### ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

# ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

### ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Νικολαΐδης Βασίλης



Εξεταστική Επιτροπή: Καθ. Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)

Καθ. Σταυρακάκης Γεώργιος

Επίκ. Καθ. Μπούχερ Ματτίας

Χανιά, Απρίλιος 2008

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα πράγματα δεν τα γνωρίζουμε όπως είναι αλλά όπως μπορούμε να τα αντιληφθούμε

Ε. Κάντ

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη σχεδίαση υβριδικών συστημάτων που αξιοποιούν ταυτόχρονα την αιολική και την ηλιακή ενέργεια μετατρέποντάς τις σε ηλεκτρική. Τέτοιες κινήσεις είναι βασικές, όσον αφορά την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών συνεπειών από τη χρήση των συμβατικών πηγών ενέργειας (άνθρακας, πετρέλαιο, πυρηνική ενέργεια) και της ενδεχόμενης ανεπάρκειάς τους.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννητριών. Η διαστασιολόγηση αποσκοπεί στην αδιάλειπτη παροχή ενέργειας προς το φορτίο και στην ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους του συστήματος για όλη τη διάρκεια της ζωής του. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι αποτελούν μια αποδοτική κατηγορία αλγόριθμων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Για την οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν οικονομικοί δείκτες όπως η καθαρή παρούσα αξία.

Περιεχόμενα	
1.1 Εισαγωγή	
1.2 Η δομή της εργασίας12	
2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ1	5
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία15	
2.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας16	
2.3 Ακτινοβολία ενός Ήλιου	
2.4 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη	
2.4.1 Η εγκατάσταση των Φ/Β πλαισίων	
2.5 Οι συνιστώσες του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης	
2.6 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο	
2.7 Φωτοβολταϊκές διατάξεις	
2.7.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	
2.7.2 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου	
2.7.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων	
2.7.4 Υπολογισμός της ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων	
2.8 Η μέθοδος μοντελοποίησης των Φ/Β στοιχείων που ακολουθήθηκε στην	
παρούσα εργασία	
3. AIOΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	12
3.1.1 Ισχύς κινητικής ενέργειας ανέμου42	
3.1.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος	
3.1.3 Αιολικό δυναμικό	
3.2 Ανεμογεννήτριες	
3.2.1 Είδη Ανεμογεννητριών46	

3.2.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα	47
3.2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	49
3.2.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών	52
3.2.5 Ισχύς ανεμογεννητριών	53
3.2.6 Μέθοδος μοντελοποίησης της Α/Γ που έχει εφαρμοστεί παρούσα εργασία	στην 56
4. ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ - ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC	57
4.1 Συσσωρευτές-Στοιχεία	57
4.1.1 Είδη στοιχείων	58
4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους	ών και 59
4.2.1 Εσωτερική αντίσταση και ρυθμός εκφόρτισης	59
4.2.2 Θερμοκρασία	61
4.2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών	62
4.3 Είδη συσσωρευτών	67
4.3.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Pb-Acid)	67
4.3.2 Διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης	67
4.3.3 Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)	69
4.3.4 Εκφόρτιση των συσσωρευτών νικελίου καδμίου (Ni-Cd)	70
4.3.5 Μέθοδοι φόρτισης συσσωρευτών νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)	72
4.4 Μετατροπείς ισχύος DC/AC	75
5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	78
5.1 Εισαγωγή	78
5.2 Ιστορική αναδρομή	78
5.3 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος	81
Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	6

5.4 Η κωδικοποίηση των μεταβλητών	
5.5 Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής	
5.6 Μηχανισμοί Επιλογής	
5.7 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης	
6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	91
6.1 Πληθωρισμός	91
6.2 Επιτόκιο αναγωγής	92
6.3 Αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής (real discount Παρούσα Αξία (Net Present Value)	rate)-Καθαρή 93
7.ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΔΟΔΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤ	ΓΩΝ Φ/Β ΚΑΙ
Α/Γ	96
7.1 Εισαγωγή	
7.2 Πρώτη μέθοδος	
7.2.1 Διαστασιολόγηση	
7.2.2. Οικονομικές παράμετροι	100
7.3 Μέθοδος Homer V. 2.19	102
7.3.1 Εισαγωγή	102
7.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας	103
7.3.3 Οικονομική ανάλυση	103
7.3.5 Αρχεία εισόδου	104
7.3.6 Συσσωρευτές	104
7.3.7 Ανεμογεννήτριες	105
7.3.8 Φωτοβολταϊκά	105
7.3.9 Μετατροπείς DC/AC	105
7.3.10 Περιορισμοί	106

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	8
9.1 Εισαγωγή	149
9. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	149
8.7 Στάδια γενετικού αλγόριθμου	146
8.6 Σύγκλιση του αλγόριθμου	145
8.5.2 Αλγόριθμος διόρθωσης εσφαλμένων λύσεων	144
8.5.1 Αλγόριθμος εύρεσης πεδίου τιμών μιας μεταβλητής	144
8.5 Επιμέρους αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από γενετικό αλγόριθ	µo 144
8.4.2 Μετάλλαξη	141
8.4.1 Διασταύρωση	139
8.4 Πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης	139
ο.ο.∠ ινιετασχηματισμος αντικειμενικης συναρτησης σε συνα προσαρμογής	ιρτηση 138
8.3.1 Εφαρμογη του γενετικού αλγοριθμου	131
<ul> <li>8.3 Ινιοντελοποιηση του προβληματος με το γενετικό αλγόριθμο</li> <li>9.2.1 Εφαριομή του προβληματος με το γενετικό αλγόριθμο</li> </ul>	131
8.2.4 Ι Ιαραμετροί εισαγωγής στο γενετικό αλγόριθμο	126
8.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργικών μερών	121
8.2.2 Ι Ιροφίλ φορτίου	121
8.2.1 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά	121
8.2 Ο αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος	119
8.1 Γενικά χαρακτηριστικά	117
8. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ	117
7.4.2 Οικονομικές παράμετροι	114
7.4.1.Διαστασιολόγηση	111
7.3.12 Αποτελέσματα	107
7.3.11 Εκπομπές αερίων	106

9.2 Τάση λειτουργίας του συστήματος149	
9.3 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτών	
9.4 Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος	
9.5 Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών	
9.5.1 Φόρτιση	
9.5.2 Εκφόρτιση	
9.6 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού μοντέλου των συσσωρευτών	
10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ166	)
10.1 Εισαγωγή	
10.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης171	
10.2.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για μεταβαλλόμενο φορτίο 171	
10.2.2 Αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των γενετικών αλγόριθμων στην παρούσα εργασία	
10.2.3 Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης	
11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ193	;
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ196	;

# 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

# 1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί βασικό όρο για κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα. Καθ' όλη τη διάρκεια της ανθρώπινης πορείας γίνονταν προσπάθειες ώστε ο άνθρωπος να χρησιμοποιεί την ενέργεια με τρόπο που να βελτιώνει την ποιότητα της ζωής του. Η παραγωγή ενέργειας πλέον έχει να επιδείξει μεγάλη ποικιλία μεθόδων οι οποίες εξελίσσονται ανάλογα με τα αποτελέσματα της νεότερης επιστήμης. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνεται λόγος για την **αειφόρο** ανάπτυξη, όρο συνάρμοσης της οικονομικής ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος. Έτσι στο προσκήνιο εμφανίστηκαν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες αναπτύσσονται με ταχύτατο ρυθμό λόγω της εκτιμώμενης ανεπάρκειας των συμβατικών μορφών ενέργειας (Σχήμα 1.1), της παγκόσμιας πολιτικής (διάσκεψη Κιότο Δεκέμβρης 1992) και των οικονομικών κινήτρων τόσο στον ελλαδικό χώρο (Νόμος 3468/2006) όσο και παγκοσμίως (π.χ. Γερμανία: επιδότηση 125 €/m<sup>2</sup> εγκατάστασης) που ενθαρρύνουν τη χρησιμοποίησή τους [1].

Στα υβριδικά συστήματα ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.), όπως π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα και ανεμογεννήτριες, οδηγεί στη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας. Η επιλογή του καταλληλότερου, από οικονομοτεχνικής πλευράς, συνδυασμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθορίζεται από τη μεγιστοποίηση του βαθμού κάλυψης του φορτίου από τα υβριδικά σύστημα με βάση το ηλιακό και αιολικό δυναμικό της περιοχής. Το κόστος λειτουργίας τέτοιων συστημάτων είναι βασική παράμετρος για τον σχεδιασμό τους. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην εύρεση της οικονομικά βέλτιστης λύσης μέσω της κατάλληλης διαστασιολόγησης ενός αυτόνομου συστήματος για χρονικό ορίζοντα 25 ετών.

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, λαμβάνονται υπόψη φωτοβολταϊκά πλαίσια (Φ/Β), ανεμογεννήτριες (Α/Γ), μετατροπείς

DC/AC και φορτιστές για την ομαλή φόρτιση των συσσωρευτών. Υπολογίζεται σε ωριαία βάση η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή/και τις ανεμογεννήτριες και συγκρίνεται με το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί. Σε περίπτωση που η παραγωγή ενέργειας δεν επαρκεί για την κάλυψη του φορτίου, τότε το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από τους συσσωρευτές. Όταν προκύπτει περίσσεια ενέργειας ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών και πραγματοποιείται φόρτισή τους. Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχήμα 1.2. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τις ανεμογεννήτριες, τους μετατροπείς DC/AC, τους φορτιστές και τους διαύλους DC και AC (DC, AC bus) για τις συνδέσεις. Για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος λαμβάνεται υπόψη το αρχικό κεφάλαιο (κόστος εγκατάστασης), το κόστος συντήρησης των λειτουργικών μερών, το κόστος αντικατάστασης καθώς και το κόστος επισκευής λόγω βλαβών (π.χ. για τους μετατροπείς DC/AC). Επίσης χρησιμοποιούνται οικονομικοί παράμετροι όπως ο πληθωρισμός και το επιτόκιο αναγωγής ώστε να υπολογίζεται η παρούσα αξία του συστήματος.



Σχήμα 1.1 Γράφημα εκτιμώμενων χρόνων επάρκειας των συμβατικών πηγών ενέργειας.



**Σχήμα 1.2** Το γενικό διάγραμμα του αυτόνομου υβριδικού συστήματος με Φ/Β στοιχεία και Α/Γ που μελετάται στην παρούσα εργασία.

## 1.2 Η δομή της εργασίας

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλιακή ακτινοβολία και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εξετάζονται τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης κα αναλύεται ο τρόπος που υπολογίζεται, ενώ διερευνάται και η επίδραση του προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη στην ενεργειακή του απόδοση. Αναλύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η μέθοδος

μοντελοποίησης των Φ/Β πλαισίων η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την αιολική ενέργεια και τις ανεμογεννήτριες. Περιγράφονται οι τρόποι υπολογισμού της ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο και μελετάται, εν συντομία, η μέθοδος προσδιορισμού της καταλληλότητας μιας περιοχής για αιολική εκμετάλλευση. Επίσης αναλύονται οι παράμετροι που προσδιορίζουν την παραγωγή ενέργειας από Α/Γ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσσωρευτών και των μετατροπέων DC/AC. Εξετάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και διασαφηνίζονται βασικές έννοιες που σχετίζονται με τη λειτουργία τους. Επίσης αναλύεται η μέθοδος φόρτισης-εκφόρτισης των συσσωρευτών και οι παράγοντες που συσχετίζονται με τη διαδικασία αυτή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των βασικών εννοιών των γενετικών αλγόριθμων και ο τρόπος με τον οποίο οι γενετικοί αλγόριθμοι επιλύουν πολύπλοκα προβλήματα.

Το έκτο κεφάλαιο αναφέρεται σε οικονομικούς όρους που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Αναλύεται η έννοια του πληθωρισμού, του επιτοκίου αναγωγής και της παρούσας αξίας, εννοιών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία. Αναλύεται ο τρόπος σύνδεσης των συσσωρευτών (αναλυτικό και απλό μοντέλο), η μέθοδος υπολογισμού της παραγόμενης ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές και οι έλεγχοι για τη φόρτιση-εκφόρτιση των συσσωρευτών.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τρείς μέθοδοι διαστασιόλογησης φωτοβολταϊκών συστημάτων που χρησιμοποιούνται συχνά για τη θεωρητική ανάλυση και τον προσδιορισμό του κόστους ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος Φ/Β στοιχείων και Α/Γ.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Αρχικά, αναλύεται ο τρόπος διαστασιολόγησης που προκύπτει από τη χρήση των γενετικών αλγόριθμων. Στη συνέχεια υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια και αναλύεται το απλό και το σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της φόρτισης ή της εκφόρτισης.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία με τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων διαστασιολόγησης αυτόνομων υβριδικών συστημάτων που παρουσιάστηκαν στο όγδοο κεφάλαιο. Επίσης προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις αυτής της εργασίας.

# 2. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

# 2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Ο Ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τεράστιος θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας που μετατρέπει το υδρογόνο σε ήλιο μέσω αυτοσυντηρούμενων πυρηνικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στο εσωτερικό του:

$$4^{1}_{1}H → {4 \over 2}$$
 He + Ενέργεια (2.1)

Η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η Γη σε 10 μέρες είναι ισοδύναμη με την ενέργεια που μπορούν να παράγουν τα παγκόσμια αποθέματα σε καύσιμα (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Η διαπίστωση αυτή υποδεικνύει το πόσο μεγάλη πηγή ενέργειας είναι ο Ήλιος. Η εκπεμπόμενη ενέργεια απομακρύνεται ακτινικά προς το διάστημα ενώ η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι της τάξη των 5800 <sup>ο</sup>Κ και η εσωτερική του θερμοκρασία είναι 15.000.000 <sup>ο</sup>Κ.

Το φάσμα του ηλιακού φωτός, η κατανομή δηλαδή της έντασης της ακτινοβολίας στα διάφορα μήκη κύματος, εκτείνεται πρακτικά από 100 nm μέχρι 1400 nm. Το ορατό φάσμα είναι από 400 έως 700 nm και αποτελεί το 44% της ηλιακής ακτινοβολίας. Άνω των 700 nm, πέραν του ερυθρού, δηλαδή στην περιοχή του υπέρυθρου, βρίσκεται το 50 % της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ το υπόλοιπο 6% βρίσκεται στην περιοχή του υπεριώδους φωτός που είναι μικρότερη των 400 nm και αποτελεί την υπεριώδη ακτινοβολία (Σχήμα 2.1).

Η ακτινοβολία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας είναι αυτή που βρίσκεται στις μεγάλες συχνότητες. Σε αυτές τις συχνότητες αντιστοιχούν φωτόνια μεγάλης ενέργειας που είναι δυνατό να προκαλέσουν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι συχνότητες αυτές αποτελούν το 75% του φάσματος περίπου, ενώ οι υπόλοιπες δεν προκαλούν αξιοσημείωτα αποτελέσματα ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία [1].



**Σχήμα 2.1** Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (nm).

# 2.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι από τις βασικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς καθορίζει την ενέργεια που περιέχεται στο φώς του Ήλιου. Ως ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, Β, ορίζεται το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m<sup>2</sup> επιφάνειας σε 1 sec και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$B = \frac{E}{S^* t} = \frac{P}{S} (W / m^2)$$
 (2.2)

16

όπου:

- Ε είναι η προσπίπτουσα ενέργεια,
- S το εμβαδό της επιφάνειας,
- t ο χρόνος και
- Ρ η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ του Ήλιου και της επιφάνειας της Γης δίνεται από τη σχέση:

$$B_{r} = \frac{E_{o}}{4\pi r^{2}t} = \frac{P_{o}}{4\pi r^{2}}$$
(2.3)

όπου:

E<sub>o</sub> είναι η ολική ενέργεια που εκπέμπεται από τον Ήλιο σε χρόνο t και
 4πr<sup>2</sup> το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας της νοητής σφαίρας με ακτίνα r.

Παρατηρείται ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από τον Ήλιο. Η γεωγραφική θέση (γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος) ενός τόπου καθώς και το υψόμετρό του από την επιφάνεια της θάλασσας είναι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, η μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στην αλλαγή της πορείας της σε σχέση με την αρχική κατεύθυνση. Η αλλαγή της κατεύθυνσης οφείλεται σε δύο αιτίες:

α) Την ελαστική σκέδαση του φωτός στα ηλεκτρόνια των ατόμων ή μορίων του αερίου, όπου γίνεται επανεκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τα ηλεκτρόνια των μορίων. Η σκέδαση στα μόρια της ατμόσφαιρας ακολουθεί το νόμο του Rayleigh, σύμφωνα με τον οποίο η ένταση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από τα ηλεκτρόνια των μορίων των αερίων της ατμόσφαιρας είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης του μήκους κύματος λ και εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης, θ, σε σχέση με την αρχική κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

$$E_{_{\sigma\kappa\epsilon\delta.}} \sim \left(1 + \cos^2\theta\right) \left(1 + n^2\right)^2 \tag{2.4}$$

όπου:

n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου.

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας 17

β) τις μοριακές απορροφήσεις συντονισμού, όπου παρατηρείται μείωση της έντασης του καταμετρούμενου ηλιακού φωτός σ' όλο το εύρος του φάσματος. Τέτοιες απορροφήσεις προέρχονται από υδρατμούς (H<sub>2</sub>O), οξυγόνο (O<sub>2</sub>), όζον (O<sub>3</sub>), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) κ.α. που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, το όζον απορροφά την ακτινοβολία η οποία έχει μήκος κύματος μικρότερο από 400 nm [2].

## 2.3 Ακτινοβολία ενός Ήλιου

Εκτός από τους παράγοντες που έχουν περιγραφεί στην προηγούμενη παράγραφο, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά καταλήγει στην επιφάνεια της Γης επηρεάζεται δυναμικά από τη θέση του Ήλιου. Το μήκος της διαδρομής μέχρι τη στάθμη της θάλασσας χαρακτηρίζεται από την κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass). Η κλίμακα μάζας αέρα δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας από την κατακόρυφη διαδρομή (τη διαδρομή που θα έκανε ο Ήλιος αν βρισκόταν στο ζενίθ). Τα πεδία ΑΜ1, ΑΜ1.5 και ΑΜ2 αφορούν στο Ηλιακό φως, όπως αυτό υπολογίζεται στην επιφάνεια της Γης και αφού το φως διαγράψει τροχιά μήκους μία φορά, μία και ήμισυ και δύο φορές, αντίστοιχα το πάχος της ατμόσφαιρας. Θεωρώντας ότι το Ηλιακό φώς διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά μέσα στην ατμόσφαιρα, στις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις, οι ακτίνες σχηματίζουν γωνίες 0°,45° και 60°, αντίστοιχα, με την κατακόρυφη του τόπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (γωνία z). Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που απέχει όση είναι η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο. Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια της Γης αντιστοιχεί σε ΑΜ1 και έχει τυπική τιμή περίπου 950 W/m², ενώ για ΑΜ1.5 είναι περίπου 935 W/m<sup>2</sup> και για AM2 είναι περίπου700 W/m<sup>2</sup>. Η πυκνότητα ισχύος ΑΜ1.5 αποτελεί μια αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος

που δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς την διεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι και καθαρός ουρανός). Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα στρογγυλοποιείται στα 1000 W/m<sup>2</sup> και ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός Ήλιου (ή ενός πλήρους Ήλιου). Η ακτινοβολία ενός Ήλιου χρησιμοποιείται ως μονάδα σύγκρισης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία καθώς και ως μονάδα αναφοράς για τον καθορισμό της ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων



**Σχήμα 2.2** Το μήκος L που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης πάχους Η.

Για να υπολογιστεί ο αριθμός που τοποθετείται μετά το ακρωνύμιο AM, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$x = \frac{L}{H}$$
(2.5)

όπου:

L είναι το μήκος της διαδρομής που διανύουν οι ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης και

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η το πάχος της ατμόσφαιρας της Γης.

## 2.4 Ο προσανατολισμός του συλλέκτη

Σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότερη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας από ένα συλλέκτη παίζει η γωνία κλίσης και το αζιμούθιο. Το αζιμούθιο (ή διόπτευση) του Ήλιου αναφέρεται στην αντίστοιχη γωνία μεταξύ του κατακόρυφου επιπέδου, που περιέχει τον Ήλιο και του γεωγραφικού μεσημβρινού. Μετράται κατά τη φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού (clockwise), με αναφορά στην κατεύθυνση του Βορρά, από 0° έως 360°. Στα Φ/Β συστήματα συνηθίζεται η αναφορά του αζιμούθιου του Ήλιου ως προς την κατεύθυνση του Ηλιακού Νότου. Ο προσδιορισμός του Ηλιακού Νότου μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτρονικών οργάνων, τη στιγμή που ο Ήλιος βρίσκεται στο μεσημβρινό του τόπου στον οποίο γίνεται η συγκεκριμένη μέτρηση. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.3 το αζιμούθιο της ευθείας ΟΑ είναι 310°.



**Σχήμα 2.3** Η σχηματική απεικόνιση του αζιμούθιου με βάση τα σημεία του ορίζοντα.

Η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης, φ, είναι 0°. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο Ήλιος συνεχώς

μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Πρέπει λοιπόν να επιλεχθεί μια σταθερή κλίση που να μειώνει όσο το δυνατό περισσότερο τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Όταν η γωνία κλίσης ισούται με το γεωγραφικό πλάτος, λ, του τόπου, τότε οι ακτίνες του Ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο συλλέκτη δυο φορές το χρόνο (το μεσημέρι των ισημεριών). Αν θεωρήσουμε ως EL το ύψος (Elevation) του Ήλιου και Μ το ύψος κατά τη μεσουράνηση τότε το ύψος μεσουράνησης του Ήλιου, δηλαδή το ύψος κατά το οποίο ο Ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, αυξάνεται από την ελάχιστη τιμή ELM<sub>min</sub> = (90° -  $\lambda$ ) - 23.5° στις 22 Δεκεμβρίου μέχρι τη μέγιστη ELM<sub>max</sub> = (90° -  $\lambda$ ) + 23.5° στις 21 Ιουνίου και στη συνέχεια ελαττώνεται επανερχόμενο στην τιμή της 22<sup>ας</sup> Δεκεμβρίου. Αντίστοιχα, η γωνία των ακτινών του Ήλιου μεταβάλλεται κατά τη μεσουράνησή του από -23.5° έως +23.5° ως προς την κάθετη στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ένας προσεγγιστικός τρόπος είναι να επιλεγεί γωνία ίση με β = $\lambda$ -10° όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4α, όπου β είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Σε περίπτωση που το Φ/Β πλαίσιο έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί με δύο κλίσεις κατά τη διάρκεια του έτους, μπορεί να επιλεγεί για το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου - 22 Σεπτεμβρίου) κλίση  $β_{\theta}$ =λ-10° και για το χειμερινό εξάμηνο (22 Σεπτεμβρίου-21 Μαρτίου) κλίση  $β_{\chi}$ =λ+10° όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4β. Στην περίπτωση αυτή, η συνολική πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας θα είναι αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση που τα Φ/Β παραμένουν έχοντας σταθερή κλίση όλη τη διάρκεια του έτους [2].



**Σχήμα 2.4 (α)** Σταθερή στήριξη σε ετήσια βάση, με γωνία κλίσης β=λ-10° και **(β**) Εποχική ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη δυο φορές μέσα στο έτος (ΘΗ: Θερινό Ηλιοστάσιο, Ι: Ισημερίες, ΧΗ: Χειμερινό Ηλιοστάσιο).

#### 2.4.1 Η εγκατάσταση των Φ/Β πλαισίων

Καθώς η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει εξελιχθεί, πλέον οι συλλέκτες μπορούν να περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ή δύο. Όσον αφορά την περιστροφή γύρω από έναν άξονα, μπορεί να γίνεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, έτσι ώστε ο Ήλιος να βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα xx<sup>'</sup>. Η κίνηση σε δύο άξονες είναι πιο πολύπλοκη και επιτυγχάνεται με δύο διαδοχικές κινήσεις του συλλέκτη, μέσω ηλεκτρικών κινητήρων με έλεγχο στροφών για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα στην ηλιακή ακτινοβολία. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 και ονομάζεται σύστημα ανίχνευσης της πορείας του Ήλιου (Tracker). Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι διαφορετικές κλίσεις που μπορεί να λάβει ο συλλέκτης σε σχέση με την πορεία που κινείται ο Ήλιος καθώς διαγράφει τροχιά από την Ανατολή στη Δύση, ώστε να διατηρείται η καθετότητα πρόσπτωσης των ακτινών στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Αυτή η διάταξη έχει το μειονέκτημα της πρόσθετης οικονομικής επιβάρυνσης για τα μηχανολογικά και ηλεκτρονικά μέρη καθώς και του κινδύνου καταστροφής της εξαιτίας ισχυρών ανέμων. Για το λόγο αυτό ελέγχεται η ταχύτητα του ανέμου και σε περίπτωση που πνέουν ισχυροί άνεμοι τα πλαίσια διατάσσονται σε οριζόντια θέση ώστε να έχουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς τη διεύθυνση του ανέμου. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το ενεργειακό κέρδος που προκύπτει από την παραπάνω εφαρμογή μπορεί να αντισταθμιστεί από ένα Φ/Β σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί πλαίσια με σταθερή κλίση και ισχύ αιχμής περίπου 35% μεγαλύτερη της διάταξης του συστήματος ανίχνευσης της πορείας του Ήλιου [2].



**Σχήμα 2.5** Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ανίχνευσης της πορεία του Ήλιου (Tracker).

## 2.5 Οι συνιστώσες του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης

Καθώς οι ακτίνες του Ήλιου διέρχονται μέσα από την γήινη ατμόσφαιρα η έντασή τους μειώνεται καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, στην επιφάνεια της Γης φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η άμεση (beam) Β και η διάχυτη (diffuse) D, η οποία προκύπτει από τη σκέδαση στα μόρια του αέρα. Εξετάζοντας έναν συλλέκτη, εκτός από τις προαναφερθείσες συνιστώσες θα γίνει αναφορά και στην ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία γνωστή ως albedo ή λευκαύγεια (όρος που προκύπτει από το λατινικό albus που σημαίνει λευκό). Η συνιστώσα αυτή προκύπτει από το πηλίκο της έντασης ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μια επιφάνεια, που ονομάζεται συντελεστής ανάκλασης, r. Η συνολική ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης από τα έδαφος ακτινοβολίας. Αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο συλλέκτη και συμβολίζεται με G (Global Irradiation). Η ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία (albedo) εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή την επικάλυψη του εδάφους π.χ. από χιόνι ή γρασίδι και την πυκνότητα των νεφών. Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης, r, διάφορων επιφανειών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Τιμές του συντελεστή ανάκλασης διάφορων επιφανειών		
Είδος Επιφάνειας	r	
Επιφάνεια νερού	0.05	
Ασφαλτόστρωμα	0.070	
Αγρός σκοτεινόχρωμος	0.08	
Αγρός πράσινος	0.15	
Βραχώδεις επιφάνεια	0.20	
Επιφάνεια τσιμέντου	0.24-0.30	
Χιόνι	0.60	
Άμμος	0.40	

Η απευθείας και η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του συλλέκτη,
- την εποχή και
- τη σύσταση της ατμόσφαιρας τη δεδομένη χρονική στιγμή.

# 2.6 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο

Συνήθως είναι γνωστή η τιμή της ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, θεωρώντας ότι τα Φ/Β πλαίσια τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές γωνίες κλίσης, υπολογίστηκε αντίστοιχα η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στις κλίσεις αυτές.

Ο όρος irradiation αναφέρεται στην ενέργεια της ακτινοβολίας και έχει μονάδα μέτρησης Wh/m<sup>2</sup> ενώ ο όρος irradiance προσδιορίζει την ισχύ της ακτινοβολίας με μονάδα μέτρησης W/m<sup>2</sup>. Η σχέση που τις συνδέει είναι παρόμοια με αυτή που συνδέει την ισχύ με την ενέργεια δηλαδή η ενέργεια είναι το ολοκλήρωμα της ισχύος στην περίοδο του χρόνου. Η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία σε επιφάνεια με γωνία κλίσης  $\beta^{o}$ , είναι G( $\beta^{o}$ ) (Wh/m<sup>2</sup>) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$G_{d}(\beta^{\circ}) = R_{d}(\beta^{\circ}) + B_{d}(\beta^{\circ}) + D_{d}(\beta^{\circ})$$
(2.5)

όπου:

 $B_d(\beta^\circ)$  άμεση ακτινοβολία σε κλίση β (direct irradiation) και

 $D_d(\beta^\circ)$  η διάχυτη ακτινοβολία σε κλίση β (diffuse irradiation).

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.



**Σχήμα 2.6** Ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας, της ολικής, της άμεσης και της διάχυτης, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας.

Για την μέτρηση της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνεια με γωνία κλίσης β, αρχικά υπολογίζεται η ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο έχοντας ως δεδομένη τη συνολική ακτινοβολία G<sub>d</sub>(0°) σε μια ημέρα και θεωρώντας ότι η ακτινοβολία από αντανακλάσεις στο οριζόντιο επίπεδο είναι μηδενική, δηλαδή R<sub>d</sub>(0°) = 0. Οι υπολογισμοί γίνονται ανά μία ώρα καθώς η συνολική ενέργεια (irradiation) ισούται αριθμητικά με τη μέση τιμή της ισχύος (radiation) για την εκάστοτε ώρα.

Στο Σχήμα 2.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα για τον υπολογισμό της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε επιφάνεια με γωνία κλίσης β.



**Σχήμα 2.7** Τα βήματα της μεθόδου υπολογισμού της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας υπό γωνία β<sup>ο</sup>.

Η άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο,  $B_d(0^\circ)$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathsf{B}_{\mathsf{d}}(\mathsf{0}^{\circ}) = \frac{24}{\pi} \mathsf{B}_{\mathsf{o}} \varepsilon_{\mathsf{o}} \left( \cos\varphi \cos\delta \right) \left( \omega_{\mathsf{s}} \cos\omega_{\mathsf{s}} - \sin\omega_{\mathsf{s}} \right)$$
(2.6)

όπου:

B<sub>o</sub> είναι η ηλιακή σταθερά η οποία προσδιορίζει την πυκνότητα ισχύος της

ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που απέχει από τον Ήλιο ίση απόσταση με αυτή της Γης, χωρίς την ύπαρξη ατμόσφαιρας. Η τιμή της είναι ίση με 1367 W/m<sup>2</sup>,

ε<sub>0</sub> το τετράγωνο του λόγου της μέσης απόστασης Γης – Ήλιου προς την απόσταση Γης – Ήλιου και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_{o} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 d_{n}}{365}\right)$$
 (2.7)

d<sub>n</sub> είναι η ημέρα του χρόνου (1, 2,.., 365),

φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου,

δ η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ισημερινού επιπέδου και της ευθείας που ενώνει τη Γη με τον Ήλιο (solar declination) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(d_n + 284)\right]$$
 (2.8)

ω<sub>s</sub>: είναι η γωνία ανατολής του Ήλιου και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_{s} = -\arccos(-\tan\delta\tan\phi) \tag{2.9}$$

$$1: \cos\omega_s = -\tan\delta\tan\phi$$
 (2.10)

Η διάχυτη ακτινοβολία υπολογίζεται από το μοντέλο των Collares-Pereira και Rabl. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό ισχύει:

$$\kappa_{\tau} = \frac{G_{d}(0^{\circ})}{B_{d}(0^{\circ})} \kappa \alpha \imath \kappa_{d} = \frac{D_{d}(0^{\circ})}{G_{d}(0^{\circ})}$$
(2.11)

όπου: 
$${}_{\rm K_d}$$
 =0.99 για  ${\rm K_T} \le 0.17$  (2.12)

και

$$K_{d}$$
 = 1.188 - 2.272 $K_{T}$  + 9.473 $K_{T}^{2}$  - 21.856 $K_{T}^{3}$  + 14.648 $K_{T}^{4}$ 

με 
$$0.17 \le K_{T} \le 0.8$$
 (2.13)

ενώ ισχύει:

Έχοντας προσδιορίσει για κάθε ημέρα τα  $G_d(0)$  και  $B_d(0)$ , μπορούν να υπολογιστούν και οι τιμές ωριαίας ενέργειας (hourly irradiation)  $G_h(0)$  και  $D_h(0)$ . Το  $B_h(0)$  δίνεται από τη σχέση  $B_h(0) = G_h(0)-D_h(0)$ . Για τα  $G_h(0)$  και  $D_h(0)$  ισχύουν οι σχέσεις:

$$D_{h}(0^{\circ}) = r_{d}D_{d}(0^{\circ}) \kappa \alpha I G_{h}(0^{\circ}) = r_{g}G_{d}(0^{\circ})$$
(2.14)

όπου:

$$r_{d} = \frac{\pi(\cos\omega - \cos\omega_{s})}{24\omega_{s}\cos\omega_{s} - \sin\omega_{s}} \quad \text{kal} \quad r_{g} = r_{d}(a + b\cos\omega)$$
(2.15)

και ω είναι η ηλιακή ώρα της ημέρας ενώ τα a, b υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\label{eq:alpha} \begin{split} &\alpha = 0.409 - 0.5016 sin \bigl( \omega_s + 1.047 \bigr), \\ &b = 0.6609 + 0.4767 sin \bigl( \omega_s + 1.047 \bigr) \end{split} \tag{2.16}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις παραπάνω σχέσεις τα ω και ω<sub>s</sub> πρέπει να υπολογίζονται σε ακτίνια.

Αφού έχουν υπολογιστεί οι τιμές της συνολικής ωριαίας ενέργειας B<sub>h</sub>(0), G<sub>h</sub>(0), D<sub>h</sub>(0) μπορεί να ακολουθήσει ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών σε κεκλιμένο επίπεδο υπό γωνία  $\beta^{\circ}$ . Στη συνέχεια ακολουθεί η μέτρηση της ισχύος σε μονάδες W/m<sup>2</sup> για τις ακτινοβολίες B<sub>h</sub>( $\beta^{\circ}$ ), G<sub>h</sub>( $\beta^{\circ}$ ) και D<sub>h</sub>( $\beta^{\circ}$ ) από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mathsf{B}_{\mathsf{h}}(\beta^{\circ}) = \frac{\mathsf{G}_{\mathsf{h}}(0^{\circ})\mathsf{D}_{\mathsf{h}}(0^{\circ})}{\cos\theta_{\mathsf{zs}}} \max(0,\cos\theta_{\mathsf{s}})$$
(2.17)

$$\cos\theta_{s} = \sin\delta\sin(\varphi - \beta) + \cos(\varphi - \beta)\cos\omega$$
 (2.18)

και

όπου:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega$$
 (2.19)

$$\mathsf{R}_{\mathsf{h}}\left(\beta^{\circ}\right) = \mathsf{G}_{\mathsf{h}}\left(\beta^{\circ}\right) \frac{(1-\cos\beta)\mathsf{r}}{2}$$
(2.20)

όπου:

r είναι ο δείκτης ανάκλασης του εδάφους και εάν δεν είναι γνωστή η τιμή του, θεωρείται ίσος με 0.2.

