| 13 |               | 30.25198 | 10.89928 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 31914.45 |   |
| 14 |               | 45.84738 | 9.590516 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 >= |       | 32453.7  |   |
| 15 |               | 45.35782 | 9.887651 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 65760.46 |   |
| 16 |               | 54.66594 | 11.72272 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 54698.5  |   |
| 17 |               | 32.28812 | 17.82022 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 58136.78 |   |
| 18 |               | 49.74453 | 19.39971 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 55537.68 |   |
| 19 |               | 28.90537 | 19.33109 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 65045.9  |   |
| 20 |               | 38.12906 | 23.09561 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 69273.21 |   |
| 21 |               | 38.54619 | 23.07494 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 83614.26 |   |
| 22 |               | 39.57979 | 23.5628  | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 83005.49 |   |
| 23 |               | 23.0436  | 17.76177 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 77309.98 |   |
| 24 |               | 40.17549 | 16.16969 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 66779.74 |   |
| 25 |               | 30.25198 | 10.89928 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 58789.78 |   |
| 26 |               | 45.84738 | 9.590516 | 333.33333 | 11.5     |   | 0 <= |       | 59783.13 |   |
| 27 |               | 1        | 0        | 0         | 0        |   | 0 <= |       | 1200     |   |
| 28 |               | 0        | 1        | 0         | 0        |   | 0 <= |       | 800      |   |
| 29 |               | 0        | 0        | 1         | 0        |   | 0 <= |       | 120      |   |
| 30 |               | 0        | 0        | 0         | 1        |   | 0 <= |       | 1368     |   |
| 31 |               |          |          |           |          |   |      |       |          |   |

**Σχήμα 5.1:** Ολοκληρωμένη μορφή του γραμμικού προγράμματος.

## 5.8 Βελτιστοποίηση γραμμικού προγράμματος

Για να είναι δυνατή η επίλυση του γραμμικού προβλήματος το Solver να μπορεί να υπολογίσει τα αριστερά μέλη των περιορισμών σύμφωνα με τις τιμές των μεταβλητών απόφασης. Για αυτό το λόγο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, επιλέγεται η περιοχή L3:L6 του λογιστικού φύλλου, στην οποία θα αποθηκεύονται οι τιμές των μεταβλητών απόφασης και στις οποίες αρχικά έχουν δοθεί μηδενικές τιμές.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται με χρήση της συνάρτησης `sumproduct( )` του Excel και αποθηκεύεται στο κελί L9. Εισάγοντας στο κελί L9 τον υπολογισμό: `=sumproduct(L3:L6,M3:M6)`, υπολογίζεται το άθροισμα των τιμών των μεταβλητών απόφασης επί τους αντίστοιχους συντελεστές τους στην αντικειμενική

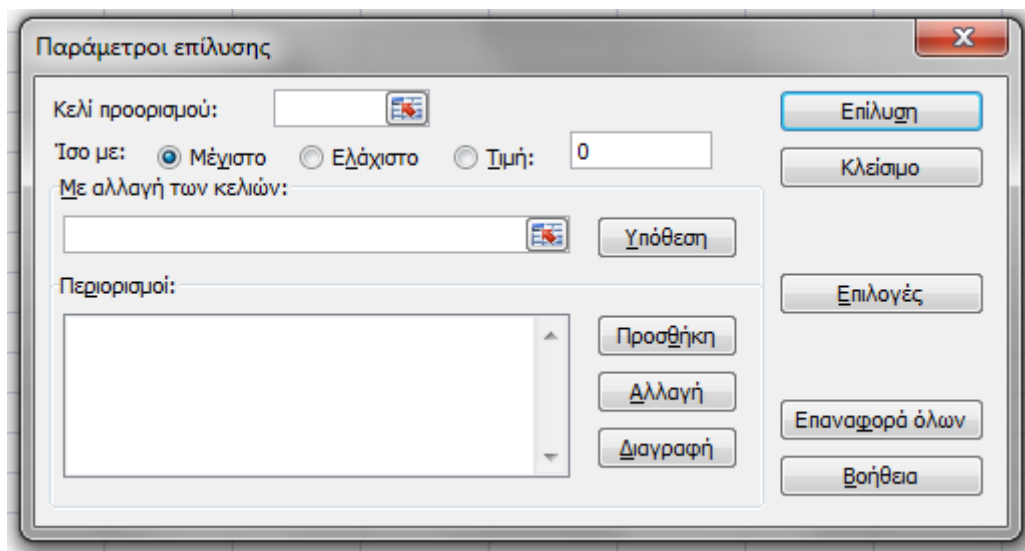
συνάρτηση (διάνυσμα c). Το άθροισμα αυτό αποτελεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγράμματος.

| J | K          | L    | M | N        |
|---|------------|------|---|----------|
|   | metavlhtes | timh | c |          |
|   | Aw         |      | 0 | 634.4886 |
|   | As         |      | 0 | 482.8474 |
|   | Rd         |      | 0 | 26183.54 |
|   | Rb         |      | 0 | 205.0403 |
|   |            |      |   |          |
|   | f=         |      | 0 |          |

**Σχήμα 5.2:** Περιοχή αποθήκευσης των τιμών των μεταβλητών απόφασης και της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης συναρτήσει των μεταβλητών.

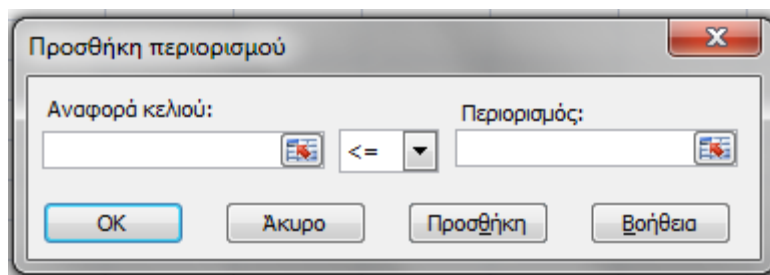
Οι τιμές των αριστερών μελών των περιορισμών, οι οποίοι αποθηκεύονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, στην περιοχή G3:G30, προκύπτουν από το γινόμενο της μήτρας  $A$ , όπου αποθηκεύονται οι συντελεστές των μεταβλητών στους περιορισμούς, επί τις τιμές των μεταβλητών απόφασης. Το γινόμενο αυτό αντιστοιχεί δηλαδή, στον πολλαπλασιασμό του πίνακα της περιοχής B3:E30 επί το διάνυσμα της περιοχής L3:L6. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης `mmult()`. Επιλέγοντας με τον κέρσορα την περιοχή G3:G30, εισάγοντας τον υπολογισμό: `=mmult(B3:E30, L3:L6)` και πατώντας ταυτόχρονα τα πλήκτρα Control, Shift και Enter, αποθηκεύεται στη περιοχή G3:G30 το διάνυσμα που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό  $A \cdot x$  και τα στοιχεία του αποτελούν το αριστερό μέλος των περιορισμών.

Αφού πλέον το γραμμικό πρόβλημα έχει διατυπωθεί με τον κατάλληλο τρόπο στο Excel μπορεί να γίνει η επίλυση του με τη χρήση του Solver. Αρχικά, επιλέγεται από την καρτέλα «Δεδομένα» του Excel 2007 το εργαλείο Επίλυση (Solver), το οποίο βρίσκεται στην υποκατηγορία «Ανάλυση» και εμφανίζεται η οθόνη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Στην οθόνη αυτή υπάρχουν τρία βασικά πεδία με τις ονομασίες: «Κελί προορισμού», «Με αλλαγή κελιών» και «Περιορισμοί».



**Σχήμα 5.3:** Η βασική οθόνη του Solver.

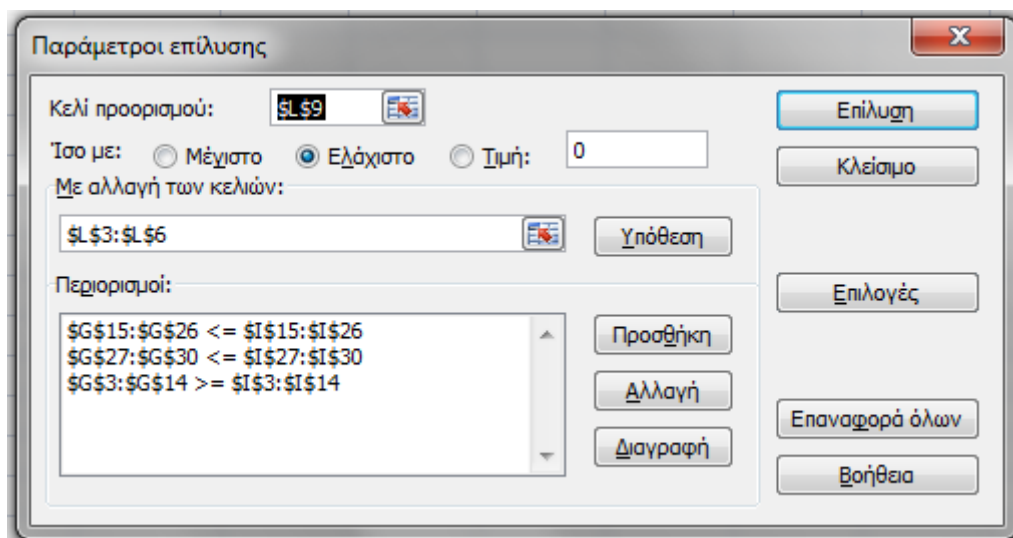
Στη συνέχεια, εισάγεται στο πεδίο «Κελί προορισμού» το κελί στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή το κελί L9. Από τις τρεις επιλογές: Μέγιστο, Ελάχιστο και Τιμή που βρίσκονται κάτω από το πεδίο «Κελί προορισμού», επιλέγεται το Ελάχιστο αφού το γραμμικό πρόβλημα που εξετάζεται θέτει προς ελαχιστοποίηση την αντικειμενική συνάρτηση. Στο πεδίο «Με αλλαγή των κελιών» εισάγεται η περιοχή στην οποία θα αποθηκευτούν οι τιμές των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή η περιοχή L3:L6. Τέλος, η εισαγωγή των περιορισμών στο πεδίο «Περιορισμοί» γίνεται πατώντας το κουμπί «Προσθήκη» και την εμφάνιση μιας νέας οθόνης, η οποία έχει τρία πεδία.



**Σχήμα 5.4:** Οθόνη για την εισαγωγή των περιορισμών του γραμμικού προβλήματος στο Solver.

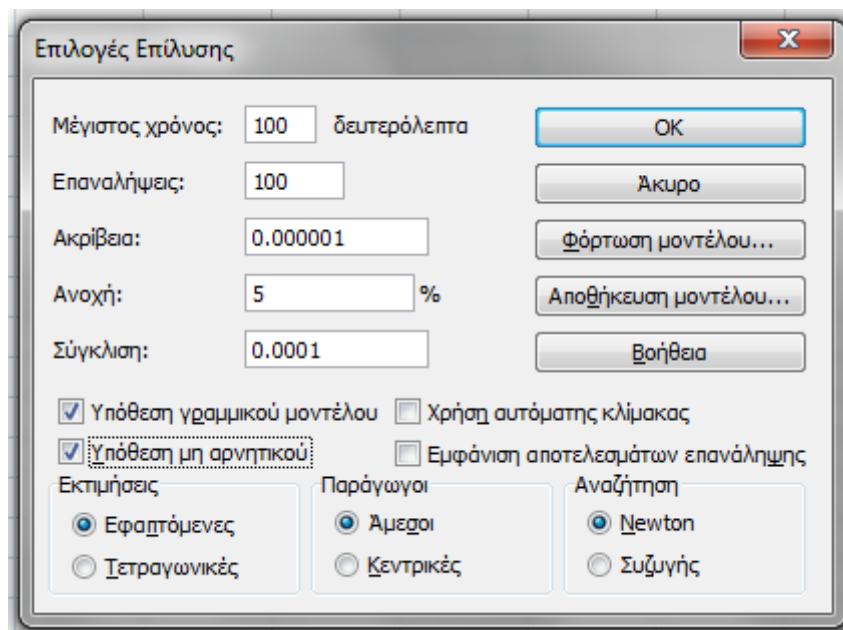
Η εισαγωγή των περιορισμών μπορεί να γίνει εισάγοντας κάθε περιορισμό ξεχωριστά από τους υπόλοιπους, αλλά στην περίπτωση περιορισμών του ίδιου τύπου, δίνεται η δυνατότητα από το Solver να εισαχθούν όλοι μαζί. Στο πεδίο «Αναφορά κελιού» εισάγεται το κελί που περιέχει το αριστερό μέλος του περιορισμού, στο μεσαίο πεδίο επιλέγεται ο τύπος του περιορισμού και στο πεδίο «Περιορισμός» εισάγεται το κελί που περιέχει το δεξί μέλος του περιορισμού. Ακόμα, πρέπει να αναφερθεί πως μέσω της οθόνης αυτής γίνεται και ο καθορισμός ειδικών τύπων μεταβλητών απόφασης (δυαδικές ή ακέραιες) επιλέγοντας στο μεσαίο πεδίο bin και int αντίστοιχα.

Συνεπώς όσον αφορά τους περιορισμούς της ελάχιστης παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, εισάγονται στο πρώτο πεδίο η περιοχή G3:G14, επιλέγεται ο τύπος  $\geq$  και στο τρίτο πεδίο εισάγεται η περιοχή I3:I14. Οι περιορισμοί που αφορούν τη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορούν να εισαχθούν μαζί με τους περιορισμούς που αναφέρονται στις μέγιστες τιμές που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης, αφού είναι ίδιου τύπου περιορισμοί. Επομένως, στο πρώτο πεδίο της οθόνης για την εισαγωγή των περιορισμών, θα εισαχθεί ακόμα η περιοχή G15:G30, στο δεύτερο πεδίο επιλέγεται ο τύπος  $\leq$  και στο τρίτο πεδίο εισάγεται η περιοχή I15:I30. Η μορφή της βασικής οθόνης του Solver έχει πλέον διαμορφωθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



**Σχήμα 5.5:** Μορφή της βασικής οθόνης του Solver έχοντας εισάγει τις κατάλληλες περιοχές στα αντίστοιχα πεδία.

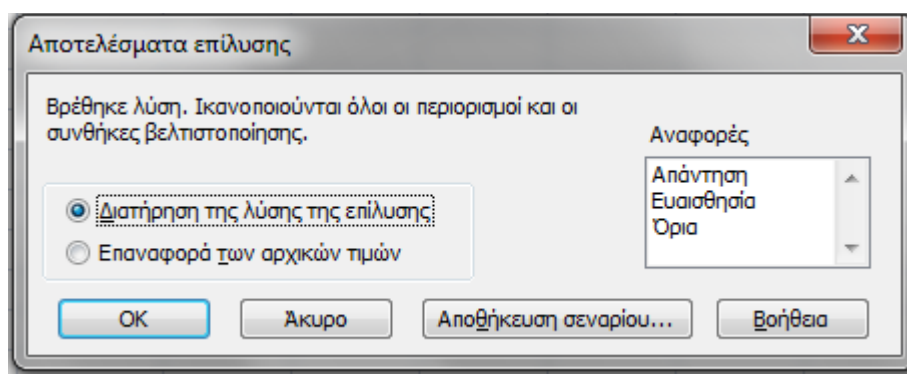
Πριν την επίλυση του γραμμικού προγράμματος πρέπει να καθοριστούν δύο ακόμα στοιχεία στην οθόνη που παρουσιάζεται όταν πατηθεί το κουμπί Επιλογές στη βασική οθόνη του Solver. Στη νέα οθόνη που παρουσιάζεται, πραγματοποιούνται οι επιλογές «Υπόθεση γραμμικού μοντέλου» και «Υπόθεση μη αρνητικού». Η πρώτη επιλογή προσδιορίζει τη μορφή του μοντέλου, ενημερώνοντας το Solver πως πρόκειται για ένα γραμμικό πρόγραμμα. Η δεύτερη επιλογή αποτελεί τον πιο εύκολο τρόπο για την εισαγωγή των περιορισμών μη αρνητικότητας, θεωρώντας ότι οι μεταβλητές απόφασης παίρνουν μη αρνητικές τιμές. Εάν το γραμμικό πρόγραμμα έχει ακέραιες μεταβλητές, τότε σημαντικό ρόλο στη διαδικασία επίλυσης έχει η επιλογή «Ανοχή». Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη ποσοστιαία διαφορά μεταξύ του άνω και του κάτω φράγματος στη διαδικασία κλάδου και φράγματος, η οποία θεωρείται αποδεκτή ως κριτήριο βελτιστότητας. Έτσι η προκαθορισμένη επιλογή του 5% σημαίνει ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης θα τερματιστεί όταν βρεθεί ακέραια λύση που απέχει λιγότερο από 5% σε σχέση με το καλύτερο άνω φράγμα. Για μικρά προβλήματα, η παράμετρος αυτή είναι προτιμότερο να τίθεται ίση με μηδέν, ώστε να διασφαλιστεί ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης. Πατώντας το κουμπί OK στην οθόνη επιλογών του Solver γίνεται επιστροφή στη βασική οθόνη του Solver και πλέον μπορεί να γίνει η επίλυση του γραμμικού προβλήματος πατώντας το κουμπί Επίλυση.



Σχήμα 5.6: Οθόνη επιλογών του Solver.

## 5.9 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης γραμμικού μοντέλου

Εφόσον η διατύπωση του προβλήματος έχει γίνει σωστά και το πρόβλημα δεν είναι αδύνατο ή μη φραγμένο, τότε η διαδικασία της βελτιστοποίησης με το Solver περατώνεται εμφανίζοντας το μήνυμα «Βρέθηκε λύση. Ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί κι οι συνθήκες βελτιστοποίησης», όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, το οποίο υποδεικνύει πως βρέθηκε η βέλτιστη λύση. Στην ίδια οθόνη, παρουσιάζεται η δυνατότητα επιλογής τριών αναφορών που αφορούν τη βέλτιστη λύση, η αναφορά απάντησης, η αναφορά ευαισθησίας και η αναφορά ορίων.



Σχήμα 5.7: Αποτέλεσμα της διαδικασίας της επίλυσης και επιλογές αναφορών.