Τέλος, για τον υπολογισμό της διάχυτης ακτινοβολίας υπό γωνία β  $D_h(\beta^o)$  χρησιμοποιείται το ανισοτροπικό μοντέλο του Klucher σύμφωνα με το οποίο ισχύει:

$$D_{h}(\beta^{o}) = \frac{\left(1 + k_{1}\cos^{2}\theta_{s}\sin^{2}\theta_{zs}\right)\left(1 + k_{1}\sin^{3}\frac{\beta}{2}\right)D_{h}(0^{o})(1 + \cos\beta)}{2}$$
(2.21)

όπου:

$$\kappa_{1} = 1 - \left(\frac{D_{h}\left(0^{\circ}\right)}{G_{h}\left(0^{\circ}\right)}\right)$$
(2.22)

Για τον υπολογισμό της συνολικής ωριαίας ενέργειας υπό κλίση β<sup>ο</sup> ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$G_{h}(\beta^{\circ}) = R_{h}(\beta^{\circ}) + D_{h}(\beta^{\circ}) + B_{h}(\beta^{\circ})$$
(2.23)

Για την εύρεση της συνολικής ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια ημέρα χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα της ποσότητας G<sub>h</sub> (β°)για μια ημέρα σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$G_{h}(\beta^{\circ}) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_{h}(\beta^{\circ}) dt$$
 (2.24)

Τα ω<sub>ss</sub> και ω<sub>ps</sub> δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$\omega_{ss} = -\omega_{ps} = \max\left\{\omega_{s}, -\arccos\left(-\tan\delta\tan(\varphi - \beta)\right)\right\}$$
(2.25)

όπου:

ω<sub>ss</sub> είναι η γωνία Ανατολής για γωνία κλίσης του συλλέκτη β<sup>ο</sup> και

 $ω_{ps}$  η γωνία Δύσης για γωνία κλίσης του συλλέκτη  $β^o$ .

Οι ποσότητες ω και t(h) συνδέονται από την παρακάτω σχέση:

$$\omega(^{\circ})=15(t-12)$$
 (2.26)

## 2.7 Φωτοβολταϊκές διατάξεις

#### 2.7.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Γάλλο Φυσικό Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα όταν συγκεκριμένες διατάξεις εκτεθούν στο φως. Οι Αμερικάνοι Adams και Day το 1876 χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο σεληνίου είχαν κάνει επίδειξη αυτού του φαινομένου. Η απόδοση σε αυτή την περίπτωση ήταν μόνο 1%. Το 1905 ο Albert Einstein διατύπωσε την εξήγηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου (υπόθεση του φωτονίου). Το 1949 οι Αμερικάνοι Shockley, Bardeen και Brattain ανακάλυψαν το τρανζίστορ διευκρινίζοντας τη φυσική των p και n ενώσεων των ημιαγωγικών υλικών. Το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο με απόδοση περίπου 6% κατασκευάστηκε το 1956, ενώ αργότερα κατασκευάστηκε το φωτοβολταϊκό κύτταρο από πυρίτιο, το οποίο λειτουργούσε με απόδοση 10%. Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο από πυρίτιο είναι κατασκευασμένο από μία ειδική ημιαγωγική δίοδο (φωτοδίοδος), στην οποία παρατηρείται μια ροή ηλεκτρικών φορέων όταν αυτό δεχθεί φως. Όταν το φως προσπίπτει στο κύτταρο, τότε τα φωτόνια απορροφώνται από τα ηλεκτρόνια του πυριτίου. Η ενέργεια των φωτονίων διεγείρει τα ηλεκτρόνια σε μια υψηλότερη ενεργειακή

στάθμη, οπότε αυτά κινούνται αφήνοντας πίσω τους μία οπή. Έτσι λοιπόν τα απορροφημένα φωτόνια δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Το ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει τα ηλεκτρόνια από τις οπές και η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται κυμαίνεται μεταξύ 0.5-0.6 Volts. Η ύπαρξη των ηλεκτρικών φορέων και της διαφοράς δυναμικού δημιουργούν ρεύμα το οποίο μπορεί να διαρρέει ένα εξωτερικό κλειστό κύκλωμα [10].

#### 2.7.2 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το πιο απλό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια πηγή ρεύματος η οποία ελέγχεται από μια δίοδο όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8 και διαρρέεται από ρεύμα που δίνεται από την παρακάτω σχέση [11]:

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right)$$
 (2.27)

όπου:

ι<sub>σh</sub> είναι το ρεύμα που δημιουργείται από το ηλιακό φώς,

I<sub>d</sub> το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο,

 $I_s$  το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης (reverse saturation current) και έχει προσεγγιστική τιμή ίση με 10<sup>-8</sup>A και

m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου (m=1, για ιδανική δίοδο).

Το V<sub>T</sub> δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{\rm T} = \frac{kT}{q} \tag{2.28}$$

32

όπου:

k είναι η σταθερά Boltzmann,

q το φορτίο του ηλεκτρονίου (1.6 x 10<sup>-19</sup> C) και

T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.



Σχήμα 2.8 Ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Το ρεύμα για το οποίο είναι V=0, ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_{ph}$$
 (2.29)

Αντίστοιχα, η τάση για την οποία I=0, ονομάζεται τάση ανοικτοκύκλωσης και είναι:

$$E_{oc} = mV_{T} ln \left(\frac{l_{ph}}{l_{s}}\right)$$
(2.30)

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το κύκλωμα ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι αντιστάσεις R<sub>s</sub> και R<sub>p</sub> που έχουν προστεθεί στο πραγματικό στοιχείο αναπαριστούν τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται σε επίπεδο ημιαγωγών και οδηγούν σε απώλεια ενέργειας.



**Σχήμα 2.9** Κύκλωμα πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = I_{ph} - I_{s} \left( e^{\frac{V}{mV_{T}}} - 1 \right) - \frac{V + IR_{s}}{R_{p}}$$
(2.31)

Οι παραδοχές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη Σχέση (2.31) είναι οι εξής: η επίδραση της  $R_p$  είναι αμελητέα, το  $I_{ph}=I_{sc}$  και ισχύει η σχέση  $e^{V+IR_s}/mv_T$ >>1. Οπότε το ρεύμα του στοιχείου εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = I_{sc} \left( 1 - e^{\frac{V - E_{oc} + IR_{s}}{mV_{T}}} \right)$$
(2.32)

Στη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης του Φ/Β στοιχείου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 παρατηρείται ότι υπάρχει ένα σημείο όπου η ισχύς μεγιστοποιείται (V<sub>m</sub>,I<sub>m</sub>). Το σημείο αυτό ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος MPP (maximum power point) και δίνεται από τον κατασκευαστή μετρημένο σε ακτινοβολία 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 και θερμοκρασία 25°C, συνθήκες δηλαδή που θεωρούνται ιδανικές για τη λειτουργία του πλαισίου και περιγράφονται από το αρκτικόλεξο STC (Standard Test Conditions).



Σχήμα 2.10 Χαρακτηριστική Ι-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor) ονομάζεται το πηλίκο:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} E_{oc}}$$
(2.33)

Η ενεργειακή απόδοση ενός στοιχείου, n, (Σχήμα 2.11), ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο προς την ισχύ που παράγεται από το στοιχείο (την ισχύ δηλαδή που αντιστοιχεί στο ρεύμα I<sub>ph</sub>):

$$n = \frac{P_m}{P_L} = \frac{I_m V_m}{P_L}$$
(2.34)



**Σχήμα 2.11** Χαρακτηριστική P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

### 2.7.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα Φ/Β στοιχεία αναπτύσσουν μικρή τάση στην έξοδό τους (0.5 – 1 Volt) οπότε κρίνεται απαραίτητη η σύνδεσή τους έτσι ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Έτσι οι κατασκευαστές παρέχουν Φ/Β στοιχεία σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται Φ/Β πλαίσια (modules) και περιλαμβάνουν κάποιο αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα. Τα στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία πάνω σε ανθεκτικό φύλλο μετάλλου ή πλαστικού που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η μπροστινή όψη καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή πλαστικού. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν σε
σειρά ώστε να έχουμε μεγιστοποίηση της τάσης εξόδου (π.χ. όταν πρόκειται να συνδεθούν με το δίκτυο της Δ.Ε.Η) ή παράλληλα ώστε να διατηρείται η τάση και να αυξάνουμε το ρεύμα εξόδου [12].

Έστω ότι ένα πλαίσιο αποτελείται από Ν<sub>p</sub> παράλληλα στοιχεία και Ν<sub>s</sub> σε σειρά, τότε το ρεύμα Ι<sub>M</sub> και η τάση του συστήματος V<sub>M</sub> δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{\rm M} = IN_{\rm p} \tag{2.35}$$

και

$$V_{\rm M} = VN_{\rm s} \tag{2.36}$$

όπου Ι και V είναι η ένταση και η τάση αντίστοιχα του κάθε στοιχείου. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I<sub>scm</sub> και η τάση ανοικτοκύκλωσης, E<sub>ocm</sub>, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_{scm} = I_{sc}N_{p}$$
(2.37)

και

$$E_{ocm} = E_{oc}N_{p}$$
 (2.38)

Έτσι καταλήγουμε ότι το ρεύμα που διαρρέει ένα πλαίσιο Ι<sub>Μ</sub> είναι:

$$I_{M} = I_{scm} \left( 1 - e^{\frac{V_{M} - E_{ocm} + I_{M}R_{sm}}{N_{s}V_{t}m}} \right)$$
(2.39)

όπου:

$$R_{sm} = \frac{R_s N_s}{N_p}$$
(2.40)

Στο σημείο μέγιστης ισχύος στις εξισώσεις (2.32) και (2.39) το ρεύμα του δεύτερου μέλους μπορεί να αντικατασταθεί με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η χαρακτηριστική καμπύλη του Φ/Β στοιχείου να μη διαφοροποιηθεί σημαντικά από αυτή στο Σχήμα 2.10 [3]. Πέραν της κατάστασης STC (Παράγραφος 2.2.1) στα Φ/Β πλαίσια αναγράφεται και το χαρακτηριστικό της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας, NCOT (Nominal Operating Cell Temperature), που εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων των πλαισίων υπό τις εξής συνθήκες:

- το Φ/Β πλαίσιο βρίσκεται σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος,
- η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι 800W/m<sup>2</sup>,
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα είναι 20 °C και
- η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 1m/s.

Όσο μικρότερη είναι η τιμή της ονομαστικής θερμοκρασίας για ένα πλαίσιο, τόσο μικρότερη είναι η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος συγκριτικά με άλλο, ίδιας ισχύος αιχμής, με μεγαλύτερη θερμοκρασία NOCT. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η μεταβολή της μέγιστης ισχύος εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου το οποίο από χώρο σταθερής θερμοκρασίας 24°C μεταφέρεται σε υπαίθριο χώρο κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεσημεριού, ώστε η πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας να μένει πρακτικά σταθερή (G<sub>t</sub> = 930  $W/m^2$ ). Παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της θερμοκρασίας θ<sub>c</sub> (°C) η ισχύς εξόδου P<sub>m</sub> μειώνεται.



**Σχήμα 2.12** Τυπική μορφή της μεταβολής της θερμοκρασίας ενός Φ/Β πλαισίου και της αντίστοιχης αποδιδόμενης από αυτό μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος.

## 2.7.4 Υπολογισμός της ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ένα Φ/Β πλαίσιο εγκαταστημένο στην ύπαιθρο λειτουργεί διαρκώς σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές που αντιστοιχούν στον ορισμό της ισχύος αιχμής του. Αυτό δημιουργεί μια ανακολουθία στις προβλεπόμενες τιμές ισχύος που αναφέρονται από τον κατασκευαστή και τις τελικές τιμές απόδοσης. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{sc} = C_1 G \tag{2.41}$$

G είναι η ένταση της προσπίπτουσα ακτινοβολίας.

Η σταθερά  $C_1$ δίνεται από τη σχέση:

$$C_{1} = \frac{I_{sc} \left( \frac{1000 W}{m^{2}} \right)}{1000} \left( \frac{Am^{2}}{W} \right)$$
 (2.42)

Η τάση ανοικτοκύκλωσης μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία των στοιχείων με ρυθμό:

$$\frac{dE_{oc}}{dT_{c}} = -2.3 \qquad \left(\frac{mV_{o}}{C}\right)$$
(2.43)

Η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, Τ<sub>a</sub>, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$T_{c} - T_{a} = C_{2}G$$
 (2.44)

όπου:

$$C_{2} = \frac{NCOT - 20}{800} \qquad \begin{pmatrix} ^{\circ}Cm^{2}/W \end{pmatrix}$$
(2.45)

Τέλος, η αντίσταση  $R_s$  των στοιχείων των πλαισίων δεν επηρεάζεται από τις παραπάνω συνθήκες και δίνεται από τη σχέση:

$$R_{s} = \left(1 - \frac{FF}{FF_{0}}\right) \frac{E_{oc}}{I_{sc}}$$
(2.46)

όπου τα FF και FF₀ συνδέονται με τον εξής εμπειρικό τύπο:

$$FF = \frac{V_m I_m}{E_{oc} I_{sc}} = FF_0 (1 - r_s)$$
(2.47)

Το rs προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$r_{s} = \frac{R_{s}}{E_{oc}/I_{sc}}$$
(2.48)

και το FF<sub>o</sub> εκφράζεται από τη σχέση:

$$FF_{0} = \frac{E_{oc} - \ln(E_{oc} + 0.72)}{E_{oc} + 1}$$
(2.49)

Γνωρίζοντας τη μέγιστη ισχύ εξόδου από τον κατασκευαστή, P<sub>Mm</sub>, καθώς και τις τιμές των N<sub>p</sub> και N<sub>s</sub> προκύπτει εύκολα η μέγιστη ισχύς ενός στοιχείου σε δεδομένες συνθήκες:

$$P_{m} = \frac{P_{Mm}}{N_{s}N_{p}}$$
(2.50)

Οι παραδοχές που γίνονται για να ισχύει η παραπάνω μέθοδος είναι:  $E_{oc}$ >15, r<sub>s</sub><0.4 και m=1. Από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται η τιμή για τα I<sub>m</sub> και V<sub>m</sub>, οπότε υπολογίζεται και η ζητούμενη μέγιστη ισχύς του στοιχείου P<sub>m</sub>. Τέλος, μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς του πλαισίου από την παρακάτω σχέση:

$$P_{Mm} = N_s N_p P_m$$
(2.51)

# 2.8 Η μέθοδος μοντελοποίησης των Φ/Β στοιχείων που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία

Για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων του υβριδικού συστήματος θεωρούμε τα Φ/Β πλαίσια ως σύστημα με εισόδους και εξόδους. Για τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων εισάγουμε των αριθμό των στοιχείων ανά πλαίσιο, N<sub>c.</sub>, την τάση εξόδου, V<sub>m.</sub> στο σημείο μέγιστης ισχύος και το αντίστοιχο ρεύμα, Ι<sub>m</sub>, τη μέγιστη ισχύ, Ρ<sub>m</sub>, που προκύπτει από τα V<sub>m</sub> και Ι<sub>m</sub>,τη τάση ανοικτοκύκλωσης, E<sub>oc</sub>, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I<sub>sc</sub> και την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των διατάξεων, NCOT. Όσον αφορά тα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται οι τιμές για τη μέση ημερήσια μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία G (Wh/m<sup>2</sup>) σε οριζόντιο επίπεδο και τη μέση ημερήσια ή μηνιαία θερμοκρασία Τ (°C). Οι έξοδοι του συστήματος είναι η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (W) και οι ώρες διαθεσιμότητας αυτής της ισχύος για την κλίση και για την ημέρα που θα γίνει ο υπολογισμός. Η ισχύς υπολογίζεται από τις εξισώσεις (2.41) έως (2.51). Η εξίσωση (2.41) λαμβάνει ως είσοδο τη μέση ωριαία ακτινοβολία που προκύπτει αν διαιρέσουμε τη συνολικά αποδιδόμενη ημερήσια ακτινοβολία, [εξίσωση (2.24)], με τις ώρες διαθεσιμότητας της ακτινοβολίας αυτής [εξίσωση (2.25) και εξίσωση (2.26)].

# 3. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## 3.1 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος είναι το αποτέλεσμα της μεγάλης ποσότητας ηλιακής ενέργειας που δέχεται ο ισημερινός σε σχέση με τους πόλους γεγονός που προκαλεί την ευρείας κλίμακας μεταφορά ρευμάτων στην ατμόσφαιρα. Εκτιμάται ότι περίπου το 1% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Μια λεπτομερής έρευνα που έγινε το 1982 από επιστήμονες όλων των ευρωπαϊκών χωρών, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι στην Ευρώπη υπάρχουν σημεία κατάλληλα για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών 400.000 MW, οι οποίες θα μπορούν να παράγουν συνολικά 4.000 TWh ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή είναι περίπου το τριπλάσιο των ετήσιων αναγκών της Ευρώπης και αντιστοιχεί σε μία πετρελαιοπηγή με παραγωγή 16 εκατομμύρια βαρέλια. Αυτό που μπορεί να τονιστεί είναι ότι αν και ο άνεμος είναι μία στοχαστική πηγή ενέργειας, αν εξεταστεί μέρα με τη μέρα καταλήγει να είναι μια αξιόπιστη οικολογική πηγή ενέργειας.

### 3.1.1 Ισχύς κινητικής ενέργειας ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου σ' έναν τόπο καθορίζεται από τις διαφορές πίεσης στην ατμόσφαιρα, σε μεγάλη κλίμακα και διαμορφώνεται από το ανάγλυφο της περιοχής. Η άμεση σχέση του ανέμου και της περιοδικής εμφάνισης του Ήλιου έχει ως αποτέλεσμα την εποχική και ετήσια περιοδικότητα της εμφάνισης της μέσης ταχύτητάς του [2]. Η κινητική ενέργεια του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι μια ποσότητα αέρα διέρχεται από ένα τμήμα κυλινδρικού αγωγού με σταθερή διατομή. Η κινητική ενέργεια του τμήματος αυτού είναι:

$$dE_{k} = \frac{1}{2}dmu^{2} = \frac{1}{2}pSdlu^{2} = \frac{1}{2}pSu^{3}dt$$
(3.1)

όπου:

dm είναι η μάζα του τμήματος του κυλινδρικού αγωγού, η οποία ισούται με dm = pdV,

ρ η πυκνότητα του αέρα,

dV ο όγκος του τμήματος του κυλινδρικού αγωγού με εμβαδό διατομής S,

dl το μήκος της διαδρομής που διανύει ο αέρας κινούμενος με ταχύτητα u και ισούται με dl = Udt .

Συνεπώς, η ισχύς της κινητικής ενέργειας προκύπτει ίση με:

$$P_a = \frac{1}{2}pSu^3$$
(3.2)

Η πυκνότητα του αέρα, ρ, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$p(g/cm^3) = 1.225 \frac{288.15}{T(^{\circ}K)} \frac{P(mbar)}{1013.3}$$
 (3.3)

Δηλαδή, η ισχύς της κινητικής ενέργειας του ανέμου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα καθώς και από την ατμοσφαιρική πίεση στο συγκεκριμένο τόπο.

#### 3.1.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται καθ' ύψος και το οριακό στρώμα μέσα στο

οποίο συμβαίνουν σημαντικές αλλαγές στη ταχύτητα είναι από μερικά δεκάδες μέτρα ως 2 km. Οι επικρατέστερες θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ταχύτητας είναι ο εκθετικός νόμος και ο λογαριθμικός νόμος. Κατά τον εκθετικό νόμο, η ταχύτητα v<sub>2</sub> σε ύψος h<sub>2</sub> δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \tag{3.4}$$

όπου:

v1 η ταχύτητα σε ύψος h1 και

a ο συντελεστής που εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους (Πίνακας3.1).

Σύμφωνα με τον λογαριθμικό νόμο η ταχύτητα ν του ανέμου σε ύψος h υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$v = v^* \frac{1}{k} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right)$$
(3.5)

όπου:

ν<sup>\*</sup> είναι η ταχύτητα τριβής (εκφράζει την αντίσταση της επιφάνειας του εδάφους) (m/sec),

k η σταθερά Karman (παίρνει τιμές από 0.35-0.4) και

z<sub>0</sub> ο συντελεστής που εκφράζει τη τραχύτητα του εδάφους (m).

Ο συντελεστής τραχύτητας του λογαριθμικού νόμου, z<sub>0</sub>, συνδέεται με τον εκθέτη a από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$z_0 = 15.25e^{-\frac{1}{a}}$$
 (3.6)

44

Πίνακας 3.1 Συντελεστές μεταβολής της ταχύτητας				
Περιγραφή περιοχής	Συντελεστής εκθετικού νόμου	Συντελεστές λογαριθμικού νόμου		
	(a)	z₀(m)	k	
Θάλασσα, λίμνες με μήκος ανάντη τουλάχιστον 5km	0.10	0.005	0.161	
Έδαφος επίπεδο με μεμονωμένα εμπόδια, περιοχές αεροδρομίων	0.15	0.05	0.189	
Αγροτικές περιοχές με μεμονωμένα εμπόδια, σειρές δέντρων, φάρμες κ.τ.λ.	0.20	0.20	0.208	
Αγροτικές ή βιομηχανικές περιοχές, δάση	0.25	0.5	0.222	
Κέντρα μεγάλων πόλεων	0.30	1	0.233	

Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιήθηκε ο λογαριθμικός νόμος, ο οποίος δεν είναι τόσο ακριβής αλλά έχει χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Σε αντίθεση με τον εκθετικό νόμο που απαιτεί αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω των πολλών παραμέτρων που πρέπει να υπολογιστούν (υπολογισμός ταχύτητας τριβής, της σταθεράς Karman, που όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1 μεταβάλλεται ανάλογα με το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους) και που ο μη ακριβής προσδιορισμός τους επιφέρει σφάλματα ανάλογα των διαφορών των δύο νόμων [3]. Δηλαδή, όταν δεν οριστούν με ακρίβεια οι παράμετροι του εκθετικού τον καθιστούν τόσο αποδοτικό όσο και το λογαριθμικό.

## 3.1.3 Αιολικό δυναμικό

Το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου μιας περιοχής, είναι από τις πιο ενδελεχείς διαδικασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να κριθεί σκόπιμη ή όχι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μια περιοχή. Η σκοπιμότητα μπορεί να έγκειται στην επαρκή (ενεργειακή) τροφοδοσία της περιοχής ή σε ενδεχόμενο επενδυτικό ενδιαφέρον. Επειδή ο άνεμος έχει στοχαστική συμπεριφορά, δηλαδή καθοδηγείται από το τυχαίο, το σφάλμα στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού είναι αναπόφευκτο κάτι που καθιστά κρίσιμη την ακρίβεια στις μετρήσεις. Η διαπίστωση του εκμεταλλεύσιμου αιολικού δυναμικού σε μία συγκεκριμένη θέση, προκύπτει μόνο από επιτόπιες μακροχρόνιες μετρήσεις οι οποίες επικεντρώνονται στην ταχύτητα και τη διεύθυνση των ανέμων συμπεριλαμβανομένων και των ανεμολογικών χαρτών της περιοχής. Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι μία πρώτη εκτίμηση του κατά πόσο η περιοχή έχει σημαντικό αιολικό δυναμικό. Εάν η μέση ταχύτητα μιας περιοχής δεν υπερβαίνει τα 5 m/s τότε είναι ακατάλληλη, ενώ αντίθετα τιμές από 8 m/sec και άνω θεωρούνται ιδανικές περιπτώσεις. Στον ελλαδικό χώρο και κυρίως στα νησιά του Αιγαίου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζει μια μέση ετήσια τιμή από 7 έως 11 m/s, η οποία υπερκαλύπτει την αποδοτική για τις ανεμογεννήτριες, περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κατ' επέκταση τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια των νησιών αυτών.

## 3.2 Ανεμογεννήτριες

### 3.2.1 Είδη Ανεμογεννητριών

Η ανεμογεννήτρια (Α/Γ) είναι η διάταξη που έχει σκοπό να μετατρέψει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Από την εποχή εμφάνισής της μέχρι τις μέρες μας έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης τόσο ως προς τον τύπο της όσο και ως προς τα υποσυστήματα της (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.τ.λ.). Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης και μεταφοράς ενέργειας του ανέμου. Τα κυριότερα είδη Α/Γ είναι οριζόντιου και κάθετου άξονα.

#### 3.2.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι οι μηχανές τύπου Savonius και οι μηχανές τύπου Darrieus. Οι μηχανές τύπου Savonius (Σχήμα 3.1) πρωτοεμφανίστηκαν το 1931 από τον Savonius. Τα χαρακτηριστικά τους είναι η σχετικά μεγάλη ροπή, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος, ο μικρός λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ, για βέλτιστο συντελεστή ισχύος, το περιορισμένο μέγεθος, η εξαιρετική απλότητα και η οικονομικότητα της κατασκευής.



**Σχήμα 3.1** Τελική όψη ανεμογεννήτριας τύπου Savonius

Οι μηχανές τύπου Darrieus (Σχήμα 3.2) κατασκευάστηκαν από τον Γάλλο G. J. M.Darrieus το 1920 και μέχρι το 1970 βρήκαν μεγάλη εφαρμογή στον Καναδά.

Τα χαρακτηριστικά τους είναι ότι παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές αρχικές ροπές και υψηλές ταχύτητες σχετικά με τον άνεμο. Έτσι έχουμε ικανοποιητική παραγωγή ενέργειας σχετικά με το μέγεθος, το βάρος και το κόστος της μηχανής. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου των μηχανών είναι τα καμπύλα πτερύγια (edge beater), που μπορεί να είναι ένα, δύο τρία ή περισσότερα.



**Σχήμα 3.2** Ανεμογεννήτρια τύπου Darreus.

Γενικά τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα των μηχανών κάθετου άξονα είναι τα εξής:

48

• έχουν μικρό βάρος,

- είναι απλές και οικονομικές στην κατασκευή,
- δεν απαιτούν μεγάλο πύργο,
- οι μηχανισμοί τοποθετούνται στο έδαφος,
- δεν απαιτούν συστήματα προσανατολισμού σχετικά με τον άνεμο, αφού δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές διεύθυνσης του και
- δεν απαιτούν σύστημα ελέγχου των στροφών του δρομέα στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων του ανέμου.

Τα σπουδαιότερα μειονεκτήματα των μηχανών κάθετου άξονα είναι τα εξής:

- έχουν χαμηλή απόδοση σχετικά με τις μηχανές τύπου έλικα και
- οι μηχανές τύπου Darrieus χαρακτηρίζονται από έλλειψη ροπής εκκίνησης με αποτέλεσμα ο δρομέας αυτού του τύπου της μηχανής να μην εκκινεί μόνος του. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας δρομέας εκκίνησης τύπου Savonius. Δηλαδή οι Α/Γ τύπου Darrieus δε λειτουργούν αυτόνομα και είναι πιο πολύπλοκες ως διατάξεις μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

#### 3.2.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Σχήμα 3.3) είναι οι πιο διαδεδομένες καθώς έχουν καλύτερη απόδοση από τις Α/Γ κάθετου άξονα. Η αύξηση του ύψους της Α/Γ αυξάνει την παραγόμενη ισχύ και εκείνο που καθορίζει το ύψος είναι η τραχύτητα του εδάφους και τα εμπόδια στη ροή του ανέμου.



Σχήμα 3.3 Λεπτομέρεια ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.

Τα υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι τα παρακάτω:

- Πυλώνας: Ο πυλώνας, για μεγάλες Α/Γ, είναι το βασικότερο στοιχείο από πλευράς κόστους και στηρίζει το κέλυφος και το δρομέα. Κατά την κατασκευή του λαμβάνονται υπόψη η μάζα που υποστηρίζει, οι καταπονήσεις που δέχεται από κάμψεις και στρέψεις, η ταχύτητα περιστροφής και η αντοχή του στις φυσικές φθορές.
- Κέλυφος: Το κέλυφος στηρίζεται πάνω στον πυλώνα και περιβάλλει τα μηχανικά μέρη και τη γεννήτρια και τα προστατεύει. Πρέπει, επομένως, να είναι ευρύχωρο για να γίνεται εφικτή η εποπτεία και ενδεχομένως η συντήρηση των εξαρτημάτων και να αερίζεται επαρκώς για να ψύχεται σωστά η γεννήτρια. Μερικές μεγάλες Α/Γ έχουν σύστημα κλιματισμού.
- Δρομέας: Ο δρομέας αποτελείται από την πλήμνη και την πτερύγωση. Σχεδιάζεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απολαβή ενέργειας, η αντοχή σε δύσκολες συνθήκες και το ελάχιστο δυνατό κόστος κατασκευής. Πλήμνη είναι το τμήμα της μηχανής πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια και το οποίο συνδέεται εσωτερικά του κελύφους με το σύστημα μετάδοσης κίνησης (άξονα). Τα πτερύγια είναι το βασικότερο στοιχείο της μηχανής όσον αφορά την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Κατά τη σχεδίαση τους λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι, όπως η ελαστικότητα, η αντοχή, το βάρος, η αεροδυναμική, το μήκος κ.λπ. Τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων στους μικρούς ανεμοκινητήρες είναι συνήθως πολυουρεθάνη, υαλόνημα και ξύλο, υλικά που δεν υποφέρουν από διάβρωση αλλά έχουν άγνωστη συμπεριφορά σε εναλλασσόμενη φόρτιση που οδηγεί σε πρόωρη γήρανση του υλικού.
- Σύστημα προσανατολισμού: Στους ανεμοκινητήρες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται ένας σερβοκινητήρας (κινητήρας που γίνεται έλεγχος της θέσης του άξονά του) ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και προσανατολίζει το δρομέα κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Στους μικρού ή μεσαίου μεγέθους ανεμοκινητήρες χρησιμοποιείται καθοδηγητικό πτερύγιο (ουρά), που τόσο η επιφάνεια της ουράς όσο και η θέση της, ως προς τον άξονα του πυλώνα, επιλέγονται έτσι ώστε σε απόκλιση του ανέμου 10°, να εξασκείται ροπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα στον άνεμο ικανή να επαναφέρει την αντίρροπη δύναμη λόγω γυροσκοπικού φαινομένου.
- Μηχανικό σύστημα: Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα, την έδρασή του, το μηχανισμό μετάδοσης κίνησης, τους ελαστικούς

συνδέσμους για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων και το σύστημα πέδησης (δισκόφρενα). Σκοπός του μηχανικού συστήματος είναι να μεταβιβάσει την κίνηση της πλήμνης και των πτερυγίων, δια μέσου του άξονα, στην ηλεκτρογεννήτρια.

- Ηλεκτρική γεννήτρια: Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι υπεύθυνη για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες διαχωρίζονται στις ασύγχρονες, τις σύγχρονες και τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Οι ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις μικρού ή μεσαίου μεγέθους Α/Γ (μέχρι 500 kW), λόγω κυρίως της στιβαρότητας τους και του μικρού τους κόστους. Τα μειονεκτήματα των ασύγχρονων μηχανών είναι ότι δεν έχουν τη δυνατότητα παραγωγής της άεργου ισχύος που απαιτείται για την λειτουργία τους και έτσι υποχρεωτικά τροφοδοτείται με εξωτερική πηγή άεργου ισχύος, π.χ. σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών στους ακροδέκτες της. Αυτό ονομάζεται αυτοδιέργεση της ασύγχρονης γεννήτριας και δημιουργεί προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με την προστασία του δικτύου διανομής που είναι συνδεδεμένη η Α/Γ. Η χρησιμοποίηση σύγχρονων γεννητριών παρουσιάζει μεν το πλεονέκτημα ότι παράγεται η άεργος ισχύ που απαιτείται για τη διέγερση της μηχανής και για τις καταναλώσεις που τροφοδοτεί, αλλά μειονεκτεί στο γεγονός ότι οι διακυμάνσεις των στροφών που προκαλούνται κατά τις απότομες μεταβολές του ανέμου μεταφέρονται απευθείας στο δίκτυο, εκτός αν συνδέονται μέσω μετατροπέα AC-AC. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι πολύ πιο εύκολο να ελεγχθούν από τις αντίστοιχες του εναλλασσόμενου. Έχουν όμως σοβαρά μειονεκτήματα: είναι ογκώδεις, ευπαθείς, έχουν μεγάλο κόστος και δεν υπάρχει δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας με τα δίκτυα αλλά και τροφοδοτήσεως συσκευών που λειτουργούν μόνο με εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Σύστημα ελέγχου: Οι ανεμογεννήτριες έχουν ένα Ηλεκτρονικό Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου (ΗΣΑΕ), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του ανεμοκινητήρα εντός των προδιαγραφών του. Ορισμένες διεργασίες που εκτελεί είναι:

i) Έλεγχος αεροδυναμικής πέδησης,
ii) Έλεγχος μηχανικού συστήματος πέδησης,
iii) Έλεγχος ταλαντώσεων του συστήματος και
iv) Έλεγχος περιστροφής.

Έτσι το ΗΣΑΕ αποφασίζει για την ενεργοποίηση ή την παύση της λειτουργίας της Α/Γ λαμβάνοντας υπόψη τις ενδείξεις του ανεμομέτρου και τις

προδιαγραφές του συστήματος.

#### 3.2.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών παρουσιάζονται παρακάτω:

#### Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (u<sub>in</sub>)

Εκφράζει την ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του ανέμου που η Α/Γ μπορεί να λειτουργήσει. Συνήθως είναι 3-5 m/sec.

#### Ονομαστική ταχύτητα (u<sub>r</sub>)

Εκφράζει την τιμή της ταχύτητας του ανέμου που η μηχανή αποδίδει τη μέγιστη ισχύ με την μικρότερη δυνατή καταπόνηση. Με λίγα λόγια είναι η ιδανική ταχύτητα λειτουργίας της Α/Γ.

#### Ταχύτητα αποκοπής (u<sub>co</sub>)

Εκφράζει την τιμή της ταχύτητας του ανέμου πάνω από την οποία το σύστημα ελέγχου της μηχανής σταματά τη λειτουργία της για λόγους αντοχής και υπερθέρμανσης. Συνήθως είναι 15-25 m/sec.

#### Ονομαστική ισχύς (P<sub>r</sub>)

Εκφράζει την τιμή της ισχύος κατά την λειτουργία της Α/Γ στην ονομαστική της ταχύτητα. Η μηχανή σ' αυτή την κατάσταση λειτουργεί βέλτιστα, καθώς έχει μέγιστη απόδοση με την ελάχιστη καταπόνηση.

#### Διάμετρος πτερυγίων

Αυτή η παράμετρος έχει πολύ μεγάλη σημασία γιατί από αυτήν καθορίζεται το κόστος της φτερωτής και εξαρτάται η ισχύς της Α/Γ.

#### Ύψος πυλώνα

Αυτή η παράμετρος παίζει ρόλο τόσο στη διαμόρφωση του κόστους, όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Α/Γ, αφού η ταχύτητα του ανέμου, άρα και η ισχύς που αυτή μπορεί να δώσει σε μία Α/Γ, εξαρτάται από το ύψος.

## 3.2.5 Ισχύς ανεμογεννητριών

Η ισχύς του ανέμου που προσπίπτει σε μια επιφάνεια Α (m<sup>2</sup>) προκύπτει από τη σχέση:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{w}} = \frac{1}{2} \rho \mathsf{A} \mathsf{u}_{\mathsf{w}}^3 \tag{3.7}$$

όπου:

ρ η πυκνότητα του αέρα kg/m<sup>3</sup> και

u<sub>w</sub> η ταχύτητα του αέρα m/s.

Η ισχύς P<sub>m</sub> με την οποία αποδίδεται έργο στην αιολική μηχανή χαρακτηρίζει τη δυνατότητά της για παραγωγή περαιτέρω μηχανικού έργου από τη διάταξη αυτή. Επειδή ένα τμήμα της μάζας του αέρα που προσπίπτει στην πτερωτή κατ' ανάγκη τη διαπερνά χωρίς να αποδίδει σ' αυτήν την ενέργειά της, η μέγιστη μηχανική ισχύς P<sub>wm</sub> που θα μπορούσε να αποδώσει, θεωρητικά, ο άνεμος στην πτερωτή της Α/Γ είναι μικρότερη και ανάλογη της ισχύος P<sub>w</sub> που δημιουργείται από τον άνεμο που προσπίπτει στην παρακάτω σχέση:

$$P_{wm} = C_{p}P_{w} = C_{p}\frac{1}{2}\rho A u_{w}^{3}$$
(3.8)

όπου:

C<sub>p</sub> είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής της έλικας (Coefficient of Power).