Επιλέγοντας την αναφορά απάντησης και πατώντας το κουμπί OK γίνεται η αποδοχή της λύσης, η οποία αποτελείται από τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης, τις τιμές

των αριστερών μελών των περιορισμών καθώς και τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι τιμές αυτές έχουν αποθηκευτεί στις περιοχές του λογιστικού φύλλου που έχουν επιλεγεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8.

| F | G        | H     | I        | J | K                   | L         | M        | N |
|---|----------|-------|----------|---|---------------------|-----------|----------|---|
|   | Ax       | typos | b        |   | metavlhtes          | timh      | c        |   |
|   | 45913.99 | >=    | 35698.53 |   | Aw                  | 459.1245  | 634.4886 |   |
|   | 51655.63 | >=    | 29693.47 |   | As                  | 800       | 482.8474 |   |
|   | 46259.43 | >=    | 31559.97 |   | Rd                  | 4.3409355 | 26183.54 |   |
|   | 55537.68 | >=    | 30149.03 |   | Rb                  | 1368      | 205.0403 |   |
|   | 45915.02 | >=    | 35310.63 |   |                     |           |          |   |
|   | 53161.45 | >=    | 37605.46 |   |                     |           |          |   |
|   | 53336.43 | >=    | 45390.6  |   | f=                  | 1071743.5 |          |   |
|   | 54201.27 | >=    | 45060.12 |   |                     |           |          |   |
|   | 41968.28 | >=    | 41968.28 |   | COE(€/kWh)          | 0.2249633 |          |   |
|   | 48560.28 | >=    | 36251.86 |   |                     |           |          |   |
|   | 39787.83 | >=    | 31914.45 |   |                     |           |          |   |
|   | 45901.05 | >=    | 32453.7  |   |                     |           |          |   |
|   | 45913.99 | <=    | 65760.46 |   | Πραγματική επένδυση | 2050983.3 |          |   |
|   | 51655.63 | <=    | 54698.5  |   |                     |           |          |   |
|   | 46259.43 | <=    | 58136.78 |   | up_bound_load_prc   | 1.75      |          |   |
|   | 55537.68 | <=    | 55537.68 |   |                     |           |          |   |
|   | 45915.02 | <=    | 65045.9  |   |                     |           |          |   |
|   | 53161.45 | <=    | 69273.21 |   |                     |           |          |   |
|   | 53336.43 | <=    | 83614.26 |   |                     |           |          |   |
|   | 54201.27 | <=    | 83005.49 |   |                     |           |          |   |
|   | 41968.28 | <=    | 77309.98 |   |                     |           |          |   |
|   | 48560.28 | <=    | 66779.74 |   |                     |           |          |   |
|   | 39787.83 | <=    | 58789.78 |   |                     |           |          |   |
|   | 45901.05 | <=    | 59783.13 |   |                     |           |          |   |
|   | 459.1245 | <=    | 1200     |   |                     |           |          |   |
|   | 800      | <=    | 800      |   |                     |           |          |   |
|   | 4.340935 | <=    | 120      |   |                     |           |          |   |
|   | 1368     | <=    | 1368     |   |                     |           |          |   |

**Σχήμα 5.8:** Παρουσίαση βέλτιστων τιμών στο λογιστικό φύλλο του Excel.

Η αναφορά απάντησης παρουσιάζεται σε ένα καινούργιο φύλλο εργασίας και περιλαμβάνει τρεις πίνακες, οι οποίοι περιέχουν την αρχική και τη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, τις αρχικές και τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης, τα αριστερά μέλη των περιορισμών καθώς και τον χαρακτηρισμό των περιορισμών ως υποχρεωτικός ή μη υποχρεωτικός.

|    | A | B                          | C              | D           | E                | F               | G           | H |
|----|---|----------------------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|-------------|---|
| 5  |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |
| 6  |   | Κελί προορισμού (Ελάχιστο) |                |             |                  |                 |             |   |
| 7  |   | Κελί                       | Όνομα          | Αρχική τιμή | Τελική τιμή      |                 |             |   |
| 8  |   | \$L\$9                     | f= timh        | 0           | 1071743.486      |                 |             |   |
| 9  |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |
| 10 |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |
| 11 |   | Ρυθμιζόμενα κελιά          |                |             |                  |                 |             |   |
| 12 |   | Κελί                       | Όνομα          | Αρχική τιμή | Τελική τιμή      |                 |             |   |
| 13 |   | \$L\$3                     | Aw timh        | 0.0000      | 459.1245         |                 |             |   |
| 14 |   | \$L\$4                     | As timh        | 0           | 800              |                 |             |   |
| 15 |   | \$L\$5                     | Rd timh        | 0           | 4.340935488      |                 |             |   |
| 16 |   | \$L\$6                     | Rb timh        | 0           | 1368             |                 |             |   |
| 17 |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |
| 18 |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |
| 19 |   | Περιορισμοί                |                |             |                  |                 |             |   |
| 20 |   | Κελί                       | Όνομα          | Τιμή κελιού | Τύπος            | Κατάσταση       | Απόκλιση    |   |
| 21 |   | \$G\$3                     | Περιορισμοί Ax | 45913.98508 | \$G\$3>=\$I\$3   | Μη υποχρεωτικός | 10215.45185 |   |
| 22 |   | \$G\$4                     | Ax             | 51655.63064 | \$G\$4>=\$I\$4   | Μη υποχρεωτικός | 21962.16112 |   |
| 23 |   | \$G\$5                     | Ax             | 46259.42538 | \$G\$5>=\$I\$5   | Μη υποχρεωτικός | 14699.45776 |   |
| 24 |   | \$G\$6                     | Ax             | 55537.6801  | \$G\$6>=\$I\$6   | Μη υποχρεωτικός | 25388.65376 |   |
| 25 |   | \$G\$7                     | Ax             | 45915.01696 | \$G\$7>=\$I\$7   | Μη υποχρεωτικός | 10604.3872  |   |
| 26 |   | \$G\$8                     | Ax             | 53161.44877 | \$G\$8>=\$I\$8   | Μη υποχρεωτικός | 15555.98928 |   |
| 27 |   | \$G\$9                     | Ax             | 53336.43287 | \$G\$9>=\$I\$9   | Μη υποχρεωτικός | 7945.836476 |   |
| 28 |   | \$G\$10                    | Ax             | 54201.26935 | \$G\$10>=\$I\$10 | Μη υποχρεωτικός | 9141.146514 |   |
| 29 |   | \$G\$11                    | Ax             | 41968.27526 | \$G\$11>=\$I\$11 | Υποχρεωτικός    | 0           |   |
| 30 |   | \$G\$12                    | Ax             | 48560.28151 | \$G\$12>=\$I\$12 | Μη υποχρεωτικός | 12308.42102 |   |
| 31 |   | \$G\$13                    | Ax             | 39787.82858 | \$G\$13>=\$I\$13 | Μη υποχρεωτικός | 7873.375535 |   |
| 32 |   | \$G\$14                    | Ax             | 45901.04682 | \$G\$14>=\$I\$14 | Μη υποχρεωτικός | 13447.34608 |   |
| 33 |   | \$G\$15                    | Ax             | 45913.98508 | \$G\$15<=\$I\$15 | Μη υποχρεωτικός | 19846.47087 |   |
| 34 |   | \$G\$16                    | Ax             | 51655.63064 | \$G\$16<=\$I\$16 | Μη υποχρεωτικός | 3042.865837 |   |
| 35 |   | \$G\$17                    | Ax             | 46259.42538 | \$G\$17<=\$I\$17 | Μη υποχρεωτικός | 11877.35708 |   |
| 36 |   | \$G\$18                    | Ax             | 55537.6801  | \$G\$18<=\$I\$18 | Υποχρεωτικός    | 0           |   |
| 37 |   | \$G\$19                    | Ax             | 45915.01696 | \$G\$19<=\$I\$19 | Μη υποχρεωτικός | 19130.87996 |   |
| 38 |   | \$G\$20                    | Ax             | 53161.44877 | \$G\$20<=\$I\$20 | Μη υποχρεωτικός | 16111.76608 |   |
| 39 |   | \$G\$21                    | Ax             | 53336.43287 | \$G\$21<=\$I\$21 | Μη υποχρεωτικός | 30277.82364 |   |
| 40 |   | \$G\$22                    | Ax             | 54201.26935 | \$G\$22<=\$I\$22 | Μη υποχρεωτικός | 28804.22009 |   |
| 41 |   | \$G\$23                    | Ax             | 41968.27526 | \$G\$23<=\$I\$23 | Μη υποχρεωτικός | 35341.70548 |   |
| 42 |   | \$G\$24                    | Ax             | 48560.28151 | \$G\$24<=\$I\$24 | Μη υποχρεωτικός | 18219.4615  |   |
| 43 |   | \$G\$25                    | Ax             | 39787.82858 | \$G\$25<=\$I\$25 | Μη υποχρεωτικός | 19001.95334 |   |
| 44 |   | \$G\$26                    | Ax             | 45901.04682 | \$G\$26<=\$I\$26 | Μη υποχρεωτικός | 13882.08612 |   |
| 45 |   | \$G\$27                    | Ax             | 459.1245247 | \$G\$27<=\$I\$27 | Μη υποχρεωτικός | 740.8754753 |   |
| 46 |   | \$G\$28                    | Ax             | 800         | \$G\$28<=\$I\$28 | Υποχρεωτικός    | 0           |   |
| 47 |   | \$G\$29                    | Ax             | 4.340935488 | \$G\$29<=\$I\$29 | Μη υποχρεωτικός | 115.6590645 |   |
| 48 |   | \$G\$30                    | Ax             | 1368        | \$G\$30<=\$I\$30 | Υποχρεωτικός    | 0           |   |
| 49 |   |                            |                |             |                  |                 |             |   |

**Σχήμα 5.9:** Αναφορά απάντησης της λύσης του γραμμικού προγράμματος στο Solver.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5.9, η βέλτιστη λύση του γραμμικού προβλήματος αντιστοιχεί στις εξής τιμές των μεταβλητών απόφασης:  $A_w = 399,69 \text{ m}^2$ ,  $A_s = 800 \text{ m}^2$ ,  $R_d = 4,34 \text{ kW}$ ,  $R_b = 1368 \text{ kWh}$ . Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ίση με:  $z = 1.141.607,416 \text{ €}$ .

Η ΑΓ η οποία έχει θεωρηθεί και εξετάζεται έχει εμβαδό περρωτής  $\pi \cdot \frac{D^2}{4} = 132,7 \text{ m}^2$ , συνεπώς η βέλτιστη τιμή που προέκυψε για τη μεταβλητή απόφασης  $A_w$ , η οποία αναφέρεται στα τετραγωνικά μέτρα της επιφάνειας της περρωτής της ΑΓ, αντιστοιχεί στην αγορά τεσσάρων ΑΓ (αφού  $\frac{459,12}{132,7} = 3,45$ ).

Το ΦΒ πλαίσιο που έχει θεωρηθεί έχει επιφάνεια:  $S = \frac{55}{1000} \cdot 8 = 0,44 \text{ m}^2$ , συνεπώς η βέλτιστη τιμή που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση για τη μεταβλητή απόφασης  $A_s$ , αντιστοιχεί στην αγορά 1818 ΦΒ πλαισίων, δηλαδή 100 kW<sub>p</sub> (αφού  $\frac{800}{8} = 100$ ).

Η νηζελογεννήτρια που έχει θεωρηθεί έχει ονομαστική ισχύ 40 kW, συνεπώς η βέλτιστη τιμή που προέκυψε για τη μεταβλητή απόφασης  $R_d$  αντιστοιχεί στην αγορά μίας νηζελογεννήτριας (αφού  $\frac{4,34}{40} = 0,109$ ).

Ο συσσωρευτής ο οποίος έχει θεωρηθεί έχει χωρητικότητα 1900 Ah και τάση λειτουργίας 4 V, επομένως η βέλτιστη λύση που προέκυψε για τη μεταβλητή απόφασης  $R_b$  αντιστοιχεί σε 180 συσσωρευτές (αφού  $\frac{1368 \cdot 1000}{1900 \cdot 4} = 180$ ).

Συνεπώς, το πραγματικό συνολικό παρόν κόστος του αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι:

$$\begin{aligned} cost &= (4 \cdot 634,488 \cdot 132,7) + (800 \cdot 482,847) + (1 \cdot 40 \cdot 26183,54) \\ &\quad + (1368 \cdot 205,04) = 2.050.983,3 \text{ €} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Τέλος, η βέλτιστη λύση που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση του γραμμικού προγράμματος, που αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση του απομονωμένου υβριδικού συστήματος, συγκεντρώνεται στον Πίνακα 5.7, όπου παρουσιάζεται το πλήθος των μονάδων που αποτελούν το σύστημα.

**Πίνακας 5.7:** Βέλτιστη λύση που προέκυψε από τη βελτιστοποίηση με το Solver.

| Συστατικά υβριδικού συστήματος | Μονάδες                    |
|--------------------------------|----------------------------|
| Ανεμογεννήτριες                | 4                          |
| ΦΒ πλαίσια                     | 1818 ή 100 kW <sub>p</sub> |
| Νηζελογεννήτρια                | 1                          |
| Συσσωρευτές                    | 180                        |
| <b>Συνολικό Κόστος</b>         | <b>2.050.983,3 €</b>       |

## **ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΟ HOMER**

### **6.1 Εισαγωγή**

Το HOMER Micropower Optimization Model, είναι ένα μοντέλο χρονοσειρών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που έχει αναπτυχθεί από το U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Σκοπός του είναι να βοηθήσει στο σχεδιασμό μικρών συστημάτων ενέργειας και να διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Το HOMER μοντελοποιεί τη φυσική συμπεριφορά καθώς και το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα επιτρέπει στον αναλυτή να συγκρίνει πλήθος διαφορετικών επιλογών σχεδίασης, βασισμένες στα οικονομικά και τεχνικά πλεονεκτήματα κάθε επιλογής. Το HOMER συμβάλει επίσης, στην κατανόηση και στην ποσοτικοποίηση των συνεπειών της αβεβαιότητας και των αλλαγών, στα δεδομένα εισόδου. Για τη σχεδίαση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας το HOMER χρησιμοποιεί τρεις βασικές διαδικασίες: την προσομοίωση, τη βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας.

### **6.2 Προσομοίωση**

Η πρωταρχική ικανότητα του προγράμματος HOMER είναι η προσομοίωση της λειτουργίας συστημάτων παραγωγής ενέργειας, τα οποία έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια. Οι εξελιγμένες δυνατότητες βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας που διαθέτει το HOMER βασίζονται στην προσομοίωση. Η διαδικασία της προσομοίωσης, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθορίζει τη συμπεριφορά είτε ενός συστήματος με συγκεκριμένη διάταξη, είτε ενός συνδυασμού συστατικών ενός συστήματος ορισμένων μεγεθών και μιας στρατηγικής λειτουργίας η οποία καθορίζει τον τρόπο που οι συνιστώσες του συστήματος συνεργάζονται.

Το HOMER μπορεί να προσομοιώσει μεγάλη ποικιλία συστημάτων όπως:

1. Φωτοβολταϊκά

2. Ανεμογεννήτριες
3. Υδροηλεκτρικά συστήματα
4. Μπαταρίες
5. Γεννήτριες
6. Μετατροπείς
7. Κυψέλες καυσίμου
8. Ηλεκτρολύτες

Το σύστημα που προσομοιώνεται μπορεί να είναι είτε συνδεδεμένο στο δίκτυο είτε αυτόνομο και έχει τη δυνατότητα να ικανοποιεί τη ζήτηση σε εναλλασσόμενο ή συνεχές ηλεκτρικό φορτίο καθώς και τη ζήτηση σε θερμικό φορτίο.

Η διαδικασία της προσομοίωσης ικανοποιεί δύο σκοπούς. Αρχικά, καθορίζει αν το σύστημα που εξετάζεται είναι εφικτό, ελέγχοντας αν η ζήτηση σε ηλεκτρικό ή θερμικό φορτίο ικανοποιείται επαρκώς καθώς και αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί από το χρήστη. Έπειτα, κάνει εκτίμηση του συνολικού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος για τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα του έργου. Με βάση το συνολικό κόστος που προκύπτει το HOMER συγκρίνει διαφορετικές διατάξεις συστημάτων, έτσι ώστε να προκύψει η βέλτιστη.

Το HOMER μοντελοποιεί ένα συγκεκριμένο σύστημα εκτελώντας προσομοιώσεις της λειτουργίας του συστήματος για κάθε ένα από τα χρονικά διαστήματα (σε λεπτά της ώρας), που έχουν οριστεί από τον χρήστη. Συνήθως επιλέγεται σαν βήμα της προσομοίωσης η μία ώρα (60 λεπτά), γεγονός που σημαίνει πως το HOMER εκτελεί τις απαραίτητες προσομοιώσεις για κάθε μία από τις 8760 ώρες ενός έτους. Για κάθε ώρα του έτους το HOMER υπολογίζει την διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια από Α.Π.Ε., τη συγκρίνει με τη ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου, αποφασίζει πως θα διανείμει την πλεονάζουσα ενέργεια στη περίπτωση που είναι περισσότερη από τη ζήτηση καθώς και πως θα παράγει την ενέργεια που χρειάζεται για την ικανοποίηση της ζήτησης, στη περίπτωση που η παραγόμενη ενέργεια από Α.Π.Ε. δεν επαρκεί. Όταν ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί για ένα έτος, το HOMER καθορίζει αν το σύστημα ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν τεθεί από το χρήστη και αφορούν το ποσοστό της συνολικής ζήτησης φορτίου που ικανοποιείται, το ποσό της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. ή τις εκπομπές ορισμένων ρύπων. Επιπλέον το HOMER υπολογίζει την ετήσια κατανάλωση καυσίμου, τις ώρες λειτουργίας των γεννητριών για ένα έτος, τον αναμενόμενο χρόνο ζωής του συσσωρευτή ή την ποσότητα της ενέργειας που αγοράζεται ετησίως από το δίκτυο (στην περίπτωση που το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο), έτσι ώστε να εξάγει το συνολικό κόστος κατά τη διάρκεια του έργου.

Το μέγεθος που το HOMER χρησιμοποιεί για να αναπαραστήσει το συνολικό κόστος του έργου είναι το καθαρό παρόν κόστος ή NPC (Net Present Cost). Το μέγεθος NPC αντιπροσωπεύει την παρούσα αξία από τις συνολικές εκροές μείον τις εισροές, που προκύπτουν κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα του έργου. Στις εκροές περιλαμβάνονται: το κόστος κεφαλαίου, τα κόστη αντικατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, πιθανές ποινές από την εκπομπή ρύπων και το κόστος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο (στην περίπτωση

διασυνδεδεμένου συστήματος). Στις εισροές περιλαμβάνονται η αξία μεταπώλησης των εξαρτημάτων που αποτελούν το σύστημα καθώς και η πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (στην περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος). Το καθαρό παρόν κόστος NPC δίνεται από τη σχέση:

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, N)} \quad (6.1)$$

όπου  $C_{ann,tot}$  το συνολικό ετήσιο κόστος (€/yr),  $CRF(i, N)$  ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου, ο οποίος προκύπτει από τον τύπο:  $CRF(i, N) = \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$ ,  $i$  το πραγματικό επιτόκιο που δίνεται από τη σχέση  $i = \frac{r-j}{1-j}$  και  $N$  ο χρονικός ορίζοντας του έργου σε έτη.

### 6.3 Βελτιστοποίηση

Μετά από τη διαδικασία προσομοίωσης ενός συγκεκριμένου συστήματος, η διαδικασία της βελτιστοποίησης καθορίζει τη βέλτιστη εφικτή διάταξη του υβριδικού συστήματος. Στο HOMER η βέλτιστη εφικτή διάταξη είναι αυτή που ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν τεθεί από το χρήστη και έχει το μικρότερο συνολικό κόστος. Η εύρεση της βέλτιστης διάταξης του συστήματος συμπεριλαμβάνει την επιλογή του συνδυασμού των συνιστωσών του συστήματος καθώς και τον καθορισμό του μεγέθους ή της ποσότητας κάθε συνιστώσας. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης το HOMER προσομοιώνει πλήθος διαφορετικών συνδυασμών, απορρίπτει τις μη εφικτές λύσεις, ταξινομεί τους εφικτούς συνδυασμούς σύμφωνα με το συνολικό κόστος NPC και παρουσιάζει την εφικτή λύση με το μικρότερο συνολικό κόστος NPC ως τη βέλτιστη διάταξη του υβριδικού συστήματος.

Ο σκοπός της διαδικασίας της βελτιστοποίησης είναι να καθορίσει τη βέλτιστη τιμή για κάθε μεταβλητή ελέγχου, που ενδιαφέρει τον αναλυτή και για την οποία το HOMER μπορεί να υπολογίσει πλήθος πιθανών τιμών. Οι πιθανές μεταβλητές απόφασης που περιέχει το HOMER είναι:

1. Το μέγεθος της ΦΒ συστοιχίας σε kW.
2. Ο αριθμός των ανεμογεννητριών.
3. Η παρουσία υδροηλεκτρικού συστήματος φυσικής ροής.
4. Το μέγεθος κάθε γεννήτριας σε kW.
5. Ο αριθμός των συσσωρευτών.
6. Το μέγεθος του μετατροπέα σε kW.
7. Το μέγεθος της μονάδας ηλεκτρόλυσης σε kW.
8. Το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου σε kW.