Για τη μελέτη του C<sub>p</sub> ορίζεται η αδιάστατη παράμετρος, λ, ως το πηλίκο της γραμμικής ταχύτητας, U<sub>edge</sub> (m/s), περιστροφής του άκρου του πτερυγίου ακτίνας R (m) και συχνότητας περιστροφής ω (Hz) με τη ταχύτητα του ανέμου U<sub>w</sub> (m/s), όπου:

$$U_{edge} = \omega R \tag{3.9}$$

και

$$\lambda = \frac{U_{edge}}{U_{w}}$$
(3.10)

Ο Betz διατύπωσε ότι ο ιδανικός συντελεστής απόδοσης της πτερωτής είναι 0.593 δηλαδή μόνο το 59.3% της ισχύος του ανέμου που προσπίπτει σε μια επιφάνεια (P<sub>w</sub>) μπορεί να αξιοποιηθεί. Στην πράξη ο C<sub>p</sub> είναι μικρότερος του ορίου Betz και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (Σχήμα 3.4) και τη διαμόρφωση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας.



**Σχήμα 3.4** Τυπική γραφική παράσταση της εξάρτησης του συντελεστή C<sub>p</sub> από την ταχύτητα του ανέμου.

Η συνάρτηση που εκφράζει τη καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 3.5) είναι:

$$P(u) = \begin{cases} 0, 0 \le u \le u_{in} \\ P_r \left(\frac{u}{u_r}\right)^2, u_{in} \le u \le u_r \\ P_r, u_r \le u \le u_{co} \\ 0, u \ge u_{co} \end{cases}$$
(3.11)

όπου:

Pr είναι η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας (W),

u<sub>in</sub> η ταχύτητα εκκίνησης παραγωγής ενέργειας (m/s) και

u<sub>co</sub> η ταχύτητα αποκοπής (m/s).



**Σχήμα 3.5** Η ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

55

# 3.2.6 Μέθοδος μοντελοποίησης της Α/Γ που έχει εφαρμοστεί στην παρούσα εργασία

Για μελέτη των ανεμογεννητριών του υβριδικού συστήματος тn OI ανεμογεννήτριες θεωρήθηκαν ως σύστημα με εισόδους και εξόδους. Η είσοδος του συστήματος είναι η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου, το ύψος μέτρησης του ανέμου, το ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και η χαρακτηριστική ισχύος της ανεμογεννήτριας που παρέχεται από τον κατασκευαστή της. Στην έξοδο του συστήματος υπολογίζεται η ισχύς που παράγει η ανεμογεννήτρια. Εάν η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι γνωστή για το ύψος του πυλώνα τότε προσεγγίζεται από τον εκθετικό νόμο (Σχέση 3.4) με δεδομένη την παράμετρο Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστή η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας για δεδομένη ταχύτητα, τότε την υπολογίζουμε γραμμικά από τη Σχέση (3.12). Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής: δεδομένων των διαδοχικών ταχυτήτων u1 και u2 που έχουν αντίστοιχα ισχύ εξόδου P1 και P2, η ισχύς για την άγνωστη ταχύτητα u<sub>x</sub> ορίζεται ως P<sub>x</sub> και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{x} = P_{1} + \frac{P_{2} - P_{1}}{U_{2} - U_{1}} (U_{x} - U_{1})$$
(3.12)

Τέλος, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν ανεμογεννήτριες που έχουν ενσωματωμένους φορτιστές (ρυθμιστές τάσης) ώστε να φορτίζονται κατάλληλα οι συσσωρευτές. Συνεπώς δε χρειάστηκε να δημιουργηθεί ξεχωριστό μοντέλο για φορτιστές όπως στις φωτοβολταϊκές διατάξεις.

# 4. ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ - ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC

## 4.1 Συσσωρευτές-Στοιχεία

Ο συσσωρευτής (μπαταρία) είναι μια διάταξη που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω αντιδράσεων οξείδωσης και αναγωγής. Αν και ο όρος συσσωρευτής είναι ο πλέον διαδεδομένος η βασική ηλεκτροχημική μονάδα είναι το στοιχείο. Κάθε συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό ανάλογα με την επιθυμητή τάση ή χωρητικότητα εξόδου. Το στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- την άνοδο ή το αρνητικό ηλεκτρόδιο που δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης,
- την κάθοδο ή το θετικό ηλεκτρόδιο που δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης και
- τον ηλεκτρολύτη που δημιουργεί το κατάλληλο περιβάλλον για μεταφορά των ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Συνήθως ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό, νερό ή άλλος διαλύτης που συμβάλλει στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης.

Η άνοδος επιλέγεται με βάση την αγωγιμότητα, την ευκολία κατασκευής και το κόστος. Το υδρογόνο είναι το καταλληλότερο στοιχείο για την άνοδο, αλλά πρακτικά κατά τη χρησιμοποίησή του προκαλείται εξασθένηση της ηλεκτροχημικής του δυνατότητας. Στην πράξη τα μέταλλα χρησιμοποιούνται για την άνοδο. Ο ψευδάργυρος είναι το πιο δημοφιλές, μιας και συνοψίζει τις παραπάνω απαιτήσεις. Επίσης χρησιμοποιείται το λίθιο το οποίο είναι το πιο ελαφρύ μέταλλο με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, το οποίο το χάνει εύκολα για να γίνει ιόν.

Η κάθοδος θα πρέπει να είναι ένα καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά με τον ηλεκτρολύτη. Το οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις περιπτώσεις των συσσωρευτών zinc-air με άμεση εισαγωγή του από το περιβάλλον. Παρά ταύτα, συνήθως οξείδια μετάλλων (ενώσεις του οξυγόνου με μέταλλα) χρησιμοποιούνται για την κάθοδο ενώ αλογόνα και σουλφίδια (ενώσεις που περιέχουν S<sup>2-</sup>) μαζί με τα οξείδιά τους χρησιμοποιούνται για ειδικά συστήματα συσσωρευτών.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει ιονική αγωγιμότητα και να μην είναι ηλεκτρικά αγώγιμος ώστε να μην προκληθεί βραχυκύκλωμα. Ακόμα πρέπει να μην προκαλεί ηλεκτροχημικές αντιδράσεις με τα υλικά των ηλεκτροδίων, να μην επηρεάζεται από την αλλαγή της θερμοκρασίας, να είναι ακίνδυνος στη χρήση του και να έχει χαμηλό κόστος.

Η άνοδος και η κάθοδος είναι ηλεκτρικά απομονωμένες (στο κελί, cell) ώστε να αποφεύγεται η μεταξύ τους αντίδραση που προκαλεί βραχυκύκλωμα και είναι βυθισμένες στον ηλεκτρολύτη. Κατασκευαστικά χρησιμοποιείται ένα διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη χώρισμα. Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορα σχήματα (επίπεδο, πρισματικό, κυλινδρικό), ενώ σφραγίζεται ώστε να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη.

### 4.1.1 Είδη στοιχείων

Πρωτογενή στοιχεία ή στοιχεία πρώτης τάξης: Τα πρωτογενή στοιχεία δεν επαναφορτίζονται γι' αυτό αποσύρονται μόλις εκφορτιστούν. Αν και είναι μια φθηνή επιλογή (μηδενική συντήρηση) με μεγάλη διάρκεια ζωής και μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για μικρούς και μεσαίους ρυθμούς εκφόρτισης, τα πρωτογενή στοιχεία δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για μη αυτόνομα συστήματα.

Επαναφορτιζόμενα ή στοιχεία δεύτερης τάξης: Τα δευτερογενή στοιχεία μπορούν να επαναφορτιστούν έπειτα από το πέρας της ενεργειακής τους απόδοσης. Αυτό γίνεται με εφαρμογή ρεύματος με φορά αντίθετη της φοράς εκφόρτισης. Τα δευτερεύοντα στοιχεία χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης και καλή ενεργειακή απόδοση όταν ο ρυθμός εκφόρτισης διατηρείται χαμηλός.

# 4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των συσσωρευτών και χαρακτηριστικά λειτουργίας τους

## 4.2.1 Εσωτερική αντίσταση και ρυθμός εκφόρτισης

Η απόδοση ενός συσσωρευτή είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων οι οποίοι δεν μπορούν εξ' αρχής να οριστούν, με αποτέλεσμα οι συσσωρευτές να έχουν διαφορετική συμπεριφορά από αυτή που αναγράφει ο κατασκευαστής τους. Για παράδειγμα, οι συνθήκες αποθήκευσης (θερμοκρασία, υγρασία) ή ο χρόνος αποθήκευσης δε μπορούν να εξεταστούν αυστηρά. Αν ο χρόνος αποθήκευσης είναι μεγάλος ο συσσωρευτής θα αποφορτίζεται γρηγορότερα υπό συνθήκες γρήγορης εκφόρτισης απ' ότι ένας καινούριος συσσωρευτής.

Όταν ένα στοιχείο εκφορτίζεται η τάση του είναι μικρότερη της θεωρητικής τιμής. Αυτό οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση του στοιχείου και στην πόλωση. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η πτώση τάσης σε σχέση με τη θεωρητική (ιδανική) κατάσταση και την πραγματική (καμπύλη α, β). Παρατηρείται ότι η τάση δεν είναι σταθερή, αλλά καθώς περνά ο χρόνος, μειώνεται μέχρι να εκφορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής, ενώ στην ιδανική περίπτωση η τάση είναι σταθερή. Η πτώση τάσης οφείλεται στην πόλωση των ηλεκτροδίων και στην εσωτερική αντίσταση των στοιχείων.

Η χαρακτηριστική καμπύλη α είναι παρόμοια της καμπύλης β, αλλά αναπαριστά ένα στοιχείο με μεγαλύτερη εσωτερική αντίσταση ή υψηλότερο ρυθμό εκφόρτισης. Όσο η εσωτερική αντίσταση ή ο ρυθμός εκφόρτισης αυξάνεται τόσο η τάση μειώνεται και η χαρακτηριστική της τάσης προς το χρόνο παρουσιάζει καμπύλη.



**Σχήμα 4.1** Χαρακτηριστική τάσης στοιχείου για διαφορετικό ρυθμό εκφόρτισης και διαφορετική εσωτερική αντίσταση.

Όσο ο ρυθμός εκφόρτισης του συσσωρευτή αυξάνεται, η τελική τάση εκφόρτισης (τάση αποκοπής) ελαττώνεται και ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή μειώνεται. Αν ο συσσωρευτής βρίσκεται στη τάση αποκοπής υπό συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης, τότε αν μειώσουμε το ρυθμό εκφόρτισης, η τάση της θα αυξηθεί. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας και του χρόνου ζωής, μέχρι τη νέα τάση αποκοπής για το καινούριο ρυθμό εκφόρτισης. Παραδείγματος χάρη, ένας συσσωρευτής που χρησιμοποιείται για το φλας μιας φωτογραφικής μηχανής έχει πολύ υψηλό ρυθμό εκφόρτισης. Αν προσεγγίσει τη τάση αποκοπής κατά το τέλος της διάρκειας ζωής του μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άλλη συσκευή (π.χ. ρολόι) που έχει μικρότερο ρυθμό εκφόρτισης. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 ο συσσωρευτής εκφορτίζεται αρχικά με τον υψηλότερο ρυθμό (καμπύλη α) μέχρι την τάση αποκοπής και διαδοχικά ο ρυθμός εκφόρτισης μειώνεται. Η τάση παρατηρούμε ότι αυξάνεται για το νέο ρυθμό εκφόρτισης και μειώνεται μέχρι να προσεγγίσει πάλι τη τάση αποκοπής.



**Σχήμα 4.2** Χαρακτηριστική τάσης εκφόρτισης στοιχείου για (επαναλαμβανόμενους) διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης α>β>γ>δ.

### 4.2.2 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία κατά την οποία ο συσσωρευτής εκφορτίζεται έχει άμεση συνέπεια στη διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή και τη τάση του. Αυτό οφείλεται στην εξασθένηση της χημικής δραστηριότητας (ηλεκτρολύτης, χημικές διεργασίες) και στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό παρατηρείται και στο Σχήμα 4.3 όπου εφαρμόζεται ο ίδιος ρυθμός εκφόρτισης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία Τ<sub>4</sub> αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου. Η καταλληλότερη θερμοκρασία για τη λειτουργία του συσσωρευτή είναι μεταξύ 20 °C και 40 °C. Στις υψηλότερες θερμοκρασίες η εσωτερική αντίσταση μειώνεται και η αρχική τάση εκφόρτισης αυξάνεται με αποτέλεσμα την αύξηση της παρεχόμενης ενέργειας. Στον αντίποδα όμως, ενώ η χημική δραστηριότητα αυξάνεται παρατηρείται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης (self-discharge), κατά το οποίο μειώνεται η

διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή ακόμα και όταν δεν παρέχεται ενέργεια.



**Σχήμα 4.3** Χαρακτηριστική εκφόρτισης τάσης στοιχείου για διαφορετικές θερμοκρασίες T<sub>1</sub><T<sub>2</sub><T<sub>3</sub><T<sub>4.</sub>

### 4.2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Οι έννοιες που χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν ή να περιγράψουν την κατάσταση των συσσωρευτών ποικίλουν και οι πιο σημαντικές είναι οι παρακάτω:

• Εσωτερική αντίσταση (Internal resistance): Είναι η αντίσταση που προκύπτει μεταξύ των ηλεκτροδίων του στοιχείου και οφείλεται στον ηλεκτρολύτη (Σχήμα 4.4). Κυκλωματικά η εσωτερική αντίσταση είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τη πηγή προκαλώντας πτώση τάσης (Σχήμα 4.5),

• Κατάσταση φόρτισης (State Of Charge): Ορίζει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του συσσωρευτή εκφρασμένη σε ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας. Η χωρητικότητα (Capacity) των ηλεκτρικών στοιχείων μετράται σε Ah. Η μονάδα Ah μετρά ηλεκτρικό φορτίο (1 Ah=3600 Cb), Βάθος εκφόρτισης (Depth Of Discharge): Ορίζει το επίπεδο εκφόρτισης ενός συσσωρευτή εκφρασμένο σε ποσοστό της συνολικής χωρητικότητάς του.
 Ο βαθμός εκφόρτισης είναι ανεξάρτητος της χωρητικότητας του συσσωρευτή και συνήθως κυμαίνεται από 20% έως 90% και

 Κύκλος ζωής (battery cycle life): Είναι το σύνολο των πλήρων κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που μπορεί να αποδώσει ένας συσσωρευτής. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού της διάρκειας ζωής του συσσωρευτή βασίζεται στην εσωτερική αντίσταση. Σε αυτή την περίπτωση υπολογίζονται οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης μέχρι η εσωτερική αντίσταση να γίνει 1.3 φορές μεγαλύτερη από την αρχική της τιμή [17]. Η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή είναι, συνήθως, μεγαλύτερη από αυτή που δηλώνει ο κατασκευαστής μιας και μπορεί να συνεχίζεται η λειτουργία του συσσωρευτή με χαμηλότερη ενεργειακή απόδοση, δηλαδή να εκφορτίζεται σε συντομότερο διάστημα.

Τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από έναν συσσωρευτή, υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή των κύκλων πλήρους ενέργειας με την ονομαστική χωρητικότητα. Ένας κύκλος πλήρους ενέργειας είναι ένας κύκλος πλήρους φόρτισης-εκφόρτισης. Στην παρακάτω εξίσωση υπολογίζονται τα συνολικά Ah:

$$Ah_{batterylife} = C_{nom} \sum_{i=0.2}^{\overline{i=0.8}} DOD(i) NoCycles(i)$$
(4.1)

όπου:

Ah<sub>batterylife</sub> είναι τα συνολικά Ah που μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν από το συσσωρευτή,

C<sub>nom</sub> η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή (Ah),

DOD το βάθος εκφόρτισης (%) και

NoCycles ο αριθμός των κύκλων ζωής για το συγκεκριμένο DOD.



**Σχήμα 4.4** Εσωτερική αντίσταση ενός στοιχείου συσσωρευτή.



**Σχήμα 4.5** Κυκλωματική αναπαράσταση της εσωτερικής αντίστασης ενός στοιχείου συσσωρευτή.

Ρυθμός εκφόρτισης (Discharge Rate): είναι η αναλογία φόρτισης ή εκφόρτισης ενός συσσωρευτή. Για παράδειγμα, αν ένας συσσωρευτής έχει χωρητικότητα 250 Ah και εκφορτίζεται με σταθερό ρεύμα 50 A, τότε εκφορτίζεται με 0.2C ή C/5 και

• Αυτοεκφόρτιση (Self-Discharge): είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εσωτερικές χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στο συσσωρευτή με αποτέλεσμα τη βαθμιαία αποφόρτισή του. Για τους συσσωρευτές Μολύβδου-

οξέος ο βαθμός αυτοεκφόρτισης είναι πολύ μικρότερος του 0.5% ανά ημέρα στους 25 °C.

Η αυτοεκφόρτιση του αρνητικού πόλου είναι πιο γρήγορη ειδικά αν το στοιχείο έχει επικολλημένα μεταλλικά ιόντα που λειτουργούν ως καταλύτες. Για παράδειγμα, το αντιμόνιο (Sb) από το θετικό ηλεκτρόδιο λόγω διαβρώσεως αντιδρά με το αρνητικό ηλεκτρόδιο, όπου και επικάθεται, προκαλώντας αντιδράσεις εκφόρτισης. Για να προστατέψουμε το συσσωρευτή από την αυτοεκφόρτιση χρησιμοποιούμε ένα πλέγμα από αντιμόνιο (Sb) ή κράμα αντιμονίου, όπως το Ca-Pd. Η διαφορετικές καταστάσεις χωρητικότητας των συσσωρευτών ανάλογα με την προσθήκη αντιμονίου και κράματος αντιμονίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.



**Σχήμα 4.6** Κατάσταση χωρητικότητας συσσωρευτή κατά τη διάρκεια αποθήκευσής του.

Άλλο ένα χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι οι διάφορες τάσεις που προσδιορίζουν τη λειτουργία τους και για συσσωρευτή μολύβδου-οξέος δίνονται στον Πίνακα 4.1:

• Τάση Ανοικτοκύκλωσης (open-circuit voltage): τάση όταν δε διαρρέεται από ρεύμα και προσεγγίζει τη θεωρητική τάση,

• **Ονομαστική Τάση** (nominal voltage): είναι η χαρακτηριστική τάση λειτουργίας ενός συσσωρευτή, π.χ. 1.5 V για συσσωρευτή Zn-Mn,

 Τάση Λειτουργίας (operating voltage): τάση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας (φόρτισης-εκφόρτισης) του συσσωρευτή, η οποία είναι μικρότερη της τάσης ανοικτοκύκλωσης,

• *Μέση Τάση* (average voltage): είναι η τιμή της μέσης τάσης κατά την εκφόρτιση,

• Τάση Μέσου Σημείου (midpoint voltage): είναι η κεντρική τάση κατά την εκφόρτιση του στοιχείου ή του συσσωρευτή και

• Τάση Αποκοπής (end or cut-off voltage): είναι η οριακή τιμή τάσης όταν έχει εκφορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής. Όταν η τάση μειωθεί πέραν της τιμής αυτής, πρέπει να σταματά η εκφόρτιση του συσσωρευτή.

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικές τιμές τάσεων για συσσωρευτή μολύβδου- οξέος			
Τάση Ανοικτοκύκλωσης (V)	2.1		
Ονομαστική Τάση (V)	2.0		
Τάση Λειτουργίας (V)	1.8-2.0		
Τάση Αποκοπής* (V)	1.75	1.5	

\*Στην τάση αποκοπής οι δύο τιμές που προκύπτουν είναι για μεσαίο και υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, αντίστοιχα.

## 4.3 Είδη συσσωρευτών

## 4.3.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Pb-Acid)

Τα είδη των συσσωρευτών ποικίλουν (μέγεθος, χωρητικότητα, σύνθεση) ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται. Οι συσσωρευτές μολύβδουοξέος 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 θειικού 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.

### 4.3.2 Διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης

Η διαδικασία φόρτισης γίνεται με εφαρμογή σταθερής τάσης, ή σταθερού ρεύματος στους πόλους του συσσωρευτή. Η χαρακτηριστική της τάσης ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου-οξέος φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Για να πετύχουμε ομοιόμορφη φόρτιση ελέγχουμε αν έχουμε παράλληλες συστοιχίες συσσωρευτών. Τότε η πρώτη είναι καλύτερη μέθοδος μιας και η τάση του συστήματος είναι σταθερή, ενώ αν έχουμε σε σειρά σύνδεση ενδείκνυται η δεύτερη, μιας και έχουμε σταθερό ρεύμα. Από χημικής πλευράς οι αντιδράσεις που προκύπτουν κατά τη φόρτιση είναι οι παρακάτω:

Kάθοδος (-): 
$$PbSO_4 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow Pb + H_2SO_4$$
 (4.1)  
Άνοδος (+):  $PbSO_4 + 2OH^- \rightarrow PbO_2 + H_2SO_4 + 2e^-$ 

Η ολική δράση κατά τη φόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:

$$2PbSO_4 + 2H_2O \longrightarrow \frac{\phi \delta \rho \pi \sigma \eta}{2} PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb$$
(4.2)



**Σχήμα 4.7** Χαρακτηριστική τάσης στοιχείου ενός συσσωρευτή Μολύβδου-οξέος για φόρτιση-εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα.

Στους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος κατά το στάδιο της φόρτισης διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται υπεροξείδιο του μολύβδου στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb<sup>2+</sup> και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων, ο Pb<sup>4+</sup> ανάγεται σε Pb<sup>2+</sup> παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλ. τα ιόντα Pb<sup>2+</sup>, ενώνονται με θειικά ιόντα (SO<sup>2-</sup>) από το διάλυμα και σχηματίζουν ξανά τον θειικό μόλυβδο επάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ, παράγεται νερό και αραιώνεται το διάλυμα. Με τη φόρτιση που επακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητα του διαλύματος αποκαθίσταται στην κανονική τους τιμή. Η ονομαστική τάση για κάθε στοιχείο είναι 2V, ενώ η τάση αποκοπής για μεσαίου ρυθμού εκφόρτιση είναι 1.75V και μπορεί να φτάσει το 1V σε περίπτωση πολύ υψηλού ρυθμού εκφόρτισης. Αν στα άκρα του συσσωρευτή συνδεθεί ένα εξωτερικό φορτίο τότε συμβαίνει εκφόρτιση. Δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο, η οποία οξειδώνεται, προς την κάθοδο (οξείδιο μετάλλου) που ανάγεται. Το ηλεκτρικό κύκλωμα ολοκληρώνεται στον ηλεκτρολύτη με τη ροή ανιόντων και κατιόντων στην άνοδο και τη κάθοδο αντίστοιχα. Η ολική δράση κατά την εκφόρτιση περιγράφεται από την αντίδραση:

$$PbO_{2} + 2H_{2}SO_{4} + Pb \xrightarrow{\epsilon \kappa \phi \phi \rho \tau i \sigma \eta}{} 2PbSO_{4} + 2H_{2}O$$
(4.3)

#### 4.3.3 Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Οι συσσωρευτές νικελίου καδμίου (Ni-Cd) χρησιμοποιούν σίδηρο (Fe) και κάδμιο στην άνοδο και οξείδιο του νικελίου στην κάθοδο. Η πρώτη εφαρμογή τους ήταν το 1899 από τον Waldemar Jungner ο οποίος με ελάχιστες τροποποιήσεις από τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, που ήταν τότε ο μοναδικός ανταγωνιστής, κατάφερε αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας. Τα λεπτά και πλατιά φύλλα των ηλεκτροδίων τοποθετούνται το ένα επάνω στο άλλο, με ένα λεπτό πορώδες μονωτικό φύλλο ανάμεσά τους και τυλίγονται σε ρολό. Πριν κλείσει τελείως το στοιχείο εγχέεται μέσα τους ηλεκτρολύτης (υδροξείδιο του καλίου). Επειδή η όλη κατασκευή καταλήγει να έχει πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση, μπορούν να περάσουν μεγάλα ρεύματα. Τα στοιχεία

έχουν μία βαλβίδα εκτόνωσης. Στα απλά στοιχεία η βαλβίδα είναι μία και μίας χρήσης, ενώ σ' αυτά που προορίζονται για υπερταχεία φόρτιση οι βαλβίδες είναι πολλές και πολλαπλών χρήσεων. Όταν χρειαστεί να εκτονωθούν οι εσωτερικές πιέσεις η βαλβίδα ανοίγει, αλλιώς το στοιχείο κινδυνεύει να εκραγεί. Αν η βαλβίδα μείνει ανοικτή, θα εξατμιστεί ο ηλεκτρολύτης (τα άσπρα άλατα που παρουσιάζονται γύρω από ένα παλιό στοιχείο). Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου νικελίου-καδμιου είναι 1.2 Volt, ενώ η τάση ανοικτοκύκλωσης κυμαίνεται από 1.25 έως 1.35 Volt.

## 4.3.4 Εκφόρτιση των συσσωρευτών νικελίου καδμίου (Ni-Cd)

Παρ' όλο που ο ρυθμός εκφόρτισης και η θερμοκρασία είναι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός συσσωρευτή (Παράγραφος 4.2), στο συγκεκριμένο τύπο συσσωρευτών η επίδραση είναι πολύ μικρότερη. Έτσι μπορούν να εκφορτίζονται σε μεγάλους ρυθμούς χωρίς να φθείρονται. Η χημική αντίδραση κατά την εκφόρτιση είναι η παρακάτω:

$$2NiOOH + 2H_{2}O + Cd \xrightarrow{\epsilon \kappa \phi \delta \rho \pi i \sigma \eta} 2Ni(OH)_{2} + Cd(OH)_{2}$$
(4.4)

Χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης, για θερμοκρασία δωματίου (25 °C), φαίνονται στο Σχήμα 4.8. Ακόμα και όταν η εκφόρτιση γίνεται με ρυθμό C/5h (όπου C η χωρητικότητα του συσσωρευτή σε Ah) μπορούν να αποδώσουν, ανάλογα με το τύπο τους, από 60 έως 80% της ονομαστικής χωρητικότητάς τους.



**Σχήμα 4.8** Χαρακτηριστική τάσης στοιχείου συσσωρευτή Ni-Cd για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης στους 25 °C.

Η εσωτερική αντίσταση είναι μικρή και κυμαίνεται από 0.4 έως 2 mΩ. Στους συσσωρευτές Ni-Cd παρατηρείται το φαινόμενο της μνήμης (memory effect) το οποίο προκαλεί προβλήματα όταν οι συσσωρευτές φορτίζονται χωρίς να έχουν πλήρως αποφορτιστεί [18]. Έτσι για παράδειγμα ένας συσσωρευτής νικελίου – καδμίου, που επαναφορτίζεται όταν βρίσκεται στο 30% της ολικής του ενέργειας ακόμα και εάν επαναφορτιστεί την επόμενη φορά θα προσφέρει μόνο το 70% (100% - 30% = 70%) της ολικής ενέργειας άσχετα με το εάν το 30% είχε αρχικά φορτιστεί. Αυτά τα προβλήματα εμφανίζονται όταν γίνεται μερική φόρτιση του συσσωρευτή ή γίνεται χρήση φορτιστών γρήγορης φόρτισης. Πιο σωστό λοιπόν είναι τέτοιου τύπου συσσωρευτές να επαναφορτίζονται, όσο το δυνατόν, μετά από πλήρη αποφόρτιση. Τέλος, η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή ανάλογα με το βάθος εκφόρτισης, που πραγματοποιείται κάθε φορά, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



**Σχήμα 4.9** Χαρακτηριστική βάθους εκφόρτισης (DOD) συναρτήσει των κύκλων ζωής ενός συσσωρευτή Ni-Cd.

### 4.3.5 Μέθοδοι φόρτισης συσσωρευτών νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Κατά τη φόρτιση λαμβάνει χώρα η αντίστροφη αντίδραση από αυτή που αναφέρεται στη Σχέση 4.4.

$$2Ni(OH)_{2} + Cd(OH)_{2} \xrightarrow{\phi \circ \rho \tau i \sigma \eta} 2NiOOH + 2H_{2}O + Cd$$
(4.5)

Ένα απλό κύκλωμα για τη φόρτιση βασίζεται στην παρεμβολή μιας αντίστασης ανάμεσα στην DC πηγή και το συσσωρευτή. Ο συσσωρευτής φορτίζεται με σταθερό ρεύμα μικρής τιμής έτσι ώστε ο ρυθμός παραγωγής οξυγόνου να παραμένει μικρότερος από το ρυθμό επανασυνδυασμού [4]. Η μικρή τιμή του
ρεύματος φόρτισης περιορίζει επίσης και την αύξηση της θερμοκρασίας. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ο αργός ρυθμός φόρτισης (Σχήμα 4.10).



**Σχήμα 4.10** Χαρακτηριστική της τάσης του συσσωρευτή Ni-Cd και του ρεύματος φόρτισης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης στη μέθοδο φόρτισης με σταθερό ρεύμα μικρής έντασης.

Η μέθοδος φόρτισης με χρονομέτρηση εφαρμόζεται για μεσαίους ρυθμούς φόρτισης. Ένας χρονομετρητής χρησιμοποιείται για να αποκόψει το ρεύμα φόρτισης στο τέλος προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος (Σχήμα 4.11). Η μέθοδος αυτή ενδείκνυται για περιπτώσεις που ο συσσωρευτής έχει αποφορτιστεί πλήρως.



**Σχήμα 4.11** Χαρακτηριστική της τάσης του συσσωρευτή Ni-Cd και του ρεύματος φόρτισης συναρτήσει του χρόνου φόρτισης στη μέθοδο φόρτισης με χρονομετρητή.

Δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που ο συσσωρευτής φορτίζεται συχνά χωρίς να έχει προηγηθεί πλήρης εκφόρτιση, καθώς αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει φαινόμενα υπερφόρτισης. Ένα θερμικό κύκλωμα ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διακόψει τη διαδικασία φόρτισης όταν η θερμοκρασία φτάσει σε υψηλά επίπεδα για πρόσθετη προστασία από την υπερφόρτιση (Σχήμα 4.12).



**Σχήμα 4.12** Χαρακτηριστική της τάσης του συσσωρευτή Ni-Cd, του ρεύματος φόρτισης και της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου φόρτισης στη μέθοδο φόρτισης με θερμικό κύκλωμα ελέγχου.

Επιπλέον, μια άλλη μέθοδος είναι η εφαρμογή σταθερής τάσης με τιμή που κυμαίνεται από 1.45 έως 1.5 Volt για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

### 4.4 Μετατροπείς ισχύος DC/AC

Οι μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς) είναι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και κρίνονται απαραίτητες σ' ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μιας και μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα των φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών και συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο ώστε να τροφοδοτηθεί το φορτίο. Μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

• μετατροπείς DC/AC που εγκαθίστανται σε αυτόνομα συστήματα και

75

 μετατροπείς DC/AC που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο, π.χ. το ηλεκτρικό δίκτυο της Δ.Ε.Η.

Οι μετατροπείς της δεύτερης κατηγορίας χρειάζεται να συγχρονιστούν με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον οι μετατροπείς DC/AC μπορούν να χωριστούν σε αυτούς που δέχονται ως είσοδο μια DC πηγή τάσης (αντιστροφείς πηγής τάσης, voltage source inverters) και σε αυτούς που η είσοδός τους είναι μια DC πηγή ρεύματος (current source inverters) και οι οποίοι χρησιμοποιούνται μόνο σε AC κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος.

Η απόδοση μετατροπής ισχύος των αντιστροφέων μπορεί να προσεγγίζει το 95% όταν λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ, ενώ σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας η απόδοσή τους μειώνεται. Ο βαθμός απόδοσης, n, ενός μετατροπέα ισχύος DC/AC υπολογίζεται από το πηλίκο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$
(4.6)

76

όπου:

Pout είναι η ισχύς στην ΑC πλευρά του αντιστροφέα και

P<sub>in</sub> η ισχύς στην DC πλευρά του αντιστροφέα.



Σχήμα 4.13 Μετατροπέας ισχύος DC/AC

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι οι μετατροπείς DC/AC έχουν ένα μέσο βαθμό απόδοσης, n<sub>i</sub>, που δίνεται από τον κατασκευαστή και αποτελεί παράμετρο εισόδου. Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστός τότε λαμβάνεται ίσος με 80%.

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα σε συνάρτηση με την ισχύ του φορτίου εξόδου.



**Σχήμα 4.14** Απόδοση μετατροπέα DC/AC συναρτήσει της ισχύς του φορτίου.

## 5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

## 5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία για την εύρεση της βέλτιστης λύσης για τη διαστασιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι. Είναι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη βιολογική εξέλιξη των ειδών (θεωρία Δαρβίνου), την προσαρμοστικότητα στις εκάστοτε συνθήκες του περιβάλλοντος και εν τέλει την επικράτηση του ισχυρότερου (ικανότερου). Οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν επιλύουν το πρόβλημα με αναλυτικό/ μαθηματικό τρόπο αλλά με βιολογικό. Συνεπώς έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και ελευθερία να επιλέγουν μια επιθυμητή βέλτιστη λύση σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προβλήματος. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μαζί με τα νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) και την ασαφή λογική (Fuzzy Logic) αποτελούν τους τρείς βασικούς πυλώνες της υπολογιστικής νοημοσύνης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ξεχωρίζουν για την ικανότητά τους στην επίλυση προβλημάτων με πολυπλοκότητα NP (Nondeterministic Polynomial). Τέτοια προβλήματα δεν μπορούν να λυθούν με συνηθισμένους αλγόριθμους μιας και η χρονική πολυπλοκότητα, Ο(•),είναι μεγάλη.

### 5.2 Ιστορική αναδρομή

Από τις αρχές της δεκαετίας του '50 διάφοροι επιστήμονες υπολογιστών μελέτησαν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο εξελικτικά συστήματα με τη λογική ότι η "εξέλιξη" (evolution) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εργαλείο βελτιστοποίησης σε τεχνολογικά προβλήματα. Η ιδέα πίσω από τα συστήματα αυτά ήταν η ανάπτυξη ενός πληθυσμού από υποψήφιες λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα χρησιμοποιώντας "τελεστές" εμπνεόμενους από τη φυσική

γενετική μεταβολή και τη φυσική επιλογή.

Το 1965 και 1973 ο Rechertberg εισήγαγε τις "στρατηγικές εξέλιξης" ως μια μέθοδο βελτιστοποίησης πραγματικών παραμέτρων για κατασκευές όπως τα λεπτά μεταλλικά φύλλα των αεροπλάνων. Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε παραπέρα από τον Schwefel (1975, 1977). Το πεδίο των στρατηγικών εξέλιξης έχει παραμείνει μια ενεργή περιοχή έρευνας, αναπτυσσόμενη ανεξάρτητα από το πεδίο των γενετικών αλγόριθμων (αν και πρόσφατα οι δύο επιστημονικές κοινότητες άρχισαν να αλληλεπιδρούν). Μια σύντομη ανασκόπηση των στρατηγικών εξέλιξης δόθηκε από τους Back, Hoffmeister και Schwefel το 1991.

Το 1966 οι Fogel, Owens και Walsh ανέπτυξαν τον καλούμενο "εξελικτικό προγραμματισμό" (evolutionary programming), μια τεχνική στην οποία οι υποψήφιες λύσεις σε δεδομένα προβλήματα (καθήκοντα ή ενέργειες) παραστάθηκαν ως μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων (finite state machines), οι οποίες εξελίχθηκαν μεταλλάσσοντας (mutating) τυχαία τα διαγράμματα μετάπτωσης των καταστάσεων τους και επιλέγοντας το "πλέον ταιριαστό" (fittest).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Σε αντίθεση με τις στρατηγικές εξέλιξης και τον εξελικτικό προγραμματισμό, ο αρχικός στόχος του Holland δεν ήταν να κατασκευάσει αλγορίθμους που να λύνουν συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά μάλλον να μελετήσει συστηματικά το φαινόμενο της "προσαρμογής" όπως λαμβάνει χώρα στη φύση και να αναπτύξει τρόπους με τους οποίους οι μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής θα μπορούσαν να εμφυτευτούν στα υπολογιστικά συστήματα. Ο Holland στο βιβλίο του *"Adaptation in Natural and Artificial Systems"*, που εξέδωσε το 1975, παρουσίασε τον γενετικό αλγόριθμο ως μια αφαίρεση της βιολογικής εξέλιξης και έδωσε ένα θεωρητικό πλαίσιο προσαρμογής με γενετικούς αλγόριθμους. Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από έναν πληθυσμό "χρωμοσωμάτων" (ακολουθίες από bits 1 και 0) σε ένα νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος "φυσικής επιλογής" μαζί με εμπνευσμένους από τη γενετική τελεστές "μετάλλαξης" (mutation) και

"αντιστροφής" (inversion). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από "γονίδια" (δηλαδή bits) και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο "αλληλόμορφο" (allele) (λ.χ. 0 ή 1). Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα του πληθυσμού στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν. Η "διασταύρωση" ανταλλάσσει υπομέρη των δύο χρωμοσωμάτων, μιμούμενη χονδρικά το βιολογικό επανασυνδυασμό μεταξύ δύο οργανισμών ενός απλού χρωμοσώματος. Η "μετάλλαξη" αλλάζει τυχαία τις τιμές των αλληλόμορφων που βρίσκονται σε ορισμένες θέσεων στα χρωμοσώματα και η "αντιστροφή" αναστρέφει την τάξη μιας "γειτνιάζουσας" περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας έτσι τη σειρά με την οποία Σημειώνεται ÓTI "διασταύρωση" τοποθετούνται тα γονίδια. και "επανασυνδυασμός" σημαίνουν το ίδιο πράγμα. Η εισαγωγή από τον Holland ενός βασισμένου στον πληθυσμό αλγορίθμου με διασταύρωση, αντιστροφή και μετάλλαξη ήταν μια μεγάλη καινοτομία. (Οι στρατηγικές εξέλιξης του Rechenberg ξεκίνησαν με έναν "πληθυσμό" δύο ατόμων, ενός γονέα και ενός απογόνου, όπου ο απόγονος είναι μια μεταλλαγμένη παραλλαγή του γονέα. Πληθυσμοί πολλών ατόμων με διασταύρωση συμπεριλήφθησαν αργότερα. Αντίστοιχα, ο εξελικτικός προγραμματισμός του Walsh χρησιμοποιούσε μόνο μετάλλαξη για να προκαλέσει ποικιλία). Επιπλέον, ο Holland ήταν αυτός ο οποίος προσπάθησε πρώτος να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση (Holland 1975). Μέχρι πρόσφατα, η θεωρητική αυτή θεμελίωση, βασιζόμενη στη θεωρία των "σχημάτων" (schemas), ήταν το θεμέλιο όλων των μεταγενέστερων θεωρητικών μελετών πάνω στους γενετικούς αλγόριθμους. Μόλις κατά τα τελευταία χρόνια υπήρξε ευρεία αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι μελετούν τις μεθόδους του εξελικτικού υπολογισμού και έτσι τα σύνορα ανάμεσα στους γενετικούς αλγορίθμους, τις στρατηγικές εξέλιξης, του εξελικτικού προγραμματισμού και άλλες εξελικτικές μεθοδολογίες έχουν σπάσει μέχρι κάποιο βαθμό. Τέλος, το 1992 ο John Koza ανέπτυξε τη μέθοδο του γενετικού προγραμματισμού (genetic programming,GA) χρησιμοποιώντας γλώσσα προγραμματισμού LISP, μιας και τα προγράμματα μπορούν να εκφραστούν με τη λογική ενός συντακτικού δέντρου (parse tree), λογική στην οποία στηρίζεται και ο GA.

## 5.3 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος

Η χρήση των γενετικών αλγόριθμων παρέχει μεγάλη ευελιξία στην επίλυση προβλημάτων και καταλήγει στη βέλτιστη λύση ανεξάρτητα από το εάν οι προδιαγραφές είναι γραμμικές ή μη γραμμικές, διακριτού ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακρότατων, υποκείμενες σε ανισοτικούς ή μη περιορισμούς, NP ή non-NP complete.

Η επίλυση προβλημάτων μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών έγκειται στην εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού αυτών. Στους γενετικούς αλγόριθμους αυτό αντιστοιχεί στην εύρεση του κατάλληλου χρωμοσώματος το οποίο αποτελεί και έναν συνδυασμό λύσεων για μια συνάρτηση. Οι μεμονωμένες μεταβλητές ονομάζονται γονίδια. Αν έχουμε τη συνάρτηση F(x,y,z) τότε μια υποψήφια λύση της είναι της μορφής [x y z ] ή αν αναπαρασταθεί με bit [001|100|001]. Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου μεγέθους ονομάζεται γενεά. Κατά τη διάρκεια των γενετικών πράξεων δημιουργούνται νέες γενεές οι οποίες δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τις προηγούμενες. Λαμβάνει χώρα δηλαδή μια διαδικασία παρόμοια με τη φυσική διαδικασία της «επιβίωσης του ισχυρότερου», μόνο που τώρα εμείς, μέσω των απαιτήσεων της συνάρτησης-περιβάλλοντος, ορίζουμε ποιος νοείται ως «ισχυρότερος».

#### Πράξεις

Οι τρείς βασικές πράξεις του γενετικού αλγόριθμου είναι η επιλογή (selection), η διασταύρωση (crossover) και η μετάλλαξη (mutation). Η πράξη της επιλογής είναι μια διαδικασία κατά την οποία επιλέγονται κάποια χρωμοσώματα, έναντι άλλων, ώστε να διατηρηθούν και στις επόμενες γενεές. Η πράξη της διασταύρωσης λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων και δημιουργούνται δυο νέοι απόγονοι οι οποίοι περιέχουν τα γονίδια των διασταυρωμένων χρωμοσωμάτων. Το σημείο διασταύρωσης (crossover point) ορίζει το σημείο στο χρωμόσωμα όπου θα γίνει η ανταλλαγή γονιδίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα





**Σχήμα 5.1** Διαδικασία διασταύρωσης χρωμοσώματος πριν και μετά τη διασταύρωση.

82

Η παραπάνω διασταύρωση αποτελεί τον πιο απλό τρόπο διασταύρωσης μιας και είναι σ' ένα σημείο (one crossover point). Υπάρχουν τεχνικές που χρησιμοποιούν περισσότερα σημεία διασταύρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 που πραγματοποιείται διασταύρωση σε δυο σημεία.



**Σχήμα 5.2** Διαδικασία διασταύρωσης των χρωμοσωμάτων πριν και μετά τη διασταύρωση σε δύο σημεία.

Η μετάλλαξη τελείται μετά από τη διασταύρωση και αλλάζει τυχαία κάποια από τα γονίδια (ή ψηφία στην συγκεκριμένη περίπτωση). Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε την εξής ακολουθία ψηφίων (χρωμόσωμα) 0 0 1 1 1 0 0 1 0 και έστω ότι συμβαίνει μετάλλαξη στο τρίτο και το τελευταίο γονίδιο. Το νέο χρωμόσωμα θα είναι το 0 0 0 1 1 0 0 1 1. Η μετάλλαξη μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε θέση του χρωμοσώματος με μια όμως πολύ μικρή πιθανότητα. Ο εξελικτικός κύκλος συνεχίζεται μέχρις ότου φτάσουμε σε κάποια επιθυμητή συνθήκη τερματισμού. Η συνθήκη μπορεί να είναι ο αριθμός των συνολικών εκτελέσεων του

αλγορίθμου (αριθμός γενεών) ή μια προκαθορισμένη τιμή της συνάρτησης του προβλήματος. Από μια γενεά i επιλέγονται με κάποιο μηχανισμό κάποια χρωμοσώματα. Από αυτά κάποια δε θα συμμετάσχουν σε καμιά πράξη ενώ κάποια θα διασταυρωθούν και άλλα θα μεταλλαχθούν δημιουργώντας έτσι μια καινούρια γενεά (Σχήμα 5.3).



**Σχήμα 5.3** Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος σε μία εκτέλεσή του.

## 5.4 Η κωδικοποίηση των μεταβλητών

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης του εκάστοτε προβλήματος αποτελεί μια πολύ κρίσιμη απόφαση κατά την μοντελοποίηση ενός προβλήματος με γενετικούς αλγόριθμους. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι όπως είδαμε με τη χρήση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων. Μια μεταβλητή δηλαδή παρίσταται με ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία. Ο τρόπος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων, παρουσιάζει όμως ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Αν οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν τιμές μέσα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τότε χρειάζονται πολλά bits κωδικοποίησης. Τα πράγματα γίνονται δυσκολότερα όταν αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων) του προβλήματος. Τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται είναι μεγάλου μήκους και το search space μέσα στο οποίο πρέπει να ψάξει ο αλγόριθμος είναι τεράστιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις η απόδοση των γενετικών αλγόριθμων είναι χαμηλή. Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα εμφανίζεται στις περιπτώσεις που έχουμε πραγματικές μεταβλητές. Η κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών με δυαδικά ψηφία είναι εν γένει δύσκολη. Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα γίνεται

κωδικοποίηση με αριθμούς κινητής υποδιαστολής (floating point). Σε μια τέτοια αναπαράσταση το χρωμόσωμα έχει τη μορφή [ $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_n$ ] όπου  $\alpha_i$  είναι πραγματικοί αριθμοί και οι τιμές τους είναι μέσα σε συγκεκριμένο εύρος [ $\alpha_i \overline{\alpha_i}$ ] όπου  $\underline{\alpha_i}$  το κάτω φράγμα και  $\overline{\alpha_i}$  το άνω φράγμα αυτού του εύρους. Ενώ οι τελεστές της επιλογής και της διασταύρωσης δεν τροποποιούνται, ο τελεστής της μετάλλαξης υπόκειται σε αλλαγές. Έτσι όταν ένα γονίδιο επιλεχθεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

#### 5.5 Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής

Ως αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται η συνάρτηση αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και θέλουμε που να βελτιστοποιήσουμε. Η συνάρτηση αυτή ποικίλει ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και στην παρούσα εργασία αντιπροσωπεύει το οικονομικό κόστος. Μπορεί να παίρνει αρνητικές και θετικές τιμές. Η συνάρτηση προσαρμογής χρησιμοποιείται από το γενετικό αλγόριθμο για την πράξη της επιλογής και προέρχεται από την αντικειμενική συνάρτηση έπειτα από ένα είδος αντιστοίχησης-μετατροπής και μπορεί να παίρνει μόνο θετικές τιμές. Εάν έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση g(x) όπου x το διάνυσμα των μεταβλητών, για να λύσουμε το πρόβλημα με το γενετικό αλγόριθμο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση g(x) = -f(x), οπότε αυτόματα το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης μεταπίπτει σε πρόβλημα μεγιστοποίησης. Επομένως σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης για να μετατρέψουμε την αντικειμενική συνάρτηση σε συνάρτηση προσαρμογής, έτσι ώστε να μην παίρνει αρνητικές τιμές, κάνουμε την εξής μετατροπή:

$$f(x) = \begin{cases} C_{\min} + g(x), \, \alpha v \, C_{\min} + g(x) > 0\\ 0, \, \alpha \lambda \lambda \iota \dot{\omega} \varsigma \end{cases}$$
(5.1)

Η παράμετρος C<sub>min</sub> μπορεί να είναι μια παράμετρος εισόδου ή η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g(x) για την τρέχουσα γενεά. Μετατροπή πρέπει να γίνει και στην περίπτωση που έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης έτσι ώστε η συνάρτηση προσαρμογής να μην παίρνει αρνητικές τιμές.

$$f(x) = \begin{cases} C_{max} - g(x), \, \alpha v \, C_{max} - g(x) > 0\\ 0, \, \alpha \lambda \lambda \iota \dot{\omega} \varsigma \end{cases}$$
(5.2)

Το C<sub>max</sub> και εδώ παίρνει τη μέγιστη τιμή της g(x) για κάθε γενεά.

## 5.6 Μηχανισμοί Επιλογής

Η επιλογή αποτελεί ίσως την κρισιμότερη πράξη των γενετικών αλγόριθμων γιατί από αυτή προκύπτει το σύνολο εκείνων των χρωμοσωμάτων από τα οποία κάποια θα διασταυρωθούν και θα μεταλλαχθούν δίνοντας απογόνους στην επόμενη γενεά. Πολλοί είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την πράξη της επιλογής. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: χρησιμοποιούν τη συνάρτηση προσαρμογής για να «κρίνουν» κατά πόσο ένα χρωμόσωμα θα επιβιώσει. Ένα χρωμόσωμα με μεγαλύτερη τιμή στη συνάρτηση προσαρμογής έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσει σε σχέση με αυτό που έχει μικρότερη τιμή.

Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας. Αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση προσαρμογής f<sub>i</sub> για

όλα τα χρωμοσώματα μιας γενεάς (Ν ο αριθμός των χρωμοσωμάτων ανά γενεά). Στη συνέχεια υπολογίζεται το άθροισμα  $\sum_{i=1}^{N} f_i$  και έτσι για κάθε χρωμόσωμα βρίσκεται η πιθανότητα επιλογής p<sub>i</sub> η οποία δίνεται από τη σχέση:  $p_i = \frac{f}{\sum_{i=1}^{N} f_i}$ . Αφού έχουν υπολογιστεί οι πιθανότητες p<sub>i</sub> ακολουθεί η τυχαία

γέννηση αριθμών για Ν φορές μέσα στο διάστημα [0,1]. Ένα χρωμόσωμα επιλέγεται όταν ο τυχαίος αριθμός που γεννήθηκε είναι μικρότερος από την πιθανότητα του χρωμοσώματος αυτού και μεγαλύτερος από την αμέσως μικρότερη πιθανότητα του χρωμοσώματος. Έτσι λοιπόν, αν f είναι η μέση τιμή της συνάρτησης προσαρμογής τότε ο αναμενόμενος αριθμός επιλογών ενός χρωμοσώματος δίνεται από τη σχέση:

$$n_i = \frac{f}{\bar{f}} = Np_i.$$
(5.3)

Για να γίνει πιο σαφής ο μηχανισμός αυτός, παραθέτουμε ένα παράδειγμα. Έστω η συνάρτηση προσαρμογής μιας μεταβλητής και έστω ότι έχουμε τα εξής τέσσερα χρωμοσώματα: [13],[24],[8] και [19] (δηλαδή N=4). Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται οι τιμές της συνάρτησης, οι πιθανότητες επιλογής των χρωμοσωμάτων, ο αναμενόμενος αριθμός επιλογής κάθε χρωμοσώματος και ο πραγματικός αριθμός επιλογής, όπως προέκυψε από τις γεννήσεις τεσσάρων τυχαίων αριθμών.

Πίνακας 5.1 Επιλογή με τη μέθοδο του τροχού της ρουλέτας						
x	f(x)=x <sup>2</sup>	p <sub>i</sub>	n <sub>i</sub>	n <sub>i,actual</sub>		
13	169	0.14	0.58 1			
24	576	0.49	1.97	2		
8	64	0.06	0.22 0			
19	361	0.31	1.23 1			
Sum	1170	1	4 4			
Average	293	0.25	1 1			
Мах	576	0.49	1.97 2			

Παρατηρούμε ότι το χρωμόσωμα [13] και [19] επιλέγεται μια φορά, το χρωμόσωμα [24] δυο φορές και το χρωμόσωμα [8] δεν επιλέγεται καμία φορά. Οι τιμές αυτές είναι πολύ κοντά στις αναμενόμενες τιμές, n<sub>i,actual</sub>, που προέκυψαν από τις γεννήσεις τεσσάρων τυχαίων αριθμών. Η κατανομή πιθανοτήτων των χρωμοσωμάτων φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Κατανομή πιθανοτήτων για τα χρωμοσώματα [8],[19],[13],[24]

Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στη ρουλέτα τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να επιλεχθεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενεά.

Ενδεικτικές μέθοδοι επιλογής χρωμοσωμάτων είναι οι παρακάτω:

- το ελιτίστικο μοντέλο (elitist model) το οποίο είναι μια παραλλαγή της μεθόδου της ρουλέτας. Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος της ρουλέτας με τη διαφορά ότι ταυτόχρονα διατηρείται το καλύτερο (fittest) χρωμόσωμα από την προηγούμενη γενεά,
- το μοντέλο της αναμενόμενης τιμής (expected value model) αντιστοιχίζει σε κάθε χρωμόσωμα έναν αριθμό σύμφωνα με τη Σχέση 5.3, ο οποίος μειώνεται κάθε φορά που το χρωμόσωμα επιλέγεται από τη μέθοδο της ρουλέτας. Αν αυτός ο αριθμός πάρει αρνητική τιμή τότε το συγκεκριμένο χρωμόσωμα δεν μπορεί πλέον να συμμετάσχει στη διαδικασία της επιλογής και
- το ελιτίστικο μοντέλο αναμενόμενης τιμής είναι ο συνδυασμός των δυο προηγούμενων μοντέλων.

Όλα τα παραπάνω μοντέλα προτάθηκαν από τον De Jong το 1975. Το 1985 ο Baker πρότεινε μια μέθοδο επιλογής γνωστή ως sorted selection method. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται αρχικά μια ταξινόμηση των χρωμοσωμάτων σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής. Κατόπιν, αντιστοιχίζεται αυθαίρετα στο καλύτερο χρωμόσωμα ο αριθμός συμμετοχής του στην επόμενη γενεά. Για τα υπόλοιπα χρωμοσώματα ο αριθμός συμμετοχής τους στην επόμενη γενεά προκύπτει γραμμικά.

### 5.7 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πιθανότητες διασταύρωσης, p<sub>c</sub>, και μετάλλαξης, p<sub>m</sub>, σχετίζονται με το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που εμπλέκονται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Αν π.χ. έχουμε έναν πληθυσμό 20 χρωμοσωμάτων και η πιθανότητα διασταύρωσης είναι 50% τότε αναμένονται 10 χρωμοσώματα να συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης για να δώσουν απογόνους. Η επιλογή των πιθανοτήτων διασταύρωσης και μετάλλαξης έχει να κάνει με το εκάστοτε πρόβλημα. Πάντως στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές τιμές οι οποίες και αναφέρονται παρακάτω:

- για μεγάλους πληθυσμούς (N=50-100): pc=60% και pm =0.1% και
- για μικρούς πληθυσμούς (N=10-50):  $p_c$ =90% και  $p_m$  =1%.

## 6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

## 6.1 Πληθωρισμός

Ως πληθωρισμός χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αύξησης (θετικός πληθωρισμός) ή μείωσης (αρνητικός πληθωρισμός) των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών με το πέρασμα του χρόνου, κατά τρόπο ανομοιόμορφο για κάθε ένα από αυτά. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας όσο και από τις διεθνείς εξελίξεις. Γενικά, στις εγκαταστάσεις συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η εξέλιξη του πληθωρισμού είναι δύσκολο να προβλεφθεί λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής που τις χαρακτηρίζει. Στην παρούσα εργασία ο πληθωρισμός (g) έχει ληφθεί σταθερός και ίσος με 3.1% (έτος 2007). Ο πληθωρισμός λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του κόστους συντήρησης και αντικατάστασης των υποσυστημάτων (συσσωρευτές, φορτιστές, αντιστροφείς DC/AC) και έτσι υπολογίζεται το συνολικό ποσό που θα χρειαστεί να δαπανηθεί στο εύρος ζωής της εγκατάστασης. Ο υπολογισμός του συνολικού ποσού

$$M_{p} = \sum_{n=1}^{n=year} M_{o} (1+g)^{n}$$
 (6.1)

όπου:

Μ<sub>0</sub> είναι το κόστος συντήρησης το πρώτο έτος,

Μ<sub>p</sub> το συνολικό ποσό χρημάτων σύμφωνα με το χρονικό ορίζοντα της εγκατάστασης,

#### n το εκάστοτε έτος και

years ο χρονικός ορίζοντας.

Δηλαδή υπολογίζεται η παρούσα αξία (Present Value) της ετήσιας δαπάνης για τη συντήρηση της εγκατάστασης. Η Εξίσωση 6.1 θα έχει τόσα αθροίσματα όσα και ο χρόνος λειτουργίας της εγκατάστασης, καθώς η συντήρηση γίνεται ανά χρόνο και το ποσό που δαπανάται είναι σταθερό (π.χ. για τα Φ/Β πλαίσια είναι 1% της τιμής αγοράς).

#### 6.2 Επιτόκιο αναγωγής

Ως επιτόκιο αναγωγής ορίζεται το επιτόκιο, το κόστος του χρήματος δηλαδή, σε μια ορισμένη περίοδο, που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η παρούσα αξία μελλοντικών εισροών ή εκροών [19]. Στην παρούσα εργασία το επιτόκιο αναγωγής έχει ληφθεί ίσο με 8%. Όταν στο επιτόκιο αναγωγής συμπεριλαμβάνεται ο πληθωρισμός τότε έχουμε το κλασικό επιτόκιο αναγωγής που ονομάζεται διεθνώς ως «nominal discount rate». Το επιτόκιο αυτό υπολογίζεται ως η απόδοση της καλύτερης διαθέσιμης σίγουρης επένδυσης συν τον πληθωρισμό συν το κίνδυνο της επένδυσης που εξετάζουμε. Στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται ο πληθωρισμός και το επιτόκιο αναγωγής τότε το συνολικό ποσό που πρέπει να δαπανηθεί στο εύρος ζωής της εγκατάστασης, ανηγμένο σε παρούσα αξία, υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$M_{p} = \sum_{n=1}^{n=year} \frac{M_{o}}{(1+i)^{n}} (1+g)^{n}$$
(6.2)

Η ίδια οικονομική κατεύθυνση ακολουθείται και για τον υπολογισμό του Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας 92 συνολικού κόστους σε παρούσα αξία για την αλλαγή των συσσωρευτών, την επισκευή των μετατροπέων ισχύος DC/AC και την επισκευή των φορτιστών των συσσωρευτών:

$$R_{p} = \sum_{n=n^{*}} \frac{R_{o}}{(1+i)^{n}} (1+g)^{n}$$
(6.3)

όπου:

R<sub>o</sub> είναι το κόστος αντικατάστασης ή επισκευής,

R<sub>p</sub> το συνολικό ποσό χρημάτων για την επισκευή ή αντικατάσταση σύμφωνα με το χρονικό ορίζοντα της εγκατάστασης,

n\* η συγκεκριμένη χρονιά που θα γίνει αντικατάσταση ή επισκευή,

g ο πληθωρισμός και

ί το επιτόκιο αναγωγής.

Για παράδειγμα, αν η μελέτη μας έχει χρονικό ορίζοντα 25 έτη και ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών είναι 10 χρόνια, τότε το n\* θα πάρει τις τιμές 10 και 20.

Έτσι θα γίνει αντικατάσταση μετά από 10 και 20 χρόνια. Συνεπώς, η παρούσα αξία του συνόλου των χρημάτων που θα δαπανηθούν είναι:

$$R_{p} = \frac{R_{o}}{(1+i)^{10}} (1+g)^{10} + \frac{R_{o}}{(1+i)^{20}} (1+g)^{20}$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των υποσυστημάτων του αυτόνομου υβριδικού συστήματος ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα λειτουργίας της εγκατάστασης.

## 6.3 Αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής (real discount rate)-Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Το αποπληθωρισμένο επιτόκιο αναγωγής ή διεθνώς real discount rate, i<sub>0</sub>, [20], χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η παρούσα αξία κάποιας επένδυσης αλλά ανάγοντας τη μορφή της Εξίσωσης 6.2 και της Εξίσωσης 6.3 που

περιλαμβάνουν το κλάσμα  $\frac{(1+g)^n}{(1+i)^n}$  σε απλούστερη μορφή. Αυτό προκύπτει

βρίσκοντας ένα νέο επιτόκιο αναγωγής που συμπεριλαμβάνει τον πληθωρισμό, το οποίο είναι:

$$\frac{1+g}{1+i} = \frac{1}{1+i_0}$$
(6.4)

και λύνοντας τη Σχέση 6.4 ως προς ί₀ έχουμε:

$$i_o = \frac{i-g}{1+g}$$

Οπότε η παρούσα αξία θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$M_{p} = \sum_{n=1}^{n=year} \frac{M_{o}}{(1+i_{o})^{n}} = \frac{M_{o}}{(1+i_{o})^{1}} + \frac{M_{o}}{(1+i_{o})^{2}} + \dots + \frac{M_{o}}{(1+i_{o})^{years}}$$
(6.5)

Η καθαρή παρούσα αξία (NPV) είναι το άθροισμα όλων των χρηματοροών δηλαδή των εσόδων μείον των εξόδων που αφορούν στην επένδυση, ανηγμένες σε παρούσα αξία. Η παρούσα αξία μιας επένδυσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$PV_{t} = \frac{X_{t}}{(1+i_{o})^{t}}$$
 (6.6)

όπου:

X<sub>t</sub> είναι η χρηματοροή (Έσοδα-Έξοδα) της περιόδου t και

i<sub>o</sub> το αποπληθωρισμένο επιτόκιο (real discount rate).

Η καθαρή παρούσα αξία ορίζεται ως:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} PV_t - C$$
 (6.7)

όπου:

PVt είναι η παρούσα αξία της χρηματοροής την περίοδο t,

C το κόστος της αρχικής επένδυσης και

n το σύνολο των χρονικών περιόδων που διαρκεί η επένδυση.

Τα πλεονεκτήματα της NPV είναι ότι λαμβάνεται υπόψη όλη η διάρκεια της επένδυσης. Επιτρέπεται η σύγκριση γιατί όλες οι τιμές ανάγονται σε παρούσα αξία. Λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της αξίας του χρήματος μέσω του επιτοκίου αναγωγής. Το μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται προσοχή ώστε να μη συγκρίνονται σχέδια με διαφορετική διάρκεια ζωής. Τέλος, όταν το μοναδικό κριτήριο επιλογής μιας επένδυσης είναι η καθαρή παρούσα αξία, τότε επιλέγεται η επένδυση με τη μεγαλύτερη παρούσα αξία.

Στο σχεδιασμό του αυτόνομου υβριδικού συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία υπολογίζεται το ελάχιστο συνολικό κόστος, δηλαδή η όσο το δυνατόν μικρότερη εκροή χρημάτων (ελαχιστοποίηση εξόδων). Η παρούσα αξία που προκύπτει είναι το σύνολό των εξόδων έχοντας αναχθεί σε παρούσα αξία και η τιμή της είναι αρνητική.

# 7.ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΔΟΔΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ Φ/Β ΚΑΙ Α/Γ

## 7.1 Εισαγωγή

Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι διαστασιολόγησης ενός συστήματος κάλυψης των ημερήσιων αναγκών σε ενέργεια μίας οικίας με χρήση Φ/Β πλαισίων ή Φ/Β πλαισίων και Α/Γ και αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται σε συσσωρευτές.

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση ενός αυτόνομου συστήματος με Φ/Β στοιχεία και συσσωρευτές και προτείνεται από το State Energy Conservation Office το οποίο προσπαθεί να προωθήσει τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πολιτείες της Αμερικής. Ο διαδικτυακός τόπος βρίσκεται στη διεύθυνση: http://www.infinitepower.org/. Ο υπολογισμός του αριθμού των συσσωρευτών, του αριθμού των Φ/Β πλαισίων καθώς και το κόστος αγοράς περιγράφονται στις υποπαραγράφους 7.2.1 και 7.2.2.

 Στη δεύτερη μέθοδο γίνεται χρήση του λογισμικού Homer για τη διαστασιολόγηση ενός αυτόνομου συστήματος με Φ/Β στοιχεία, Α/Γ και συσσωρευτές.

Η τρίτη μέθοδος ακολουθεί τη διαδικασία που αναπτύσσεται στο βιβλίο:
"Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, 2006" και υπολογίζει τον αριθμό των απαιτούμενων Φ/Β πλαισίων και των συσσωρευτών για ένα αυτόνομο σύστημα.

Στις παρακάτω μεθόδους έχει χρησιμοποιηθεί συνδυασμός από τα Φ/Β πλαίσια, τους συσσωρευτές, τις Α/Γ, τους φορτιστές και τους αντιστροφείς DC/AC που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Επιπλέον έχει χρησιμοποιηθεί προφίλ φορτίου που αντιστοιχεί στις ανάγκες για ενέργεια μίας οικίας και απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Έχουν χρησιμοποιηθεί μετεωρολογικά δεδομένα που προήλθαν από μετρήσεις στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης το έτος 2003 για τη συνολική ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, τη μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου και τη μέση ημερήσια θερμοκρασία. Ο υπολογισμός

της συνολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίστηκε για κάθε μέθοδο ξεχωριστά ανάλογα με την κλίση των Φ/Β πλαισίων που ορίζει η κάθε μέθοδος. Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τα βήματα της μεθόδου που φαίνονται στο Σχήμα 2.7 για κάθε ημέρα του έτους 2003. Ο χρονικός ορίζοντας για κάθε μέθοδο είναι τα 25 χρόνια.



**Σχήμα 7.1** Ημερήσιο προφίλ φορτίου.

Πίνακας 7.1 Οι τύποι των συσσωρευτών, των Φ/Β πλαισίων, των Α/Γ, των								
μετατροπέων DC/AC και των φορτιστών που χρησιμοποιήθηκαν για τη								
διαστασιολόγηση								
	Μοντέλο	Χωρητικότητα (Ah)/Ισχύς (W)	Τάση (V)	Είδος	Κόστος (€)			
Συσσωρευτές	Trojan L16	390 (Ah)	6	Pd-Acid	123			
Ф/В	MitsubishiMF170	170 (W)	24	Πολυκρυσταλλικό	542			
Α/Γ	WhisperH40	900 (W)	24	-	1650			
Μετατροπείς DC/AC	Samplex	300 (W)	24	-	151.6			
Φορτιστής	SB200E	300 (W)	24	MPPT	146			

## 7.2 Πρώτη μέθοδος

### 7.2.1 Διαστασιολόγηση

α) Αρχικά υπολογίζεται η συνολική κατανάλωση φορτίου καθημερινά για την κάλυψη των αναγκών μίας οικίας. Θεωρείται ότι γίνεται κατανάλωση ενέργειας από το φορτίο σύμφωνα με το προφίλ που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 και οι υπολογισμοί γίνονται βάσει των ωριαίων αναγκών σε φορτίο, έτσι θα έχουμε:

DE=L\*H=(15\*6)+(100\*5)+(1000\*1)+(200\*6)+(300\*1)+(500\*2)+(700\*2)+(90\*1)=

= 5580 Wh

όπου:

DE είναι η ημερήσια συνολική ενέργεια (Wh),

L η απαίτηση του φορτίου (W) και

Η οι ώρες τροφοδοσίας (h).

β) Ανάλογα με την περιοχή που γίνεται η εγκατάσταση υπολογίζεται η μέση

98

ετήσια πυκνότητα ενέργειας. Οι μετρήσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση του συστήματος αναφέρονται σε περιοχή με γεωγραφικό πλάτος 35.33° και γεωγραφικό μήκος 24.31° (Χανιά, Κρήτης). Η κλίση των Φ/Β πλαισίων λαμβάνεται σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους και ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Η μέση ημερήσια πυκνότητα ενέργειας που προκύπτει για γωνία 35° είναι 5.4 kWh/m<sup>2</sup>, οπότε DS=5.4 h, με DS το χρόνο (h) που η πυκνότητα ισχύος είναι 1 kW/m<sup>2</sup>.

γ) Υπολογίζεται η ισχύς αιχμής, PV (W), των φωτοβολταϊκών διατάξεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν:

$$PV = \frac{DE}{DS} = \frac{5580}{5.4} = 1034 \text{ W}$$
(7.1)

δ) Υπολογίζεται η απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών σύμφωνα με
τη σχέση:

$$C = \frac{DE * N}{V}$$
(7.2)

99

όπου:

Ν ο αριθμός των ημερών αυτονομίας και

V η τάση της συστοιχίας των συσσωρευτών (V).

Η αυτονομία του συστήματος, π.χ. σε περίπτωση έκτακτων καιρικών φαινομένων είναι πέντε μέρες και η τάση της συστοιχίας των συσσωρευτών (battery bank) είναι 24V ώστε να υπάρχει συμβατότητα με τις τάσεις των άλλων συσκευών (Φ/Β, φορτιστών, μετατροπέων DC/AC) ενώ η τάση κάθε συσσωρευτή είναι 6V οπότε ο αριθμός των συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά, N<sub>s</sub>, είναι: N<sub>s</sub> =  $\frac{V}{6} = \frac{24}{6} = 4$ . Άρα χρειάζονται συσσωρευτές με χωρητικότητα, C (Ah):

$$C = \frac{5580 * 5}{24} = 1163 \text{ Ah}$$

Οι μετρήσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διαστασιολόγηση του συστήματος αναφέρονται σε συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης με βάθος εκφόρτισης (DOD) 80% και συνεπώς χρειάστηκε χωρητικότητα μεγαλύτερη από αυτή που υπολογίστηκε από τη Σχέση 7.2 κατά 20%. Η τελική χωρητικότητα, C<sub>t</sub> (Ah), είναι:

$$C_t = \frac{C}{DOC} = \frac{1163}{0.8} = 1454 \text{ Ah}$$

Η χωρητικότητα του κάθε κλάδου είναι 390 Ah, οπότε οι παράλληλοι κλάδοι, N<sub>p</sub>, είναι:

$$N_{p} = \frac{C_{t}}{390} = \frac{1454}{390} = 4$$

ε) Υπολογίζεται ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC, N<sub>inv</sub>, οι οποίοι πρέπει να καλύπτουν το 125% της μέγιστης ωριαίας κατανάλωσης:

$$N_{inv} = \frac{1.25 * P_{max}}{P_{inv}} = \frac{1.25 * 1000}{300} = 5$$

όπου:

Pinv είναι η ισχύς του μετατροπέα DC/AC στην AC πλευρά (W) και

Pmax η μέγιστη ισχύς που απαιτεί το φορτίο (W)

#### 7.2.2. Οικονομικές παράμετροι

Το κόστος, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1, των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι ίσο

με  $\frac{542 €}{170 W}$  = 3.18 €/W, το κόστος του συσσωρευτή ίσο με  $\frac{123 €}{390 Ah}$  = 0.32 €/Ah, ενώ για το μετατροπέα DC/AC είναι ίσο με  $\frac{151.6 €}{300 W}$  = 0.51 € /W. Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι η παρούσα μέθοδος δε λαμβάνει υπόψη φορτιστές μεταξύ φωτοβολταϊκών, ενώ ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών δίνεται από τον κατασκευαστή και στην συγκριμένη περίπτωση είναι τα 6 έτη, οπότε ο αριθμός των αντικαταστάσεων των συσσωρευτών, Υ, για χρονικό ορίζοντα 25 ετών είναι ίσος με 4. Επειδή θεωρείται επιβεβλημένη η χρήση φορτιστών μεταξύ των συσσωρευτών και των Φ/Β πλαισίων για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών, υπολογίζονται οι φορτιστές που χρειάζονται συνολικά σύμφωνα με τη σχέση:

Φορτιστές (#) = 
$$\frac{PV}{Iσχύς φορτιστή} = \frac{1034}{300} = 4$$

Το συνολικό κόστος που προκύπτει είναι:

C<sub>ph</sub>=PV\*3.45 = 1034\*3.18=3289 €

C<sub>b</sub>=N<sub>p</sub>\*N<sub>s</sub>\*123 =1968 €

C<sub>ch</sub>= 146\* Φορτιστές (#)=146\*4=584 €

C<sub>inv</sub>=P<sub>inv</sub>\*N<sub>inv</sub>\*0.51=300\*5\*0.51=765 €

#### Κόστος Εγκατάστασης=C<sub>ph</sub> +C<sub>b</sub>+ C<sub>inv</sub>+C<sub>ch</sub>= 6635 €

όπου:

- C<sub>ph</sub> είναι το συνολικό κόστος των Φ/Β πλαισίων (€),
- PV η ισχύς των Φ/Β πλαισίων (W),
- C<sub>b</sub> το συνολικό κόστος των συσσωρευτών (€),
- Ct η συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών (Ah),
- C<sub>ch</sub> το συνολικό κόστος των φορτιστών (€)
- N<sub>inv</sub> ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC,
- P<sub>inv</sub> η ισχύς του μετατροπέα DC/AC (W) και
- C<sub>inv</sub> το συνολικό κόστος των μετατροπέων DC/AC (€).