Μετά από τη διαδικασία προσομοίωσης όλων των πιθανών συνδυασμών των συστημάτων ενέργειας, το HOMER επιδεικνύει έναν κατάλογο συνδυασμών, που ταξινομούνται σύμφωνα με το συνολικό κόστος NPC, το οποίο χρησιμοποιείται για να γίνει σύγκριση των επιλογών που έχουν γίνει προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα παραγωγής ενέργειας. Στο Σχήμα 6.1 φαίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καθώς και όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας ταξινομημένου σύμφωνα με το συνολικό κόστος NPC. Η ταξινόμηση των συστημάτων ενέργειας που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1 είναι πλήρης, έχουν αποτυπωθεί δηλαδή όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των συστημάτων.

|    |    |    |    | FL30 | Gen (kW) | Batt. | Conv. (kW) | Initial Capital | Total NPC  | COE (\$/kWh) | Diesel (L) | Gen (hrs) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-------|------------|-----------------|------------|--------------|------------|-----------|
|    |    |    |    | 1    | 135      | 64    | 30         | \$ 216,500      | \$ 849,905 | 0.273        | 75,107     | 4,528     |
|    |    |    |    | 2    | 135      | 64    | 30         | \$ 346,500      | \$ 854,660 | 0.274        | 54,434     | 3,350     |
|    |    |    |    | 1    | 135      | 48    | 30         | \$ 200,500      | \$ 855,733 | 0.275        | 78,061     | 4,910     |
|    |    |    |    | 2    | 135      | 48    | 30         | \$ 330,500      | \$ 856,335 | 0.275        | 57,654     | 3,685     |
|    |    |    |    | 2    | 135      | 32    | 30         | \$ 314,500      | \$ 873,322 | 0.280        | 62,394     | 4,139     |
|    |    |    |    | 2    | 135      | 96    | 60         | \$ 401,000      | \$ 878,370 | 0.282        | 48,139     | 2,603     |
|    |    |    |    | 2    | 135      | 64    | 60         | \$ 369,000      | \$ 880,421 | 0.282        | 52,999     | 3,195     |
|   |   |   |   |      | 135      | 64    | 30         | \$ 86,500       | \$ 885,175 | 0.284        | 101,290    | 5,528     |
|  |  |  |  | 1    | 135      | 96    | 30         | \$ 248,500      | \$ 887,379 | 0.285        | 74,193     | 4,346     |
|  |  |  |  |      | 135      | 48    | 30         | \$ 70,500       | \$ 888,528 | 0.285        | 104,009    | 6,067     |
|  |  |  |  | 1    | 135      | 32    | 30         | \$ 184,500      | \$ 889,688 | 0.285        | 85,310     | 5,615     |
|  |  |  |  | 2    | 135      | 96    | 30         | \$ 378,500      | \$ 890,504 | 0.286        | 52,442     | 3,136     |
|  |  |  |  | 2    | 135      | 48    | 60         | \$ 353,000      | \$ 891,896 | 0.286        | 57,316     | 3,615     |
|  |  |  |  | 2    | 135      | 32    | 60         | \$ 337,000      | \$ 905,959 | 0.291        | 62,312     | 4,080     |
|  |  |  |  | 2    | 135      | 128   | 60         | \$ 433,000      | \$ 907,508 | 0.291        | 45,596     | 2,226     |
|  |  |  |  | 1    | 135      | 64    | 60         | \$ 239,000      | \$ 911,667 | 0.292        | 77,753     | 4,613     |
|  |  |  |  |      | 135      | 96    | 30         | \$ 118,500      | \$ 912,410 | 0.293        | 101,003    | 5,330     |

**Σχήμα 6.1:** Παράδειγμα ολικών αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης του HOMER.

Στο Σχήμα 6.2 παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένα τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του HOMER για το ίδιο παράδειγμα. Ο εναλλακτικός αυτός τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, εμφανίζει την λύση με το χαμηλότερο συνολικό κόστος NPC για κάθε πιθανή διάταξη του συστήματος.

|  |  |  |  | FL30 | Gen (kW) | Batt. | Conv. (kW) | Initial Capital | Total NPC    | COE (\$/kWh) | Diesel (L) | Gen (hrs) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------|-------|------------|-----------------|--------------|--------------|------------|-----------|
|  |  |  |  | 1    | 135      | 64    | 30         | \$ 216,500      | \$ 849,905   | 0.273        | 75,107     | 4,528     |
|  |  |  |  |      | 135      | 64    | 30         | \$ 86,500       | \$ 885,175   | 0.284        | 101,290    | 5,528     |
|  |  |  |  |      | 135      |       |            | \$ 0            | \$ 996,273   | 0.320        | 132,357    | 8,760     |
|  |  |  |  | 1    | 135      |       |            | \$ 130,000      | \$ 1,130,637 | 0.363        | 127,679    | 8,740     |

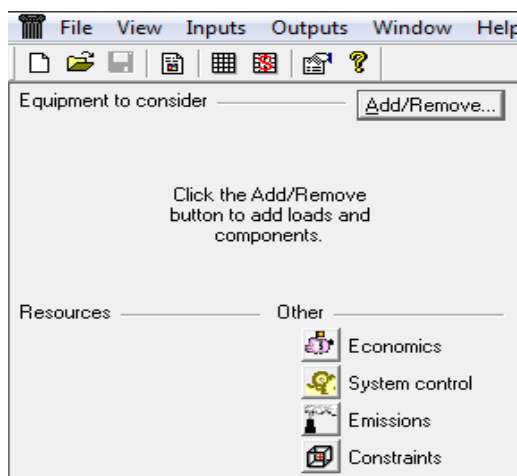
**Σχήμα 6.2:** Κατηγοριοποιημένα αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

## 6.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Το HOMER έχει την ικανότητα να εκτελέσει ανάλυση ευαισθησίας σχετικά με τα ωριαία σύνολα δεδομένων όπως η ζήτηση του ηλεκτρικού φορτίου, του ηλιακού, του αιολικού, του υδροηλεκτρικού δυναμικού καθώς και της διαθέσιμης βιομάζας. Όταν καθοριστούν οι μεταβλητές ευαισθησίας ως δεδομένα εισόδου, το HOMER επαναλαμβάνει τη διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε μεταβλητή ευαισθησίας που εισάγεται. Για παράδειγμα, εάν καθοριστεί η ταχύτητα αέρα ως μεταβλητή ευαισθησίας, το HOMER θα αναλύσει όλους τους συνδυασμούς των συστημάτων ενέργειας χρησιμοποιώντας τις τιμές της ταχύτητας αέρα που δόθηκαν.

## 6.5 Μοντελοποίηση με HOMER

Για την μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος στο HOMER αρχικά δημιουργείται ένα καινούργιο αρχείο, είτε επιλέγοντας File → New, είτε πατώντας το εικονίδιο . Η αρχική οθόνη του HOMER είναι ένα κενό σχεδιάγραμμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: Κενό σχεδιάγραμμα του HOMER.

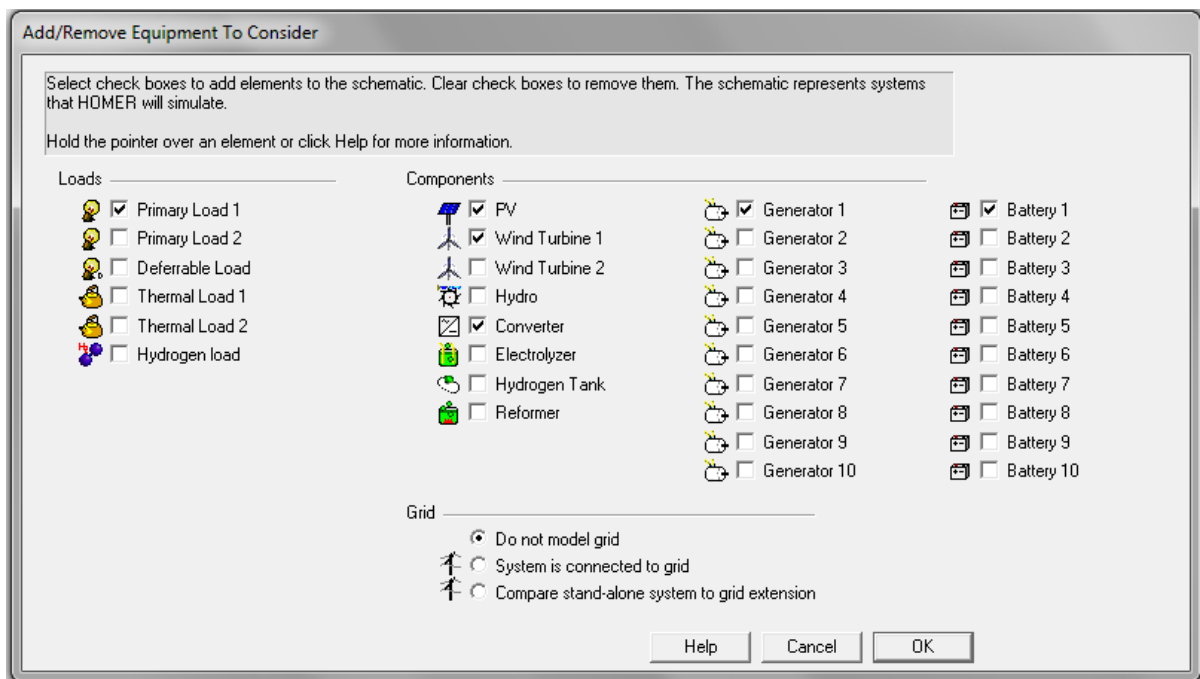
Στη συνέχεια, πατώντας το πλήκτρο «Add/Remove» στο κυρίως παράθυρο ανοίγει το μενού καθορισμού εξοπλισμού, στο οποίο γίνεται η επιλογή των συνιστωσών που αποτελούν το υβριδικό σύστημα. Το μενού επιλογής εξαρτημάτων περιλαμβάνει τρεις βασικές κατηγορίες:

1. **Loads (Φορτία):** Είναι οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια οι οποίες πρέπει να ικανοποιηθούν από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το HOMER μπορεί να μοντελοποιήσει ηλεκτρικά φορτία, θερμικά φορτία και φορτία υδρογόνου. Τα ηλεκτρικά φορτία είτε χρειάζεται να ικανοποιηθούν σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αναφέρονται ως πρωτεύοντα φορτία (primary loads), είτε μπορούν να ικανοποιηθούν

οποιαδήποτε στιγμή μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα και αναφέρονται ως χρονικά μετατιθέμενα φορτία (deferrable loads).

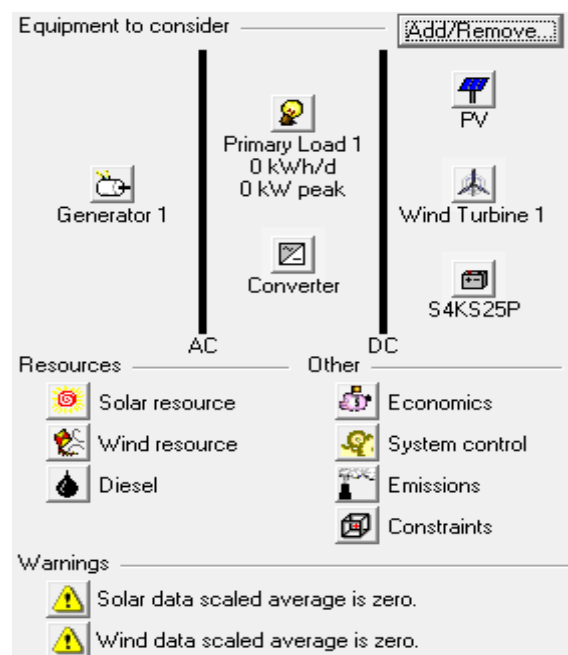
2. **Grid (Δίκτυο):** Υπάρχουν τρεις επιλογές για τη μοντελοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα εκτός δικτύου για το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου και σύνδεσης του συστήματος με αυτό, επιλέγει το «Do not model grid». Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, επιλέγει το «System is connected to grid». Εάν ο χρήστης επιθυμεί να μοντελοποιήσει ένα σύστημα εκτός δικτύου, αλλά και να συγκρίνει οικονομικά αυτή την επιλογή σε σχέση με την επέκταση του δικτύου και σύνδεση του συστήματος σε αυτό, επιλέγει το «Compare standalone system to grid extension».
3. **Components (Συστατικά):** Ένα συστατικό είναι ένας μηχανισμός που είναι τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν προστεθεί ένα συστατικό το οποίο απαιτεί πληροφορίες σχετικές με τους πόρους του, προστίθεται ένα επιπλέον κουμπί στην κατηγορία των πόρων (resources). Έτσι, εάν για παράδειγμα προστεθεί μια ανεμογεννήτρια στο σύστημα, εμφανίζεται στην κατηγορία των πόρων ένα κουμπί με τίτλο Wind resource, στο οποίο χρειάζεται να εισαχθούν δεδομένα ταχύτητας ανέμου.

Από το μενού προσθαφαίρεσης εξοπλισμού, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 6.4 επιλέγονται τα «Primary Load 1» για τη ζήτηση φορτίου, «PV» για τα ΦΒ πλαίσια, «Wind turbine 1» για τις ανεμογεννήτριες, «Generator 1» για τις γεννήτριες, τις οποίες το HOMER θεωρεί εξορισμού πως καταναλώνουν καύσιμο diesel, «Battery 1» για τους συσσωρευτές και «Converter» για τον μετατροπέα. Ακόμα, όσον αφορά τη σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο, επιλέγεται το «Do not model grid, έτσι ώστε το σύστημα να θεωρηθεί απομονωμένο.



**Σχήμα 6.4:** Μενού προσθαφαίρεσης συνιστωσών του υβριδικού συστήματος στο HOMER.

Πατώντας το κουμπί «OK» στο μενού επιλογής, το σχεδιάγραμμα παίρνει την αρχική του μορφή, η οποία περιέχει όλα τα επιλεγμένα στοιχεία και φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Στο κέντρο του σχήματος, ανάμεσα στους δύο ζυγούς, εμφανίζεται το εικονίδιο  το οποίο αντιπροσωπεύει τη ζήτηση και το εικονίδιο  το οποίο αντιπροσωπεύει τον μετατροπέα. Ο ζυγός «AC» που βρίσκεται αριστερά στο γράφημα αντιπροσωπεύει τον κόμβο του συστήματος, στον οποίο συνδέεται η ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ ο ζυγός «DC» συμβολίζει τον κόμβο στον οποίο συνδέεται η ενέργεια συνεχούς ρεύματος. Αριστερά του ζυγού «AC» βρίσκεται η περιοχή με τις συνιστώσες του συστήματος οι οποίες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα ενώ δεξιά του ζυγού «DC» βρίσκονται εκείνες που παράγουν συνεχές ρεύμα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5 το HOMER θεωρεί εξορισμού πως η νηζελογεννήτρια (αναπαριστάται με το εικονίδιο ) παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ τα ΦΒ πλαίσια (αναπαριστώνται με το εικονίδιο ) , οι ΑΓ (αναπαριστώνται με το εικονίδιο ) και οι συσσωρευτές (αναπαριστώνται με το εικονίδιο ) παράγουν συνεχές ρεύμα. Ακόμα παρατηρείται πως το HOMER εμφανίζει ορισμένες προειδοποιήσεις, οι οποίες οφείλονται στο γεγονός πως δεν έχουν εισαχθεί τα δεδομένα, που αφορούν το αιολικό και το ηλιακό δυναμικό. Στο πεδίο των πόρων (resources) του συστήματος εμφανίζονται τα εικονίδια: ,  και , τα οποία αναφέρονται στους ηλιακούς πόρους, στους αιολικούς πόρους και στους πόρους καυσίμου της νηζελογεννήτριας, αντίστοιχα.

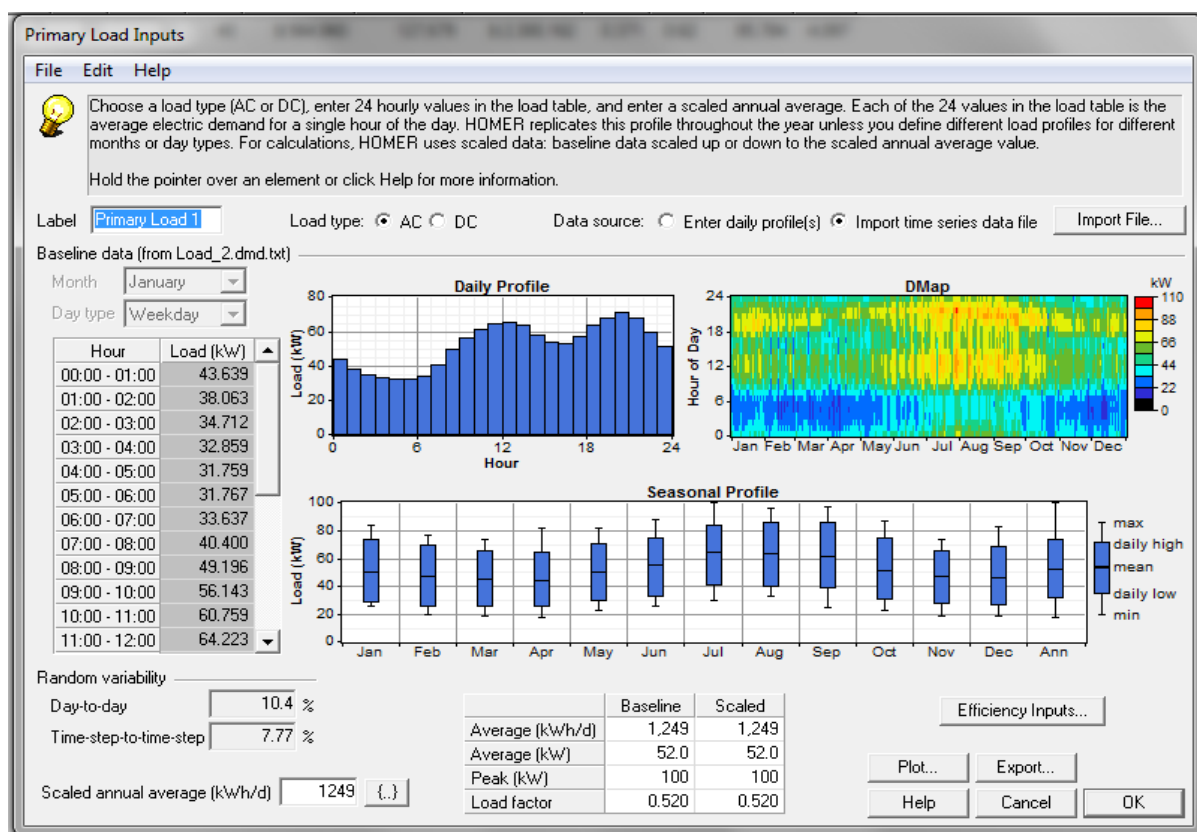


**Σχήμα 6.5:** Αρχικό σχεδιάγραμμα του υβριδικού συστήματος που μελετάται.

### 6.5.1 Ζήτηση φορτίου

Η εισαγωγή των λεπτομερειών της ζήτησης φορτίου γίνεται πατώντας το εικονίδιο του «Primary Load 1» ανοίγοντας έτσι το παράθυρο των δεδομένων εισόδου του φορτίου (το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6). Στο παράθυρο αυτό, επιβεβαιώνεται πως ο τύπος φορτίου αντιστοιχεί στο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και πατώντας το κουμπί «Import File» δίνεται η διεύθυνση του αρχείου που περιέχει τις ωριαίες τιμές της ζήτησης φορτίου για ένα χρόνο.

Το HOMER υπολογίζει τη μέση ημερήσια ζήτηση φορτίου και την εμφανίζει στο πεδίο «Scaled annual average (kWh/d)». Για τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί η μέση ημερήσια ζήτηση φορτίου είναι ίση με: 1249 kWh/d. Το HOMER παραθέτει ακόμα μια σειρά από γραφήματα τα οποία χαρακτηρίζουν τη μορφή της ζήτησης. Στο γράφημα με τον τίτλο «Daily profile», παρουσιάζεται η μέση τιμή της ζήτησης φορτίου για κάθε ώρα της ημέρας. Στο γράφημα με τον τίτλο «DMap» παρουσιάζεται παραστατικά η εξέλιξη της ζήτησης του φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους. Τέλος, στο γράφημα με τον τίτλο «Seasonal Profile» παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της ζήτησης για κάθε μήνα του έτους.



Σχήμα 6.6: Παράθυρο δεδομένων εισόδου του φορτίου.

### 6.5.2 Ανεμογεννήτριες

Η μοντελοποίηση των ανεμογεννητριών γίνεται πατώντας το εικονίδιο που αναφέρεται στις ΑΓ και καθορίζοντας τα μεγέθη που χρειάζονται, στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ανεμογεννητριών που εμφανίζεται (Σχήμα 6.7). Αρχικά, πατώντας το κουμπί «New» και εισάγοντας τη θεωρητική ισχύ της ΑΓ (30 kW), το είδος του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (εναλλασσόμενο «AC»), καθώς και την παραγόμενη ισχύ για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, σύμφωνα με τη σχέση (Κεφάλαιο 2), προκύπτει η καμπύλη ισχύος (Power Curve) της ΑΓ. Στη συνέχεια, ορίζονται το αρχικό κόστος αγοράς, το κόστος αντικατάστασης, το οποίο έχει θεωρηθεί ίσο με το κόστος αγοράς, καθώς και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας που αντιστοιχεί σε μία ΑΓ:

1. Κόστος αγοράς ΑΓ: 60000 €.
2. Κόστος αντικατάστασης ΑΓ: 60000 €.
3. Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης ΑΓ: 1800 €.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.7 έχει θεωρηθεί πως η καμπύλη κόστους (Cost Curve) είναι γραμμική, δηλαδή η αγορά 2 ΑΓ έχει το διπλάσιο κόστος από την αγορά μίας ΑΓ. Τέλος για την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης των ΑΓ, εισάγεται η διάρκεια ζωής (Lifetime) της ΑΓ, που έχει θεωρηθεί ίση με 25 έτη, καθώς και το ύψος της πλήμνης (Hub height) της ΑΓ, το οποίο είναι ίσο με 30 m.

Στο πεδίο «Sizes to consider» του παραθύρου δεδομένων ανεμογεννητριών, εισάγονται οι τιμές από 0 ως 9 που εκφράζουν το πιθανό πλήθος των ΑΓ, για το οποίο θα γίνει προσομοίωση του συστήματος. Η εισαγωγή των δεδομένων για τις ΑΓ ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί «OK» και επιστρέφοντας στο κυρίως παράθυρο.

**Wind Turbine Inputs**

File Edit Help

Choose a wind turbine type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include the cost of the tower, controller, wiring, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

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

Turbine type:  Details... New... Delete

Turbine properties:

Abbreviation: FL30 (used for column headings)  
 Rated power: 30 kW AC  
 Manufacturer: Fuhrlander AG  
 Website: [www.fuhrlander.de](http://www.fuhrlander.de)

Costs

| Quantity | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/yr) |
|----------|--------------|------------------|-------------|
| 1        | 60000        | 60000            | 1800        |
|          | {.}          | {.}              | {.}         |

Other

Lifetime (yrs)  {.  
 Hub height (m)  {.

Sizes to consider

Quantity

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6

Power Curve

Cost Curve

Help Cancel OK

Σχήμα 6.7: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ανεμογεννητριών.