Τέλος, το συνολικό κόστος επιβαρύνεται με 20% για έξοδα σύνδεσης, όπως και

έξοδα για την αντικατάσταση των συσσωρευτών του συστήματος, οπότε το τελικό κόστος ανέρχεται:

#### Συνολικό Κόστος= Κόστος Εγκατάστασης\*1.2+Υ\*C<sub>b</sub>=15800 €

όπου:

C<sub>b</sub> το συνολικό κόστος των συσσωρευτών (€) και

Υ ο αριθμός αντικαταστάσεων των συσσωρευτών.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στην παρούσα μέθοδο, για τον καθορισμό του συνολικού κόστους του συστήματος, δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος συντήρησης των συσσωρευτών, των Φ/Β πλαισίων ούτε το κόστος επισκευής των μετατροπέων ισχύος DC/AC.

#### 7.3 Μέθοδος Homer V. 2.19

#### 7.3.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό Homer βασίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης συστήματος παραγωγής ενέργειας τόσο για διασυνδεδεμένα δίκτυα (grid-connected) όσο και για μη διασυνδεδεμένα. Επιπλέον, περιλαμβάνει ένα οικονομικό μοντέλο το οποίο μπορεί να συγκρίνει διάφορους συνδυασμούς συστημάτων. Δέχεται ως παραμέτρους εισόδου πληροφορίες για το φορτίο που πρέπει να τροφοδοτείται, την πυκνότητα της ενέργειας, την ταχύτητα του ανέμου καθώς και άλλες πληροφορίες που αφορούν αμιγώς τα υποσυστήματα (συσσωρευτές, Φ/Β, Α/Γ κ.α.) και έχει ως εξόδους όλες τις δυνατές και βιώσιμες λύσεις. Η διαστασιολόγηση που προκύπτει, έπειτα από γραμμική αναζήτηση, περιέχει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των λειτουργικών μερών που μπορούν να

χρησιμοποιηθούν και επιλέγεται ο πλέον οικονομικός συνδυασμός. Η προσομοίωση του συστήματος γίνεται ανά μία ώρα, δηλαδή για 8760 ώρες το χρόνο και υπολογίζεται η παραγόμενη ενέργεια η οποία συγκρίνεται με την ενέργεια που πρέπει να παρέχει το σύστημα στο φορτίο.

#### 7.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας

Στο λογισμικό Homer χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας κατά την οποία υπάρχει ευελιξία στη μεταβολή των τιμών ορισμένων επιλεγμένων από το χρήστη μεταβλητών για να διερευνηθεί η επίπτωσή τους σε ορισμένες άλλες μεταβλητές που έχουν αποφασιστική σημασία στην επιλογή της διαστασιολόγησης του συστήματος. Έτσι οι μεταβλητές ή οι παράμετροι εισόδου που συμμετέχουν στην ανάλυση ευαισθησίας ονομάζονται μεταβλητές ευαισθησίας (sensitive variables). Τέτοιες μπορεί να είναι το κόστος αγοράς, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και η μέγιστη διάρκεια ζωής λειτουργικών μερών του συστήματος.

#### 7.3.3 Οικονομική ανάλυση

Για την οικονομική ανάλυση μπορεί να οριστεί το επιτόκιο αναγωγής (i) που περιλαμβάνει: τον πληθωρισμό, g, το επιτόκιο δανεισμού, i', (Σχέση 7.3), το αρχικό κόστος, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος καθώς και το κόστος σε περίπτωση αγοράς ενέργειας για χρονικό διάστημα ενός έτους.

$$i = (i' - g) * (1 + g)$$
 (7.3)

Τέλος, το συνολικό κόστος της εγκατάστασης ανάγεται σε καθαρή παρούσα αξία.

#### 7.3.5 Αρχεία εισόδου

Είναι δυνατόν να οριστούν:

 το προφίλ του φορτίου που πρέπει να τροφοδοεί η εγκατάσταση είτε ημερήσια (daily load profile), είτε ωριαία (hourly load profile) σε kW,

τα δεδομένα για την πυκνότητα ενέργειας, είτε με μέσες μηνιαίες τιμές,
είτε με ωριαίες τιμές σε kWh/m<sup>2</sup>, αφού πρώτα προσδιοριστεί το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος της περιοχής και

 τα δεδομένα για την ταχύτητα ανέμου σε μέσες μηνιαίες ή ωριαίες τιμές (m/s).

#### 7.3.6 Συσσωρευτές

Στους συσσωρευτές ορίζεται το κόστος αγοράς (\$), το κόστος αντικατάστασης (\$), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (\$/έτος) και ο αριθμός των συσσωρευτών. Επίσης, είναι δυνατόν να οριστούν ως μεταβλητές ευαισθησίας όλες οι οικονομικές παράμετροι καθώς και η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών. Επιπλέον μπορεί να επιλεχθεί ο τύπος του συσσωρευτή ανά κατασκευαστή παρέχοντας διαγράμματα για τη μείωση της χωρητικότητας της, ανάλογα με το ρεύμα εκφόρτισης (δηλαδή σε πόσο χρόνο θα έχει εκφορτιστεί ο συσσωρευτής με δεδομένη παροχή ρεύματος), καθώς και διαγράμματα για τον κύκλο ζωής του συσσωρευτή ή το throughput (Ah) συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης (DOD). Τέλος, ανάλογα με τις πληροφορίες που παρέχει ο κατασκευαστής

- ονομαστική χωρητικότητα (Ah,)
- ονομαστική τάση (V),
- βαθμός απόδοσης,
- μέγιστη διάρκεια ζωής (years),
- throughput (kWh) και
- ο ρυθμός φόρτισης (A/Ah).

#### 7.3.7 Ανεμογεννήτριες

Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των ανεμογεννητριών ορίζεται η συνολική ισχύς (kW), ο τύπος της ανεμογεννήτριας, ο αριθμός των ανεμογεννητριών, το κόστος αγοράς (\$), το κόστος αντικατάστασης (\$) και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (\$/έτος). Δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος αγοράς και συντήρησης των Α/Γ. Επίσης, είναι δυνατόν να οριστούν ως μεταβλητές ευαισθησίας όλες οι οικονομικές παράμετροι, το ύψος της ανεμογεννήτριας και η διάρκεια ζωής της. Τέλος, ανάλογα με τις πληροφορίες που παρέχει ο κατασκευαστής καθορίζεται η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας (kW) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (m/s).

#### 7.3.8 Φωτοβολταϊκά

Για την εγκατάσταση της φωτοβολταϊκής διάταξης ορίζεται το συνολικό μέγεθος (kW) της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, το κόστος αγοράς (\$), το κόστος αντικατάστασης (\$) και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (\$/έτος). Ακόμα υπάρχουν πολλές επιλογές για σύστημα παρακολούθησης της πορείας του Ήλιου (Sun Tracking System). Τέλος, είναι δυνατόν να οριστούν ως μεταβλητές ευαισθησίας όλες οι οικονομικές παράμετροι καθώς και τα παρακάτω χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- διάρκεια ζωής (έτη),
- συντελεστής αντανάκλασης (r),
- κλίση (°) και
- αζιμούθια γωνία (°).

#### 7.3.9 Μετατροπείς DC/AC

Για τους μετατροπείς DC/AC προσδιορίζεται η ονομαστική ισχύς (kW), το κόστος αγοράς (\$), το κόστος αντικατάστασης (\$) και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (\$/έτος). Επίσης, είναι δυνατόν να οριστούν ως μεταβλητές ευαισθησίας όλες οι οικονομικές παράμετροι, η διάρκεια ζωής και ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC.

#### 7.3.10 Περιορισμοί

Κατά τη διαστασιολόγηση είναι δυνατόν να ελεγχθεί η βιωσιμότητα της εγκατάστασης βάσει κάποιων περιορισμών. Θεωρείται ότι το σύστημα πρέπει να παρέχει περισσότερη ενέργεια από αυτή που απαιτεί το φορτίο ώστε να είναι συνεπές σε τυχαίας αυξήσεις της ζήτησης ενέργειας του φορτίου. Έτσι ορίζονται οι εξής παράμετροι λειτουργίας:

- συνολικό έλλειμμα ενέργειας E<sub>cs</sub> (kWh/έτος),
- συνολικό φορτίο προς κατανάλωση Ε<sub>tot</sub> (kWh/έτος),
- κλάσμα συνολικού ελλείμματος, f<sub>cs</sub>,
- ετήσιο έλλειμμα, L<sub>tot</sub>, (%)
- συνολική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές E<sub>ren</sub> (kWh/έτος) και
- κλάσμα ανανεώσιμης ενέργειας  $f_{ren} = \frac{E_{ren}}{E_{tot}}$ .

Το ετήσιο έλλειμμα, L<sub>tot,</sub> είναι παράμετρος εισόδου και προσδιορίζει το συνολικό ετήσιο έλλειμμα ενέργειας και πρέπει:  $L_{tot} \geq f_{cs}$ .

Για παράδειγμα, αν πρέπει να παρέχονται κάθε μήνα 110kWh και το σύστημα παράγει κάθε μήνα 100kWh τότε το κλάσμα συνολικού ελλείμματος είναι:

$$f_{cs} = \frac{E_{cs}}{E_{tot}} = \frac{12*10}{12*100} = 10\%$$

Μία εγκατάσταση είναι βιώσιμη όταν το κλάσμα συνολικού ελλείμματος, f<sub>cs</sub>, είναι μικρότερο του ετήσιου ελλείμματος L<sub>tot</sub>.

#### 7.3.11 Εκπομπές αερίων

Στο λογισμικό Homer μπορούν να οριστούν παράμετροι όσον αφορά τις κυρώσεις που μπορεί να επιβληθούν λόγω μόλυνσης του περιβάλλοντος από τη λειτουργία του συστήματος π.χ. εκπομπές αερίων από το σύστημα. Είναι δυνατόν να οριστούν τα όρια εκπομπών για τα εξής αέρια:

- διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) (kgr/έτος),
- μονοξείδιο του άνθρακα (CO) (kgr/έτος),

- ατελής καύση υδρογονανθράκων (kgr/έτος),
- μικροσωματίδια (kgr/έτος),
- διοξείδιο του θείου (kgr/έτος) και
- νιτρικά οξείδια (kgr/έτος).

Για όλα τα παραπάνω αέρια σε περίπτωση που η εκπομπή τους υπερβεί τα όρια επιβάλλεται πρόστιμο σε \$/t (t: ο τόνος).

#### 7.3.12 Αποτελέσματα

Το λογισμικό Homer δε χρησιμοποιεί φορτιστές μεταξύ φωτοβολταϊκών πλαισίων και συσσωρευτών. Ακόμα, λόγω της γραμμικής αναζήτησης για την εύρεση του βέλτιστου αποτελέσματος, σε περίπτωση που τα δεδομένα εισόδου είναι πολλά τότε ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται υπερβολικά. Τέλος, όλοι οι παρακάτω υπολογισμοί έχουν γίνει για χρονικό ορίζοντα λειτουργίας του συστήματος τα 25 έτη και έχει συνυπολογιστεί το κόστος των φορτιστών θεωρώντας ότι προκύπτουν από τη σχέση:

Φορτιστές (#) =  $\frac{Iσχύς Φ / Β πλαισίων}{Iσχύς φορτιστή}$ 

#### Σύστημα μόνο με Φ/Β πλαίσια

Για την ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 7.1) έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες μηνιαίες τιμές που προέκυψαν από μετρήσεις στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά το έτος 2003.





Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαστασιολόγηση του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια και για κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος, 35°, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2 συμπεριλαμβανομένων των φορτιστών:

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για Φ/Β σύστημα				
Υποσύστημα	Ποσότητα			
Ф/В	12			
Συσσωρευτές	152			
Μετατροπείς DC/AC	4			
Φορτιστές*	7			
Συνολικό κόστος	81647 €			
Το σύνολο των συσσωρευτών είναι 152 εκ των οποίων 4 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά ώστε να παρέχουν τάση συμβατή με το σύστημα (24 V) και 38 κλάδοι συσσωρευτών είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

\*Φορτιστές =  $\frac{\Sigma υνολική ισχύς Φ / Β πλαισίων}{Ισχύς φορτιστή} = \frac{12*170 W}{300 W} = \frac{2040}{300} = 7$ 

#### Σύστημα μόνο με Α/Γ

Για τη ταχύτητα του ανέμου έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες μηνιαίες ωριαίες τιμές σε ύψος 10m (Σχήμα 7.2) που προέκυψαν από μετρήσεις στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά το έτος 2003.



**Σχήμα 7.2** Κατανομή ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια του 2003 στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του Homer για το σύστημα με τις ανεμογεννήτριες παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.3 και θεωρείται ότι οι Α/Γ είναι στο ύψος που έχουν γίνει οι μετρήσεις για την ταχύτητα του ανέμου (10 m).

Πίνακας 7.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για σύστημα μόνο με Α/Γ									
Υποσύστημα	Ποσότητα								
Συσσωρευτές*	140								
Μετατροπείς DC/AC	4								
A/F	9								
Συνολικό κόστος	59860 €								

\*Το σύνολο των συσσωρευτών είναι 140 εκ των οποίων 4 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά ώστε να παρέχουν τάση συμβατή με το σύστημα (24 V) και 35 κλάδοι συσσωρευτών είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

# Υβριδικό σύστημα

Στον Πίνακα 7.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για υβριδικό σύστημα με τα ίδια δεδομένα ακτινοβολίας και ανέμου που παρουσιάστηκαν παραπάνω (Σχήματα 7.1 και 7.2).

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για υβριδικό σύστημα										
Υποσύστημα	Ποσότητα									
Ф/В	15									
Συσσωρευτές	64									
Φορτιστές*	9									
Μετατροπείς DC/AC	4									
A/Г	2									
Συνολικό κόστος	49762 €									

\*Φορτιστές = 
$$\frac{\Sigma UVO \lambda i \kappa \eta i \sigma \chi \dot{U} \zeta \Phi / B \pi \lambda \alpha i \sigma i \omega v}{I \sigma \chi \dot{U} \zeta \phi O \rho \tau i \sigma \tau \dot{\eta}} = \frac{15 * 170}{300} = \frac{2550 W}{300 W} = 9$$

Το σύνολο των συσσωρευτών είναι 64 εκ των οποίων 4 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά ώστε να παρέχουν τάση συμβατή με το σύστημα (24 V) και 16 κλάδοι συσσωρευτών είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

# 7.4 Μέθοδος διαστασιολόγησης Φ/Β συστήματος για κατοικία

Η μέθοδος που αναλύεται στις παραγράφους 7.4.1 και 7.4.2 έχει παρουσιαστεί στο βιβλίο "Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, 2006".

# 7.4.1.Διαστασιολόγηση

#### α) Υπολογισμός ισχύος αιχμής Φ/Β συστοιχίας

Αφού οριστεί η συνολική ενέργεια του φορτίου, στην περίπτωσή μας 5580Wh (Σχήμα 7.1) και η κλίση των Φ/Β πλαισίων (ίση με το γεωγραφικό πλάτος) από την οποία υπολογίζεται η μέση ημερήσια πυκνότητα ενέργεια στη συγκεκριμένη κλίση (5.3 kWh/m<sup>2</sup>) χρησιμοποιείται η Σχέση 7.4 για τον υπολογισμό της ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων, Ρ<sub>2</sub> (W).

$$P_{\rho,\sigma} = \frac{G_{stc} * m * E_{L,a}}{PR_{\sigma} * H_{t} * \eta_{\alpha}}$$

$$PR_{\sigma} = \frac{E_{\sigma}}{E(\eta_{\sigma,STC}, G_{t})}$$
(7.4)

όπου:

 $PR_{\sigma}$  είναι ο λόγος επίδοσης (Performance Ratio) και λαμβάνεται ίσος με 0.72,

E<sub>σ</sub> η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (Wh),

 $E_{\sigma}\left(\eta_{\sigma,stc},G_{t}\right)$  η ενέργεια της Φ/Β συστοιχίας σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας,

 $G_t$  η πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο επίπεδο των Φ/Β πλαισίων (W/m<sup>2</sup>),

 $H_t$ η μέση ημερήσια πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο της Φ/Β συστοιχίας (Wh/m<sup>2</sup>),

η<sub>α</sub> ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας (η<sub>α</sub>=0.92),

 $G_{stc}$  η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες ακτινοβολίας:1 kW/m<sup>2</sup>,  $\Theta_c$ =25° C, AM=1.5,

E<sub>L,α</sub> η συνολική ημερήσια κατανάλωση (kWh) και

m ο συντελεστής επάρκειας (περίσσεια ενέργειας για παροχή σε περίπτωση αύξησης της ζήτησης ενέργειας του φορτίου, m=1.1).

Από τη Σχέση 7.4 προκύπτει ότι: Ρ<sub>...</sub> =  $\frac{1*1.1*5.580}{0.72*5.3*0.92}$  = 1.818 kW

# β) Πλήθος Φ/Β πλαισίων

Προσδιορίζεται το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων με ισχύ αιχμής 170 W. Έτσι λοιπόν, ο αριθμός των Φ/Β, Ν<sub>ph</sub>, που προκύπτει είναι:

$$N_{ph} = \frac{1818W}{170W} = 11$$

# γ) Ηλεκτρικοί συσσωρευτές

Για τον υπολογισμό του αριθμού των συσσωρευτών εφαρμόζεται η παρακάτω σχέση:

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας 112

$$C = \frac{m^* E_{L}}{n_{\gamma,B} * n_{\epsilon\kappa\phi} * \beta_{\epsilon\kappa\phi} * V_{\beta}}$$
(7.5)

όπου:

 $β_{εκφ} = 80\%$  είναι το επιλεγόμενο βάθος εκφόρτισης

m =1.1 είναι ο συντελεστής επάρκειας

V<sub>β</sub>=24 (V) είναι η ονομαστική τάση των συσσωρευτών

- n<sub>v,s</sub> =0.8 είναι ο βαθμός γήρανσης\* του συσσωρευτή
- E<sub>L</sub> (kWh) είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας

n<sub>εκφ</sub>=0.91 είναι ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας.

\*Βαθμός γήρανσης συσσωρευτή: Η χωρητικότητα του συσσωρευτή ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του. Η μείωση αυτή (γήρανση) λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια που απαιτεί η συνολική κατανάλωση. Ως τυπική τιμή του συντελεστή γήρανσης του συσσωρευτή λαμβάνεται η τιμή n<sub>γ,β</sub>=0.8.

Έτσι προκύπτει ότι C=439 Ah. Συνεπώς, ο αριθμός των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών, N<sub>b</sub>, που χρειάζονται είναι:

$$N_b = \frac{439}{390} = 2$$

Το σύνολο των συσσωρευτών είναι 8 εκ των οποίων 4 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά ώστε να παρέχουν τάση συμβατή με το σύστημα (24 V) και 2 κλάδοι συσσωρευτών είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

# δ) Επιλογή μετατροπέα DC/AC

Στην περίπτωσή μας η μέγιστη κατανάλωση φορτίου, P<sub>max</sub>, κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν υπερβαίνει τα 1000 W ,οπότε ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC,

Ν<sub>inv,</sub> (στρογγυλοποιημένος προς τα επάνω) που χρειάζονται με ισχύ Ρ<sub>inv</sub> είναι:

$$N_{inv} = \frac{P_{max}}{P_{inv}} = 4$$

#### ε) Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Η/Ζ)

Η ισχύς του Η/Ζ πρέπει να καλύπτει παράλληλα τα φορτία της εφαρμογής και τη φόρτιση των συσσωρευτών. Στο κύκλωμα παρεμβάλλεται κατάλληλος ανορθωτής (rectifier), ο οποίος μπορεί να είναι ενσωματωμένος στο Η/Ζ.

Αναλυτικότερα το Η/Ζ πρέπει να καλύπτει: την συνολική ενέργεια του φορτίου (5.580 kWh) και τη φόρτιση των συσσωρευτών μέσω ανορθωτή. Τέλος, στην παρούσα μέθοδο θεωρείται ότι το κόστος του Η/Ζ είναι 2400 €.

# 7.4.2 Οικονομικές παράμετροι

Υπολογίζεται το τελικό κόστος της εγκατάστασης και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τμήματος στο συνολικό αρχικό κόστος της εγκατάστασης. Όσον αφορά το συσσωρευτή, τυπική τιμή της διάρκειας ζωής του μπορεί να θεωρηθεί η δεκαετία σύμφωνα με όσα αναφέρονται στην παρούσα μέθοδο. Για τον υπολογισμό του χρόνου ζωής των συσσωρευτών δεν υπάρχει μέθοδος, οπότε θεωρείται ίσος με αυτόν που δίνει ο κατασκευαστής. Έτσι οι φορές που θα αντικατασταθούν οι συσσωρευτές, Υ, υπολογίζεται από το χρονικό ορίζοντα των 25 ετών προς τη μέγιστη διάρκεια που δίνει ο κατασκευαστής ή θεωρείται η δεκαετία (σύμφωνα με την παρούσα μέθοδο). Επίσης συνυπολογίζεται ο αριθμός των φορτιστών από τη σχέση:

Φορτιστές (#) = 
$$\frac{Συνολική ισχύς ΦΒ πλαισίων}{Ισχύς φορτιστή} = \frac{5*170 W}{300 W} = \frac{850}{300} = 3$$

Το συνολικό κόστος που προκύπτει είναι:

C<sub>ph</sub>= N<sub>ph</sub>\*542=11\*542=5962 €

C<sub>b</sub>=8\*123 = 984 €

C<sub>ch</sub>=3\*146=438 €

C<sub>inv</sub>=N<sub>inv</sub>\*101.06 =4\*101.6=404 €

C<sub>H/Z</sub> =2400 €

Κόστος εγκατάστασης =C<sub>ph</sub>+C<sub>b</sub>+C<sub>inv</sub>+C<sub>cont</sub>+C<sub>H/Z</sub>+C<sub>ch</sub>= 10188 €

όπου:

- C<sub>H/Z</sub> είναι το κόστος του Η/Ζ (€),
- C<sub>ph</sub> το κόστος των Φ/Β πλαισίων (€),
- C<sub>b</sub> το κόστος των συσσωρευτών (€),
- C<sub>inv</sub> το κόστος των μετατροπέων DC/AC (€) και
- C<sub>ch</sub>: το κόστος των φορτιστών.

Το συνολικό κόστος επιβαρύνεται με έξοδα εγκατάστασης, C<sub>εγκ</sub>, όπου στην παρούσα μέθοδο ανέρχονται στα 800€ για εγκατάσταση που καλύπτει ενέργεια φορτίου 3.06 kWh. Κάνοντας την παραδοχή ότι χρειάζεται να δαπανηθεί το ίδιο ποσό για την κάλυψη φορτίου 5.58kW, το τελικό κόστος ανέρχεται σε:

# Συνολικό κόστος=Κόστος εγκατάστασης+C<sub>εγκ</sub>+Y\*C<sub>b</sub>=10988+4\*984=14924 €

όπου:

- C<sub>b</sub> το συνολικό κόστος των συσσωρευτών (€) και
- Υ ο αριθμός αντικαταστάσεων των συσσωρευτών.

Τέλος, στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα.

Πίνακας 7.5 Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα								
Υποσύστημα	Συμμετοχή (%)							
Φ/Β πλαίσια	40							
Συσσωρευτές	43							
Μετατροπέας DC/AC, Η/Ζ	9							
Φορτιστές	3							
Κόστος Εγκατάστασης	5							

Στην προσομοίωση που έγινε για ένα έτος στα αποτελέσματα των τριών μεθόδων, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην Παράγραφο 8.2, μόνο η μέθοδος της παραγράφου 7.3 (λογισμικό Homer) έδωσε επιτυχή λειτουργία για σύστημα με Α/Γ και υβριδικό σύστημα ενώ δεν έδωσε επιτυχή λειτουργία για σύστημα με Φ/Β πλαίσια. Οι μέθοδοι της παραγράφου 7.2 και 7.4 δεν έδωσαν επιτυχή λειτουργία κατά την προσομοίωση με τον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

# 8. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

# 8.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Στην παρούσα εργασία έγινε προσομοίωση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών για την κάλυψη του φορτίου είτε απευθείας μέσω της παραγόμενης ενέργειας, είτε με τροφοδοσία μέσω κατάλληλης συστοιχίας συσσωρευτών. Η διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος έγινε με χρήση γενετικών αλγόριθμων και κριτήριο τη βέλτιστη (ελάχιστη) οικονομική απαίτηση του συστήματος.

Η διαστασιολόγηση υπολογίζει τα παρακάτω:

- αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων (Ν1),
- αριθμό ανεμογεννητριών (Ν<sub>2</sub>),
- παράλληλοι κλάδοι συσσωρευτών (N<sub>3</sub>),
- ύψος ιστού ανεμογεννήτριας (Ν<sub>4</sub>),
- αριθμό φορτιστών (Ν<sub>5</sub>),
- αριθμό μετατροπέων ισχύος DC/AC συνδεδεμένων παράλληλα (Ν<sub>6</sub>) και
- γωνίες κλίσης των Φ/Β πλαισίων  $(b_1, b_2)$ .

Επίσης λαμβάνει υπόψη τα αντίστοιχα κόστη αγοράς (C) και συντήρησης (C<sub>m</sub>) για κάθε ένα λειτουργικό μέρος (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κ.τ.λ.).

Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται η σχηματική αναπαράσταση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία:



**Σχήμα 8.1.** Το γενικό διάγραμμα του αυτόνομου υβριδικού συστήματος.

Το σύστημα αποτελείται από ένα DC-Bus πάνω στον οποίο συνδέονται οι συσσωρευτές, οι Α/Γ, οι φορτιστές των συσσωρευτών και οι μετατροπείς ισχύος DC/AC και ένα AC-Bus όπου συνδέονται οι μετατροπείς ισχύος DC/AC και γίνεται η διασύνδεση με το φορτίο. Μπορούν να συνδεθούν πολλοί συσσωρευτές σε σειρά και παράλληλα (N<sub>3</sub>), πολλοί μετατροπείς ισχύος DC/AC παράλληλα (N<sub>6</sub>), πολλές A/Γ (N<sub>2</sub>) συνδεδεμένες παράλληλα όπως και Φ/Β πλαίσια (N<sub>1</sub>). Μεταξύ των Φ/Β πλαισίων και του DC-διαύλου υπάρχουν φορτιστές (N<sub>5</sub>) που χρησιμοποιούνται για τη σωστή φόρτιση των συσσωρευτών. Σε κάθε Φ/Β πλαίσιο μπορεί να συνδεθεί συγκεκριμένος αριθμός φορτιστών σε σειρά και παράλληλα. Μεταξύ των Α/Γ και των συσσωρευτών δε χρησιμοποιούνται φορτιστές μιας και θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνονται εσωτερικά στις Α/Γ.

Για την προσομοίωση του συστήματος μπορούμε να έχουμε τις εξής επιλογές:

- διαστασιολόγηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος με Φ/Β και Α/Γ,
- διαστασιολόγηση αυτόνομου συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια ή
- διαστασιολόγηση αυτόνομου συστήματος μόνο με Α/Γ.

Σε όλες τις παραπάνω επιλογές μπορεί να γίνει επιλογή μίας ή δύο κλίσεων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά τη διάρκεια ενός έτους. Επίσης μπορεί να επιλεγεί απλό μοντέλο προσομοίωσης της λειτουργίας συσσωρευτών ή αναλυτικό.

# 8.2 Ο αλγόριθμος προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος

Η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος υπολογίζει κάθε ώρα την ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τη συγκρίνει με το φορτίο, ενώ παράλληλα υπολογίζει τις συνθήκες φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών. Ο αλγόριθμος προσαρτάται στον γενετικό και τρέχει κάθε φορά ώστε να καθοριστεί η κατάσταση των συσσωρευτών, πόσο δηλαδή θα εκφορτιστούν ή θα φορτιστούν ανάλογα με κάποιους περιορισμούς.

Πριν γίνει όμως η προσομοίωση, εισάγονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης όλα τα δεδομένα που αφορούν το σύστημα και τα οποία μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά, το προφίλ φορτίου, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των λειτουργικών μερών και τέλος τις παραμέτρους των γενετικών. Η βασική ιδέα του αλγόριθμου προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 8.2.





# 8.2.1 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά

Γίνεται εισαγωγή του προφίλ ηλιακής ακτινοβολίας (kWh/m<sup>2</sup>) σε οριζόντιο επίπεδο με την επιλογή του γεωγραφικού πλάτους, του συντελεστή ανάκλασης του εδάφους και των μέσων μηνιαίων τιμών (12 τιμές) ή μέσων ημερήσιων τιμών ακτινοβολίας (365 τιμές). Έπειτα γίνεται εισαγωγή του προφίλ θερμοκρασίας, όπου ορίζεται το γεωγραφικό πλάτος και επιλέγεται μέση ημερήσια ή μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C). Τέλος, εισάγεται το προφίλ ανέμου όπου επιλέγεται το γεωγραφικό πλάτος, οι μέσες μηνιαίες τιμές (12 τιμές) ή οι μέσες ετήσιες (365 τιμές), ο εκθέτης του εκθετικού νόμου (Σχέση 3.4) και το ύψος (m) όπου έγιναν οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου.

#### 8.2.2 Προφίλ φορτίου

Εισάγεται το προφίλ φορτίου (W) που πρέπει το σύστημα να καλύπτει ανά ώρα για ένα έτος (8760 τιμές). Υπάρχουν επιλογές για σταθερό φορτίο και για μεταβαλλόμενο, όπως π.χ. αυτό που αντιστοιχεί στις απαιτήσεις μιας οικίας.

#### 8.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργικών μερών

#### Συσσωρευτές

Όλα τα είδη συσσωρευτών βρίσκονται σ' ένα αρχείο και ανάλογα με το ποιό έχει επιλεχθεί διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του που είναι τα ακόλουθα: ο αύξων αριθμός, το όνομα του μοντέλου, η χωρητικότητα (Ah), η ονομαστική τάση (V), το απλό ή το σύνθετο μοντέλο προσομοίωσης (0: απλό μοντέλο προσομοίωσης συσσωρευτών, 1: σύνθετο), ο βαθμός απόδοσης κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή, το βάθος εκφόρτισης, το κόστος αγοράς (€), το ετήσιο κόστος

συντήρησης (λαμβάνεται ίσο με 1.5% επί της τιμής αγοράς) (€), η τάση φόρτισης ενός στοιχείου (V), οι πλήρης κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης και τέλος, η μέγιστη διάρκεια ζωής. Επίσης διαβάζεται η κατάσταση φόρτισης, SOC, του συσσωρευτή η αντίστοιχη τάση ανοικτοκύκλωσης του κελιού (V) και η αντίστοιχη εσωτερική αντίσταση (mOhm), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.4. Τα στοιχεία αυτά παρέχονται από τον κατασκευαστή και στο Σχήμα 8.4 οι τρείς πρώτες τιμές δηλώνουν τις SOC, στις οποίες αντιστοιχίζονται οι τρείς επόμενες τιμές με τις αντίστοιχες εσωτερικές αντιστάσεις και οι επόμενες τρείς με τις αντίστοιχες τάσεις ανοικτοκύκλωσης του κελιού. Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται η μορφή του αρχείου όπου περιέχονται τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών.

K	, b	atter	ies	txt +	(C:\ok	3cygv	winde	ouleue	ei1\INPUT	DATA	<b>\</b> SYSTE	M D	EVICE	S) - GVI	M	
F	ile	<u>E</u> d	it	<u>T</u> ool	s <u>S</u> y	ntax	<u>B</u> uff	ers	<u>W</u> indow	Help	καφης					
£	7		C	₽	9	¢	X	Đ	Ē	, 🗟	،   🕭	<b>1</b> (	± ₹	ใ   วิ	l 🖸 🖓	የእ
1 2 3	S S T	B12, LM4( roja	/18 3 an_	35A 48 _L16	185 180 P 3	12 12 90 6	0 2 0 5 1	0.8 0.8 0.85	0.8 0.8 0.8	28 81 123	0 4. 1.2 1.85	2 2	23 50 2.2	00 7 0 10 300	5	

**Σχήμα 8.3** Το αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των συσσωρευτών.

Matcurves.txt (G:\ok3cygwin\INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES\BT CURVES) - GVIM1	
File Edit Tools Syntax Buffers Window Help	
🖰 🖬 🖺 🖯 영 영 🕺 🗈 🏟  🏶 🕄 🍰 🙏 🕆 🎒 🧐	<mark>⊐</mark>  ? א
0.2 0.4 0.6 0.38 0.30 0.28 2.02 2.05 2.09	

**Σχήμα 8.4** Το αρχείο εισόδου με την κατάσταση φόρτισης (SOC), την εσωτερική αντίσταση και την τάση ανοικτοκύκλωσης κάθε στοιχείου του συσσωρευτή.

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας 122

#### Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Όλα τα είδη των Φ/Β πλαισίων μαζί με τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται σε ένα αρχείο. Ανάλογα με το Φ/Β πλαίσιο που έχει επιλεγεί διαβάζονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι η ονομασία του, τα στοιχεία που περιλαμβάνει σε σειρά και παράλληλα, η τάση βραχυκύκλωσης (V), το ρεύμα ανοικτοκύκλωσης (A), η τάση στο σημείο MPP (V), το ρεύμα στο σημείο MPP (A), η ισχύ αιχμής (W), το NCOT (°C), το κόστος εγκατάστασης (€), το ετήσιο κόστος συντήρησης (λαμβάνεται ίσο με 1% επί της τιμής αγοράς) (€) και τέλος, ο χρόνος ζωής τους σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κατασκευαστή. Το αρχείο που περιέχει τα είδη των Φ/Β πλαισίων φαίνεται στο Σχήμα 8.5.