### 6.5.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η μοντελοποίηση των ΦΒ πλαισίων γίνεται πατώντας το εικονίδιο που αντιστοιχεί στα ΦΒ πλαίσια και καθορίζοντας τις απαραίτητες τιμές στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ΦΒ πλαισίων που εμφανίζεται (Σχήμα). Στο πεδίο που αναφέρεται στα κόστη των ΦΒ πλαισίων εισάγονται οι τιμές ανά παραγόμενο kW:

1. Κόστος αγοράς ΦΒ πλαισίου: 3000 €/kW.
2. Κόστος αντικατάστασης ΦΒ πλαισίου: 3000 €/kW.
3. Κόστος συντήρησης και λειτουργίας ΦΒ πλαισίου: 30 €/kW

Η καμπύλη κόστους του ΦΒ πλαισίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.8, έχει θεωρηθεί γραμμική. Στη συνέχεια εισάγονται στο πεδίο των ιδιοτήτων (Properties) του ΦΒ πλαισίου: ο τύπος του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος (συνεχές «DC»), η διάρκεια ζωής (Lifetime) του ΦΒ πλαισίου ίση με 25 έτη, ο παράγοντας κλιμάκωσης («Derating factor»)

που ισχύει για την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και καταγράφει τις απώλειες, ίσος με 80%, η γωνία στην οποία τοποθετούνται τα ΦΒ σχετικά με τον ορίζοντα (Slope) ίση με 30°, η κατεύθυνση ως προς την οποία τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι προσανατολισμένα σε σχέση με το νότο (Azimuth) ίση με 0° και ο συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους (Ground reflectance) ίσος με 20%. Στο πεδίο που αφορά προχωρημένα χαρακτηριστικά των ΦΒ πλαισίων (Advanced), υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου που ρυθμίζουν την κλίση των ΦΒ πλαισίων. Έχει θεωρηθεί πως δεν χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα παρακολούθησης τροχιάς, επομένως επιλέγεται η επιλογή «No Tracking».

Τέλος, στο πεδίο «Sizes to consider» του παραθύρου δεδομένων ΦΒ πλαισίων, εισάγονται οι τιμές από 0 ως 100 με βήμα 4, που εκφράζουν το πιθανό μέγεθος των ΦΒ πλαισίων σε kW, για το οποίο θα γίνει προσομοίωση του συστήματος. Η εισαγωγή των δεδομένων για τα ΦΒ πλαίσια ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί «OK» και επιστρέφοντας στο κυρίως παράθυρο.

**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     | 3000         | 3000             | 30          |
| {.}       | {.}          | {.}              | {.}         |

**Sizes to consider**

| Size (kW) |
|-----------|
| 0.000     |
| 4.000     |
| 8.000     |
| 12.000    |
| 16.000    |
| 20.000    |
| 24.000    |

**Cost Curve**

Graph showing Cost (000 \$) vs Size (kW). The x-axis ranges from 0 to 100 kW, and the y-axis ranges from 0 to 300,000 \$. The graph shows a linear relationship between Cost and Size, with a red line for Capital and a blue line for Replacement.

**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 (%):  {.}

Buttons: Help Cancel OK

**Σχήμα 6.8:** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ΦΒ πλαισίων.

#### 6.5.4 Ντηζελογεννήτριες

Η μοντελοποίηση των ντηζελογεννητριών γίνεται πατώντας το εικονίδιο που αναφέρεται στις ντηζελογεννήτριες και καθορίζοντας τα μεγέθη που χρειάζονται, στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ντηζελογεννητριών που εμφανίζεται (Σχήμα 6.9).

Αρχικά μεταβαίνοντας στην καρτέλα Καυσίμου (Fuel) επιβεβαιώνεται ότι είναι επιλεγμένο το καύσιμο diesel. Στη συνέχεια, πατώντας το κουμπί «Fuel curve calculator» δίνονται οι τιμές κατανάλωσης καυσίμου, για την ντηζελογεννήτρια που έχει θεωρηθεί, έτσι ώστε να προκύψουν οι τιμές της κατανάλωσης καυσίμου προς την ονομαστική ισχύ (Intercept coeff.) ίση με 0,08415 L/hr/kW rated και της πρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου (Slope) ίση με 0,246 L/hr/kW output (Σχήμα 6.10). Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στους συντελεστές της καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου. Στην ίδια καρτέλα παρουσιάζεται ακόμα, η καμπύλη αποδοτικότητας (Efficiency Curve) η οποία εκφράζει την αύξηση της αποδοτικότητας της γεννήτριας καθώς αυξάνει η παραγόμενη ισχύς.

Στη συνέχεια επιστρέφοντας στην αρχική καρτέλα, εισάγονται στο πεδίο που αναφέρεται στα κόστη των ντηζελογεννητριών οι εξής τιμές:

1. Κόστος αγοράς ντηζελογεννήτριας: 200 €/kW (αφού η τιμή αγοράς της ντηζελογεννήτριας που έχει θεωρηθεί είναι 8000 € και η ονομαστική ισχύς 40 kW).
2. Κόστος αντικατάστασης ντηζελογεννήτριας: 200 €/kW.
3. Ωριαίο κόστος λειτουργίας και συντήρησης της ντηζελογεννήτριας: 0,01 €/hr.

Εν συνεχεία, στο πεδίο των ιδιοτήτων επιλέγεται ο τύπος ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται (εναλλασσόμενο «AC»), εισάγεται η διάρκεια ζωής (Lifetime) της ντηζελογεννήτριας σε ώρες λειτουργίας ίση με 40000 h καθώς και η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να παρέχει η ντηζελογεννήτρια στο σύστημα, η οποία εκφράζεται ως ποσοστό της συνολικής ισχύος της γεννήτριας και θεωρείται ίση με 30%.

Τέλος στο πεδίο «Sizes to consider» του παραθύρου δεδομένων των ντηζελογεννητριών, εισάγονται οι τιμές από 0 ως 120 με βήμα 40, που αντιστοιχεί στα kW της ονομαστικής ισχύς της ντηζελογεννήτριας, που έχει θεωρηθεί και εκφράζουν το πιθανό πλήθος των ντηζελογεννητριών για το οποίο θα γίνει η προσομοίωση του συστήματος. Η εισαγωγή των δεδομένων για τις ντηζελογεννήτριες ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί «OK» και επιστρέφοντας στο κυρίως παράθυρο.

**Generator Inputs**

File Edit Help

Choose a fuel, and enter at least one size, capital cost and operation and maintenance (O&M) value in the Costs table. Note that the capital cost includes installation costs, and that the O&M cost is expressed in dollars per operating hour. Enter a nonzero heat recovery ratio if heat will be recovered from this generator to serve thermal load. As it searches for the optimal system, HOMER will consider each generator size in the Sizes to Consider table.

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

Cost Fuel Schedule Emissions

**Costs**

| Size (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/hr) |
|-----------|--------------|------------------|-------------|
| 1.000     | 200          | 200              | 0.010       |

{...} {...} {...}

**Sizes to consider**

| Size (kW) |
|-----------|
| 0.000     |
| 40.000    |
| 80.000    |
| 120.000   |

**Properties**

Description: Generator 1 Type: ☒ AC ☐ DC

Abbreviation: DSL

Lifetime (operating hours): 40000 {...}

Minimum load ratio (%): 30 {...}

**Cost Curve**

Cost (000 \$) vs Size (kW)

— Capital — Replacement

Help Cancel OK

Σχήμα 6.9: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων νηζελογεννήτριας.

**Fuel Curve Calculator**

Enter the generator's fuel consumption data and HOMER will calculate the two fuel curve input values. You must enter at least two points on the fuel curve. When you click OK, HOMER will copy the values to the Generator Inputs window.

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

Generator size (kW): 40

**Fuel consumption data**

|    | Output Power (kW) | Fuel Consumption (L/hr) |
|----|-------------------|-------------------------|
| 1  | 0.000             | 3.366                   |
| 2  | 12.000            | 6.318                   |
| 3  | 40.000            | 13.206                  |
| 4  |                   |                         |
| 5  |                   |                         |
| 6  |                   |                         |
| 7  |                   |                         |
| 8  |                   |                         |
| 9  |                   |                         |
| 10 |                   |                         |

**Calculated fuel curve parameters**

Intercept: 0.08415 L/hr/kW  
Slope: 0.246 L/hr/kW

**Fuel Curve**

Fuel Consumption (L/hr) vs Output Power (kW)

**Efficiency Curve**

Efficiency (%) vs Output (kW)

Help Cancel OK

Σχήμα 6.10: Παράθυρο καθορισμού καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου της νηζελογεννήτριας.

### 6.5.5 Συσσωρευτές

Η μοντελοποίηση των συσσωρευτών γίνεται πατώντας το εικονίδιο που αναφέρεται στους συσσωρευτές και καθορίζοντας τα μεγέθη που χρειάζονται, στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων συσσωρευτών που εμφανίζεται (Σχήμα 6.11). Από τον κατάλογο των αποθηκευμένων συσσωρευτών του HOMER επιλέγονται οι συσσωρευτές Surette 4KS25P οι οποίοι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: τάση λειτουργίας 4 V, χωρητικότητα 1900 Ah και διάρκεια ζωής ίση με 10569 kWh.

Στο πεδίο που αναφέρεται στα κόστη των συσσωρευτών δίνονται οι εξής τιμές για κάθε συσσωρευτή:

1. Κόστος αγοράς συσσωρευτή: 760 €.
2. Κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή: 760 €.
3. Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συσσωρευτή: 15 €.

Στο πεδίο «Sizes to consider» εισάγονται οι τιμές από 0 ως 192 με βήμα 12, έτσι ώστε να προκύπτουν συστοιχίες συσσωρευτών με τάση 48 V. Οι τιμές αυτές αποτελούν τα πιθανά μεγέθη των συσσωρευτών για τα οποία θα γίνει η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος. Η εισαγωγή των δεδομένων των συσσωρευτών ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί «OK» και επιστρέφοντας στο κυρίως παράθυρο.

**Battery Inputs**

File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

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

Battery type: **Surette 4KS25P** Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: Rolls/Surette  
Website: [www.rollsbattery.com](http://www.rollsbattery.com)

Nominal voltage: 4 V  
Nominal capacity: 1,900 Ah (7.6 kWh)  
Lifetime throughput: 10,569 kWh

Costs

| Quantity | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/yr) |
|----------|--------------|------------------|-------------|
| 1        | 760          | 760              | 15.00       |
|          | {..}         | {..}             | {..}        |

Advanced

Batteries per string: **1** (4 V bus)  
☐ Minimum battery life (yr): **4** {..}

Sizes to consider

Batteries

- 0
- 12
- 24
- 36
- 48
- 60
- 72
- 84
- 96

**Cost Curve**

Cost (000 \$)

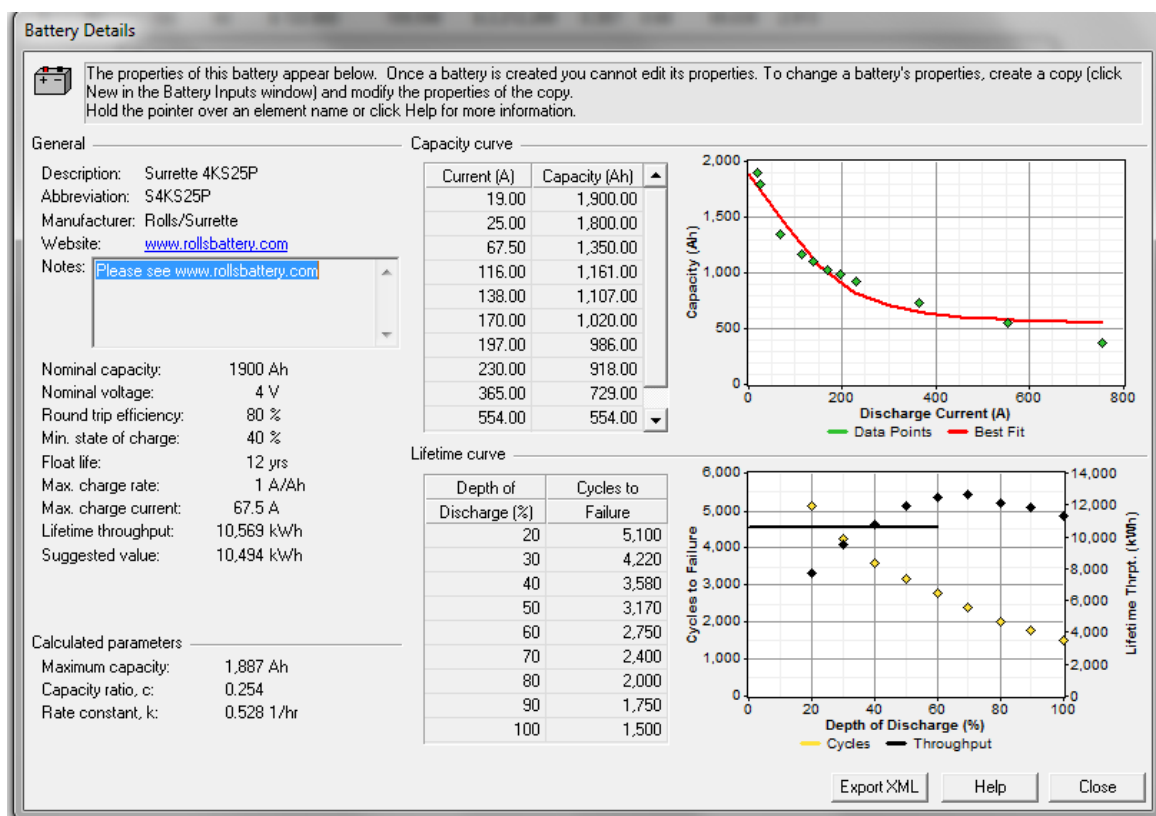
Quantity

Capital Replacement

Help Cancel OK

Σχήμα 6.11: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων συσσωρευτών.

Στη συνέχεια πατώντας το κουμπί «Details» παρουσιάζεται το παράθυρο που εμφανίζεται στο Σχήμα 6.12 και περιέχει τις πλήρεις παραμέτρους του συσσωρευτή που έχει επιλεγεί. Ακόμα πρέπει να αναφερθεί πως το HOMER διαθέτει τη δυνατότητα δημιουργίας δύο σημαντικών γραφημάτων, για τη μοντελοποίηση των συσσωρευτών, τα οποία είναι διαθέσιμα για τις αποθηκευμένες διαθέσιμες επιλογές των συσσωρευτών. Το πρώτο γράφημα, που φαίνεται στο Σχήμα 6.12 είναι η καμπύλη χωρητικότητας που δημιουργείται με τη μέτρηση της χωρητικότητας μιας μπαταρίας σε διαφορετικά σταθερά ρεύματα εκφόρτισης και αναφέρεται στο γεγονός πως η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρυθμού εκφόρτισης. Το δεύτερο γράφημα του Σχήματος 6.12 είναι η καμπύλη διάρκειας ζωής του συσσωρευτή η οποία προκύπτει από σειρά δοκιμών σε διαφορετικά βάθη εκφόρτισης. Σε μια δοκιμή διάρκειας ζωής, μια μπαταρία υποβάλλεται στους επαναλαμβανόμενους κανονικούς κύκλους κατά τη διάρκεια των οποίων η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται. Σε κάθε κύκλο, η μπαταρία εκφορτίζεται κάτω από ένα ορισμένο βάθος του ποσοστού εκφόρτισης και κατόπιν φορτίζεται πάλι πλήρως. Η δοκιμή διάρκειας ζωής καθορίζει σε πόσους τέτοιους κύκλους η μπαταρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προτού να χρειαστεί αντικατάσταση.



Σχήμα 6.12: Παράθυρο λεπτομερειών του συσσωρευτή.

### 6.5.6 Μετατροπέας

Η μοντελοποίηση του μετατροπέα γίνεται πατώντας το εικονίδιο του σχεδιαγράμματος που αναφέρεται στον μετατροπέα και καθορίζοντας τα μεγέθη που χρειάζονται, στο παράθυρο εισαγωγής δεδομένων μετατροπέα που εμφανίζεται (Σχήμα 6.13). Στο πεδίο που αναφέρεται στο κόστος του μετατροπέα δίνονται οι εξής τιμές:

1. Κόστος μετατροπέα: 500 €/kW.
2. Κόστος αντικατάστασης μετατροπέα: 500 €/kW.
3. Ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας μετατροπέα: 5 €.

Στο πεδίο των δεδομένων του μετατροπέα (Inverter inputs) εισάγεται η διάρκεια ζωής (Lifetime) του μετατροπέα ίση με 15 έτη και η απόδοση (Efficiency) του μετατροπέα ίση με 85%. Ακόμα, επιλέγεται η δυνατότητα του μετατροπέα να λειτουργεί ταυτόχρονα με μία ή περισσότερες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (Inverter can operate simultaneously with an AC generator). Στο πεδίο δεδομένων του ανορθωτή (Rectifier inputs), ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, εισάγεται το ποσοστό συσχέτισης της χωρητικότητας του ανορθωτή σε σχέση με αυτή του μετατροπέα (Capacity relative to inverter), ίση με 100% και η απόδοση (Efficiency) του ανορθωτή ίση με 85%.

Στο πεδίο «Sizes to consider» εισάγονται οι τιμές από 0 ως 65 με βήμα 5. Οι τιμές αυτές αποτελούν τα πιθανά μεγέθη του μετατροπέα για τα οποία θα γίνει η προσομοίωση του υβριδικού συστήματος. Η εισαγωγή των δεδομένων του μετατροπέα ολοκληρώνεται πατώντας το κουμπί «OK» και επιστρέφοντας στο κυρίως παράθυρο.

**Converter Inputs**

File Edit Help

 A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

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

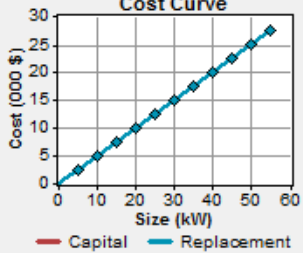
**Costs**

| Size (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/yr) |
|-----------|--------------|------------------|-------------|
| 1.000     | 500          | 500              | 5           |
| {.}       | {.}          | {.}              | {.}         |

**Sizes to consider**

| Size (kW) |
|-----------|
| 5.000     |
| 10.000    |
| 15.000    |
| 20.000    |
| 25.000    |
| 30.000    |
| 35.000    |

**Cost Curve**



**Inverter inputs**

Lifetime (years)  {.}

Efficiency (%)  {.}

☒ Inverter can operate simultaneously with an AC generator

**Rectifier inputs**

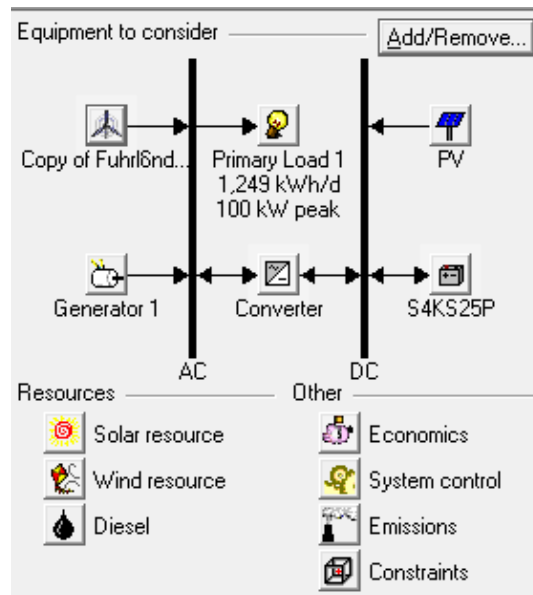
Capacity relative to inverter (%)  {.}

Efficiency (%)  {.}

Help Cancel OK

**Σχήμα 6.13:** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων μετατροπέα.

Το σχεδιάγραμμα έχει πλέον τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Τα βέλη που εμφανίζονται υποδηλώνουν τη μεταφορά της ενέργειας. Συγκεκριμένα τα ΦΒ πλαίσια και οι συσσωρευτές μεταφέρουν ενέργεια υπό τη μορφή του συνεχούς ρεύματος στο ζυγό DC από το οποίο ο μετατροπέας την παραλαμβάνει και την μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος και την μεταφέρει στο ζυγό AC. Οι ανεμογεννήτριες και οι νηζελογεννήτριες μεταφέρουν ενέργεια υπό τη μορφή AC ρεύματος στο ζυγό AC. Τέλος η ζήτηση του φορτίου ικανοποιείται από το ζυγό AC.