👫 pvmodules.txt (G:\ok3cygwin\INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES) - GVIM1
File Edit Tools Syntax Buffers Window Help
은 🖬 🖫 볼   원 ⓒ   X 🗈 唯   & 운 운 은   솔 솔 ጲ   î  🏟 💶   ?  유
1 AT55 39 1 21.6 3.48 17.3 3.18 55 43 265.81 2.7 20
2 AT110 36 1 21.0 7.22 17.0 6.47 110 43 519.14 5.2 20
3 EC102 72 1 21.5 7.05 17.0 6 102 44 382 3.82 20
4 EC110 72 1 21.5 7.22 17.2 6.40 110 44 404.8 4 20
5 EC115 72 1 21.5 7.26 7.26 17.3 6.65 115 44 430.3 4.3 20
6 MitsubishiMF110 36 1 21.2 7.16 17.1 6.43 110 44 264.38 2.65 25
7 Mitsubishi_MF170 50 1 30.6 7.38 24.6 6.93 170 44 542 5.4 25
8 SharpMD123 36 1 21.3 8.1 17.2 7.16 123 44 468 4.7 25
9 SharpNt180 72 1 44.8 5.6 35.86 5.02 180 44 320.6 3.2 25

**Σχήμα 8.5** Το αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### Ανεμογεννήτριες

Τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών διαβάζονται επίσης από ξεχωριστό αρχείο. Αυτά είναι: το μοντέλο του κατασκευαστή, η DC τάση εξόδου (V), η ονομαστική ισχύς (W), το κόστος εγκατάστασης (€), το ετήσιο κόστος συντήρησης (1% επί της τιμής αγοράς) (€), το κόστος εγκατάστασης του ιστού

(σε €/m), το κόστος συντήρησης του ιστού (σε €/m), το όνομα του αρχείου που περιέχει την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας, ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών του φορτιστή της Α/Γ σε ώρες και τέλος, το κόστος επισκευής (λαμβάνεται ίσο με 1.5% επί του 30% της τιμής αγοράς της Α/Γ) (€). Το αρχείο με την καμπύλη ισχύος δίνεται από τον κατασκευαστή και περιλαμβάνει δυο στήλες. Η μια αντιπροσωπεύει την ταχύτητα ανέμου (m/s) και η άλλη την αντίστοιχη ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας. Το Σχήμα 8.6 απεικονίζει το αρχείο με τη χαρακτηριστική καμπύλη της Α/Γ *Whisper W100 H40.* 

K	windturbines.txt (C:\elegxos\elegxos t++\INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES) - GVIM
Fil	e Edit Tools Syntax Buffers Window Help
9	i 🖬 🖫 🗄   9 G   X 🗈 🏚 🔩 🔂 🔂 📥 📩 🎗   î 🏟 💶   ? 🎗
1	BWCXL.1 24 1000 1681 16.81 55 0.55 xl1.txt 25 87600 7.56
2	AirX 24 400 512 5.12 55 0.55 airx1.txt 25 87600 2.3
3	ARE110 48 2500 7881 78.81 55 0.55 are110.txt 20 87600 35.46
4	ARE442 48 10000 24861 248.6 55 0.55 are442.txt 22 87600 111.8
5	Whisper200H80 24 1000 2000 20 55 0.55 w200.txt 25 87600 9
6	Whisper100H40 24 900 1650 16.5 55 0.55 w100.txt 30 87600 7.43

**Σχήμα 8.6** Το αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Kn v	v100	.txt	(G:\ok	Scygv	vin\II	NPUT_	DAT	a\sys	TEM	DEVI	CES\M	/T PO	WER	CURV	ES) -	GVI	<b>//2</b>		
File	Ec	lit	Tools	Syr	ntax	Buff	ers	Winde	ow	Help									
₿			8	9	¢	X	Ð	۵)		₽.	€.	٥	٥	急	ግ	٩	<u> </u>	?	2
3.4	0																		
4.5	40	)																	
6.8	19	0																	
94	00																		
10	460																		
11.	36	80																	
13	900																		
15.	88	50																	
18	800	)																	
20.	37	20																	

# **Σχήμα 8.7** Το αρχείο εισόδου με τις τιμές της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας.

#### Φορτιστές

Για τους φορτιστές τα χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται είναι η ονομασία, ο τύπος (1 με δυνατότητα MPPT, 0 χωρίς δυνατότητα MPPT), ο βαθμός απόδοσης, η ισχύς (W), ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών σε ώρες, η τάση λειτουργίας (V), το κόστος αγοράς (€), το κόστος επισκευής λόγω βλαβών (€) (λαμβάνεται ίσο με 1% επί της τιμής αγοράς) και το ετήσιο κόστος συντήρησης (€) (λαμβάνεται ίσο με 1.5% επί της τιμής αγοράς). Οι φορτιστές έχουν δύο βαθμούς απόδοσης n<sub>1</sub> και n<sub>2</sub>, αν έχουν δυνατότητα MPPT τότε ο ένας λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, π.χ. n<sub>1</sub>=1 και n<sub>2</sub>=0.96, όπως φαίνεται για την πρώτη επιλογή στο Σχήμα 8.8.

Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), είναι μια συσκευή που επεξεργάζεται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού, ώστε σε κάθε χρονική στιγμή το σύστημα, να απορροφά τη μέγιστη δυνατή ισχύ από το φωτοβολταϊκό.

K	ŝ	olaro	char	gers.tx	t + (G:	\ok3cj	ygwin\I	NPUT_DAT	'A\SYS	TEM DEV	ICES) -	GVIM1		
E	ile	Ec	lit	<u>T</u> ools	<u>S</u> ynt	ax <u>B</u>	uffers	<u>W</u> indow	<u>H</u> elp					
£	7		Q	₽	9 (	g	λĒ	ē 🕻	l 🗟	8	5 📥	\$   T	ái 💷	የ እ
1 2	S S	B_2 R20	000 0	DE 1 0.7	0.96 0.	30 962	087 4087	600 24 600 24	146 94 0	1.46 2 .94 1.	.19 41			

**Σχήμα 8.8** Το αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των φορτιστών.

# Μετατροπείς ισχύος DC/AC

Στο αρχείο με τους μετατροπείς ισχύος περιλαμβάνονται τα εξής χαρακτηριστικά:

ο αύξων αριθμός, το μοντέλο του κατασκευαστή, η απόδοση, η μέγιστη ισχύς

εξόδου (kW), ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (MTBF), το κόστος αγοράς (€), το κόστος συντήρησης (€) (λαμβάνεται ίσο με 1.5% επί της τιμής αγοράς), η τάση λειτουργίας (V) και τέλος, το κόστος επισκευής του μετατροπέα ισχύος(€) (λαμβάνεται ίσο με 1% επί της τιμής αγοράς).

k	inverters.txt (G:\	ok3cygw	in\INPU	T_DATA\SYS	TEM DEVIC	CES) - GVIM	3		
F	File Edit Tools	Syntax	Buffer	s Window	Help				
ę	3894	9 C	- X (	ē 🖻 🗄	). 🔁 🔁	l 🕹 📥	& ி	a 🗆 ?	2
1	3KVA-conv	0.8	8 :	3 8760	0 469.	5 7.04	48	4.695	
2	Ppower30	0.89	30	87600	4695	70.425	240	46.95	
3	Everest	0.94	100	87600	15650	234.75	360	15.655	
4	Solarstocc	0.88	6.5	87600	2761	41.415	240	27.61	
5	SMC5000A	0.95	5	87600	3580	5.37	240	35.80	
6	Samplex	0.80	0.3	43800	101.06	1.515	24	1.0106	

**Σχήμα 8.9** Το αρχείο εισόδου με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος DC/AC.

# 8.2.4 Παράμετροι εισαγωγής στο γενετικό αλγόριθμο

Πρώτα προσδιορίζεται ο συνδυασμός των λειτουργικών μερών του συστήματος που πρόκειται να προσομοιωθεί βάσει του αύξοντα αριθμού που αναφέρθηκε παραπάνω. Η μορφή του αρχείου φαίνεται στο Σχήμα 8.10 και επιλέγεται ο αύξων αριθμός με την εξής σειρά: φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ανεμογεννήτρια, φορτιστής, μετατροπέας ισχύος, συσσωρευτής. Δηλαδή στο αρχείο που παρατίθεται στο Σχήμα 8.10 θα επιλέξουμε:

από το αρχείο με τα Φ/Β πλαίσια το Φ/Β πλαίσιο με αύξοντα αριθμό 7, δηλαδή το 7 Mitsubishi\_MF170,

από το αρχείο με τις ανεμογεννήτριες την ανεμογεννήτρια με αύξοντα αριθμό 6, δηλαδή την **6** Whisper100H40,

από το αρχείο με τους φορτιστές το φορτιστή με αύξοντα αριθμό 1, δηλαδή το: **1** SB\_2000E,

από το αρχείο με τους μετατροπείς ισχύος, το μετατροπέα DC/AC με αύξοντα

αριθμό 6, δηλαδή το **6** Samplex και

από το αρχείο με τους συσσωρευτές το συσσωρευτή με αύξοντα αριθμό 3, δηλαδή το **3** *Trojan\_L16P*.



**Σχήμα 8.10** Το αρχείο εισόδου με αύξοντες αριθμούς λειτουργικών μερών.

Τέλος, διαβάζονται κατά σειρά όλες οι παράμετροι που αφορούν το γενετικό αλγόριθμο από ένα αρχείο εισόδου που έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 8.10 και περιέχονται τα εξής:

- αρχική γενεά,
- ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων ανά γενεά,
- η πιθανότητα απλής διασταύρωσης,
- η πιθανότητα απλής αριθμητικής διασταύρωσης,
- η πιθανότητα ολικής αριθμητικής διασταύρωσης,
- η πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης,
- η πιθανότητα boundary μετάλλαξης,
- η πιθανότητα μη-ομοιόμορφης μετάλλαξης,
- ο αριθμός των γενεών,
- οι ημέρες τις προσομοίωσης,
- η ημέρα που ξεκινά η προσομοίωση,

- το είδος της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, όταν ο δείκτης έχει τη τιμή 0 τότε χρησιμοποιούμε υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από Φ/Β πλαίσια και Α/Γ, όταν ο δείκτης είναι 1 τότε επιλέγονται μόνο Φ/Β πλαίσια και όταν είναι 2 επιλέγονται μόνο Α/Γ,
- επιλέγεται το μοντέλο της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν ο δείκτης είναι 1 έχουμε ισοτροπικό, ενώ για 0 ανισοτροπικό,
- επιλέγεται το ποσοστό της επιδότησης και
- προσδιορίζεται ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι ο χρόνος μελέτης προσδιορίζεται από το ελάχιστο προβλεπόμενο χρόνο λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων ή των Α/Γ και διαβάζεται από τα αρχεία που αναφέραμε πιο πάνω. Συνεπώς, αν ο εγγυημένος χρόνος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας είναι π.χ. 30 χρόνια και των φωτοβολταϊκών πλαισίων 25 χρόνια, τότε η προσομοίωση, δυναμικά, θα πραγματοποιηθεί για 25 χρόνια.

<b>O</b> File	emac e Ed	it O	<b>loc</b> a	alho ns B	st.io uffe	ocal rs Ti	dom pols	nain Help	)			
Ø	Ø	x	0	S	\$	¥	ĝø	Ħ	Q	Î	Ø	; ş
Z	4543 30 0.1 0.1 0.1 0.30 365 1 1 0 20	388										



Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος δημιουργείται ένα αρχείο με όνομα που προσδιορίζει το συνδυασμό των λειτουργικών μερών (βάσει αύξοντα αριθμού) καθώς και το είδος ανανεώσιμης πηγής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε (π.χ. **76163\_0.txt**), όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 8.4.2. Το αρχείο αυτό περιέχει αναλυτικά τα αποτελέσματα της διαστασιόλογησης μερικά από τα οποία είναι: ο αριθμός των Φ/Β, των Α/Γ, των φορτιστών, των μετατροπέων DC/AC και των συσσωρευτών. Επίσης περιέχεται για κάθε υποσύστημα (Φ/Β, Α/Γ, ιστός Α/Γ, φορτιστή κ.α.) ξεχωριστά το συνολικό κόστος συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασης ανηγμένο σε παρούσα αξία καθώς και τη βέλτιστη οικονομική λύση που προέκυψε από το γενετικό αλγόριθμο. Μέρος της μορφής του αρχείου με τα αναλυτικά αποτελέσματα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

🕤 emacs@localhost.localdomain File Edit Options Buffers Tools Help 0 @ × 6 @ > + 1 1 6 6 6 8 ? -----GA INPUT DATA-----Rand seed: 454388 Population number: 30 psc: 0.10 psac: 0.10 pwac: 0.10 pum: 0.10 pbm: 0.03 pnm: 0.35 Generations mumber: 10000 Type: 0 Xronikos Orizontas: 25 ----OUTPUT DATA-----Voltage of operation : 24 Volts Total run time of algorithm: 10018 seconds -----DETAILS OF EACH MODULO-----DETAILS OF EACH MODULO-----Number of PV's: 4 Cost of each PV: 542.00 Euros Number of pv modules in series: 1 Pv module inclinations: 11,50 Number of Windturbines: 2.00 Cost of each WDTourbine: 1650.00 Euros Number of batterie's arrays: 3.00 Cost of each array: 369.00 Euros Number of batteries in series: 3. Total number of batteries : 9 Total replacement times for the batteries: 2 First replacement in year: 2018 Heigh of tower: 15.00 meters Cost of each meter of tower: 0.00 Euros Number of Chargers: 2 Cost of each Charger 101.06 Euros Number of Inverters: 1 Cost of each Inverter: 101.06 Euros Cost of each Inverter's Controller: 50.00 Euros Voltage of Inverter : 12 Volts Inverter power rating: 300 Watt Cost for replacing batteries: 3540.77 Euros Cost for replacing inverters: 1.01 Euros Cost for replacing solarchargers: 1735.72 Euros Maintenance of one PV: 5.40 Euros Maintenance of one WDTurbine: 1.60 Euros Maintenance of one Battery array: 18.45 Euros Maintenance of every meter of Tower: 0.00 Euros Maintenance of one Charger: 1.46 Euros Maintenance of one Inverter: 1.51 Euros -----TOTAL COST IN DETAIL-----\_\_\_\_ Subsidy: 0.0 Economy of 2007: inflation: 0.031, interest rate: 0.08 Installation Cost: 7018.06 Euros Total maintenance through 25 years is: 3221.59 Euros Replacement cost: 5277.50 Euros Total cost through 25 years is 15517.15 Euros The net present value with interset rate 0.08 is 2265.78 plus the installation cost is: 9283.84 Euros

**Σχήμα 8.12** Μορφή αρχείου εξόδου με μέρος των βέλτιστων αποτελεσμάτων της διαστασιολόγησης.

# 8.3 Μοντελοποίηση του προβλήματος με το γενετικό αλγόριθμο

# 8.3.1 Εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου

Το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγόριθμου απεικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 8.13. Αρχικά υλοποιείται μια ρουτίνα αρχικοποίησης και εν συνεχεία ακολουθούν οι γενετικές πράξεις. Η λήξη του αλγορίθμου συμβαίνει όταν ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού.



**Σχήμα 8.13** Το διάγραμμα ροής του γενετικού αλγόριθμου.

Ως γονίδια του γενετικού αλγόριθμου, χρησιμοποιήθηκαν ο αριθμός των Φ/Β, των Α/Γ, των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών, το ύψος του ιστού της Α/Γ και η κλίση των Φ/Β πλαισίων όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 8.2.3. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την οικονομικότερη λύση ανάλογα με τα γονίδια που έχει επιλέξει. Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση μπορεί να γίνει για σταθερή κλίση των Φ/Β πλαισίων όλο το χρόνο, οπότε τα χρωμοσώματα έχουν τη μορφή c=[N<sub>1</sub>,N<sub>2</sub>,N<sub>3</sub>,N<sub>4</sub>,b] ή για δύο κλίσεις κατά τη διάρκεια του έτους, οπότε τα χρωμοσώματα έχουν τη μορφή c=[N<sub>1</sub>,N<sub>2</sub>,N<sub>3</sub>,N<sub>4</sub>,b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>]. Ο αριθμός των μετατροπέων ισχύος DC/AC υπολογίζεται μονοσήμαντα από την παρακάτω σχέση:

$$N_6 = \frac{P_{max}}{P_{nom}}$$
(8.1)

όπου N<sub>6</sub> ο αριθμός των παράλληλων μετατροπέων ισχύος DC/AC, P<sub>max</sub> η μέγιστη απαίτηση ισχύος του φορτίου και P<sub>nom</sub> η ονομαστική AC ισχύς του μετατροπέα DC/AC.

Επίσης μονοσήμαντα υπολογίζεται και ο αριθμός των φορτιστών που καθορίζεται από το σύνολο των φωτοβολταϊκών πλαισίων που υπολογίζει ο γενετικός αλγόριθμος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{pv/ch} = \frac{P_{chm}}{P_{Mm}}$$
(8.2)

όπου Ν<sub>pv</sub> ο αριθμός των πλαισίων που αντιστοιχούν σε ένα φορτιστή, P<sub>chm</sub> η ονομαστική ισχύς του φορτιστή και P<sub>Mm</sub> η ισχύς αιχμής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αν Ν<sub>1</sub> είναι ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων τότε ο συνολικός αριθμός φορτιστών Ν<sub>5</sub> δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_5 = \frac{N_1}{N_{pv/ch}}$$
(8.3)

Συνεπώς, τόσο οι μετατροπείς DC/AC όσο και οι φορτιστές συμμετέχουν έμμεσα στις πράξεις του γενετικού αλγόριθμου και συγκεκριμένα στην συνάρτηση κόστους. Ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων του συστήματος, N<sub>1</sub>, με τάση V<sub>pvm</sub> και τάση του DC bus V<sub>bus</sub> είναι:

$$N_1 = \frac{V_{\text{bus}}}{V_{\text{pvm}}} * N_p \tag{8.4}$$

Το πηλίκο  $\frac{V_{bus}}{V_{pvm}}$  προσδιορίζει τον αριθμό των Φ/Β πλαισίων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και αντιστοιχούν σε ένα φορτιστή και N<sub>p</sub> τον αριθμό των κλάδων που είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Η τάση V<sub>bus</sub> είναι η τάση εξόδου του φορτιστή και κατ' επέκταση του DC-bus που πρέπει να συμφωνεί με την τάση εισόδου του μετατροπέα DC/AC και την τάση εξόδου της Α/Γ ώστε να υπάρχει συμβατότητα των συσκευών. Δηλαδή η τάση στον DC δίαυλο να είναι ίδια με την τάση της διάταξης των συσκευών (συσσωρευτές, φορτιστές, Α/Γ και

Ο αριθμός των Α/Γ, Ν<sub>2</sub>, προκύπτει από το γενετικό αλγόριθμο και ελέγχεται η τάση εξόδου της Α/Γ να είναι ίδια με την τάση του DC-bus.

μετατροπείς DC/AC) που συνδέονται σε αυτόν.

Ο αριθμός των παράλληλων κλάδων συσσωρευτών, N<sub>3</sub>, με V<sub>array</sub> την τάση ενός κλάδου, η οποία είναι ίση με τη V<sub>bus</sub>, και V<sub>b</sub> την τάση ενός συσσωρευτή είναι:

$$N_{tot} = N_{3} \frac{V_{array}}{V_{b}} \Rightarrow N_{3} = \frac{N_{tot}}{V_{array}/V_{b}}$$
(8.5)

Το πηλίκο  $\frac{V_{array}}{V_{b}}$  προσδιορίζει τον αριθμό των συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και Ν<sub>tot</sub> είναι ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών.

Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων ανά γενεά λαμβάνεται ίσο με 30. Η τιμή αυτή προέκυψε έπειτα από δοκιμές, όπου διαπιστώθηκε ότι με υψηλότερο αριθμό χρωμοσωμάτων ο αλγόριθμος είναι χρονοβόρος, ενώ δε συνέκλινε με μικρότερο αριθμό [3].

Για την κωδικοποίηση των τιμών των μεταβλητών χρησιμοποιήθηκαν αριθμοί κινητής υποδιαστολής (floating point). Έτσι δεν υπήρξαν χρωμοσώματα με

πολύ μεγάλες τιμές κάτι που θα περιέπλεκε τις πράξεις και κυρίως τις συναρτήσεις ελέγχου καθώς ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί επαναληπτικούς βρόχους για κάθε αποτέλεσμα που προκύπτει, ώστε να ελέγχεται η εγκυρότητα του εύρους τιμών των χρωμοσωμάτων.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δίνεται από τη σχέση:

$$g(N_1, N_2, N_3, N_4, N5) = (1-k)^* I_{cost} + M_{costp} + B_c + IN_c + S_c + W_c$$
(8.6)

όπου:

k είναι το ποσοστό επιδότησης (%),

I<sub>cost</sub> το κόστος εγκατάστασης (€),

Μ<sub>costp</sub> η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης (€),

B<sub>c</sub> η παρούσα αξία του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών (€),

IN<sub>c</sub> η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των μετατροπέων DC/AC (€),

S<sub>c</sub> η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των φορτιστών (€) και

W<sub>c</sub> η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των φορτιστών των Α/Γ (€)

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των παραμέτρων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το κόστος εγκατάστασης, Icost, δίνεται από τη σχέση:

$$I_{\text{cost}} = N_1 * C_1 + N_2 * C_2 + N_3 * C_3 + N_2 * N_4 * C_h + N_5 * C_5 + N_6 * C_6$$
(8.7)

όπου:

N<sub>1</sub>,C<sub>1</sub> είναι ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων και το κόστος κάθε Φ/Β πλαισίου αντίστοιχα,

 $N_2, C_2$  ο αριθμός των Α/Γ και το κόστος κάθε Α/Γ αντίστοιχα,

Ν<sub>3</sub>,C<sub>3</sub> ο αριθμός των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών και το αντίστοιχο

κόστος,

Ν₄,C<sub>h</sub> το ύψος του ιστού κάθε Α/Γ και το αντίστοιχο κόστος (€/m),

N<sub>5</sub>,C<sub>5</sub> ο αριθμός των φορτιστών των συσσωρευτών και το κόστος κάθε φορτιστή αντίστοιχα,

N<sub>6</sub>,C<sub>6</sub> ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC και το κόστος κάθε μετατροπέα DC/AC αντίστοιχα.

Το ύψος της επιδότησης, k, μπορεί να επιλεχθεί ως παράμετρος εισόδου στο γενετικό αλγόριθμο.

Το M<sub>cost</sub> είναι το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_{cost} = N_1 * Cm_1 + N_2 * C_{m2} + N_3 * C_{m3} + N_2 * N_4 * C_{hm} + N_5 * C_{m5} + N_6 * C_{m6}$$
(8.8)

όπου:

C<sub>m1</sub> είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης του Φ/Β πλαισίου,

C<sub>m2</sub> το ετήσιο κόστος συντήρησης της Α/Γ,

C<sub>m3</sub> το ετήσιο κόστος συντήρησης ενός κλάδου συσσωρευτών,

Chm το ετήσιο κόστος συντήρησης του ιστού της Α/Γ,

C<sub>m5</sub> το ετήσιο κόστος συντήρησης κάθε φορτιστή και

C<sub>m6</sub> το ετήσιο κόστος συντήρησης κάθε μετατροπέα ισχύος DC/AC.

Η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης, M<sub>costp</sub>, υπολογίζεται, σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στην Παράγραφο 6.2, από την παρακάτω σχέση:

$$M_{\text{cocstp}} = \sum_{n=1}^{n=\text{year}} \frac{M_{\text{cost}}}{\left(1+i\right)^n} \left(1+g\right)^n \tag{8.9}$$

όπου:

year ο χρονικός ορίζοντας λειτουργίας του συστήματος (έτη),

- g ο πληθωρισμός και
- ί το επιτόκιο αναγωγής.

Η παρούσα αξία του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών, B<sub>c</sub>, είναι:

$$B_{c}=N_{3}*C_{3}*\sum_{n=n^{*}}\frac{(1+g)^{n}}{(1+i)^{n}}$$
(8.10)

όπου:

Ν<sub>3</sub> είναι ο αριθμός των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών,

- C<sub>3</sub> το κόστος ενός κλάδου συσσωρευτών,
- n\* η συγκεκριμένη χρονιά που θα γίνει η αντικατάσταση,
- g ο πληθωρισμός και
- ί το επιτόκιο αναγωγής.

Η μεταβλητή n\* είναι η χρονιά που θα αλλάξουν οι συσσωρευτές. Για παράδειγμα εάν. η μελέτη είναι για 25 χρόνια και οι συσσωρευτές έχουν διάρκεια ζωής 10 χρόνια, τότε θα γίνει αλλαγή 2 φορές, η πρώτη μετά από 10 χρόνια και η δεύτερη μετά από 20 χρόνια.

Η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των μετατροπέων DC/AC, IN<sub>c</sub>, λόγω βλαβών δίνεται από την παρακάτω σχέση:

IN<sub>c</sub>=N<sub>6</sub>\*MTBF\_cost\* 
$$\sum_{n=n^*} \frac{(1+g)^n}{(1+i)^n}$$
 (8.11)

όπου:

Ν<sub>6</sub> είναι ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC,

MTBF\_cost το κόστος για την επισκευή κάθε μετατροπέα DC/AC,

n\* η συγκεκριμένη χρονιά που θα γίνει η επισκευή,

g ο πληθωρισμός και

ί το επιτόκιο αναγωγής.

To n\* υπολογίζεται σύμφωνα με το μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών, MTBF (Mean Time Between Failures) ο οποίος καθορίζει το χρονικό διάστημα σωστής λειτουργίας κάθε μετατροπέα ισχύος.

Η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των φορτιστών των συσσωρευτών, S<sub>c</sub>, είναι:

$$S_c = N_5 C_5^* \sum_{n=n^*} \frac{(1+g)^n}{(1+i)^n}$$
 (8.12)

Ν<sub>5</sub> είναι ο αριθμός των φορτιστών των συσσωρευτών,

- C<sub>6</sub> το κόστος για την επισκευή κάθε φορτιστή,
- n\* η συγκεκριμένη χρονιά που θα γίνει η επισκευή,
- g ο πληθωρισμός και
- ί το επιτόκιο αναγωγής.

Τέλος η παρούσα αξία του κόστους επισκευής των φορτιστών των Α/Γ, W<sub>c</sub>, είναι:

$$W_{c}=N_{2}*C_{7}*\sum_{n=n^{*}}\frac{(1+g)^{n}}{(1+i)^{n}}$$
 (8.13)

- Ν<sub>2</sub> είναι ο αριθμός των Α/Γ,
- C7 το κόστος για την επισκευή κάθε φορτιστή της Α/Γ,
- n\* η συγκεκριμένη χρονιά που θα γίνει η επισκευή,

g ο πληθωρισμός και

ί το επιτόκιο αναγωγής.

# 8.3.2 Μετασχηματισμός αντικειμενικής συνάρτησης σε συνάρτηση προσαρμογής

Επειδή το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης, σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση κόστους. Έτσι λαμβάνονται υπόψη οι Σχέσεις 5.1 και 5.2, οπότε η αντικειμενική συνάρτηση, g(), μετατρέπεται στην παρακάτω συνάρτηση προσαρμογής:

$$f(N_{1,}N_{2,}N_{3,}N_{4},N_{5}) = \begin{cases} C_{max} - g(N_{1},N_{2},N_{3},N_{4},N_{5}) \, \alpha v \, C_{max} - g(N_{1},N_{2},N_{3},N_{4},N_{5}) \\ 0, \, \alpha \lambda \lambda i \dot{\omega} \zeta \end{cases}$$
(8.14)

Η συνάρτηση f() είναι η συνάρτηση προσαρμογής του γενετικού αλγόριθμου και χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής για την εκλογή των χρωμοσωμάτων, κάποια από τα οποία θα συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης. Η ποσότητα Cmax είναι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g(). Η Cmax υπολογίζεται ξεχωριστά σε κάθε γενεά, ενώ οι περιορισμοί του προβλήματος είναι:

 $\mathsf{N}_{_1,}\mathsf{N}_{_2,}\mathsf{N}_{_3,}\mathsf{N}_{_4}$  ,  $\mathsf{N}_{_5}\in\mathrm{N}$  ,

 $N_4 \in [8, \, 15],$ 

 $b, b_1, b_2 \in [0^o, 90^o]$  каι,

 $SIM1(N_1, N_2, N_3, N_4, b) = 1, SIM2(N_1, N_2, N_3, N_4, b_1, b_2) = 1$ 

Θεωρούμε ότι όταν ο αλγόριθμος προσομοίωσης για μία κλίση Φ/Β πλαισίων, SIM1, ή για δύο κλίσεις, SIM2, επιτυγχάνει, επιστρέφει 1. Οι αλγόριθμοι SIM1 και SIM2 χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί κατά πόσο μια λύση ικανοποιεί τις ενεργειακές απαιτήσεις του φορτίου. Τέλος, η απλή μέθοδος του τροχού της ρουλέτας (Παράγραφος 5.6) εφαρμόζεται σαν μηχανισμός επιλογής στο πρόβλημά μας. Μετά την επιλογή ακολουθούν οι πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

# 8.4 Πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης

# 8.4.1 Διασταύρωση

Για τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων χρησιμοποιούνται οι εξής τρείς τελεστές:

**Απλή διασταύρωση (simple crossover,sc)**: Εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει αναλυθεί στην Παράγραφο 5.3. Για το δεδομένο πρόβλημα θεωρούμε ότι η s.c. συμβαίνει μόνο σ' ένα σημείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα  $p_{sc}$  κάποια από τα χρωμοσώματα που έχουν προκύψει από την πράξη της επιλογής να συμμετάσχουν σε απλή διασταύρωση, δίνεται ως παράμετρος εισόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή για πληθυσμό χρωμοσωμάτων ίσο με 30 είναι  $p_{sc}$ =10%. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα ενωθούν γίνεται με τη γέννηση ενός τυχαίου αριθμού r,  $p_{sc} \le r \le p_{sac}$ , για κάθε χρωμόσωμα. Αν για κάποιο χρωμοσωμάτων που έχουν επιλεγεί δεν είναι άρτιος τότε επιλέγεται ένα ακόμα χρωμόσωμα. Η διασταύρωση εν συνεχεία λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα χρωμοσώματα με αύξουσα σειρά, δηλαδή θα διασταυρωθεί το πρώτο χρωμόσωμα που έχει επιλεχθεί με το δεύτερο, το τρίτο με το τέταρτο κ.o.κ.

**Απλή αριθμητική διασταύρωση (simple arithmetic crossover, sac)**: Αν τα χρωμοσώματα c<sub>1</sub>=[u<sub>1</sub>...u<sub>m</sub>] και c<sub>2</sub>=[w<sub>2</sub>...w<sub>m</sub>] πρόκειται να λάβουν μέρος σε πράξη sac., τότε οι απόγονοί τους θα είναι:

$$c_1'=[u_1...u_k'...u_m] \ \kappa \alpha_1 \ c_2'=[w_1...w_{k'} \ w_m]$$
 (8.15)

όπου:

 $u_k$ '= $\alpha w_k$ +(1- $\alpha$ ) $u_k$  $w_k$ '= $\alpha u_k$ +(1- $\alpha$ ) $w_k \mu \epsilon k \in [1,m]$  Η επιλογή του k είναι τυχαία, ενώ το α επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται μέσα στο πεδίο των εφικτών λύσεων, χωρίς να παραβιάζουν τους κανόνες. Πιο αναλυτικά το α είναι μια τυχαία επιλογή στο διάστημα:

$$\alpha = \begin{cases} [\max(\alpha,\beta),\min(\gamma,\delta)], \alpha v u_{k} > w_{k} \\ [0,0], \alpha v u_{k} = w_{k} \\ [\max(\gamma,\delta),\min(\alpha,\beta)], \alpha v u_{k} < w_{k} \end{cases}$$

$$(8.16)$$

όπου:

$$\begin{split} \alpha &= \frac{\left(I_{k}^{c_{2}} - w_{k}\right)}{\left(u_{k} - w_{k}\right)} \\ \beta &= \frac{\left(u_{k}^{c_{1}} - u_{k}\right)}{\left(w_{k} - u_{k}\right)} \\ \gamma &= \frac{\left(I_{k}^{c_{1}} - u_{k}\right)}{\left(w_{k} - u_{k}\right)} \\ \delta &= \frac{\left(u_{k}^{c_{2}} - w_{k}\right)}{u_{k} - w_{k}} \end{split}$$

Οι ποσότητες  $I_{k}^{c_{i}}$  και  $u_{k}^{c_{i}}$  συμβολίζουν το άνω και το κάτω φράγμα του γονιδίου k του χρωμοσώματος i. Δεν λαμβάνονται σταθερές αλλά υπολογίζονται δυναμικά από τον αλγόριθμο dyn\_bnd για κάθε απλή αριθμητική διασταύρωση. Η πιθανότητα sac. λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου με προεπιλεγμένη τιμή  $p_{sac}$ =10%. Όπως και στην απλή διασταύρωση για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας αριθμός, r,  $1 \le r \le 0$ . Σε περίπτωση που  $p_{sc} \le r \le p_{sac}$ , τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε απλή αριθμητική διασταύρωση.

#### Ολική αριθμητική διασταύρωση (whole arithmetic crossover, wac):

Av τα χρωμοσώματα  $c_1=[u_1...u_m]$  και  $c_2=[w_2...w_m]$  πρόκειται να λάβουν μέρος σε πράξη w.a.c. τότε οι απόγονοί τους θα είναι  $c_1$ '= $ac_2+(1-a)c_1$  και  $c_2$ '= $ac_1+(1-a)c_2$ 

# $\mu\epsilon \ a \in [0,1].$

Η επιλογή του a μέσα από το πεδίο αυτό εγγυάται ότι οι απόγονοι θα βρίσκονται στο πεδίο εφικτών λύσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε α=0.75. Η πιθανότητα για wac. λαμβάνεται ως παράμετρος από το αρχείο εισόδου και προεπιλεγμένη τιμή είναι p<sub>wac</sub>=10%. Η επιλογή και ο τρόπος ολικής αριθμητικής διασταύρωσης γίνεται όπως και στην απλή διασταύρωση μόνο που ισχύει  $p_{sac} \leq r \leq p_{wac}$ .

Μετά την πράξη της επιλογής εφαρμόζονται οι παραπάνω τελεστές διασταύρωσης. Τα χρωμοσώματα που επιλέγονται για κάποιο είδος διασταύρωσης δεν μπορούν να συμμετέχουν σε κάποιο άλλο είδος διασταύρωσης. Από τους τρείς τελεστές μόνο ο p<sub>sac</sub> και p<sub>wac</sub> εγγυώνται ότι οι απόγονοι που προκύπτουν δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς. Για την εξάλειψη λύσεων, που μπορεί να προκύψουν από τη p<sub>sc</sub> και να βρίσκονται εκτός ορίου επιτρεπτών λύσεων, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος repair. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται σε κάθε γενεά μετά την πράξη της διασταύρωσης.

#### 8.4.2 Μετάλλαξη

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης θεωρούμε πάντα ότι σε ένα χρωμόσωμα μόνο ένα γονίδιο μεταλλάσσεται. Για τη μετάλλαξη χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τελεστές :

**Ομοιόμορφη μετάλλαξη (uniform mutation, um):** Στην ομοιόμορφη μετάλλαξη επιλέγεται τυχαία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή του γονιδίου λαμβάνεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό όριο τιμών το οποίο καθορίζεται από τον αλγόριθμο dyn\_bnd. Η πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και έχει σαν προεπιλεγμένη τιμή  $p_{um}$ =10%. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα δώσουν κάποιο γονίδιο για um γίνεται με τη γέννηση κάποιου τυχαίου αριθμού, r,  $1 \le r \le 0$  και στην

περίπτωση που  $r \leq p_{um}$  επιλέγεται το συγκεκριμένο χρωμόσωμα.