**Σχήμα 6.14:** Μορφή του σχεδιαγράμματος μετά τον ορισμό των συνιστωσών του συστήματος.

## 6.6 Πόροι συστήματος

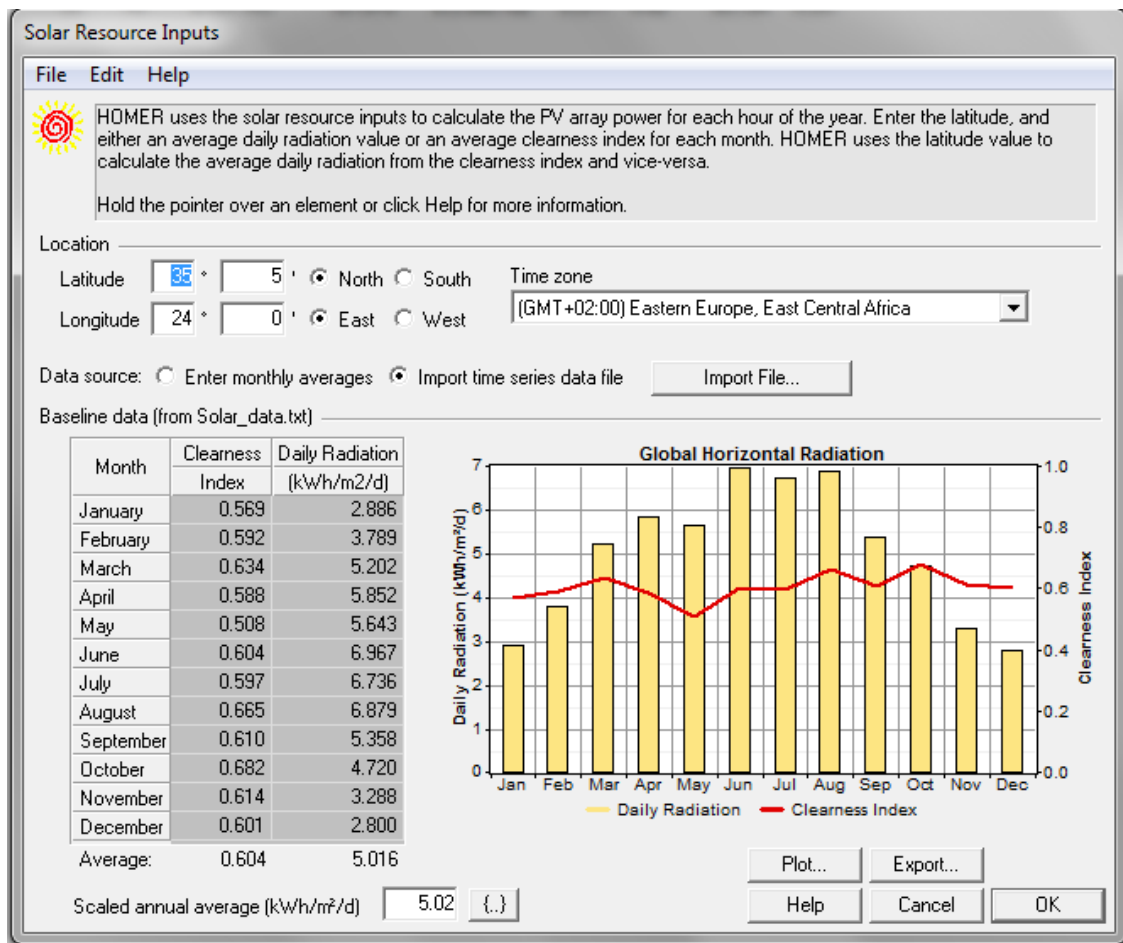
Ο όρος πόροι (resources) του συστήματος εφαρμόζεται σε οτιδήποτε προέρχεται εκτός του συστήματος και χρησιμοποιείται από το σύστημα για να παράγει ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Αυτό περιλαμβάνει τους τέσσερις τύπους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική και βιομάζα), καθώς και κάθε καύσιμο που χρησιμοποιείται από τις συνιστώσες του υβριδικού συστήματος. Οι ανανεώσιμοι πόροι ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία. Το ηλιακό δυναμικό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα, το αιολικό δυναμικό εξαρτάται από μεγάλης κλίμακας μοντέλα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και από γεωγραφικές επιρροές, οι πόροι που αφορούν την υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτώνται από την συχνότητα βροχοπτώσεων και την τοπογραφία ενώ οι πόροι για τη βιομάζα εξαρτώνται από την τοπική βιολογική παραγωγικότητα. Επιπλέον, σε έναν τόπο μια ανανεώσιμη πηγή μπορεί να παρουσιάζει έντονη μεταβλητότητα, από εποχή σε εποχή και από ώρα σε ώρα. Η φύση των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επηρεάζει τη συμπεριφορά και τα οικονομικά των συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας, δεδομένου ότι οι πόροι καθορίζουν την ποσότητα και το χρονοδιάγραμμα της παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. Η προσεκτική μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί επομένως θεμελιώδες στοιχείο της διαμόρφωσης του συστήματος.

### 6.6.1 Ηλιακό δυναμικό

Για τη μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος που περιέχει συστοιχία ΦΒ πλαισίων πρέπει να εισαχθούν από το χρήστη τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή που μελετάται. Τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού εκφράζουν το ποσό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας (άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας) κατά τη διάρκεια ενός χαρακτηριστικού έτους. Τα δεδομένα του ηλιακού δυναμικού μπορούν να δίνονται σε μία από τις εξής τρεις μορφές: μέση ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ( $\text{kW/m}^2$ ), μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο ( $\text{kWh/m}^2\cdot\text{day}$ ), ή με τη μορφή του μέσου μηνιαίου δείκτη καθαρότητας. Ο δείκτης καθαρότητας (clearness index) είναι ο λόγος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο άνω μέρος της ατμόσφαιρας, παίρνει τιμές από 0 ως 1 και μετράει την καθαρότητα της ατμόσφαιρας. Στη περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να εισάγει τις μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας το HOMER χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε από τους Graham και Hollands ώστε να δημιουργήσει τις τιμές που χρειάζονται για κάθε χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, το οποίο έχει οριστεί από το χρήστη.

Αρχικά πατώντας το εικονίδιο που αντιστοιχεί στους ηλιακούς πόρους (Solar resources), εμφανίζεται το παράθυρο δεδομένων ηλιακών πόρων (Σχήμα 6.15) στο οποίο συμπληρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία. Στο πεδίο «Latitude» εισάγεται η τιμή  $35^{\circ}5'$  που αντιστοιχεί στο γεωγραφικό πλάτος της περιοχής των Χανίων και επιλέγεται η επιλογή «North», η οποία εκφράζει πως η περιοχή βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο της γης. Στο πεδίο «Longitude» εισάγεται η τιμή 24 που αντιστοιχεί στο γεωγραφικό μήκος των Χανίων κι επιλέγεται η επιλογή «East», η οποία εκφράζει πως η περιοχή που μελετάται βρίσκεται ανατολικά του μεσημβρινού του Γκρίνουιτς. Στη συνέχεια, στο πεδίο «Time zone» εισάγεται η ζώνη ώρας της υπό μελέτη περιοχής, ίση με «(GMT +02:00) Eastern Europe, East Central Africa» στην οποία ανήκει η Ελλάδα. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται από το HOMER για να υπολογίσουν το δείκτη καθαρότητας ή την μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία, ανάλογα με τον τρόπο που έχει επιλεγεί να εισαχθούν τα δεδομένα.

Στη συνέχεια, πατώντας το κουμπί «Import File» δίνεται η διαδρομή που βρίσκεται το αρχείο, το οποίο περιέχει τις 8760 μέσες ωριαίες τιμές της ολικής ακτινοβολίας. Αφού εισαχθούν οι ωριαίες τιμές, το HOMER υπολογίζει και εμφανίζει, τις μέσες μηνιαίες τιμές του δείκτη καθαρότητας και της ολικής ακτινοβολίας. Ακόμα απεικονίζει γραφικά τις τιμές αυτές σε ένα γράφημα με τον τίτλο «Global Horizontal Radiation». Τέλος, εμφανίζει ακόμα την στρογγυλοποιημένη ετήσια μέση τιμή (Scaled annual average) της ολικής ακτινοβολίας, η οποία για τις τιμές που έχουν εισαχθεί προκύπτει ίση με  $5,02 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ .



Σχήμα 6.15: Παράθυρο δεδομένων ηλιακών πόρων.

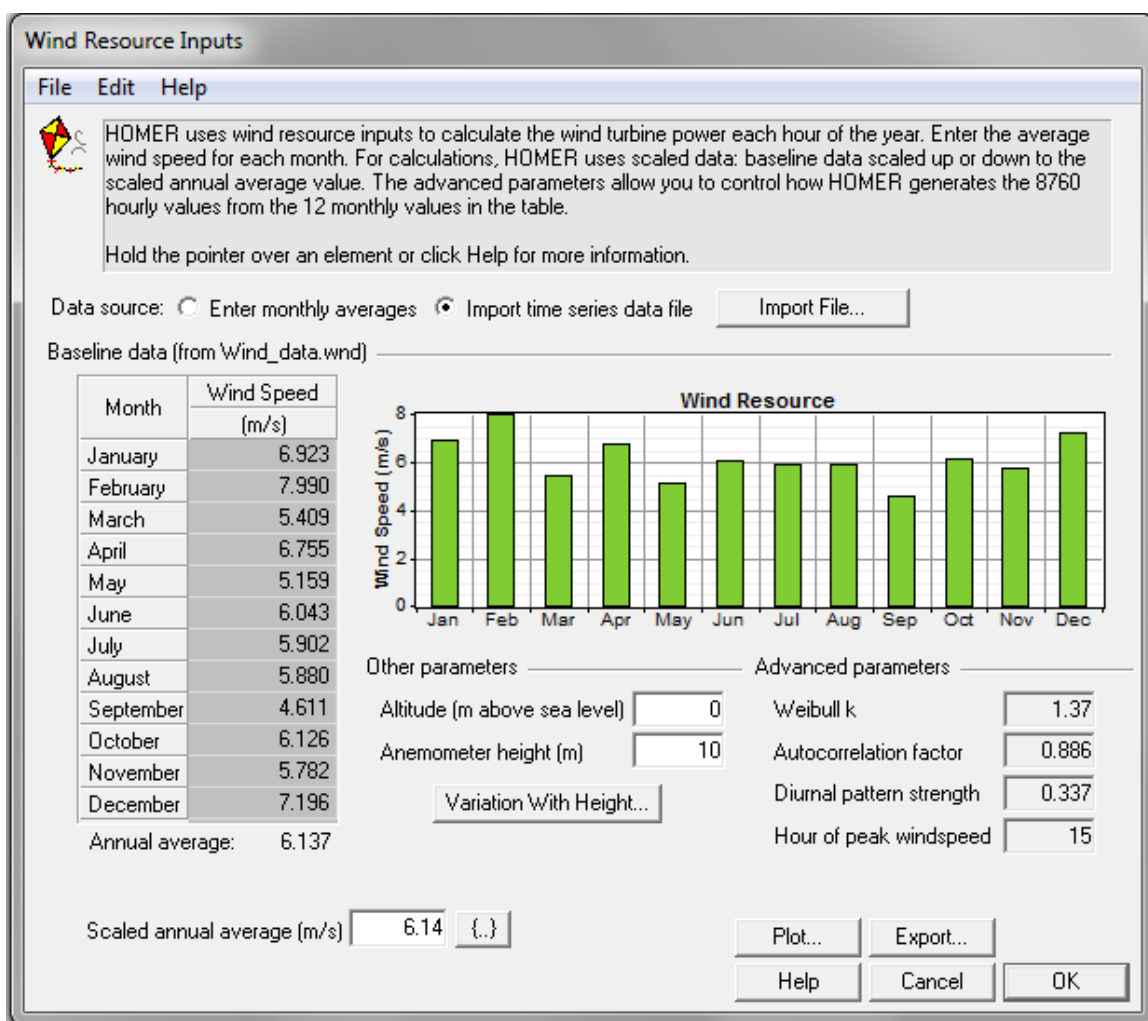
## 6.6.2 Αιολικό δυναμικό

Για την μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος που περιέχει μία ή περισσότερες ΑΓ, πρέπει να εισαχθούν στο HOMER οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου που επικρατούν στην περιοχή που μελετάται. Οι τιμές που θα εισαχθούν θα πρέπει να αντιστοιχούν στις 8760 τιμές της ταχύτητας του ανέμου για κάθε ώρα ενός έτους. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες οι ωριαίες τιμές της ταχύτητας, το HOMER μπορεί να τις δημιουργήσει χρησιμοποιώντας τις 12 μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας και τα εξής στατιστικά στοιχεία: την παράμετρο μορφής  $k$  της κατανομής Weibull, τον συντελεστή αυτοσυσχέτισης (Autocorrelation factor), την ημερήσια πρότυπη δύναμη (Diurnal pattern strength) και την ώρα της μέγιστης ταχύτητας ανέμου (Hour of peak windspeed).

Αρχικά, πατώντας το εικονίδιο του αιολικού δυναμικού επιλέγεται στο παράθυρο που ανοίγει (Σχήμα 6.16) «Data source: Import time series data file» και πατιέται το πλήκτρο «Import File...». Εμφανίζεται το παράθυρο ανοίγματος αρχείου από το οποίο εισάγεται το αρχείο με τα ωριαία δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου για ένα χρόνο. Στο πεδίο με το

τίτλο «Baseline data» εμφανίζονται οι μηνιαίες μέσες τιμές της ταχύτητας του ανέμου καθώς και η στρογγυλοποιημένη ετήσια μέση ταχύτητα, η οποία είναι ίση με 6,14 m/s. Οι μηνιαίες μέσες τιμές παριστάνονται γραφικά στο διάγραμμα με τον τίτλο «Wind Resource» .

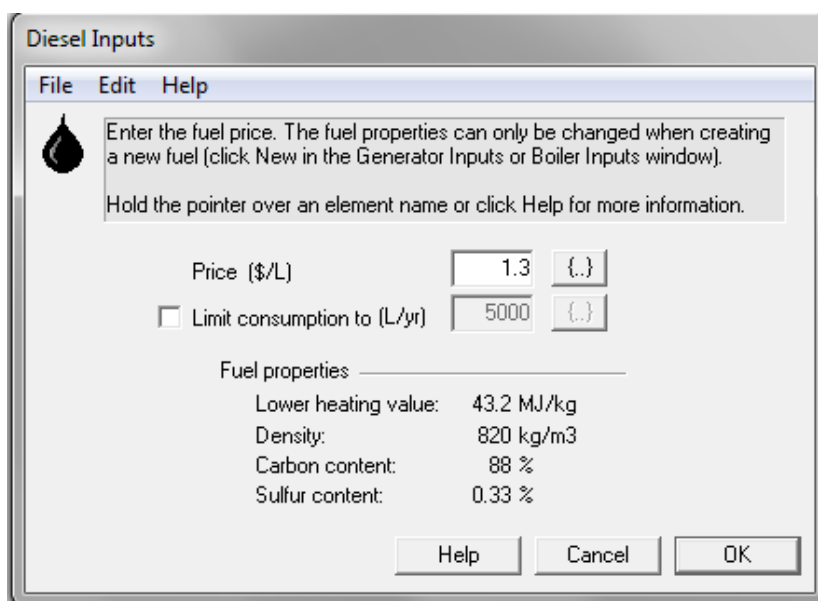
Έπειτα εισάγεται το ύψος αναφοράς στο οποίο έχουν γίνει οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου για τις τιμές των δεδομένων που εισήχθηκαν, το οποίο είναι το ύψος στο οποίο ήταν τοποθετημένο το ανεμόμετρο (Anemometer height) και έχει θεωρηθεί ίσο με 10 m. Ακόμα εισάγεται το ύψος από το επίπεδο της θάλασσας (Altitude) το οποίο έχει θεωρηθεί ίσο με 0, αφού οι μετρήσεις της ταχύτητας έχουν γίνει σε περιοχή που βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας. Τέλος, πατώντας το κουμπί «Variation With Height» επιλέγεται στο παράθυρο που εμφανίζεται η χρήση του εκθετικού νόμου για τον υπολογισμό της πραγματικής ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης της ΑΓ και εισάγεται η τιμή της παραμέτρου  $a$  που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους ίση με 0,2.



Σχήμα 6.16: Παράθυρο δεδομένων αιολικών πόρων.

### 6.6.3 Καύσιμο Diesel

Πατώντας το εικονίδιο που αντιστοιχεί στους πόρους καυσίμου diesel εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Στο πεδίο «Price» εισάγεται η τιμή του καυσίμου diesel ανά λίτρο, η οποία έχει θεωρηθεί ίση με 1,3 €/L. Ακόμα, το HOMER δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα, αφού ενεργοποιήσει την επιλογή στο πεδίο «Limit consumption to», να εισάγει ένα μέγιστο όριο κατανάλωσης καυσίμου για τη περίοδο ενός έτους.



Σχήμα 6.17: Παράθυρο καθορισμού δεδομένων καυσίμου diesel.

## 6.7 Περιορισμοί λειτουργίας

Στο βασικό χώρο εργασίας του HOMER κάτω από τη σήμανση «Other» βρίσκονται οι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος οι οποίοι είναι οι εξής:

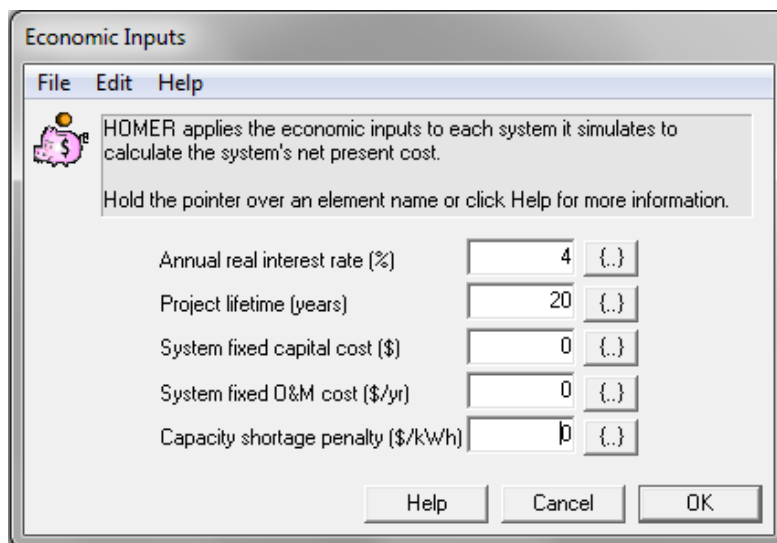
1. Οικονομικά «Economics», που αναπαριστώνται με το εικονίδιο .
2. Έλεγχος συστήματος «System control», που αναπαριστώνται με το εικονίδιο .
3. Ρύποι «Emissions», που αναπαριστώνται με το εικονίδιο .
4. Περιορισμοί «Constraints», που αναπαριστώνται με το εικονίδιο .

### 6.7.1 Οικονομικά

Αρχικά πατώντας το εικονίδιο των που αντιστοιχεί στα Οικονομικά εμφανίζεται το παράθυρο καθορισμού οικονομικών στοιχείων που φαίνεται στο Σχήμα 6.18. Στο πεδίο του

πραγματικού επιτοκίου  $i$  (Annual real interest rate) δίνεται η τιμή 4%, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση  $i = \frac{r-j}{1-j}$ , για ονομαστικό επιτόκιο  $r$  ίσο με 6% και ρυθμό πληθωρισμού  $j$  ίσο με 2%. Ακόμα στο πεδίο «Project lifetime» εισάγεται ο χρονικός ορίζοντας του έργου σε έτη.

Στη συνέχεια βεβαιώνεται πως στα πεδία «System fixed capital cost», «System fixed O&M cost » και «Capacity shortage penalty» έχουν οριστεί μηδενικές τιμές. Ορίζεται έτσι μηδενικό σταθερό αρχικό κόστος, μηδενικό σταθερό ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας καθώς και μηδενικό κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας αντίστοιχα. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας «OK» και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.



Σχήμα 6.18: Παράθυρο καθορισμού οικονομικών στοιχείων.

### 6.7.2 Έλεγχος συστήματος

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

### 6.7.3 Περιορισμοί

Αρχικά πατιέται το εικονίδιο που αντιστοιχεί στους περιορισμούς και ανοίγει το παράθυρο καθορισμού των περιορισμών που φαίνεται στο Σχήμα 6.19. Στο παράθυρο καθορισμού των περιορισμών επιβεβαιώνεται πως τα πεδία «Maximum annual capacity shortage» και «Minimum renewable fraction» έχουν μηδενικές τιμές, έτσι ώστε να θεωρείται μηδενικό έλλειμμα παραγωγής ενέργειας και ελάχιστο ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας το 0%.

Κάτω από τον τίτλο «Operating Reserve» δίνονται ,μηδενικές τιμές στα πεδία «Hourly load», «Annual peak load», «Solar power output» και «Wind power output», έτσι ώστε να τίθεται η λειτουργική εφεδρεία ίσο με το άθροισμα του 0 % της ωριαίας ζήτησης, του 0 % της ετήσιας μέγιστης ζήτησης και του 0 % της αποδιδόμενης ανανεώσιμης ισχύος. Η εισαγωγή των επιλογών ολοκληρώνεται πατώντας «OK» και επιστρέφοντας έτσι στο κυρίως παράθυρο.

**Constraints**

File Edit Help

Constraints are conditions that systems must meet to be feasible. Infeasible systems do not appear in the sensitivity and optimization results. Operating reserve provides a margin to account for intra-hour deviation from the hourly average of the load or renewable power output. HOMER calculates this margin for each hour based on the operating reserve inputs.

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

Maximum annual capacity shortage (%) 0 {..}

Minimum renewable fraction (%) 0 {..}

Operating reserve

As percent of load

Hourly load (%) 0 {..}

Annual peak load (%) 0 {..}

As percent of renewable output

Solar power output (%) 0 {..}

Wind power output (%) 0 {..}

Note: HOMER calculates the total required operating reserve for each hour by multiplying each of these four inputs by the load or output value for that hour and adding the results.

Primary energy savings

☒ Minimum primary energy savings (%) 10 {..}

Reference electrical efficiency (%) 33 {..}

Reference thermal efficiency (%) 75 {..}

Help Cancel OK

Σχήμα 6.19: Παράθυρο καθορισμού των περιορισμών.

## 6.8 Επίλυση μοντέλου υβριδικού συστήματος

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή του μοντέλου αρκεί να δοθεί η εντολή έναρξης της προσομοίωσης πατώντας το κουμπί «Calculate». Εκτελείται μία σειρά προσομοιώσεων για κάθε συνδυασμό των συνιστωσών του συστήματος. Το HOMER δίνει μια αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και πατώντας το εικονίδιο  στο κάτω μέρος του παραθύρου εμφανίζονται στατιστικά της προσομοίωσης καθώς και ο αριθμός των εφικτών λύσεων. Οι προσομοιώσεις ολοκληρώνονται σε συνολικό χρόνο 33,47 λεπτών. Στο χρόνο αυτό εκτελούνται 114.118 προσομοιώσεις, δηλαδή περίπου 56,3 προσομοιώσεις το δευτερόλεπτο. Στην καρτέλα «Optimization Results» (Σχήμα 6.20) εμφανίζεται το σύνολο των δυνατών λύσεων για κάθε συνδυασμό των συνιστωσών του υβριδικού συστήματος ενώ στην καρτέλα «Sensitivity Results» (Σχήμα 6.21) εμφανίζεται η βέλτιστη λύση του συστήματος.

Sensitivity Results

Optimization Results

Double click on a system below for simulation results.

|   |   |   |   |   | PV (kW) | FL30 | DSL (kW) | S4KS25P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC    | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | DSL (hrs) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|----------|---------|------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-----------|
|  |  |  |  |  | 80      | 5    | 80       | 180     | 60         | \$ 722,800      | 109,598                | \$ 2,212,269 | 0.357        | 0.68       | 69,838     | 2,913     |
|  |  |  |  |  |         | 7    | 80       | 120     | 40         | \$ 547,200      | 133,730                | \$ 2,364,630 | 0.382        | 0.63       | 88,307     | 3,667     |
|  |  |  |  |  | 100     |      | 80       | 132     | 65         | \$ 448,820      | 175,777                | \$ 2,837,687 | 0.458        | 0.31       | 125,206    | 5,182     |
|  |  |  |  |  | 20      | 7    | 120      |         | 15         | \$ 511,500      | 182,081                | \$ 2,986,036 | 0.482        | 0.64       | 125,000    | 5,877     |
|  |  |  |  |  |         | 8    | 120      |         | 5          | \$ 506,500      | 183,345                | \$ 2,998,223 | 0.484        | 0.65       | 125,240    | 5,818     |
|  |  |  |  |  |         |      | 80       | 24      | 30         | \$ 49,240       | 232,799                | \$ 3,213,060 | 0.519        | 0.00       | 170,791    | 8,435     |
|  |  |  |  |  | 100     |      | 120      |         | 65         | \$ 356,500      | 240,118                | \$ 3,619,780 | 0.584        | 0.30       | 172,980    | 8,059     |
|  |  |  |  |  |         |      | 120      |         | 5          | \$ 26,500       | 278,990                | \$ 3,818,063 | 0.616        | 0.00       | 203,308    | 8,760     |

**Σχήμα 6.20:** Βέλτιστα αποτελέσματα για κάθε πιθανό συνδυασμό των συνιστωσών του υβριδικού συστήματος.

Sensitivity Results | Optimization Results

Double click on a system below for optimization results.

|  |  |  |  |  | PV (kW) | FL30 | DSL (kW) | S4KS25P | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC    | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | DSL (hrs) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|----------|---------|------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-----------|
|  |  |  |  |  | 80      | 5    | 80       | 180     | 60         | \$ 722,800      | 109,598                | \$ 2,212,269 | 0.357        | 0.68       | 69,838     | 2,913     |

**Σχήμα 6.21:** Βέλτιστη λύση του υβριδικού συστήματος.

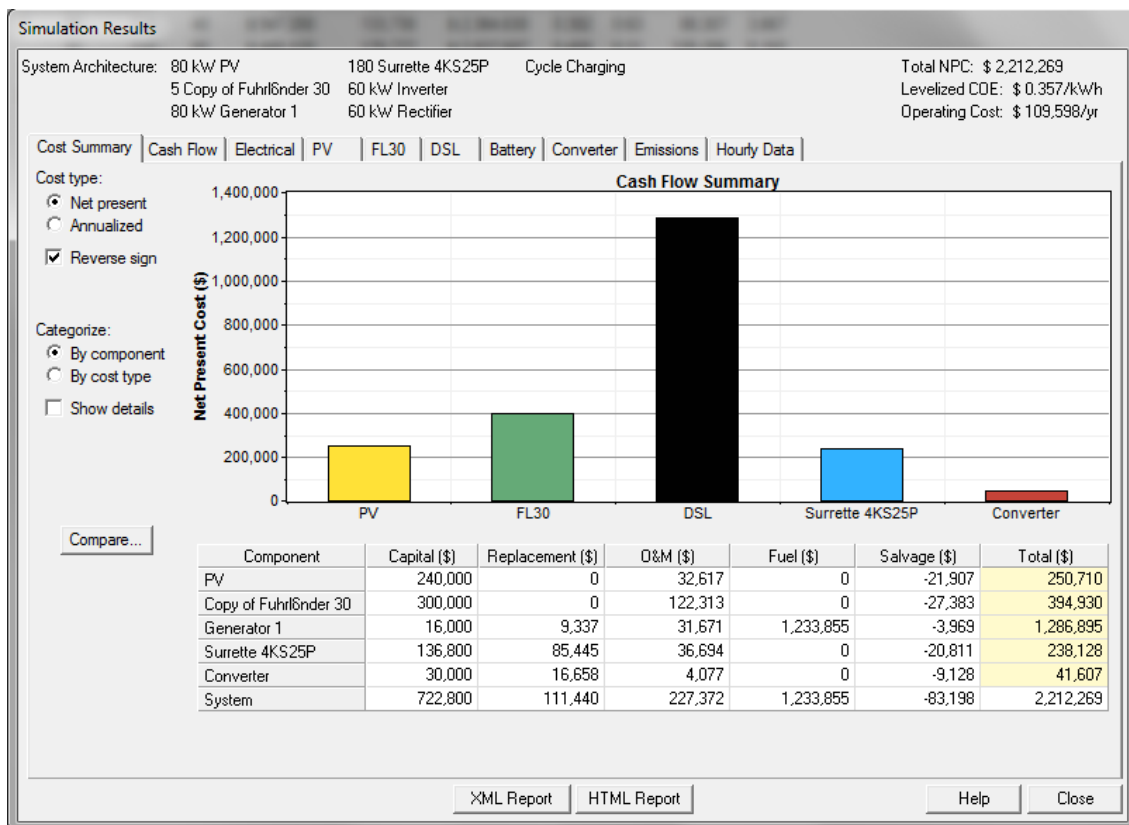
Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.21 η βέλτιστη λύση του υβριδικού συστήματος που προέκυψε από την προσομοίωση του HOMER συγκεντρώνεται στον Πίνακα 6.1.

**Πίνακας 6.1:** Βέλτιστη λύση υβριδικού συστήματος σύμφωνα με το HOMER.

| Συστατικό                        | Μέγεθος          |
|----------------------------------|------------------|
| Ανεμογεννήτριες                  | 5                |
| ΦΒ πλαίσια                       | 1456 ή 80 kW     |
| Ντηζελογεννήτριες                | 2                |
| Συσσωρευτές                      | 180              |
| Μετατροπέας                      | 60 kW            |
| <b>Καθαρό παρόν κόστος (NPC)</b> | <b>2.212.269</b> |

## 6.9 Αναλυτικά στοιχεία της βέλτιστης λύσης

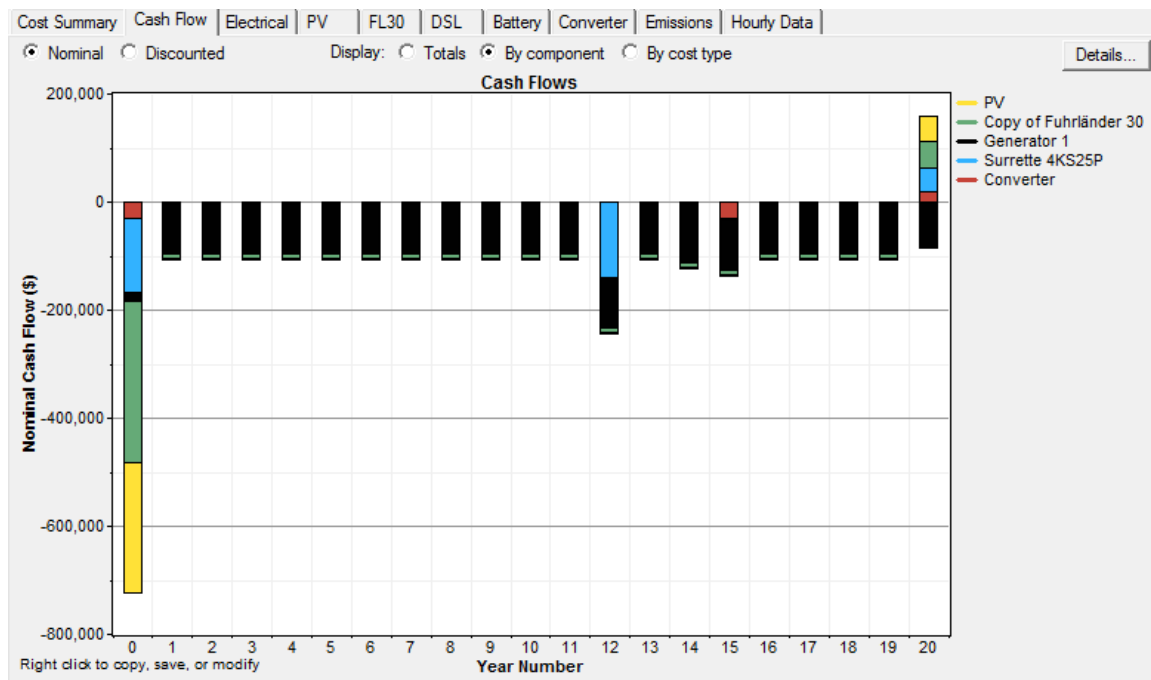
Το HOMER έχει τη δυνατότητα να παρουσιάσει αναλυτικά στοιχεία για τις λύσεις που έχουν προκύψει από την προσομοίωση και αφορούν τα συστατικά του υβριδικού συστήματος. Επιλέγοντας τη βέλτιστη λύση που προέκυψε εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 6.22. Στο παράθυρο αυτό εκτός από τη βέλτιστη λύση εμφανίζονται ακόμα οι καρτέλες «Cost Summary», «Cash Flow», «Electrical», «PV», «FL30», «Battery», «Converter», «Emissions» και «Hourly Data». Στη καρτέλα «Cost Summary» (Σχήμα 6.22) παρουσιάζονται αναλυτικά τα κόστη αγοράς, αντικατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας καθώς και τα έσοδα από την μεταπώληση κάθε συστατικού του υβριδικού συστήματος, καθώς και το σύνολο τους. Ακόμα στο διάγραμμα με τον τίτλο «Cash Flow Summary» αναπαριστάται γραφικά το συνολικό κόστος κάθε συστατικού του συστήματος με μπάρα διαφορετικού χρώματος. Από το διάγραμμα αυτό είναι φανερό πως το μεγαλύτερο συνολικό κόστος, με μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα, προκύπτει από την ντηζελογεννήτρια, η οποία αναπαριστάται με την μαύρη μπάρα, και οφείλεται στην κατανάλωση του καυσίμου. Ακόμα παρατηρείται πως το συνολικό κόστος των ΦΒ πλαισίων (κίτρινη μπάρα) είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από το κόστος των συσσωρευτών, ενώ τα συνολικά κόστος του μετατροπέα είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά.



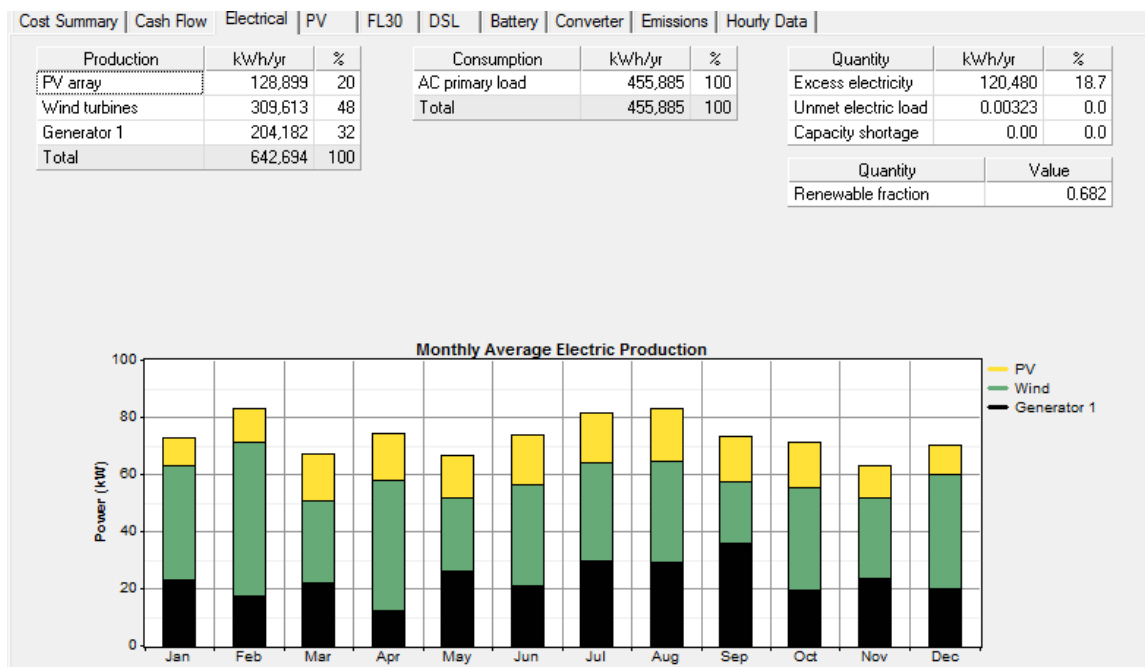
**Σχήμα 6.22:** Αναλυτικά συνολικά κόστη για κάθε συστατικό του υβριδικού συστήματος, που παρουσιάζονται στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στην καρτέλα «Cash Flow», που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23, εμφανίζονται οι χρηματοροές που πραγματοποιούνται σε κάθε έτος της συνολικής χρονικής διάρκειας του έργου, για κάθε συστατικό του υβριδικού συστήματος. Από το διάγραμμα των χρηματοροών, που παρουσιάζεται, γίνεται αντιληπτό το γεγονός πως το μεγάλο συνολικό κόστος που παρουσιάζει η ντηζελογεννήτρια οφείλεται στη ετήσια χρηματοροή, που αφορά την κατανάλωση καυσίμου diesel.

Στην καρτέλα «Electrical», που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.24, παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΓ, τις ΦΒ συστοιχίες και τις ντηζελογεννήτριες. Ακόμα εμφανίζεται η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια ίση με 120480 kWh και υπολογίζεται το ποσοστό της ίσο με 18,7%. Τέλος παρουσιάζεται το γράφημα με τον τίτλο «Monthly Average Electric Production» στο οποίο φαίνεται η μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε συστατικό.



Σχήμα 6.23: Γράφημα ετήσιων χρηματοροών για κάθε συστατικό του συστήματος.

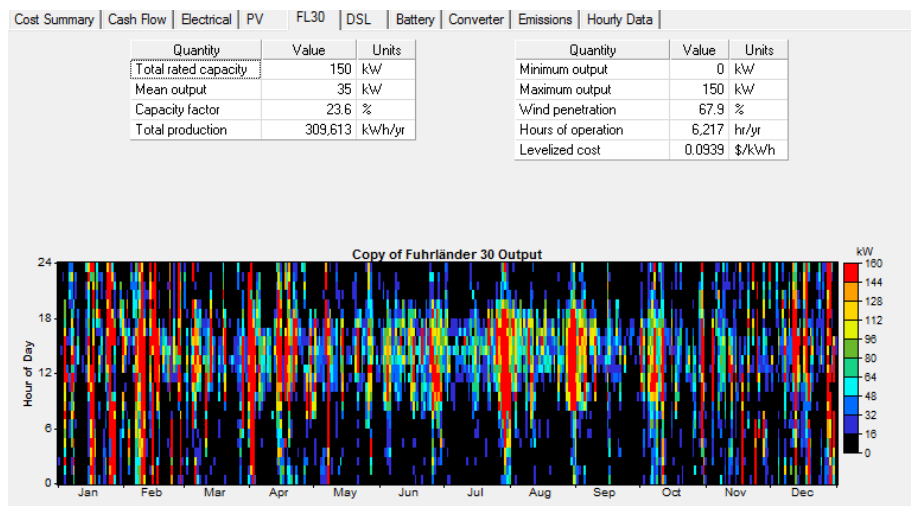


Σχήμα 6.24: Καρτέλα «Electrical» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

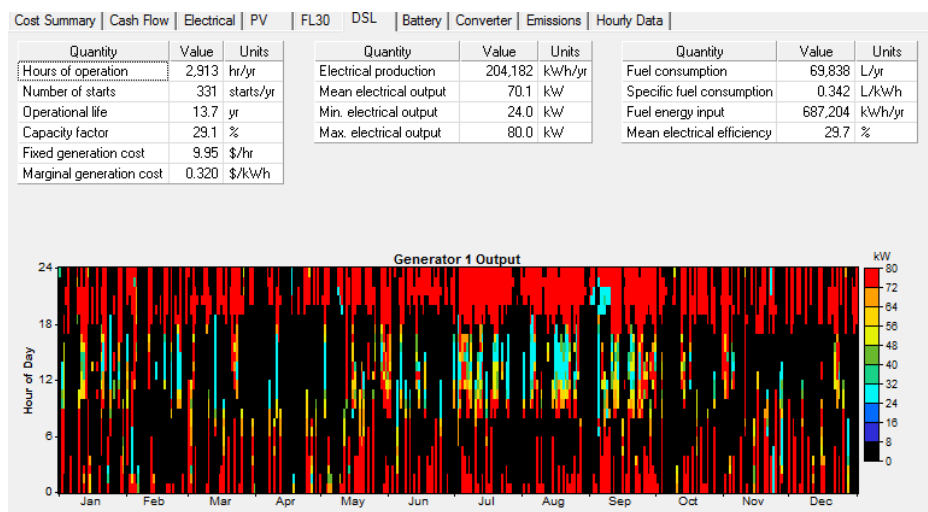
Στις καρτέλες «PV» (Σχήμα 6.25), «FL30» (Σχήμα 6.26), «DSL» (Σχήμα 6.27), «Battery» (Σχήμα 6.28) και «Converter» (Σχήμα 6.29) παρουσιάζονται τα αναλυτικά στοιχεία για τα ΦΒ πλαίσια τις ΑΓ, τις νηζελογεννήτριες, τους συσσωρευτές και τον μετατροπέα αντίστοιχα. Σε κάθε καρτέλα παρουσιάζονται γραφήματα που απεικονίζουν την μέση παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κάθε ώρα του έτους, με τη χρήση χρωματικού κώδικα.