**Boundary μετάλλαξη (boundary mutation, bm):** Το γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και παίρνει, με ίση πιθανότητα, την ελάχιστη ή τη μέγιστη τιμή που προκύπτει από το εύρος επιτρεπτών λύσεων του αλγόριθμου dyn\_bnd. Η πιθανότητα boundary μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και έχει σαν προεπιλεγμένη τιμή  $p_{bm}$ =3%. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα δώσουν κάποιο γονίδιο για bm γίνεται με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε προηγουμένως, αλλά στην προκειμένη πρέπει να ισχύει  $p_{um} \leq r \leq p_{bm}$ .

*Μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non-uniform mutation, num):* Ο χαρακτηρισμός μη ομοιόμορφη δηλώνει ότι ο τελεστής μεταβάλλεται δυναμικά κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι σε προβλήματα με μεταβλητές πραγματικούς αριθμούς και με μεγάλα πεδία επιτρεπτών τιμών αυτών των μεταβλητών αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Τοπική αναζήτηση είναι η αναζήτηση κοντά στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ενώ δηλαδή μπορούν να φτάσουν εύκολα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης παρουσιάζουν δυσκολίες στο τοπικό ψάξιμο. Η δυνατότητα του αλγόριθμου να εκτελεί επιτυχώς και τοπική αναζήτηση ονομάζεται fine local tuning. Η num λοιπόν χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ικανότητας του συστήματος για fine local tuning. Αν σε ένα χρωμόσωμα έχει επιλεχθεί (όπως πάντα με τυχαίο τρόπο) το γονίδιο g<sub>k</sub> για μετάλλαξη, τότε το νέο γονίδιο g<sub>k</sub>' δίνεται από τη σχέση:

$$g'_{k} = \begin{cases} g_{k} + p(\overline{g_{k}} - g_{k}), \pi i \theta \alpha v \delta \tau \eta \tau \alpha : 0.5 \\ g_{k} - p(g_{k} - \underline{g_{k}}), \pi i \theta \alpha v \delta \tau \eta \tau \alpha : 0.5 \end{cases}$$

$$(8.17)$$

όπου  $\left[\overline{g_k}, \underline{g_k}\right]$  το επιτρεπτό εύρος τιμών του γονιδίου  $g_k$  (υπολογίζεται από την dyn\_bnd) και ρ η συνάρτηση:

$$\rho = u \left( 1 - \frac{t}{T} \right)^{B}$$
(8.18)

όπου :

 $u\!\in\![0,\!1]$ , επιλέγεται τυχαία και γεννιέται για κάθε γενεά,

t είναι ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς,

Τ ο συνολικός αριθμός γενεών και

Β ο συντελεστής ανομοιομορφίας που είναι σταθερός κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου,  $B \in [2,5]$  και εμείς επιλέξαμε B=3.5.

Όταν ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς είναι μικρός τότε ο τελεστής ψάχνει ομοιόμορφα όλο το πεδίο των λύσεων (ρ  $\rightarrow$  u), ενώ όσο μεγαλώνει (ρ  $\rightarrow$  0) ψάχνει τοπικά. Όσο πιο μεγάλο είναι το B τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η τοπική αναζήτηση. Η πιθανότητα ανομοιόμορφης μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και έχει τιμή p<sub>num</sub>=35%. Η τιμή αυτή επιλέγεται αρκετά μεγάλη ώστε να ενισχύεται η δυνατότητα fine local tuning. Η επιλογή του χρωμοσώματος γίνεται όπως και πριν μόνο που τώρα πρέπει να ισχύει p<sub>bm</sub>  $\leq$  r  $\leq$  p<sub>num</sub>.

Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται αμέσως μετά τις πράξεις της διασταύρωσης με τη σειρά που παρουσιάστηκαν. Τα χρωμοσώματα των οποίων κάποιο γονίδιο μεταλλάσσεται με κάποιον από τους τρεις τρόπους δεν μπορεί να συμμετέχει σε άλλου είδους μετάλλαξη. Τέλος και οι τρεις τελεστές που αναλύθηκαν εγγυώνται ότι τα χρωμοσώματα που παράγονται ανήκουν στο σύνολο των επιτρεπτών λύσεων.

# 8.5 Επιμέρους αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται από γενετικό αλγόριθμο

# 8.5.1 Αλγόριθμος εύρεσης πεδίου τιμών μιας μεταβλητής

Ο αλγόριθμος "dyn\_bnd" χρησιμοποιείται από τους γενετικούς τελεστές για την εύρεση του επιτρεπτού εύρους τιμών ενός γονιδίου στο χρωμόσωμα. Το εύρος αυτό μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του αλγόριθμου καθώς είναι συνάρτηση του πεδίου τιμών των άλλων γονιδίων του χρωμοσώματος. Τα πεδία αυτά είναι βέβαια υποσύνολα των πεδίων τιμών που ορίζουν οι γενικοί περιορισμοί. Η βασική ιδέα είναι να μειώνει σταδιακά το εξεταζόμενο γονίδιο και έπειτα να εκτελεί τον αλγόριθμο προσομοίωσης SIM1 ή SIM2 μέχρι αυτός να αποτύχει. Η τελευταία τιμή για την οποία η προσομοίωση ήταν επιτυχής ορίζεται ως το κατώφλι (κάτω φράγμα) του πεδίου τιμών του γονιδίου. Σε περίπτωση αποτυχίας στην προσομοίωση. Έτσι το κάτω φράγμα ορίζεται στην πρώτη τιμή που είχαμε επιτυχή προσομοίωση. Όσον αφορά τα γονίδια για την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ο αλγόριθμος επιστρέφει μόνο το γενικό εύρος επιτρεπτών τιμών (Παράγραφος 8.3.2).

# 8.5.2 Αλγόριθμος διόρθωσης εσφαλμένων λύσεων

Επειδή υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθούν χρωμοσώματα εκτός του συνόλου επιτρεπτών λύσεων, ο "repair algorithm" χρησιμοποιείται για να τα εξαλείψει και να τα αντικαταστήσει με άλλα που δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκύψει από τον τελεστή της απλής διασταύρωσης ή από τη λανθασμένη επιλογή γονιδίων. Η βασική ιδέα της διόρθωσης είναι το χρωμόσωμα να τροποποιηθεί, έτσι ώστε να διατηρήσει την ομοιότητα με τους γονείς του. Στην παρούσα περίπτωση ο αλγόριθμος επιλέγει το χρωμόσωμα των παράλληλα συνδεδεμένων συσσωρευτών, N<sub>3</sub>, και το
αυξάνει μέχρι να προκύψει χρωμόσωμα που να ανήκει στο χώρο των επιτρεπτών λύσεων.

#### 8.6 Σύγκλιση του αλγόριθμου

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει είναι το κριτήριο λήξης της εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου. Δηλαδή το πότε η λύση που έχει προκύψει από την εφαρμογή του αλγόριθμου μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων είναι η βέλτιστη. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι γενετικοί αλγόριθμοι προσεγγίζουν την περιοχή της βέλτιστης λύσης και δεν πέφτουν στην παγίδα άλλων τοπικών μεγίστων.

Το πιο απλό κριτήριο σύγκλισης είναι η εκτέλεση του αλγόριθμου για ένα συγκεκριμένο πλήθος γενεών. Το ποιό είναι το κρίσιμο πλήθος γενεών πέρα από το οποίο είμαστε σίγουροι ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει στη βέλτιστη λύση προκύπτει μετά από την εξέταση ενός μεγάλου εύρους προβλημάτων. Στην παρούσα εργασία έπειτα από δοκιμή διαφορετικών αριθμών γενεών καταλήξαμε ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει έπειτα από 20000 γενεές.

Ένα άλλο κριτήριο που χρησιμοποιείται συχνά είναι το κριτήριο «σύγκλισης του πληθυσμού». Ένας πληθυσμός θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν η διαφορά της μέσης τιμής της συνάρτησης κόστους του από τη βέλτιστη (ελάχιστη) τιμή είναι μικρότερη από κάποιο ποσοστό της βέλτιστης τιμής. Η ύπαρξη του τελεστή της μη ομοιόμορφης μετάλλαξης προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση του συνολικού αριθμού γενεών (Παράγραφος 8.4.2). Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωσή μας δε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο της «σύγκλισης του πληθυσμού» γιατί τότε δεν είναι γνωστός ο συνολικός αριθμού επαναλήψεων και ο αλγόριθμος εκτελείται μέχρι να ολοκληρωθούν όλες οι επαναλήψεις.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι τελεστές που έχουν χρησιμοποιηθεί, είναι σχεδιασμένοι ειδικά για προβλήματα που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια λύσης,

έχουν πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους και πολύπλοκους περιορισμούς. Έτσι με την εφαρμογή αυτών των τελεστών για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων είναι βέβαιο πως ο αλγόριθμος θα συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή.

#### 8.7 Στάδια γενετικού αλγόριθμου

Ο γενετικός αλγόριθμος στο πρώτο βήμα (αρχικοποίηση) γεννά ένα σύνολο αρχικών τιμών για τα γονίδια που συμμετέχουν στο γενετικό αλγόριθμο. Έτσι προκύπτει η πρώτη γενεά αλλά λόγω τυχαιότητας των τιμών των γονιδίων εφαρμόζεται, στο δεύτερο βήμα, ο repair algorithm ώστε να εξαλειφθούν τα χρωμοσώματα που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Αμέσως μετά ακολουθεί η διαδικασία της αποτίμησης της συνάρτησης προσαρμογής για κάθε χρωμόσωμα – λύση (fitness function evaluation). Σε αυτή τη διαδικασία λαμβάνει χώρα η αντιστοίχηση της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης προσαρμογής. Αμέσως μετά γίνεται η πράξη της επιλογής με τον κανόνα του τροχού της ρουλέτας, όπου επιλέγονται τα χρωμοσώματα που θα έχουν τη δυνατότητα να αποδώσουν απογόνους έπειτα από διασταύρωση και μετάλλαξη. Ακολουθεί η εφαρμογή των τελεστών διασταύρωσης με την εξής σειρά:

- 1. Απλή διασταύρωση,
- 2. Απλή αριθμητική διασταύρωση και
- 3. Ολική αριθμητική διασταύρωση.

Στη συνέχεια εκτελείται για άλλη μια φορά ο repair-algorithm για να διορθώσει τα τυχόν λανθασμένα χρωμοσώματα και ακολουθούν οι τελεστές της μετάλλαξης με την εξής σειρά:

- 1. Ομοιόμορφη μετάλλαξη,
- 2. Boundary μετάλλαξη και
- 3. Μη-ομοιόμορφη μετάλλαξη.

Σε αυτό το σημείο έχουν τελειώσει τις ενέργειές τους όλοι οι τελεστές, οπότε εκτελείται για τελευταία φορά ο "repair-algorithm" για τις τελικές διορθώσεις. Ο αλγόριθμος λήγει όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού που χρησιμοποιείται μέσα στο τμήμα της fitness function evaluation και είναι ο μέγιστος αριθμός γενεών. Τα βήματα του γενετικού αλγόριθμου παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.15.



**Σχήμα 8.15** Τα βήματα του γενετικού αλγόριθμου.

## 9. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### 9.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης αφού διαβάσει τα αρχεία που αναφέρονται στην Παράγραφο 8.2 πραγματοποιεί την προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι συμβολισμοί και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον αλγόριθμο της προσομοίωσης. Παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των συσσωρευτών και οι συνθήκες για τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Επίσης καθορίζεται ο υπολογισμός της ενέργειας που παράγεται τόσο από τα Φ/Β πλαίσια όσο και από τις ανεμογεννήτριες καθώς και οι σχέσεις που συνδέουν την παραγόμενη ενέργεια με αυτή του φορτίου.

#### 9.2 Τάση λειτουργίας του συστήματος

Η επιλογή της τάσης λειτουργίας ενός υβριδικού συστήματος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι μέγιστες τάσεις των Φ/Β και των Α/Γ αλλά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος DC/AC και των φορτιστών. Στην παρούσα εργασία η τάση λειτουργίας του συστήματος, V<sub>bus</sub>, όταν περιέχει μόνο Φ/Β είναι η τάση του μετατροπέα ισχύος DC/AC και ελέγχεται ώστε να είναι ίδια με τη τάση των φορτιστών των συσσωρευτών. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται Φ/Β και Α/Γ μαζί (υβριδικό σύστημα) γίνεται έλεγχος ώστε η τάση της Α/Γ, των φορτιστών των συσσωρευτών και των μετατροπέων DC/AC να είναι ίδια. Δηλαδή η τάση στο DC-bus που ενώνονται οι Α/Γ, οι φορτιστές και οι μετατροπείς DC/AC να είναι συμβατή με την τάση λειτουργίας καθενός.

#### 9.3 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτών

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης των συσσωρευτών επηρεάζει τον υπολογισμό της χωρητικότητας και της τάσης του συστήματος των παράλληλων κλάδων. Να αναφέρουμε επιγραμματικά ότι όταν οι συσσωρευτές συνδέονται παράλληλα τότε έχουμε αύξηση της τάσης του κλάδου, ενώ η χωρητικότητα παραμένει σταθερή και ίση προς την τάση του ενός συσσωρευτή (Σχήμα 9.1α). Στην περίπτωση που οι συσσωρευτές συνδέονται παράλληλα έχουμε αύξηση της χωρητικότητας αντίστοιχης με τον αριθμό των παράλληλων κλάδων, ενώ η τάση παραμένει σταθερή και ίση με τη τάση ενός κλάδου συσσωρευτών, Varray. (Σχήμα 9.1β).

Έτσι λοιπόν με δεδομένη τη τάση του συστήματος, V<sub>bus.</sub> (Παράγραφος 9.1) μπορούν να υπολογιστούν πόσοι συσσωρευτές θα τοποθετηθούν σε κάθε κλάδο:

$$n_{bs} = \frac{V_{bus}}{V_{b}}$$
(9.2)

όπου V<sub>b</sub> η τάση των ακροδεκτών ενός συσσωρευτή.



Σχήμα 9.1 Τρόποι σύνδεσης των συσσωρευτών.

Θεωρώντας ότι οι συσσωρευτές δεν είναι πλήρως φορτισμένοι στην αρχή της προσομοίωσης, προβαίνουμε στους παρακάτω υπολογισμούς. Υπολογίζεται η συνολική ονομαστική χωρητικότητα του συστήματος των συσσωρευτών από την παρακάτω σχέση:

$$C_{nom} = C_{b} * n_{bp}$$
(9.3)

όπου:

C<sub>b</sub> είναι η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή (Ah) και

n<sub>bp</sub> ο αριθμός των παράλληλων κλάδων.

Η διαθέσιμη χωρητικότητα του συστήματος των συσσωρευτών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{init} = \left(1 - \frac{DOD}{2}\right)^* C_{nom}$$
(9.4)

όπου:

DOD είναι το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή,

Cinit η διαθέσιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών και

C<sub>nom</sub> η συνολική ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών.

Έτσι λοιπόν μπορεί να υπολογιστεί η αρχική κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών από τη σχέση:

$$SOC = \frac{C_{init}}{C_{nom}}$$
(9.5)

Στο τέλος του έτους θα πρέπει να ισχύει  $C^{365}(24) \ge C_{init}$ .

### 9.4 Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος

Η βασική ιδέα της προσομοίωσης στηρίζεται στον υπολογισμό της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας από τις Α/Γ και τα Φ/Β πλαίσια και έπειτα στη σύγκρισή της με την ωριαία ενέργεια που πρέπει να καλυφθεί. Στην περίπτωση που έχουμε περίσσεια ενέργειας, ελέγχεται η χωρητικότητα των συσσωρευτών, οι οποίοι ή θα φορτιστούν ή θα διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισής τους. Στην αντίθετη περίπτωση, εξετάζεται η ενέργεια που μπορεί να παρέχεται από τους συσσωρευτές (εκφόρτιση) ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα παροχής ενέργειας, Ρ<sub>ren</sub>, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ren} = P_{wt} + n_s * P_{pv}$$
(9.6)

όπου:

P<sub>wt</sub> είναι η συνολική παραγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες,

ns ο συντελεστής απόδοσης του φορτιστή και

Ρ<sub>pv</sub> η συνολική παραγόμενη ισχύς των Φ/Β πλαισίων.

Ο συντελεστής απόδοσης του φορτιστή, n<sub>s</sub>, προκύπτει από το γινόμενο των αποδόσεων, n<sub>1</sub> και n<sub>2</sub> των φορτιστών που παρέχεται από τον κατασκευαστή (Σχήμα 8.8).

Ο έλεγχος για τη φόρτιση ή την εκφόρτιση των συσσωρευτών επιτυγχάνεται με τη σύγκριση της παραγόμενης ισχύος, P<sub>ren</sub>, με την ισχύ του φορτίου, P<sub>I</sub>, στην DC είσοδο του μετατροπέα DC/AC. Η ισχύς P<sub>I</sub> υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{i} = \frac{P_{load}}{n_{i}}$$
(9.7)

όπου:

P<sub>1</sub> η ισχύς που πρέπει να παρέχεται στο φορτίο υπολογιζόμενη στην είσοδο
 του μετατροπέα DC/AC,

Pload η ισχύς του φορτίου και

Η ισχύς, Ρ<sub>b</sub>, με την οποία φορτίζονται οι συσσωρευτές είναι:

$$P_{b} = P_{ren} - P_{l}$$
 (9.8)

Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται για την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών είναι οι παρακάτω:

- Αν P<sub>b</sub>=0 η χωρητικότητα των συσσωρευτών μένει αναλλοίωτη και γίνεται προσομοίωση για την επόμενη ώρα,
- Αν P<sub>b</sub>>0 υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ισχύος, οπότε γίνεται έλεγχος για φόρτιση των συσσωρευτών και
- Αν P<sub>b</sub><0 γίνεται έλεγχος για εκφόρτιση των συσσωρευτών.</li>

#### 9.5 Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών

#### 9.5.1 Φόρτιση

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της φόρτισης ελέγχεται η κατάσταση φόρτισης (SOC) των συσσωρευτών και σε περίπτωση που είναι 100% τότε ο αλγόριθμος οδηγείται στην επόμενη ώρα προσομοίωσης, χωρίς να γίνει φόρτιση. Αλλιώς υπολογίζεται η τάση ανοικτοκύκλωσης, E<sub>oc</sub>, ενός συσσωρευτή και κατ' επέκταση ενός κλάδου συσσωρευτών. Η τάση ανοικτοκύκλωσης δίνεται από τον κατασκευαστή για κάθε στοιχείο του συσσωρευτή ως συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης και για έναν συσσωρευτή μολύβδου-οξέος έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 9.2:



**Σχήμα 9.2** Χαρακτηριστική της τάσης ανοικτοκύκλωσης ενός στοιχείου μολύβδου-οξέος ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης.

Παρατηρείται ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης κάθε στοιχείου δε μεταβάλλεται γραμμικά με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, [14] οπότε κατά τη διάρκεια της φόρτισης ελέγχεται κάθε φορά η SOC (%) του συσσωρευτή και αντιστοιχίζεται στην τάση ανοικτοκύκλωσης του στοιχείου (E<sub>ocCell</sub>). Σε περίπτωση που δεν είναι γνωστή η τάση ανοικτοκύκλωσης του στοιχείου για συγκεκριμένο SOC, υπολογίζεται γραμμικά σύμφωνα με την εξίσωση ευθείας που προκύπτει. Παραδείγματος χάρη, αν χρειάζεται να υπολογιστεί η E<sub>ocCell</sub> για SOC= 50% και δίνεται ότι για SOC<sub>1</sub>=40% είναι E<sub>ocCell</sub>=2.07 V και για SOC<sub>2</sub>=70% η τιμή της είναι E<sub>ocCell</sub>=2.11 V, τότε η ζητούμενη τιμή της E<sub>ocCell</sub> προκύπτει από την εξίσωση της ευθείας: SOC=a\*E<sub>ocCell</sub>+b.

α είναι η κλίση της ευθείας που είναι ίση με:

$$a = \frac{SOC_2 - SOC_1}{E_{ocCell1} - E_{ocCell2}}$$
(9.9)

Ενώ αφού βρεθεί η κλίση της ευθείας υπολογίζεται το b: b=SOC1-a\*EocCell1.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εσωτερική αντίσταση ενός κλάδου συσσωρευτών. Η εσωτερική αντίσταση μεταβάλλεται συναρτήσει της SOC του συσσωρευτή με χαρακτηριστική, για συσσωρευτή μολύβδου οξέος, που φαίνεται παρακάτω:



**Σχήμα 9.3** Χαρακτηριστική της εσωτερικής αντίστασης του συσσωρευτή ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης.

Σε κάθε τιμή SOC (%) αντιστοιχίζεται η εσωτερική αντίσταση (Rint) του συσσωρευτή και σε περίπτωση που δε δίνεται για συγκεκριμένο SOC, τότε

υπολογίζεται (όπως και στην περίπτωση της E<sub>ocCell</sub>) σύμφωνα με την εξίσωση της ευθείας που συνδέει SOC και R<sub>int</sub>: SOC=a\*R<sub>int</sub>+b, με a την κλίση της ευθείας:

$$a = \frac{SOC_2 - SOC_1}{Rint_2 - Rint_1}$$
(9.10)

όπου:

SOC<sub>1</sub>, SOC<sub>2</sub> είναι οι καταστάσεις φόρτισης του συσσωρευτή με εσωτερικές αντιστάσεις R<sub>int1</sub> και R<sub>int2</sub> αντίστοιχα.

Τέλος, αφού υπολογιστεί η κλίση, a, υπολογίζεται το b: b=SOC1-a\*Rint1.

Το ρεύμα φόρτισης του κάθε κλάδου, Istring (A), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{\text{string}}^{i}\left(t\right) = \frac{V_{\text{charge-}} E_{\text{oc}}^{i}\left(t\right)}{R_{\text{init}}^{i}\left(t\right)}$$
(9.11)

όπου:

 $\mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{\mathsf{i}}\left(t\right)$ είναι η τάση ανοικτοκύκλωσης ενός κλάδου συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

V<sub>charge</sub> η σταθερή τάση φόρτισης που εφαρμόζεται στον κλάδο των συσσωρευτών.

Η σταθερή τάση φόρτισης που εφαρμόζεται στα άκρα ενός κλάδου συσσωρευτών είναι:

$$V_{charge} = V_{ch} * N_c * n_{bs}$$

$$(9.12)$$

όπου:

V<sub>ch</sub> είναι η σταθερή τάση ανά στοιχείο του συσσωρευτή και δίνεται ως παράμετρος εισόδου,

N<sub>c</sub> ο συνολικός αριθμός των στοιχείων του συσσωρευτή και

n<sub>bs</sub> ο αριθμός των συσσωρευτών που συνδέονται σε σειρά σε έναν κλάδο.

Έπειτα υπολογίζεται το ρεύμα, l<sub>array</sub>, που διαρρέει το σύστημα από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{I}_{\text{array}}^{i}\left(t\right) = \mathbf{I}_{\text{string}}^{i}\left(t\right) * \mathbf{N}_{3} \tag{9.13}$$

όπου:

 $I^{i}_{array}\left(t
ight)$ είναι το συνολικό ρεύμα φόρτισης όλων των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t,

 $I^{i}_{string}\left(t
ight)$  το ρεύμα που διαρρέει έναν κλάδο συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

Ν<sub>3</sub> ο αριθμός των παράλληλων κλάδων από συσσωρευτές.

Γίνεται έλεγχος ώστε  $I_{array}^{i}(t) < \frac{C_{nom}}{5h}$ . Σε περίπτωση που δεν ισχύει, τότε το συνολικό ρεύμα φόρτισης του συστήματος των συσσωρευτών τίθεται ίσο με  $C_{nom}/5h$  ώστε να προστατευτούν οι συσσωρευτές από την υπερφόρτιση και τη φθορά που προκαλείται. Αυτή η φόρτιση με σταθερό ρεύμα διαρκεί μέχρι η τάση του κλάδου των συσσωρευτών, που υπολογίζεται από τη Σχέση 9.14, γίνει ίση με  $V_{charge}$ .

Η τάση στα άκρα ενός κλάδου συσσωρευτών είναι:

$$V_{\text{array}}^{i}\left(t\right) = E_{\text{oc}}^{i}\left(t\right) + I_{\text{string}}^{i}\left(t\right) * R_{\text{init}}^{i}\left(t\right)$$
(9.14)

όπου:

 $V^{i}_{array}\left(t
ight)$  είναι η τάση του συστήματος των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα, t,

 $\mathsf{E}^{\mathsf{i}}_{\mathsf{oc}}\left(t
ight)$ η τάση ανοικτοκύκλωσης την ημέρα i και την ώρα t,

 $I_{\text{string}}^{\text{i}}\left(t
ight)$  το ρεύμα που διαρρέει έναν κλάδο την ημέρα i και την ώρα t και

 $R^{i}_{init}(t)$  η αντίσταση ενός κλάδου την ημέρα i και την ώρα t.

Από τις Εξισώσεις 9.13 και 9.14 μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς φόρτισης,  $P^i_{ab}(t)$ ,των συσσωρευτών για δεδομένη ημέρα i και ώρα t:

$$P_{ch}^{i}(t) = V_{array}^{i}(t)I_{array}^{i}(t)$$
(9.15)

Στη συνέχεια συγκρίνεται το  $P_{a^{h}}^{i}(t)$  με το  $P_{b}^{i}(t)$  και σε περίπτωση που  $P_{a^{h}}^{i}(t) > P_{b}^{i}(t)$  τότε τίθεται ίσο με το  $P_{b}^{i}(t)$ . Το ρεύμα φόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{array}^{i}\left(t\right) = \frac{P_{b}^{i}\left(t\right)}{V_{array}^{i}\left(t\right)}$$
(9.16)

όπου:

 $I^{i}_{array}\left(t
ight)$ είναι το ρεύμα φόρτισης του συστήματος των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t,

$$\begin{split} P^{i}_{\;b}\left(t\right) & \eta \text{ ισχύς φόρτισης των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και \\ V^{i}_{\text{array}}\left(t\right) & \eta \text{ τάση του συστήματος των συσσωρευτών την ημέρα i και την } \end{split}$$

ώρα t σύμφωνα με την Εξίσωση 9.14.

Τέλος, αφού είναι γνωστό το ρεύμα φόρτισης του κλάδου των συσσωρευτών μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα φόρτισης από την παρακάτω σχέση:

$$Q^{i}(t) = \int_{t-1}^{t} I_{array}^{i}(t') dt'$$
 (9.17)

όπου:

 $Q^{i}(t)$  η ποσότητα φορτίου που παρέχεται στους συσσωρευτές την ημέρα i και την ώρα t (Ah).

Η κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{C}^{i}(t) = \mathbf{C}^{i}(t-1) + \left(\frac{\mathbf{Q}^{i}(t)}{\mathbf{C}_{nom}}\right)$$
(9.18)

όπου:

SOC' (t) είναι η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t,

SOC<sup>i</sup> (t - 1) η κατάσταση φορτίου των συσσωρευτών την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή,

 $\mathbf{Q}^{i}\left(t
ight)$ η ποσότητα φορτίου των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

 $C_{nom}$ η ονομαστική χωρητικότητα του συνόλου των συσσωρευτών Τέλος, σε περίπτωση που SOC<sup>i</sup>(t)>100% η ισχύς φόρτισης, το SOC<sup>i</sup>(t) τίθεται ίσο με 100% και ο αλγόριθμος προχωρά στην επόμενη ώρα προσομοίωσης.

#### 9.5.2 Εκφόρτιση

Στην περίπτωση που  $P_b^i(t)$ <0 τότε οι συσσωρευτές θα παρέχουν ισχύ στο φορτίο, οπότε θα ξεκινήσει η εκφόρτισή τους. Πρώτα υπολογίζεται η τάση ανοικτοκύκλωσης και η εσωτερική αντίσταση ενός κλάδου συσσωρευτών σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισής τους.

Ο υπολογισμός της τάσης ενός κλάδου συσσωρευτών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{\text{array}}^{i}\left(t\right) = \mathsf{E}_{\text{oc}}^{i}\left(t\right) - \mathsf{I}_{\text{string}}^{i}\left(t\right) * \mathsf{R}_{\text{init}}^{i}\left(t\right)$$
(9.21)

όπου:

 $\mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{\mathsf{i}}\left(t\right)$ είναι η τάση ανοικτοκύκλωσης την ημέρα i και την ώρα t,

 $I^{i}_{string}\left(t
ight)$ το ρεύμα που διαρρέει έναν κλάδο συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

 $\mathsf{R}^{i}_{\mathsf{init}}\left(t
ight)$ η εσωτερική αντίσταση ενός κλάδου συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t.

Το ρεύμα εκφόρτισης του συστήματος των συσσωρευτών, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{array}^{i}\left(t\right) = \frac{P_{b}^{i}\left(t\right)}{V_{array}^{i}\left(t\right)}$$
(9.22)

όπου:

 $\mathbf{P}_{\mathbf{b}}^{\mathbf{i}}(t)$ είναι η ισχύς που πρέπει να παρέχουν οι συσσωρευτές,

 $V^{i}_{array}\left(t
ight)$  τάση του συστήματος των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

Έπειτα ελέγχεται αν  $I_{array}^{i}(t) > 0.2C_{nom}$  σε περίπτωση που ισχύει, η προσομοίωση αποτυγχάνει.

Το ρεύμα εκφόρτισης ενός κλάδου,  $I_{string}^{i}(t)$ , υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{\text{string}}^{i}\left(t\right) = \frac{I_{\text{array}}^{i}\left(t\right)}{N_{3}}$$
(9.23)

όπου:

l<sup>i</sup><sub>array</sub> (t) είναι το ολικό ρεύμα που διαρρέει το σύστημα των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t και

Ν<sub>3</sub> ο αριθμός των παράλληλων κλάδων των συσσωρευτών.

Για να υπολογιστεί η τάση εκφόρτισης, αντικαθιστάται στην Εξίσωση 9.21 η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης ενός κλάδου από την Εξίσωση 9.23, οπότε η τάση εκφόρτισης προκύπτει από τις ακόλουθες πράξεις:

$$\begin{split} & \mathsf{V}_{\mathsf{array}}^{i}\left(t\right) = \mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{i}\left(t\right) - \frac{\mathsf{I}_{\mathsf{array}}^{i}\left(t\right)}{\mathsf{N}_{3}} * \mathsf{R}_{\mathsf{init}}^{i}\left(t\right) = \mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{i}\left(t\right) - \frac{\mathsf{P}_{\mathsf{b}}^{i}\left(t\right)}{\mathsf{N}_{3}} * \mathsf{R}_{\mathsf{init}}^{i}\left(t\right) \Rightarrow \\ & \left[\mathsf{V}_{\mathsf{array}}^{i}\left(t\right)\right]^{2} - \mathsf{V}_{\mathsf{array}}^{i}\left(t\right) * \mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{i}\left(t\right) + \frac{\mathsf{P}_{\mathsf{b}}^{i}\left(t\right)}{\mathsf{N}_{3}} * \mathsf{R}_{\mathsf{init}}^{i}\left(t\right) = 0 \Rightarrow \\ & \mathsf{V}_{\mathsf{array}}^{i}\left(t\right)_{1,2} = \frac{\mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{i}\left(t\right) \pm \sqrt{\mathsf{E}_{\mathsf{oc}}^{i}\left(t\right)^{2} - \frac{4 * \mathsf{P}_{\mathsf{b}}^{i}\left(t\right) * \mathsf{R}_{\mathsf{init}}^{i}\left(t\right)}{\mathsf{N}_{3}}} \\ & 2 \end{split}$$

Από τις λύσεις της  $V_{array}^{i}(t)$  επιλέγεται η μεγαλύτερη και έπειτα αντικαθιστάται στη Σχέση 9.23 ώστε να υπολογιστεί το ρεύμα εκφόρτισης των κλάδων,  $I_{string}^{i}(t)$ .

Από τις λύσεις της  $V_{array}^{i}(t)$  αν επιλεχθεί η μικρότερη τότε το ρεύμα εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από  $C_{nom}/5h$ , κάτι που οδηγεί τον αλγόριθμο σε αποτυχία. Τέλος, υπολογίζεται η νέα κατάσταση φόρτισης, SOC<sup>i</sup>(t),από τη σχέση:

$$SOC^{i}(t) = SOC^{i}(t-1) - \left(\frac{\int_{t-1}^{t} I_{array}^{i}(t') dt'}{C_{nom}}\right)$$
(9.24)

όπου:

SOC<sup>i</sup> (t - 1) είναι η κατάσταση φόρτισης την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή,

 $\int_{t-1}^{t} I_{array}^{i}(t') dt'$  η ποσότητα φορτίου με την οποία θα φορτιστούν οι συσσωρευτές (Ah) και

C<sub>nom</sub> η ονομαστική χωρητικότητα του συνόλου των συσσωρευτών.

Στο τέλος κάθε ώρας t της προσομοίωσης, ελέγχεται αν η κατάσταση φόρτισης είναι μικρότερη από 20% της ονομαστικής χωρητικότητας των συσσωρευτών. Αν αυτό ισχύει τότε ο αλγόριθμος τερματίζει ανεπιτυχώς.

Ο υπολογισμός των χρόνων ζωής των συσσωρευτών υπολογίζεται διαιρώντας, το throughput που έχει προκύψει από την Εξίσωση 4.1 με το άθροισμα όλων των ρευμάτων της Εξίσωσης 9.22. Σε περίπτωση που είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής που δίνει ο κατασκευαστής, τότε τίθεται ίσος με το χρόνο ζωής του κατασκευαστή.

# 9.6 Περιγραφή αυτόνομου συστήματος με χρήση του απλού μοντέλου των συσσωρευτών

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων των συσσωρευτών είναι δυνατόν να

επιλεχθεί απλό μοντέλο συσσωρευτών για τη διαστασιολόγηση του συστήματος. Αφού υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς και γίνουν έλεγχοι για τις συνθήκες φόρτισης ή εκφόρτισης (Παράγραφος 9.5) ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια:

Αρχικά υπολογίζεται η ονομαστική χωρητικότητα του συστήματος των συσσωρευτών:

$$C_{nom} = C_{b} * n_{bp}$$
 (9.25)

όπου:

C<sub>b</sub> η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή και

n<sub>bp</sub> ο αριθμός των παράλληλων κλάδων από συσσωρευτές.

Για να ελεγχθεί αν θα υπάρξει φόρτιση ή εκφόρτιση των συσσωρευτών, εξετάζεται κάθε φορά η ισχύς, P<sub>b</sub>, που μπορούν να παρέχουν ή να δεχτούν οι συσσωρευτές, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{P}_{\rm b} = \mathbf{P}_{\rm ren} - \mathbf{P}_{\rm I} \tag{9.26}$$

όπου:

Pι είναι η ισχύς που πρέπει να παρέχεται στο φορτίο υπολογιζόμενη στη Dc
 είσοδο του μετατροπέα DC/AC και

Pren η ισχύς που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές.

Έτσι διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

 Αν P<sub>b</sub><0 γίνεται εκφόρτιση των συσσωρευτών και η χωρητικότητα του συνόλου των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t, C<sup>i</sup>(t), υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{C}^{i}\left(t\right) = \mathbf{C}^{i}\left(t-1\right) - \frac{\mathbf{P}_{b}^{i}\left(t\right)}{V_{bus}}\Delta t \tag{9.27}$$

όπου:

C<sup>i</sup> (t - 1) είναι η χωρητικότητα των συσσωρευτών την ώρα t-1,

 $P_{b}^{i}(t)$  η ισχύς εκφόρτισης την ημέρα i και την ώρα t και

Δt το χρονικό διάστημα από την προηγούμενη μέχρι την παρούσα στιγμή.

Έπειτα γίνεται έλεγχος αν  $C^i(t) \leq (1 - DOD)C_{nom}$  ώστε να μην υπερβληθεί το όριο εκφόρτισης των συσσωρευτών. Σε περίπτωση που ισχύει, ο αλγόριθμος απορρίπτει το συγκεκριμένο χρωμόσωμα.

 Αν Pb>0 γίνεται φόρτιση των συσσωρευτών. Η χωρητικότητα του συνόλου των συσσωρευτών την ημέρα i και την ώρα t, C<sup>i</sup>(t), υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C^{i}(t) = C^{i}(t-1) + \frac{P_{b}^{i}(t)n_{b}}{V_{bus}}\Delta t$$
(9.28)

όπου:

 $C^{i}(t-1)$  είναι η χωρητικότητα των συσσωρευτών την ώρα t-1,

 $P_{b}^{i}(t)$  η ισχύς φόρτισης την ημέρα i και την ώρα t,

n<sub>b</sub> ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή και

Δt το χρονικό διάστημα από την προηγούμενη μέχρι την παρούσα στιγμή.

Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος αν C<sup>i</sup> (t) > C<sub>nom</sub> ώστε να μην υπερβληθεί το όριο φόρτισης των συσσωρευτών. Σε περίπτωση που ισχύει, τότε: C<sup>i</sup> (t) = C<sub>nom</sub>. Επειδή έχει επιλεγεί η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος να γίνεται σε ωριαία βάση, το χρονικό διάστημα Δt είναι ίσο με μία ώρα. Τέλος, γίνεται έλεγχος την τελευταία ημέρα, i, και την τελευταία ώρα, t, της προσομοίωσης ώστε αν η τελική χωρητικότητα, C<sup>i</sup> (t), είναι μικρότερη της αρχικής, C<sub>init</sub>, τότε ο αλγόριθμος απορρίπτει το συγκεκριμένο γονίδιο.

• Αν P<sub>b</sub>=0 τότε η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών παραμένει αναλλοίωτη και ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη ώρα της προσομοίωσης.

## 10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης του συστήματος για διάφορους συνδυασμούς. Σε όλες τις περιπτώσεις ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Πλήθος χρωμοσωμάτων ανά γενεά N=30,
- Πιθανότητα simple crossover  $p_{sc}$ =0.1,
- Πιθανότητα simple arithmetic crossover  $p_{sac}$ =0.1,
- Πιθανότητα whole arithmetic crossover  $p_{sac}=0.1$ ,
- Πιθανότητα uniform mutation  $p_{um}=0.1$ ,
- Πιθανότητα boundary mutation p<sub>bm</sub>=0.1,
- Πιθανότητα non-uniform mutation p<sub>nu</sub>=0.1,
- Γεωγραφικό πλάτος 35.33°(Χανιά, Κρήτης),
- Συντελεστής ανάκλασης εδάφους ίσος με 0.2,
- Εκθέτης εκθετικού νόμου για ταχύτητα ανέμου ίσος με 0.2 και
- Επιδότηση 0%.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τη μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, τη συνολική ημερήσια θερμοκρασία και τη μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου που μετρήθηκαν στην περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης το έτος 2003.



**Σχήμα 10.1** Συνολική ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια του έτους 2003.



**Σχήμα 10.2** Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους 2003.



**Σχήμα 10.3** Μέση ημερήσια θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του έτους 2003

Tα γενικά χαρακτηριστικά των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν παρατίθενται στους Πίνακες 10.1-10.5. Το κόστος συντήρησης λαμβάνεται ίσο με 1% επί της τιμής αγοράς (€/έτος), το κόστος επισκευής λόγω βλαβών λαμβάνεται ίσο με 1.5% επί της τιμής αγοράς (€), το κόστος του ιστού της Α/Γ λαμβάνεται ίσο με 55 €/m και το κόστος επισκευής του φορτιστή της ανεμογεννήτριας λαμβάνεται ίσο με το 1.5% του 30% της τιμής αγοράς της Α/Γ (€).

Πίνακας 10.1 Τύποι Φ/Β πλαισίων									
Μοντέλο	Στοιχεία σε σειρά	Στοιχεία παράλληλα	E <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>max</sub> (V)	I <sub>max</sub> (A)	P (W)	NCOT	Κόστος Αγοράς (€)
EC102	72	1	21.5	7	17	6	102	44	383
Mitsubis hi MF170EB	50	1	30.6	7.3	24.6	6.93	170	44	580

Πίνακας 10.2 Τύποι συσσωρευτών								
Χωρητικότητα (Ah)	Τάση (V)	Βαθμός Απόδοσης	DOD	Τύπος	Κύκλοι ζωής	Διάρκεια ζωής (έτη)	Κόστος Αγοράς (€)	
390	6	0.8	0.8	Pd- acid	300	10	123	

Πίνακας 10.3 Τύποι φορτιστών							
Μοντέλο	Τύπος	Απά	δοση	Ισχύς (W)	Χρόνος ζωής (h)	Κόστος Αγοράς (€)	
SB2000E	MPPT	1	0.96	300	87600	146	

Πίνακας 10.4 Τύποι Α/Γ							
Μοντέλο	Τάση (V)	Ισχύς (W)	Διάρκεια ζωής (έτη)	Κόστος Αγοράς (€)			
AIRX	24	400	20	482			
WHISPER100H40	24	900	30	1650			

Πίνακας 10.5 Μοντέλα μετατροπέων ισχύος DC/AC						
Μοντέλο	Απόδοση	Ισχύς (kW)	MTBF (h)	Τάση (V)	Κόστος (€)	
SAMPLEX	0.80	0.3	87600	24	101.06	

Οι συνδυασμοί των λειτουργικών μερών του αυτόνομου υβριδικού συστήματος, για τον οποίο έγινε η διαστασιολόγηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.6:

	Πίνακας 10.6 Συνδυασμοί διαστασιολόγησης								
Συνδυασμός (#)	Ф/В	A/Γ	Φορτιστής	Μετατροπέας DC/AC-	Συσσωρευτής				
1	MitsubishiMF170	Whisper100H40	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P				
	542.00€	1650.00€	146.00€	151.06 €	123€				
2	EC 102	AIRX	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P				
	383 €	482€	146.00€	151.06 €	123€				
3	MitsubishiMF170	AIRX	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P				
	542.00€	482€	146.00€	151.06 €	123€				
4	EC 102	Whisper100H40	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P				
	383 €	1650.00€	146.00€	151.06 €	123€				

#### 10.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης

Η διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου για τη διαστασιολόγηση ενός συστήματος με ημερήσια κατανάλωση 5.580 kWh, είναι κατά μέσο όρο 40 λεπτά σε υπολογιστή με επεξεργαστή AMD 2GHz και μνήμη 512 MB. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι Linux έκδοση Ubuntu 6.06 LTS-Dapper Drake-, compiler g++ (έκδοση 2.7.0) και debugger GDB (έκδοση 6.7.1). Η γραμμική αναζήτηση διήρκεσε περίπου 40 ώρες για να καταλήξει στη βέλτιστη λύση. Κατά τη γραμμική αναζήτηση ο γενετικός αλγόριθμος έκανε όλους τους δυνατούς συνδυασμούς χρωμοσωμάτων, από ένα εύρος τιμών που επιλέξαμε για κάθε γονίδιο. Για παράδειγμα για την κλίση των Φ/Β πλαισίων το συγκεκριμένο γονίδιο πήρε τιμές από 0° μέχρι 90° και εξετάστηκαν μία προς μία όλες οι κλίσεις ώστε να καταλήξει στη βέλτιστη. Αυτή η διαδικασία έγινε για όλα τα γονίδια που αποτελούσαν το χρωμόσωμα. Τελικά, η βέλτιστη επιλογή περιλάμβανε τον κατάλληλο συνδυασμό Φ/Β πλαισίων, Α/Γ, μετατροπέων DC/AC, φορτιστών και κλίσεων των Φ/Β πλαισίων που κάλυπταν τις απαιτήσεις του φορτίου και είχαν το ελάχιστο κόστος. Στις παρακάτω λύσεις έχει ληφθεί υπόψη ο πληθωρισμός 0.031 (έτος 2007) το επιτόκιο αναγωγής ίσο με 0.08, ενώ η προσομοίωση έχει γίνει για 25 χρόνια που προκύπτει από τη μέγιστη χρονική διάρκεια εγγυημένης λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων ή των Α/Γ. Το κόστος που προκύπτει έχει αναχθεί σε παρούσα αξία.

#### 10.2.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για μεταβαλλόμενο φορτίο

Στο Σχήμα 10.4 απεικονίζεται το μεταβαλλόμενο προφίλ φορτίου που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση του συστήματος με **σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών** και χρονικό ορίζοντα τα 25 έτη [12]. Σε όλες τις περιπτώσεις ορίζεται ως:

- PV: ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων,
- WT:ο συνολικός αριθμός των Α/Γ,
- BT: ο συνολικός αριθμός των συσσωρευτών,

- CH: ο συνολικός αριθμός των φορτιστών,
- INV: ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων DC/AC,
- WT-TOWER: το κόστος του ιστού της Α/Γ,
- h: το ύψος του ιστού της Α/Γ και
- b<sub>1</sub>,b<sub>2</sub>: οι γωνίες κλίσεις των Φ/Β.



**Σχήμα 10.4** Ημερήσιο προφίλ φορτίου

Οι γωνίες κλίσεις των Φ/Β πλαισίων αλλάζουν δύο φορές κατά τη διάρκεια του έτους σύμφωνα με τις ημερομηνίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.7

Πίνακας 10.7 Κλίσεις Φ/Β πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους						
ΑΠΟ 1 ΙΑΝ. ΕΩΣ15 ΑΠΡΙΛΙΟΥ &	ΑΠΟ 15 ΑΠΡΙΛΙΟΥ ΕΩΣ 15					
ΑΠΟ 15 ΟΚΤ. ΕΩΣ 31 ΔΕΚ.	ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ					
b <sub>1</sub> (°)	b <sub>2</sub> (°)					
Οι συνδυασμοί Φ/Β πλαισίων, Α/Γ,	φορτιστών, μετατροπέων DC/AC και					
συσσωρευτών για τους οποίους	εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος					

παρουσιάζονται στους Πίνακες 10.8, 10.15, 10.20 και 10.22.

Πίνακας 10.8 Συνδυασμός διαστασιολόγησης #1							
Ф/В	Α/Γ	Φορτιστής	Μετατροπέας DC/AC-	Συσσωρευτής			
MitsubishiMF170	Whisper100H40	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P			
542.00€	1650.00 €	146.00€	151.06€	123€			

Στους Πίνακες 10.9, 10.13, 10.14, 10.16, 10.21 και 10.23 παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων, PV, των Α/Γ, WT,των συσσωρευτών, BT, των φορτιστών, CH, των μετατροπέων ισχύος DC/AC, INV, του ύψος του ιστού της Α/Γ, h (m) και των κλίσεων των Φ/Β πλαισίων b<sub>1</sub>(°), b<sub>2</sub>(°), που προέκυψαν από το γενετικό αλγόριθμο.

Πίνακας 10.9 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών για υβριδικό σύστημα, σύστημα με Φ/Β πλαίσια και σύστημα με Α/Γ για τον συνδυασμό #1									
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b₁(°)	b <sub>2</sub> (°)	Παρούσα Αξία (€)
Υβριδικό	14	2	24	8	4	14	50	33	26026
Μόνο Φ/Β	21	-	24	12	4	15	46	24	28792
Μόνο Α/Γ	-	8	52	-	4	15	-	-	44417

Στους Πίνακες 10.10-10.12 και 10.17-10.19 παρουσιάζεται το κόστος εγκατάστασης (€) ξεχωριστά για κάθε μέρος του υβριδικού συστήματος, του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια και του συστήματος μόνο με Α/Γ. Επίσης

παρουσιάζεται το κόστος συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης ανηγμένο σε παρούσα αξία (€) για κάθε υποσύστημα (Φ/Β, Α/Γ, συσσωρευτές, φορτιστές, μετατροπείς DC/AC, ύψος ιστού Α/Γ).

Στα Σχήματα 10.5, 10.8, 10.10, 10.12, 10.15 και 10.17 παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος, του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια και του συστήματος μόνο με Α/Γ για διάφορους συνδυασμούς Φ/Β πλαισίων, Α/Γ, συσσωρευτών, φορτιστών και μετατροπέων DC/AC.

Στα Σχήματα 10.6, 10.9, 10.11, 01.13, 10.16 και 10.18. παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος, του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια και του συστήματος μόνο με Α/Γ για διάφορους συνδυασμούς Φ/Β πλαισίων, Α/Γ, συσσωρευτών, φορτιστών και μετατροπέων DC/AC.

Πίνακας 10.10 Επιμέρ	Πίνακας 10.10 Επιμέρους κόστη υβριδικού συστήματος για τον συνδυασμό #1						
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)					
PV	7588	1068					
WT	3300	480					
WT-TOWER	1540	218					
СН	1168	278					
ВТ	2952	6802					
INV	404	228					
Σύνολο	16952	9074					
Συνολικό κόστος (€):	26026						



**Σχήμα 10.5** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον συνδυασμό #1.



**Σχήμα 10.6** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος για τον συνδυασμό #1. Στο Σχήμα 10.7 παρουσιάζεται η μείωση του κόστους του υβριδικού συστήματος για τον συνδυασμό 1 σε σχέση με την αύξηση των γενεών. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμός προσεγγίζει πολύ γρήγορα την περιοχή της βέλτιστης λύσης, μόλις στις 100 γενεές ο αλγόριθμος έχει βρει λύση 28774 € η οποία είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση των 26026 €.



**Σχήμα 10.7** Η μεταβολή της συνάρτησης κόστους για το υβριδικό σύστημα και τον συνδυασμό #1 σε σχέση με τον αριθμό της γενεάς κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με το γενετικό αλγόριθμο.

Πίνακας 10.11 Επιμέρους κόστη συστήματος με Φ/Β πλαίσια για τον συνδυασμό #1						
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)				
PV	11382	1603				
СН	1752	418				
ВТ	3936	9068				
INV	404	228				
Σύνολο	17474	11318				
<b>Συνολικό κόστος (€):</b> 28792						



**Σχήμα 10.8** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον συνδυασμό #1.



**Σχήμα 10.9** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια για τον συνδυασμό #1.

Πίνακας 10.12 Επιμ	Πίνακας 10.12 Επιμέρους κόστη συστήματος μόνο με Α/Γ για τον συνδυασμό #1						
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)					
WT	13200	1919					
WT-TOWER	6600	933					
ВТ	6396	14736					
INV	404	228					
Σύνολο	26600	17817					
Συνολικό κόστος (ŧ	Συνολικό κόστος (€): 44417						



**Σχήμα 10.10** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Α/Γ για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον συνδυασμό #1.



**Σχήμα 10.11** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Α/Γ για τον συνδυασμό #1.

Στον Πίνακα 10.13 παρουσιάζεται το κόστος για το υβριδικό σύστημα με χρήση του απλού μοντέλου συσσωρευτών για τον ίδιο συνδυασμό Φ/Β, Α/Γ, φορτιστών, συσσωρευτών και μετατροπέων DC/AC.

Πίνακας 10.13 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με απλό μοντέλο συσσωρευτών για υβριδικό σύστημα, σύστημα με Φ/Β πλαίσια και σύστημα με Α/Γ για τον συνδυασμό #1									
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b <sub>1</sub> (°)	b <sub>2</sub> (°)	Παρούσα Αξία (€)
Υβριδικό	9	5	12	6	4	15	50	51	26317
Μόνο Φ/Β	23	-	28	14	4	-	46	24	28765
Μόνο Α/Γ	-	9	28	-	4	15	-	-	36930

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 10.13 με τα αποτελέσματα του Πίνακα 10.9 παρατηρείται ότι το τελικό κόστος στο οποίο κατέληξε ο γενετικός αλγόριθμος στο υβριδικό σύστημα με το σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών είναι πιο μικρό (26026 €) σε σχέση με το απλό μοντέλο συσσωρευτών. Όσον αφορά το κόστος για χρήση μόνο Φ/Β πλαισίων το κόστος είναι παραπλήσιο, 28765 € για το απλό μοντέλο συσσωρευτών και 28792 € για το σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών, ενώ για το σύστημα με χρήση μόνο Α/Γ το κόστος με το απλό μοντέλο συσσωρευτών είναι αρκετά μικρότερος (36930 €) σε σχέση με το μοντέλο (44417 €). Οι διαφορές που προκύπτουν στη σύνθετο διαστασιολόγηση οφείλονται στους διαφορετικούς περιορισμούς που υπάρχουν στον αλγόριθμο προσομοίωσης (SIM1 και SIM2) για το απλό και το σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών. Για το σύνθετο μοντέλο συσσωρευτών ισχύουν πολλοί περιορισμοί για τον τρόπο φόρτισης-εκφόρτισης των συσσωρευτών, όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 9.5. Αυτό οδηγεί τον αλγόριθμο προσομοίωσης να δίνει αρκετές φορές ανεπιτυχή λειτουργία κι έτσι να εκτελούνται οι αλγόριθμοι που αναλύθηκαν στις υποπαραγράφους 8.5.1-8.5.2 ώστε να παρέχονται διαφορετικοί συνδυασμοί σε Φ/Β πλαίσια, Α/Γ και συσσωρευτές. Οι συνδυασμοί
αυτοί θα πρέπει, εν τέλει, να ικανοποιούν τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, ώστε το σύστημα να ικανοποιεί την παροχή ενέργειας στο φορτίο. Επίσης αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγόριθμου με συνέπεια την αύξηση του χρόνου εκτέλεσης σε σχέση με το απλό μοντέλο συσσωρευτών π.χ από. 40 λεπτά σε 60 λεπτά, αντίστοιχα, για χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού υπολογιστή που αναφέρθηκαν στην αρχή της Παραγράφου 10.2 και για τον συνδυασμό του Πίνακα 10.8.

Πίνακα για μία	ς 10.14 κλίση Φ	Αποτελά Φ/Β πλαι	έσματα ισίων μι σ	διαστας ε σύνθετ υνδυασ	πολόγης ro μοντέ μό #1	σης για λο συσ	υβριδ σωρε	δικό σύστημα :υτών για τον
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b(°)	Παρούσα Αξία (€)
Υβριδικό	14	2	24	8	4	15	34	26148

Παρατηρείται ότι το κόστος που προκύπτει με χρήση δύο κλίσεων στα Φ/Β πλαίσια οδηγεί σε οικονομικότερη λύση (26026 €) σε σχέση με τα αποτελέσματα του Πίνακα 10.14.

Ο συνδυασμός που παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.15 περιλαμβάνει Α/Γ μικρότερης ονομαστικής ισχύος από τον συνδυασμό του Πίνακα 10.8 (400 W έναντι 900 W) και Φ/Β με μικρότερη ισχύ αιχμής (102 W έναντι 170 W), ενώ οι φορτιστές, οι συσσωρευτές και οι μετατροπείς DC/AC διατηρούνται οι ίδιοι. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.16. Η ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο συνολικό κόστος του υβριδικού συστήματος, του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια και του συστήματος μόνο με Α/Γ παρουσιάζεται στους Πίνακες 10.17-10.19.

Πίνακας 10.15 Συνδυασμός διαστασιολόγησης #2							
Ф/В	A/F	Φορτιστής	Μετατροπέας DC/AC-	Συσσωρευτής			
EC 102	AIRX	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P			
383€	482€	146.00€	151.06€	123€			

Πίνακας 10.16 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για υβριδικό σύστημα, σύστημα με Φ/Β πλαίσια και σύστημα με Α/Γ για τον συνδυασμό #2									
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b <sub>1</sub> (°)	b <sub>2</sub> (°)	Παρούσα Αξία (€)
Υβριδικό	13	5	20	5	4	14	48	36	22972
Μόνο Φ/Β	31	-	32	11	4	-	40	32	29143
Μόνο Α/Γ	-	8	48	-	4	15	-	-	32364

Πίνακας 10.17 Ε	πιμέρους κόστη υβριδ	δικού συστήματος
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)
PV	4966	702
WT	2560	372
WT-TOWER	4125	583
СН	730	174
ВТ	2460	5668
INV	404	228
Σύνολο	15245	7727
Συνολικό κόστος (€):	22972	



**Σχήμα 10.12** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον



**Σχήμα 10.13** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του υβριδικού συστήματος για τον συνδυασμό #2.

Στο Σχήμα 10.14 παρουσιάζεται η μείωση του κόστους του υβριδικού συστήματος σε σχέση με την αύξηση των γενεών. Παρατηρείται ότι ο αλγόριθμός προσεγγίζει πολύ γρήγορα την περιοχή της βέλτιστης λύσης, μόλις στις 1000 γενεές ο αλγόριθμος έχει βρει λύση 24789 € ή οποία είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση των 22972 €.



**Σχήμα 10.14** Η μεταβολή της συνάρτησης κόστους σε σχέση με τον αριθμό της γενεάς κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με το γενετικό αλγόριθμο για τον συνδυασμό #2.

Πίνακας 10.18 Επιμέρους κόστη συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια για τον συνδυασμό #2						
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)				
PV	11842	1674				
СН	1606	383				
вт	3936	9068				
INV	404	228				
Σύνολο	17789	11354				
Συνολικό κόστος (€):	29143					



**Σχήμα 10.15** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον συνδυασμό #2.



**Σχήμα 10.16** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Φ/Β πλαίσια για τον συνδυασμό #2.

Πίνακας 10.19 Επιμ	Πίνακας 10.19 Επιμέρους κόστη συστήματος μόνο με Α/Γ για τον συνδυασμό #2						
Υποσύστημα	Κόστος (€)	Συντήρηση-Επισκευή- Αντικατάσταση (€)					
wt	4096	596					
WT-TOWER	6600	933					
ВТ	5904	13602					
INV	404	228					
Σύνολο	17004	15360					
Συνολικό κόστος (€):	32364						



**Σχήμα 10.17** Ποσοστιαία συμμετοχή ανά υποσύστημα στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Α/Γ για την κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου για τον συνδυασμό #2.



**Σχήμα 10.18** Ποσοστιαία συμμετοχή του κόστους εγκατάστασης, συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης στο ολικό κόστος του συστήματος μόνο με Α/Γ για τον συνδυασμό #2.

Πίνακας 10.20 Συνδυασμός διαστασιολόγησης #3							
Ф/В	A/F	Φορτιστής	οτιστής Μετατροπέας DC/AC Συ				
MitsubishiMF170	AIRX	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P			
542 €	482€	146.00€	151.06 €	123€			

Πίνακας 10.21 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για υβριδικό σύστημα, σύστημα με Φ/Β πλαίσια και σύστημα με Α/Γ για τον συνδυασμό #3									
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b <sub>1</sub> (°)	b <sub>2</sub> (°)	Παρούσα Αξία(€)
Υβριδικό	6	5	24	4	4	15	45	32	22460
Μόνο Φ/Β	21	-	24	12	4	15	46	24	28792
Μόνο Α/Γ	-	8	48	-	4	15	-	-	32364

Πίνακας 10.22 Συνδυασμός διαστασιολόγησης #4							
Ф/В	А/Г	Φορτιστής	Μετατροπέας DC/AC	Συσσωρευτής			
EC 102	Whisper100H40	SB_2000E	Samplex	TrojanL16P			
383€	1650 €	146.00€	151.06€	123€			

Πίνακας 10.23 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για υβριδικό σύστημα, σύστημα με Φ/Β πλαίσια και σύστημα με Α/Γ για τον συνδυασμό #4									
	PV(#)	WT(#)	BT(#)	CH(#)	INV(#)	h(m)	b <sub>1</sub> (°)	b <sub>2</sub> (°)	Παρούσα Αξία (€)
Υβριδικό	19	3	20	7	4	15	35	44	26804
Μóvo Φ/Β	31	-	32	11	4	-	40	32	29143
Μόνο	-	8	52	-	4	15	-	-	44417

Α/Γ
-----

Από όλους τους συνδυασμούς και τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι τα υβριδικά συστήματα καταλήγουν πάντα σε μικρότερο κόστος έναντι των συστημάτων μόνο με Φ/Β πλαίσια ή μόνο με Α/Γ. Το μικρότερο κόστος για υβριδικό σύστημα προκύπτει από τον συνδυασμό #3 του Πίνακα 10.20 (22460 €), ενώ για σύστημα μόνο με Φ/Β από τον συνδυασμό #1 του Πίνακα 10.8 (28792 €) και για σύστημα μόνο με Α/Γ για τον συνδυασμό #3 του Πίνακα 10.20 (32364 €).

## 10.2.2 Αποτελεσματικότητα της εφαρμογής των γενετικών αλγόριθμων στην παρούσα εργασία

Όπως έχει αναφερθεί οι γενετικοί αλγόριθμοι επιλύουν αποτελεσματικά προβλήματα χωρίς να εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστα. Στο Σχήμα 10.19 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα με διάφορες τιμές του συνολικού κόστους του υβριδικού συστήματος σε παρούσα αξία που παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.9 συναρτήσει του πλήθους των συσσωρευτών. Όπως φαίνεται υπάρχει ένα τοπικό βέλτιστο για αριθμό συσσωρευτών ίσο με 9 αλλά τελικά ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη τιμή η οποία είναι για αριθμό συσσωρευτών ίσο με 24.



**Σχήμα 10.19** Διάγραμμα του κόστους του υβριδικού συστήματος σε σχέση με τον συνολικό αριθμό συσσωρευτών.

## 10.2.3 Κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών κατά τη διάρκειας ενός έτους για το συνδυασμό που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 10.8.



**Σχήμα 10.20** Η κατάσταση φόρτισης, SOC, των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έτους προσομοίωσης.

Παρατηρείται ότι οι συσσωρευτές δεν εκφορτίζονται πέραν του 80% της χωρητικότητας τους και ότι η κατάσταση φόρτισης την τελευταία ώρα του έτους για την οποία έγινε η προσομοίωση δεν είναι μικρότερη της αρχικής κατάστασης φόρτισης. Επίσης παρατηρείται ότι οι μεγαλύτεροι βαθμοί εκφόρτισης παρουσιάζονται για τις πρώτες και τις τελευταίες μέρες του έτους (χειμερινούς μήνες) όπου η δεδομένη πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας είναι περιορισμένη και συνεπώς η παραγόμενη ενέργεια από τα Φ/Β πλαίσια μειωμένη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πιο βαθιές εκφορτίσεις των συσσωρευτών ώστε να καλυφθεί το έλλειμμα φορτίου.

## 11. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Η διαστασιολόγηση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας αποτελεί μια σύγχρονη λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που παρατηρείται στις μέρες μας. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία έγκειται στον τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται η αυτονομία του συστήματος μέσω του αναλυτικού μοντέλου συσσωρευτών σε συνδυασμό με τα οικονομικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη για χρονικό ορίζοντα τουλάχιστον τα 25 έτη.

Στη μέθοδο της Παραγράφου 7.2, το κόστος εγκατάστασης για σύστημα μόνο με Φ/Β πλαίσια ανέρχεται στα **7928** €. Ενώ το συνολικό κόστος με τις αντικαταστάσεις των συσσωρευτών είναι **15800** €. Τα αντίστοιχα κόστη που προέκυψαν στην παρούσα εργασία είναι **16952** € και **26026** €. Οι διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι στη μέθοδο αυτή δε γίνεται καμία οικονομική ανάλυση με οικονομικές παραμέτρους όπως ο πληθωρισμός ή το επιτόκιο αναγωγής, κάτι που θεωρείται κρίσιμο μιας και ο χρονικός ορίζοντας της εγκατάστασης είναι μεγάλος. Επίσης δεν συνυπολογίζεται το κόστος συντήρησης και το κόστος επισκευής των λειτουργικών μερών σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον δεν υπολογίζεται ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών αλλά καθορίζεται από το μέγιστο χρόνο ζωής που παρέχει ο κατασκευαστής. Τέλος, η προσομοίωση των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου στον αλγόριθμο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας οδήγησε σε αποτυχία, δηλαδή δεν μπόρεσε να καλυφθεί η απαίτηση σε φορτίο.

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 7.3 έχει κόστος εγκατάστασης για σύστημα μόνο με Φ/Β πλαίσια **12804** €, για σύστημα μόνο με Α/Γ **32674** € και για υβριδικό σύστημα **21220** €. Τα αντίστοιχα κόστη εγκατάστασης που προέκυψαν από τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι **17474** €, **26600** € και **16952** €. Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις το κόστος εγκατάστασης σύμφωνα με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παρούσα

εργασία είναι μικρότερο εκτός από τον συνδυασμό με τα Φ/Β πλαίσια. Η προσομοίωση αυτού του συνδυασμού όμως στην παρούσα μέθοδο κατέληξε σε αποτυχία. Η συγκεκριμένη μέθοδος συμπεριλαμβάνει οικονομικά κριτήρια όπως κόστος συντήρησης, πληθωρισμό, επιτόκιο αναγωγής καθώς και εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων (ταχύτητα ανέμου, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας) ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου για τον οποίο γίνεται η προσομοίωση. Δεν περιλαμβάνει κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των ιστών των Α/Γ, που όπως παρατηρήθηκε στην παρούσα εργασία έχει σημαντικό ρόλο στο τελικό κόστος. Παραδείγματος χάρη το κόστος των ιστών των Α/Γ για το συγκεκριμένο συνδυασμό (Συνδυασμός #1,Πίνακας 10.8) είναι 7% (1758 €) του συνολικού κόστους της εγκατάστασης (Σχήμα 10.5). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για χρονικό ορίζοντα 25 ετών για σύστημα μόνο με Φ/Β είναι 81647 €, για σύστημα μόνο με Α/Γ είναι 59860 € και για υβριδικό 49762 €. Οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία ήταν 28792 €, 44417 € και 26026 €. Παρατηρούμε ότι οι διαφορές είναι πολύ μεγάλες και κυρίως οφείλονται στον αυξημένο αριθμό συσσωρευτών που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της παραγράφου 7.3 που σε συνδυασμό με την αντικατάσταση των συσσωρευτών επιβαρύνει το κόστος. Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Τέλος, η προσομοίωση έδωσε επιτυχή αποτελέσματα για σύστημα με Α/Γ και για υβριδικό σύστημα.

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην Παράγραφο 7.4, έχει κόστος εγκατάστασης 8588 € για αυτόνομο σύστημα μόνο με Φ/Β πλαίσια (χωρίς τον υπολογισμό του H/Z). Το συνολικό κόστος με τις αντικαταστάσεις των συσσωρευτών είναι 14924 €. Τα αντίστοιχα κόστη που προέκυψαν για τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι 17474 € και 28792 €. Οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στο ότι δε λαμβάνονται υπόψη οικονομικές παράμετροι όπως ο πληθωρισμός και το επιτόκιο αναγωγής, το κόστος συντήρησης και επισκευής. Η προσομοίωση των αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου στον αλγόριθμο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας οδήγησε σε αποτυχία. Το ενδιαφέρον της μεθόδου είναι ότι υπολογίζει, το κόστος εγκατάστασης, ενώ συμπεριλαμβάνει στο τελικό κόστος και το κόστος ενός ελεγκτή φόρτισης.

Όσον αφορά την ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τη μέθοδο της παρούσας εργασίας η μέθοδος της Παραγράφου 7.3 λόγω της γραμμικής αναζήτησης που κάνει, είναι πιο χρονοβόρα όσα τα δεδομένα εισαγωγής αυξάνονται, εν αντιθέσει με την παρούσα μέθοδο όπου η βέλτιστη λύση απαιτεί σύντομο χρόνο. Το σημαντικό, όμως, πλεονέκτημα της παρούσας μεθόδου είναι ότι λόγω της χρησιμοποίησης των γενετικών αλγόριθμων, δεν «παγιδεύεται» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.

Διερευνώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα μέθοδο παρατηρούμε ότι το κόστος εγκατάστασης ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος δεν είναι απαγορευτικό για την εφαρμογή του. Η πρόταση αυτή γίνεται ακόμα πιο δελεαστική αν αναλογιστούμε τις πτωτικές τάσεις που επικρατούν στη αγορά όσων αφορά το κόστος αγοράς των Φ/Β πλαισίων και των Α/Γ, τον ανταγωνισμό μεταξύ των εταιρειών και τις νέες τεχνολογίες που αναπτύσσονται στο τομέα των συστημάτων παραγωγής ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι χρησιμοποιούνται μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία, έχουν υψηλές τιμές αγοράς, αλλά εκμεταλλεύονται πιο αποδοτικά τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία.

Τέλος, όσον αφορά τη χρήση του αλγόριθμου βέλτιστης διαστασιολόγησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι σημαντικό να δημιουργηθεί κατάλληλο user-interface ώστε να γίνει πιο φιλική η εισαγωγή των δεδομένων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] http://www.ape.chania.teicrete.gr , Accessed on 29/12/2007.

[2] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη, 2006.

[3] Ποτηράκης Αντώνιος, "Ανάπτυξη λογισμικού διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγής ενέργειας", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2003.

[4] Παπαδόπουλος Δημήτριος, "Σχεδιασμός και αξιολόγηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που παράγεται από αιολικά πάρκα σε απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.

[5] Χατζηιωάννου Αλέξης, "Βελτιστοποίηση σχεδιασμού υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων και ανεμογεννητριών για τη τροφοδοσία συστημάτων αφαλάτωσης", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.

[6] D. Linden, T. Reddy, "Handbook of batteries", 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 2007.

[7] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs", 2<sup>nd</sup> Edition, Springer Verlag, 1992.

[8] Σταμπολίδης Βασίλης, "Αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2005.

[9] http://helios.teiath.gr, Accessed on 29/12/2007.

[10] http://www.pvresources.com, Accessed on 29/12/2007.

[11] http://www.iqsolarpower.com/pvpanels.htm, Accessed on 29/12/2007.

[12] Eftichios Koutroulis, Dionissia Kolokotsa, Antonis Potirakis, Kostas Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-

generator systems using genetic algorithms", Solar Energy, 80, 1072-1088, 2005.

[13] Κουνενάκη Μαρία, "Οικονομοτεχνική μελέτη μονάδας αφαλάτωσης με τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας", Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2001.

[14] Iryna Snihir, William Rey, Evgeny Verbitkiy, Afifa Belfadhel-Ayeb, Peter H.L. Notten, "Battery open-circuit voltage estimation by method of statistical analysis", Journal of Power Sources, 159, 1484-1487, 2005.

[15] http://www.alternative-energy-news, Accessed on 29/12/2007.

[16] http://www.mpoweruk.com, Accessed on 29/12/2007.

[17] Γιαννοπούλου Κωνσταντίνα, "Εξέλιξη δικτύων και συστημάτων λειτουργίας κινητής τηλεφωνίας και περιγραφή νέων τεχνολογιών", Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2005.

[18] Κηρυττόπουλος Κωνσταντίνος, "Εγχειρίδιο διαχείρισης κινδύνων έργων", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2006.

[19] Νόμος 3468/2006, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α.Π.Ε. και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις, (Φ.Ε.Κ. Α' 129/27.06.2006)", 2006.

[20]http://www.ceh.nasa.gov/webhelpfiles/Present\_Value,\_Inflation,\_and\_Disco unting.htm, Accessed on 27/1/2008.