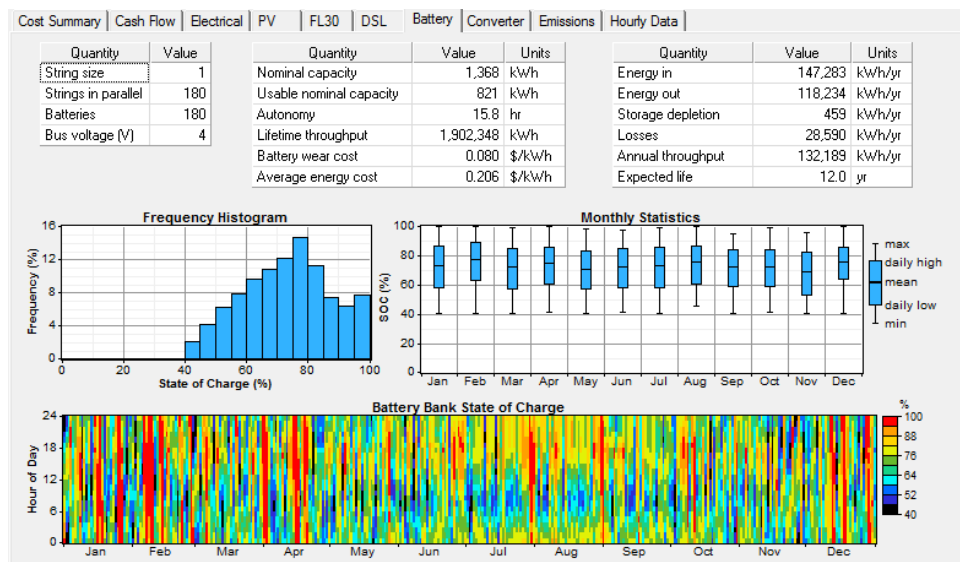
Σχήμα 6.25: Καρτέλα «PV» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



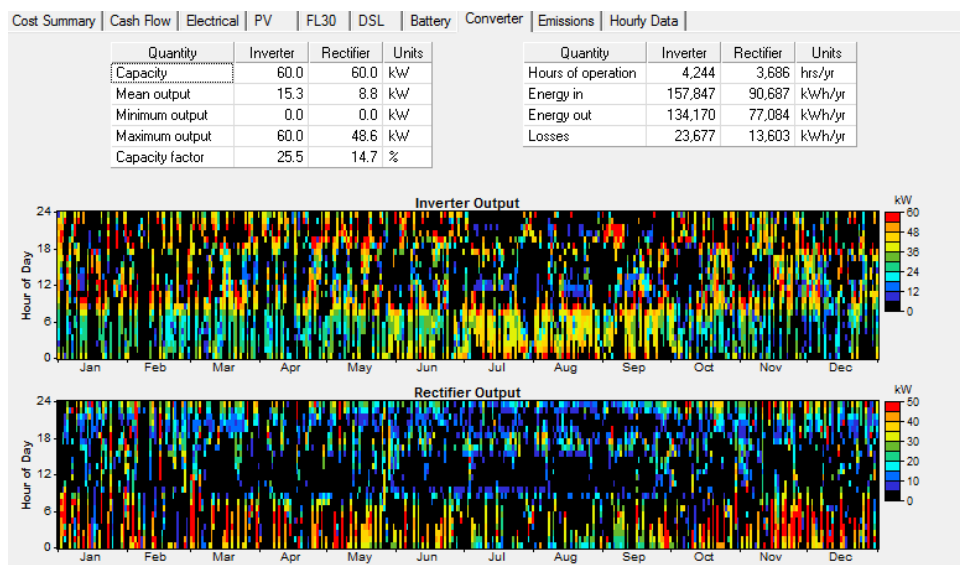
Σχήμα 6.26: Καρτέλα «FL30» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.27: Καρτέλα «DSL» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.28: Καρτέλα «Battery» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 6.24: Καρτέλα «Converter» στο παράθυρο με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

## ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι παραδοχές και οι απλοποιήσεις που έχουν γίνει για την μοντελοποίηση και τη βελτιστοποίηση του προβλήματος με χρήση του γραμμικού προγραμματισμού, καθώς και η σύγκριση με τις μεθόδους μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί το HOMER για κάθε συστατικό του υβριδικού συστήματος. Ακόμα γίνονται οι συγκρίσεις και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων που αναπτύχθηκαν για τη βελτιστοποίηση του υβριδικού συστήματος.

### 7.2 Διαφορές των δύο μεθόδων στη μοντελοποίηση

#### 7.2.1 Δεδομένα γραμμικού μοντέλου

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο γραμμικό μοντέλο και αφορούν την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη ζήτηση του φορτίου, αντιστοιχούν σε τιμές που αναφέρονται στην υποπερίοδο που έχει επιλεγεί, η οποία είναι ίση με ένα μήνα. Επομένως, οι τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς για την παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ πλαίσια και από τις ΑΓ αντιστοιχούν στη συνολική παραγόμενη ενέργεια για τον κάθε μήνα.

Η επιλογή του ενός μήνα ως υποπερίοδο στο σχεδιασμό του συστήματος έγινε, επειδή οι προσεγγίσεις που λάμβαναν, κάθε μία ώρα από τις 8760 του έτους ή μέσες ωριαίες τιμές για κάθε μήνα, δεν έδιναν εφικτές λύσεις κατά τη βελτιστοποίηση. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο μεγάλο αριθμό των περιορισμών που προέκυπταν, την ύπαρξη του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου της παραγόμενης ενέργειας και την αδυναμία ευελιξίας του μοντέλου λόγω της γραμμικότητας. Επομένως, ένα σημαντικό μειονέκτημα που προκύπτει στη μοντελοποίηση με γραμμικό προγραμματισμό, είναι πως δεν λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή που ενδέχεται να παρουσιάσουν οι τιμές των δεδομένων (ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία και ζήτηση φορτίου) σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

Αντίθετα, το HOMER λαμβάνει τις ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της ζήτησης του φορτίου και προσομοιώνει για κάθε ώρα του έτους την παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα για κάθε πιθανό συνδυασμό των συστατικών του συστήματος. Συνεπώς τα αποτελέσματα, που υπολογίζει το HOMER για την παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ πλαίσια και τις ΑΓ, είναι περισσότερο ρεαλιστικά και παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές τιμές, σε σχέση με αυτά του γραμμικού μοντέλου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η διαφοροποίηση, που παρουσιάζουν η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία, σε ωριαία βάση είναι πολύ μικρότερη από αυτή που παρουσιάζεται σε διάστημα ενός μήνα. Επομένως το HOMER, χρησιμοποιώντας σαν βήμα της προσομοίωσης, την μία ώρα, παράγει πολύ πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, σε σχέση με το γραμμικό μοντέλο που χρησιμοποιεί τις συνολικές τιμές για την περίοδο του ενός μήνα. Το ίδιο συμβαίνει και για την ζήτηση του φορτίου αφού το HOMER προσομοιώνει τη ζήτηση του φορτίου για κάθε ώρα του έτους, ενώ το γραμμικό μοντέλο λαμβάνει τη συνολική μηνιαία ζήτηση.

### 7.2.2 Ανεμογεννήτριες

Το γραμμικό μοντέλο μοντελοποιεί τις ανεμογεννήτριες, δημιουργώντας μια μεταβλητή ελέγχου, η οποία αντιστοιχεί στο εμβαδό της επιφάνειας που καταλαμβάνει η πτερωτή της ανεμογεννήτριας, που έχει θεωρηθεί. Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης για τις ανεμογεννήτριες στο γραμμικό μοντέλο, αντιπροσωπεύει το παρόν κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο της πτερωτής των ΑΓ. Για τον υπολογισμό του παρόντος κόστους λαμβάνεται το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου για την αγορά των ΑΓ με το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και αφαιρείται από αυτό τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ΑΓ στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Το HOMER μοντελοποιεί τις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιώντας το κόστος αγοράς για κάθε ΑΓ, το κόστος αντικατάστασης, στο τέλος της διάρκεια ζωής της καθώς και το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Ακόμα το HOMER λαμβάνει υπόψη τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ΑΓ στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Η μορφή της καμπύλης ισχύος της ΑΓ δεν εμφανίζει διαφορές ανάμεσα στις δύο μεθόδους, καθώς στο HOMER χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα, που παρέχει στο χρήστη να διαμορφώσει την καμπύλη ισχύος της ΑΓ, δίνοντας τις τιμές που την αντιπροσωπεύουν, έτσι ώστε να ταυτίζεται με την σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τις ΑΓ στο λογιστικό φύλλο. Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΓ, στο γραμμικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε μία χρονοσειρά και η καμπύλη ισχύος της ΑΓ που έχει θεωρηθεί (Σχήμα 2.6), βρίσκοντας έτσι την παραγόμενη ενέργεια για κάθε ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Επομένως, η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΓ που υπολογίζει το HOMER δε θα διαφέρει σημαντικά από αυτή που υπολογίζει το γραμμικό πρόγραμμα, λόγω του τρόπου υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε στο γραμμικό μοντέλο.

### 7.2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Στο γραμμικό μοντέλο τα ΦΒ πλαίσια μοντελοποιούνται με τη δημιουργία μίας μεταβλητής απόφασης, η οποία εκφράζει την επιφάνεια ΦΒ πλαισίων σε τετραγωνικά μέτρα. Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης για τα ΦΒ πλαίσια στο γραμμικό μοντέλο, αντιπροσωπεύει το παρόν κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο του ΦΒ πλαισίου. Για τον υπολογισμό του παρόντος κόστους λαμβάνεται το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου για την αγορά του ΦΒ πλαισίου με το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους και αφαιρούνται από αυτό τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ΦΒ στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Για τη μοντελοποίηση των ΦΒ πλαισίων το HOMER χρησιμοποιεί το κόστος αγοράς ανά kW, το κόστος αντικατάστασης στο τέλος της διάρκειας ζωής των ΦΒ πλαισίων καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Επιπλέον το HOMER λαμβάνει υπόψη τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ΦΒ πλαισίων στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Ακόμα, πρέπει να αναφερθεί πως το HOMER δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να καθορίσει πλήθος παραμέτρων των ΦΒ πλαισίων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση των ΦΒ πλαισίων, συγκριτικά με τη μοντελοποίηση για το γραμμικό πρόγραμμα. Οι παράμετροι αυτοί είναι: ο παράγοντας κλιμάκωσης (Derating factor) που ισχύει για την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και καταγράφει τις απώλειες (όπως η γήρανση των ΦΒ πλαισίων ή η σκίαση), η κλίση στην οποία τοποθετούνται τα ΦΒ (Slope), η κατεύθυνση ως προς την οποία τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι προσανατολισμένα σε σχέση με το νότο (Azimuth) και ο συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους (Ground reflectance), ο οποίος αναφέρεται στο ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας που ανακλάται. Το HOMER δίνει επίσης τη δυνατότητα στο χρήστη να συμπεριλάβει στη μοντελοποίηση των ΦΒ πλαισίων την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγόμενη ενέργεια από τη συστοιχία των ΦΒ πλαισίων καθώς και τη δυνατότητα επιλογής των συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου που ρυθμίζουν την κλίση των ΦΒ πλαισίων.

Στο γραμμικό μοντέλο η παραγόμενη ισχύς από τη ΦΒ συστοιχία δίνεται από τη σχέση:  $P_s = I \cdot A_s \cdot effs$  όπου  $I$  η συνολική ηλιακή ακτινοβολία,  $A_s$  η συνολική επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων και  $effs$  ένας γενικός δείκτης απόδοσης για την παραγόμενη ενέργεια από τη ΦΒ συστοιχία. Αντίθετα το HOMER για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος από τη ΦΒ συστοιχία χρησιμοποιεί τη σχέση:  $P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \cdot \frac{I_T}{I_s}$  όπου  $f_{PV}$  ο παράγοντας κλιμάκωσης,  $Y_{PV}$  η μέγιστη ισχύς της ΦΒ συστοιχίας ( $kW_p$ ),  $I_s$  η τυπική ακτινοβολία για την οποία μετράται η ισχύς της ΦΒ συστοιχίας και είναι ίση με  $1 \text{ kW/m}^2$  και  $I_T$  η συνολική ηλιακή ακτινοβολία, στον υπολογισμό της οποίας λαμβάνεται υπόψη η τρέχουσα τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ο προσανατολισμός της ΦΒ συστοιχίας, η γεωγραφική θέση της περιοχής εγκατάστασης, η εποχή του χρόνου, και η ώρα της ημέρας. Πρέπει επίσης να αναφερθεί πως στο HOMER γίνεται η θεώρηση πως τα ΦΒ συστήματα

συνεργάζονται με μια διάταξη που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Σχήμα 2.17), η οποία διατηρεί το σημείο λειτουργίας του ΦΒ συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από τα ΦΒ πλαίσια.

Συνεπώς, η παραγόμενη ενέργεια από τη ΦΒ συστοιχία, που υπολογίζει το γραμμικό μοντέλο, θα απέχει περισσότερο από την πραγματική παραγόμενη ενέργεια συγκριτικά με τον υπολογισμό που κάνει το HOMER, αφού το γραμμικό πρόγραμμα λαμβάνει μία σαφώς πιο απλοποιημένη σχέση.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως ούτε το γραμμικό μοντέλο ούτε και το HOMER λαμβάνει υπόψη το γεγονός πως στη πραγματικότητα η παραγόμενη ισχύς από τη ΦΒ συστοιχία εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό και μη γραμμικά από την τάση στην οποία λειτουργεί.

#### 7.2.4 Ντηζελογεννήτριες

Στο γραμμικό μοντέλο οι ντηζελογεννήτριες μοντελοποιούνται με τη δημιουργία μίας μεταβλητής απόφασης, η οποία εκφράζει την ισχύ της ντηζελογεννήτριας σε kW. Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης για τις ντηζελογεννήτριες στο γραμμικό μοντέλο, αντιπροσωπεύει το παρόν κόστος ανά kW. Για τον υπολογισμό του παρόντος κόστους λαμβάνεται το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου για την αγορά των ντηζελογεννητριών με το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους και αφαιρούνται από αυτό τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση τους στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Για τη μοντελοποίηση των ντηζελογεννητριών, το HOMER χρησιμοποιεί το κόστος αγοράς ανά kW, το κόστος αντικατάστασης στο τέλος της διάρκειας ζωής των ντηζελογεννητριών καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας τους. Επιπρόσθετα, το HOMER λαμβάνει υπόψη τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση των ντηζελογεννητριών στο τέλος του χρονικού ορίζοντα του έργου.

Για τη μοντελοποίηση της ντηζελογεννήτριας στο γραμμικό μοντέλο έγινε η θεώρηση πως η ντηζελογεννήτρια δουλεύει πλήρως, δηλαδή στη μέγιστη ισχύ της, για 4000 h ανά έτος. Ο χρόνος ζωής της ντηζελογεννήτριας θεωρήθηκε ίσος με 8 έτη λειτουργώντας πλήρως για 4000 h ανά έτος και στη βέλτιστη απόδοση, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη κατανάλωση καυσίμου όπως δίνεται από την καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου (Σχήμα 2.19). Ακόμα, θεωρήθηκε πως η ντηζελογεννήτρια έχει την ίδια διάρκεια λειτουργίας για κάθε υποπερίοδο  $i$ . Αντίθετα, το HOMER κάνει τη θεώρηση πως η παραγόμενη ισχύς από την ντηζελογεννήτρια κυμαίνεται ανάμεσα στην ελάχιστη επιτρεπόμενη, η οποία είναι ίση με το 30% της μέγιστης και την μέγιστη δυνατή ισχύ. Η θεώρηση αυτή προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική λειτουργία της ντηζελογεννήτριας και δίνει περισσότερα ρεαλιστικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση του συστήματος.

Οι διαφορές, που προκύπτουν ανάμεσα στις δύο μεθόδους για την παραγόμενη ενέργεια από τη νηξελογεννήτρια, έχουν σαν κύρια αιτία την απλοποιητική παραδοχή που έγινε στο γραμμικό μοντέλο και αφορά την λειτουργία της νηξελογεννήτριας στη βέλτιστη απόδοση με την ίδια χρονική διάρκεια για κάθε μήνα.

### 7.2.5 Μετατροπέας

Στο γραμμικό πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί, ο μετατροπέας δεν μοντελοποιείται ξεχωριστά αλλά ενσωματώνεται στο ΦΒ σύστημα. Η ενσωμάτωση αυτή γίνεται με την πρόσθεση ενός σταθερού κόστους στο κόστος κεφαλαίου των ΦΒ πλαισίων και με τον πολλαπλασιασμό της απόδοσης του μετατροπέα ( $effs_{conv}$ ) με την απόδοση των ΦΒ πλαισίων ( $effs_{PV}$ ), έτσι ώστε να προκύψει η συνολική απόδοση του ΦΒ συστήματος ( $effs$ ). Το γεγονός πως ο μετατροπέας δεν μοντελοποιείται ξεχωριστά συμβάλει στο να μην λαμβάνεται υπόψη, στο γραμμικό μοντέλο, το κόστος αντικατάστασης του και η αξία μεταπώλησης του, τα οποία συνυπολογίζονται στη προσομοίωση του υβριδικού συστήματος από το HOMER.

Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί πως η ενσωμάτωση του μετατροπέα στο ΦΒ σύστημα στηρίζεται στην απλοποιητική θεώρηση πως ο μετατροπέας έχει την ίδια χωρητικότητα με τα ΦΒ πλαίσια, γεγονός που δεν ισχύει στην πραγματικότητα. Τέλος, η θεώρηση της ενσωμάτωσης του μετατροπέα στο ΦΒ σύστημα έχει ως συνέπεια να μη λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της αποδοτικότητας του, στη συνολική παραγόμενη ενέργεια από τη συστοιχία των συσσωρευτών, που τροφοδοτεί το σύστημα με ενέργεια υπό τη μορφή του συνεχούς ρεύματος.

### 7.2.6 Συσσωρευτές

Στο γραμμικό μοντέλο οι συσσωρευτές μοντελοποιούνται με τη δημιουργία μιας μεταβλητής απόφασης, η οποία εκφράζει τη χωρητικότητα των συσσωρευτών. Ο συντελεστής της μεταβλητής απόφασης για τους συσσωρευτές στο γραμμικό μοντέλο, αντιπροσωπεύει το παρόν κόστος ανά kWh. Έχει θεωρηθεί πως η αξία μεταπώλησης των συσσωρευτών είναι αμελητέα. Επομένως, για τον υπολογισμό του παρόντος κόστους λαμβάνεται το άθροισμα του κόστους κεφαλαίου για την αγορά των συσσωρευτών με το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους. Αντίθετα, για την μοντελοποίηση των συσσωρευτών, το HOMER χρησιμοποιεί το κόστος κεφαλαίου ανά μονάδα, το κόστος αντικατάστασης στο τέλος της διάρκειας ζωής των συσσωρευτών καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας τους.

Στο γραμμικό μοντέλο, οι συσσωρευτές θεωρούνται σαν ένα συστατικό του συστήματος το οποίο παράγει ενέργεια ίση με τη χωρητικότητα των συσσωρευτών, x φορές

μέσα στην υποπερίοδο  $i$ . Επιπλέον, έχει γίνει η θεώρηση ότι οι συσσωρευτές είναι πάντα γεμάτοι και μπορούν να δώσουν την ενέργεια που απαιτείται από αυτούς. Ακόμα θεωρείται πως ο συσσωρευτής μπορεί να εκφορτιστεί πλήρως (στο 100% της χωρητικότητας του) έτσι ώστε να αποδώσει ενέργεια ίση με τη χωρητικότητά του, πράγμα που δεν ισχύει στη πραγματικότητα, καθώς υπάρχει ένα ελάχιστο όριο εκφόρτισης. Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη η φόρτιση των συσσωρευτών, η οποία δεσμεύει ένα μέρος από την ενέργεια που παράγεται από τα υπόλοιπα συστατικά του υβριδικού συστήματος. Για αυτό το λόγο έχει δημιουργηθεί η μεταβλητή  $up_{bound}$ , η οποία καθορίζει τη μέγιστη παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα, έτσι ώστε να προκύπτει μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου και να υπάρχει έτσι ένα πλεόνασμα ενέργειας που χρησιμοποιείται στη φόρτιση των μπαταριών. Πρέπει επίσης να τονιστεί, πως στο γραμμικό μοντέλο δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί στο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης, οι οποίοι περιορίζουν τη συνεισφορά των συσσωρευτών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η μοντελοποίηση του HOMER για τους συσσωρευτές είναι πολύ πιο λεπτομερής και πιο ρεαλιστική σε σχέση με αυτή του γραμμικού μοντέλου. Το HOMER για τη μοντελοποίηση των συσσωρευτών χρησιμοποιεί τα εξής βασικά στοιχεία: την ονομαστική τάση, την καμπύλη χωρητικότητας, την καμπύλη διάρκειας ζωής, την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης, το ποσοστό ενέργειας που αποθηκεύεται στο συσσωρευτή και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Η καμπύλη χωρητικότητας εκφράζει το γεγονός πως η χωρητικότητα του συσσωρευτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος εκφόρτισης, δηλαδή όσο πιο γρήγορη η εκφόρτιση, τόσο μικρότερη η ικανότητα του συσσωρευτή. Η καμπύλη της διάρκειας ζωής εκφράζει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης που αντέχει ο συσσωρευτής για διαφορετικά βάθη εκφόρτισης. Σύμφωνα με τη καμπύλη της διάρκειας ζωής το HOMER μπορεί, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, να υπολογίσει τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών, ανάλογα με τα βάθη εκφόρτισης που παρουσιάζονται. Η ελάχιστη κατάσταση φόρτισης αντιστοιχεί στην ελάχιστη χωρητικότητα του συσσωρευτή, κάτω από την οποία ο συσσωρευτής δεν μπορεί να εκφορτιστεί χωρίς την πρόκληση μόνιμης βλάβης και κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το HOMER δεν επιτρέπει την εκφόρτιση του συσσωρευτή σε σημείο μικρότερου από αυτή. Επιπροσθέτως, το HOMER λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς που υπάρχουν για το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, οι οποίοι προκαλούν μείωση στην συνολική συνεισφορά των συσσωρευτών.

Συμπερασματικά, όσον αφορά τους συσσωρευτές, το HOMER δίνει τη δυνατότητα στον αναλυτή να τους μοντελοποιήσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια και λεπτομέρεια, δημιουργώντας έτσι ένα μοντέλο που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Συνεπώς το HOMER υπερτερεί σημαντικά στη μοντελοποίηση των συσσωρευτών, σε σχέση με το γραμμικό μοντέλο, στο οποίο έχει γίνει μία χοντρική θεώρηση.

### 7.2.7 Περιορισμοί

Επιπλέον, το HOMER υπερτερεί σε σχέση με το γραμμικό μοντέλο επειδή παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να προσθέσει περιορισμούς που αφορούν τους εκπεμπόμενους ρύπους ή τη λειτουργική εφεδρεία, προσομοιώνοντας έτσι ένα αρκετά ρεαλιστικό μοντέλο. Κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης του υβριδικού συστήματος με το HOMER δεν χρησιμοποιήθηκαν αυτοί οι περιορισμοί, έτσι ώστε να μην παρουσιάζονται επιπλέον διαφορές ανάμεσα στα μοντέλα των δύο μεθόδων.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί η δυνατότητα που προσφέρει το HOMER στην μοντελοποίηση και την προσομοίωση των στρατηγικών συνεργασίας μεταξύ συσσωρευτών και γεννητριών, κάτι που είναι ανέφικτο στο γραμμικό μοντέλο. Το HOMER μπορεί να προσομοιώσει και να εμφανίσει στα αποτελέσματα των βέλτιστων λύσεων, την στρατηγική παρακολούθησης φορτίου και την στρατηγική φόρτισης κύκλου λειτουργίας συσσωρευτή (η οποία είναι και η προεπιλογή του προγράμματος). Πρέπει να τονιστεί όμως, πως αν γίνει η επιλογή, στο HOMER, να προσομοιωθούν και οι δύο στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ συσσωρευτών και γεννητριών, αυξάνεται σημαντικά ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση του μοντέλου.

Επιπροσθέτως πρέπει να τονιστεί ότι το γραμμικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τον τρόπο που συνεργάζονται μεταξύ τους τα συστατικά του υβριδικού συστήματος και δεν υπολογίζει την μεταβλητότητα που παρουσιάζεται στις τιμές των συντελεστών των μεταβλητών στους περιορισμούς, καθώς τους θεωρεί σταθερούς.

## 7.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων

### 7.3.1 Αποτελέσματα γραμμικού μοντέλου

Μετά από την βελτιστοποίηση του γραμμικού προγράμματος, που έγινε στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, προέκυψε η βέλτιστη λύση, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1.

**Πίνακας 7.1:** Βέλτιστη λύση γραμμικού προγράμματος

| <b>Συστατικά υβριδικού<br/>συστήματος</b> | <b>Μονάδες</b>             |
|-------------------------------------------|----------------------------|
| Ανεμογεννήτριες                           | 4                          |
| ΦΒ πλαίσια                                | 1818 ή 100 kW <sub>p</sub> |
| Ντηζελογεννήτρια                          | 1                          |
| Συσσωρευτές                               | 180                        |
| <b>Συνολικό Κόστος</b>                    | <b>2.050.983,3 €</b>       |

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.1 το συνολικό κόστος της επένδυσης για την αγορά και την λειτουργία, κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα του έργου, τεσσάρων ΑΓ ονομαστικής ισχύος 30 kW, ΦΒ πλαισίων συνολικής ισχύος 100 kW<sub>p</sub>, μίας νηξελογεννήτριας μέγιστης ισχύος 40 kW και 180 συσσωρευτών χωρητικότητας 1900 Ah, είναι ίσο με 2.050.983,3 €.

### 7.3.2 Σχολιασμός ευαισθησίας στο πάνω όριο

Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης του γραμμικού μοντέλου, παρατηρήθηκε μία ευαισθησία που παρουσιάζει η βέλτιστη λύση στις αλλαγές του συντελεστή  $up_{bound}$ , που αναφέρεται στους περιορισμούς της μέγιστης παραγόμενης ενέργειας από το υβριδικό σύστημα. Οι βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν για διαφορετικές τιμές του συντελεστή  $up_{bound}$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

**Πίνακας 7.2:** Βέλτιστες λύσεις για διαφορετικές τιμές του πάνω ορίου της μέγιστης πλεονάζουσας ενέργειας.

| $up_{bound}$ | Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης | Ανεμογεννητριες (m <sup>2</sup> ) | ΦΒ πλαίσια (m <sup>2</sup> ) | Νηξελογεννήτριες (kW) | Συσσωρευτές (kWh) | Πραγματική επένδυση € |
|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|
| 1.4          | 1560790                        | 43,1264                           | 800                          | 33,09921              | 1368              | 1798310,897           |
| 1.45         | 1490927                        | 102,5547                          | 800                          | 28,99089              | 1368              | 1798310,897           |
| 1.5          | 1421063                        | 161,9830                          | 800                          | 24,88256              | 1368              | 1882507,539           |
| 1.55         | 1351199                        | 221,4113                          | 800                          | 20,77424              | 1368              | 1882507,539           |
| 1.6          | 1281335                        | 280,8396                          | 800                          | 16,66591              | 1368              | 1882507,539           |
| 1.65         | 1211471                        | 340,2679                          | 800                          | 12,55759              | 1368              | 1966704,18            |
| 1.7          | 1141607                        | 399,6962                          | 800                          | 8,449261              | 1368              | 2050900,822           |
| 1.75         | 1071743                        | 459,1245                          | 800                          | 4,40935               | 1368              | 2050900,822           |
| 1.8          | 1001879                        | 518,5528                          | 800                          | 0,23261               | 1368              | 2050900,822           |
| 1.85         | 997923,4                       | 521,9176                          | 800                          | 0                     | 1368              | 1003559,222           |
| 1.9          | 997923,4                       | 521,9176                          | 800                          | 0                     | 1368              | 1003559,222           |

Για τιμές του συντελεστή  $up_{bound}$  μικρότερες της τιμής 1,4 η βελτιστοποίηση του γραμμικού προγράμματος δεν παρουσίαζε εφικτή λύση. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρή διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη και την μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια, η οποία κάνει αδύνατη την εύρεση τιμών για τις μεταβλητές απόφασης, που να ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς.

Για τιμές του συντελεστή  $up_{bound}$  μεγαλύτερες της τιμής 1,4 και για σταδιακή αύξηση της τάξεως των 0,5 μονάδων μέχρι την τιμή 1,85 παρατηρείται πως οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που αφορούν τα ΦΒ πλαίσια και τους συσσωρευτές παραμένουν σταθεροί, ενώ η μεταβλητή απόφασης των νηξελογεννητριών μειώνεται σε αντίθεση με τη

μεταβλητή απόφασης των ΑΓ, η οποία αυξάνεται. Το γεγονός πως η αύξηση της τιμής, που αναφέρεται στις ΑΓ, είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη μείωση που παρουσιάζει η τιμή της μεταβλητής των νηζελογεννητριών, οφείλεται στη διαφορά της παραγόμενης ενέργειας που υπάρχει ανάμεσα στα δύο συστατικά, καθώς η νηζελογεννήτρια παράγει σημαντικά μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα με τις μεταβολές των μεταβλητών απόφασης που αναφέρθηκαν, παρατηρείται μία μείωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία οφείλεται στην μείωση της τιμής της μεταβλητής απόφασης που αναφέρεται στις νηζελογεννήτριες, η οποία παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή στην αντικειμενική συνάρτηση, λόγω της κατανάλωσης καυσίμου diesel.

Για τιμές του συντελεστή  $up_{bound}$  μεγαλύτερες της τιμής 1,85 δεν παρατηρούνται πλέον μεταβολές στη βέλτιστη λύση και η τιμή της μεταβλητής απόφασης, που αναφέρεται στις νηζελογεννήτριες, μηδενίζεται. Το γεγονός ότι η βέλτιστη λύση παραμένει σταθερή για τιμές μεγαλύτερες 1,85, μαρτυρά πως πλέον δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την μέγιστη παραγόμενη ενέργεια που να ικανοποιείται αυστηρά. Παρατηρείται επίσης πως το κόστος της πραγματικής επένδυσης μειώνεται σημαντικά, γεγονός που οφείλεται στο μηδενισμό της μεταβλητής που αναφέρεται στις νηζελογεννήτριες.

Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι η επιλογή της τιμής 1,75 για τον συντελεστή  $up_{bound}$ , που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση του γραμμικού μοντέλου, βασίστηκε σε δύο σημαντικές παρατηρήσεις. Πρώτον, σε όλες τις βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν, ο αριθμός των συσσωρευτών είναι μεγάλος, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης μεγαλύτερου ποσού πλεονάζουσας ενέργειας για τη φόρτιση τους, την οποία το γραμμικό μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη του. Η απαραίτητη πλεονάζουσα ενέργεια για τη φόρτιση των συσσωρευτών δίνεται για μεγάλες τιμές του συντελεστή  $up_{bound}$ . Δεύτερον, για τιμές του  $up_{bound}$  μεγαλύτερες του 1,8 οι βέλτιστες λύσεις δεν περιλαμβάνουν νηζελογεννήτριες, γεγονός που, βάσει της εμπειρίας από τη βελτιστοποίηση αντίστοιχων συστημάτων, δεν είναι αποδεκτό, καθώς κρίνεται απαραίτητη η συμμετοχή μίας τουλάχιστον μονάδας ελεγχόμενου ρυθμού παραγωγής, έτσι ώστε να εξαλείφεται ο κίνδυνος της ύπαρξης ανικανοποίητης ζήτησης φορτίου.

### 7.3.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων HOMER

Μετά από την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση που έγινε στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, με τη χρήση του λογισμικού HOMER προέκυψε η βέλτιστη λύση, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3.

**Πίνακας 7.3:** Βέλτιστη λύση υβριδικού συστήματος σύμφωνα με το HOMER

| Συστατικό                        | Μέγεθος                   |
|----------------------------------|---------------------------|
| Ανεμογεννήτριες                  | 5                         |
| ΦΒ πλαίσια                       | 1456 ή 80 kW <sub>p</sub> |
| Ντηζελογεννήτριες                | 2                         |
| Συσσωρευτές                      | 180                       |
| Μετατροπέας                      | 60 kW                     |
| <b>Καθαρό παρόν κόστος (NPC)</b> | <b>2.212.269 €</b>        |

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.3 το καθαρό παρόν κόστος του βέλτιστου υβριδικού συστήματος, το οποίο αποτελείται από 5 ΑΓ, ΦΒ πλαίσια συνολικής ισχύος 80 kW<sub>p</sub>, 2 ντηζελογεννητριών μέγιστης ισχύος 40 kW και 180 συσσωρευτών χωρητικότητας 1900 Ah, είναι ίσο με 2.212.269 €.

#### 7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στον τρόπο μοντελοποίησης των συστατικών του υβριδικού συστήματος, είναι αρκετές και ιδιαίτερα σημαντικές και αντικατοπτρίζονται στα αποτελέσματα που προκύπτουν ως βέλτιστη λύση. Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζεται η σύγκριση των βέλτιστων λύσεων των δύο μεθόδων.

**Πίνακας 7.4:** Σύγκριση βέλτιστων λύσεων που προέκυψαν με τη βελτιστοποίηση του HOMER και του γραμμικού μοντέλου.

| Συστατικό                        | HOMER                     | Γραμμικό Μοντέλο           |
|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Ανεμογεννήτριες                  | 5                         | 4                          |
| ΦΒ πλαίσια                       | 1456 ή 80 kW <sub>p</sub> | 1818 ή 100 kW <sub>p</sub> |
| Ντηζελογεννήτριες                | 2                         | 1                          |
| Συσσωρευτές                      | 180                       | 180                        |
| Μετατροπέας                      | 60 kW                     | -                          |
| <b>Καθαρό παρόν κόστος (NPC)</b> | <b>2.212.269 €</b>        | <b>2.050.983,3 €</b>       |

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.4 η βέλτιστη λύση του HOMER διαφέρει σε αρκετά σημεία από αυτή του γραμμικού μοντέλου. Το HOMER προτείνει ως βέλτιστη την αγορά πέντε ΑΓ έναντι τεσσάρων που προτείνει το γραμμικό μοντέλο. Ακόμα το HOMER προτείνει την αγορά 1456 ΦΒ πλαισίων συνολικής ισχύος 80 kW<sub>p</sub> έναντι των 1818 ΦΒ πλαισίων συνολικής ισχύος 100 kW<sub>p</sub> που προτείνει η επίλυση του γραμμικού μοντέλου. Όσον αφορά τις ντηζελογεννήτριες, το HOMER προτείνει την αγορά δύο ντηζελογεννητριών συνολικής ισχύος 80 kW, εν αντιθέσει με το γραμμικό μοντέλο που προτείνει την αγορά μίας ντηζελογεννήτριας ισχύος 40kW. Όσον αφορά την εκτίμηση των συσσωρευτών και οι δύο μέθοδοι προτείνουν την αγορά 180 συσσωρευτών. Επιπλέον το HOMER προτείνει την αγορά

ενός μετατροπέα, ο οποίος δεν έχει μοντελοποιηθεί στο γραμμικό μοντέλο αλλά έχει συνυπολογιστεί στο κόστος του ΦΒ συστήματος. Τέλος στο HOMER το καθαρό παρόν κόστος (NPC) προκύπτει ίσο με 2.212.269 € και είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος που υπολογίζει το γραμμικό μοντέλο και είναι ίσο με 2.050.983,3 €.

## 7.5 Τελικά συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι για την μοντελοποίηση και την βελτιστοποίηση της σχεδίασης ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πλαίσια, νηζελογεννήτριες και συσσωρευτές.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε τη δημιουργία ενός γραμμικού προγράμματος που να μοντελοποιεί το αυτόνομο υβριδικό σύστημα και την επίλυση του με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού. Για τη δημιουργία του γραμμικού προγράμματος χρειάστηκε να γίνουν αρκετές απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα το μοντέλο να απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα. Όσον αφορά την μοντελοποίηση του γραμμικού προγράμματος, από την πλευρά του αναλυτή, μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική διαδικασία. Αντίθετα, η επίλυση του γραμμικού προγράμματος, η οποία έγινε με το Solver του Excel, είναι ιδιαίτερα σύντομη σε διάρκεια.

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε την μοντελοποίηση και την προσομοίωση του υβριδικού συστήματος, με το λογισμικό HOMER το οποίο αποτελεί ένα μοντέλο χρονοσειρών. Το HOMER προσομοιώνει κάθε δυνατό συνδυασμό του συστήματος και βρίσκει τη βέλτιστη με κριτήριο το ελάχιστο παρόν κόστος. Το γεγονός πως το HOMER προσομοιώνει το σύστημα για κάθε χρονικό διάστημα, που έχει ορίσει ο χρήστης, έχει ως αποτέλεσμα να προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα και να εξάγει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί πως το HOMER είναι ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη, διαθέτοντας ένα απλό και παραστατικό γραφικό περιβάλλον διεπαφής, που συμβάλει στον εύκολο και γρήγορο καθορισμό του προβλήματος. Το μόνο μειονέκτημα που παρατηρήθηκε για το HOMER είναι η μεγάλη διάρκεια που απαιτείται για την προσομοίωση του συστήματος, η οποία αυξάνεται σημαντικά όσο προστίθενται νέα πιθανά ενδεχόμενα για κάθε συστατικό του συστήματος.

Συμπερασματικά, το HOMER, συγκριτικά με το γραμμικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, μοντελοποιεί και βελτιστοποιεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και ρεαλισμό τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυριότεροι λόγοι που το γραμμικό πρόγραμμα δεν καταφέρνει να εξάγει αποτελέσματα που να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, όσο αυτά του HOMER, είναι:

1. Το γεγονός πως δεν λαμβάνει υπόψη ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες μη ελεγχόμενης παραγωγής, όπως είναι οι Α.Π.Ε., παρουσιάζουν μεταβολές σε σύντομα χρονικά διαστήματα.
2. Το γεγονός πως δεν λαμβάνει υπόψη τη συνεργασία μεταξύ των συστατικών του υβριδικού συστήματος.
3. Η θεώρηση ότι οι συντελεστές που αντιπροσωπεύουν την εκφόρτιση των συσσωρευτών και τις ώρες λειτουργίας των νηζελογεννητριών είναι σταθεροί κατά τη διάρκεια της υποπεριόδου, παράγοντας έτσι ένα σταθερό ποσό ενέργειας σε κάθε υποπερίοδο.
4. Το γεγονός πως θεωρεί ότι οι συσσωρευτές είναι πάντα φορτισμένοι και μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα με την απαιτούμενη ενέργεια, που απέχει από την πραγματικότητα.
5. Η ευαισθησία που παρουσιάζει στις αλλαγές του συντελεστή  $up_{bound}$ , η οποία κρίνει απαραίτητη την ύπαρξη εμπειρίας στην βελτιστοποίηση αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τιμή του συντελεστή και να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται και από την σύγκριση των δύο μεθόδων (Πίνακας 7.4) τα αποτελέσματα τους διαφέρουν σε αρκετά σημεία αλλά όχι σε πολύ μεγάλο βαθμό. Επομένως, μπορεί να ειπωθεί πως αν και τα αποτελέσματα του γραμμικού μοντέλου δεν είναι τόσο ρεαλιστικά, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία πρώτη, χοντρική προσέγγιση για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός υβριδικού αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια βέβαια, κρίνεται απαραίτητη η βελτιστοποίηση με ένα μοντέλο χρονοσειρών, όπως το HOMER, έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλή και ρεαλιστικά αποτελέσματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Ι.Κ. Καλδέλλης, “*Διαχείριση της αιολικής ενέργειας*”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε., Αθήνα 2005.
- [2]. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, “*Φωτοβολταϊκά Συστήματα*”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2006.
- [3]. Π.Σ. Γεωργιάκης, “*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*”, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Χανιά 2006.
- [4]. Π.Σ. Γεωργιάκης, “*Ηλεκτρική Οικονομία*”, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Χανιά 2006.
- [5]. Ι.Α. Κατσίγιαννης, “*Βελτιστοποίηση Δομής και Οικονομική Αξιολόγηση Απομονωμένου συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας που βασίζεται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*”, Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιούνιος 2008.
- [6]. Gilbert M. Masters, “*Renewable and Efficient Electric Power Systems*”, John Wiley & Sons, 2004.
- [7]. Mukund R. Patel, “*Wind and Solar Power Systems Design Analysis and Operation*”, Second Edition, Taylor & Francis, 2006.
- [8]. Felix A. Farret, M. Godoy Simoes, “*Integration of Alternative Sources of Energy*”, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [9]. Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo Garcia and Natalia Alguacil, “*Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*”, John Wiley & Sons, 2002.
- [10]. Γ. Σίσκος, “*Γραμμικός Προγραμματισμός*”, Β’ Έκδοση, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα 2000.
- [11]. Μ. Δούμπος, “*Γραμμικός Προγραμματισμός Επίλυση Γραμμικών Προγραμμάτων σε H/Y*”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Χανιά 2009
- [12]. Γ. Δούνιας, Β. Μουστάκης, “*Μεθοδολογίες Λήψης Οικονομοτεχνικών Αποφάσεων*”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Πυξίδα, Χίος 2008.
- [13]. Hisham Khatib, “*Economic Evaluation of Projects in the Electricity Supply Industry*”, Power and Energy Series 44, 2003
- [14]. Jizhong Zhu, “*Optimization of Power System Operation*”, John Wiley & Sons, 2009
- [15]. Hamdy A. Taha, “*Operation Research: An Introduction*”, 8<sup>th</sup> Edition, Pearson Education, 2007.
- [16]. Urmila Diwekar, “*Introduction to Applied Optimization*”, Second Edition, Springer, 2008.
- [17]. Daniel Fylstra, Leon Lasdon, John Watson, Allan Waren, “*Design and Use of the Microsoft Excel Solver*”, Published in *INTERFACES*, Vol. 28, No. 5, Sept-Oct 1998, pp. 29-55.
- [18]. Frontline Systems. “*Premium Solver Platform User Guide*”, 2006.
- [19]. R. Chedid, Y. Saliba, “*Optimization And Control of Autonomous Renewable Energy Systems*”, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, Vol. 20, 609-624, 1996
- [20]. R. Chedid, S. Rahman, “*Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems*”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 12, No. 1, March 1997.

- [21]. J.K. Kaldellis, E. Kondili, A. Filios, “*Sizing a hybrid wind-diesel stand-alone system on the basis of minimum long-term electricity production cost*”, Applied Energy 83 1384–1403, 2006.
- [22]. G.J. Dalton, D.A. Lockington, T.E. Baldock, “Feasibility analysis of stand-alone renewable energy supply options for a large hotel”, Renewable Energy 33, 1475–1490, 2008.
- [23]. National Renewable Energy Laboratory “*Getting Started Guide for HOMER Version 2.1*”, April 2005.
- [24]. Κ. Σαζώνης, “*Βέλτιστη Σχεδίαση Υβριδικών Συστημάτων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας*”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιανουάριος 2006.
- [25]. Π. Ανδρεάδη, “*Βελτιστοποίηση δομής Απομονωμένων Υβριδικών Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με τη χρήση του GAMS*”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Απρίλιος 2008.
- [26]. Β. Νικολαΐδης, “*Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Αυτόνομων Υβριδικών Συστημάτων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Ανεμογεννητριών*”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Απρίλιος 2008.
- [27]. Γ. Α. Παναγιώτου, “*Τεχνοοικονομική Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 100 kW<sub>p</sub>*”, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010
- [28]. Σ. Σ. Γεωργόπουλος, “*Μελέτη και μοντελοποίηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενο από γεννήτρια ντίζελ, ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκή γεννήτρια*”, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2009.
- [29]. [www.nrel.gov/homer](http://www.nrel.gov/homer), National Renewable Energy laboratory (NREL).
- [30]. [www.eshops.gr](http://www.eshops.gr).