

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ**

Χατζηιωάννου Αλέξης

Εξεταστική Επιτροπή

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων, Καθηγητής)

Σταυρακάκης Γεώργιος (Καθηγητής)

Ζερβάκης Μιχάλης (Καθηγητής)

Χανιά, Δεκέμβριος 2006

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης τον Καθηγητή κ. Σταυρακάκη Γεώργιο και τον Καθηγητή κ. Ζερβάκη Μιχάλη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Κουτρούλη Ευύχιο για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ποτηράκη Αντώνιο για τις συμβουλές στο προγραμματιστικό κομμάτι της εργασίας και τον κ. Κ. Καραμάνη για τις συμβουλές του όσον αφορά τις μονάδες αφαλάτωσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συμβατικές μορφές ενέργειας οδηγούνται με μαθηματική ακρίβεια σε μεγάλη κρίση. Η επερχόμενη εξάντλησή τους, καθώς και τα προβλήματα που δημιουργούνται από την αλόγιστη χρήση τους αποτελούν το έναυσμα για την αναζήτηση και αξιοποίηση άλλων μορφών ενέργειας. Η προφανής επιλογή είναι αυτή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας που είναι οι σημαντικότερες από αυτές.

Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα είναι αυτό της εξάντλησης του νερού είτε αυτό προορίζεται για οικιακή, είτε για οποιαδήποτε άλλη χρήση. Το πρόβλημα εντείνεται περαιτέρω από την μόλυνση των αποθεμάτων της γης σε πόσιμο ή μη νερό. Έτσι, έχει αναπτυχθεί η έρευνα για την αξιοποίηση των αλμυρών ή υφάλμυρων αποθεμάτων νερού της γης, πράγμα που προϋποθέτει την ανάπτυξη τεχνολογίας αφαλάτωσης των υδάτων αυτών.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μέθοδος για την διαστασιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννητριών που τροφοδοτεί ένα σύστημα αφαλάτωσης. Η διαστασιολόγηση αποσκοπεί στην κάλυψη της ζήτησης σε νερό μιας περιοχής ελαχιστοποιώντας το οικονομικό κόστος του συστήματος. Για την διαστασιολόγηση χρησιμοποιήθηκαν οι γενετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι αποτελούν μια πολύ αποδοτική κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Συστήματα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	9
1.3 Η δομή της εργασίας	12
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Επιλογή μορφών ενέργειας και τεχνικών αφαλάτωσης	14
2.3 Συνδυασμός τεχνολογιών	15
2.4 Διαστασιολόγηση συστημάτων αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ΑΠΕ19	
3. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	21
3.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	21
3.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.....	22
3.3 Ακτινοβολία ενός Ήλιου	23
3.4 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας.....	25
3.5 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων	25
3.6 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην Γη.....	27
3.7 Μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο	27
3.8 Φωτοβολταϊκή μετατροπή – φωτοβολταϊκά στοιχεία	32
3.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	35
3.10 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων	36
3.11 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στο σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία	38
4. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	39

4.1	Εισαγωγή.....	39
4.2	Αιολική ενέργεια.....	39
4.3	Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος	41
4.4	Αξιολόγηση αιολικού δυναμικού	42
4.5	Ανεμογεννήτριες – είδη ανεμογεννητριών	43
4.6	Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών	48
4.7	Ισχύς ανεμογεννητριών	49
4.8	Η ανεμογεννήτρια στο σύστημα της παρούσας εργασίας.....	51
5.	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ	53
5.1	Εισαγωγή.....	53
5.2	Το νερό.....	54
5.3	Η χημεία του νερού.....	56
5.4	Χρήση του νερού	59
5.5	Κριτήρια ποιότητας νερού.....	60
5.6	Αφαλάτωση	62
5.7	Μέθοδοι αφαλάτωσης.....	64
6.	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ	68
6.1	Αρχή λειτουργίας	68
6.2	Προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας.....	70
6.3	Χαρακτηριστικά λειτουργίας των μεμβρανών	71
6.4	Εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης.....	72
6.5	Διαδικασία καθαρισμού μεμβρανών	73
6.6	Η δεξαμενή αποθήκευσης του πόσιμου νερού	74
6.7	Η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης στην εργασία	74
7.	ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ – ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ).....	77
7.1	Ηλεκτρικά στοιχεία – συσσωρευτές	77

7.2	Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος	78
7.3	Οι συσσωρευτές στο σύστημα της παρούσας εργασίας	82
7.4	Ρυθμιστές τάσης	83
7.5	Οι ρυθμιστές τάσης του συστήματος της παρούσας εργασίας	85
7.6	Μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς, inverters)	86
8.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	88
8.1	Εισαγωγή.....	88
8.2	Ιστορική αναδρομή	88
8.3	Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος	90
8.4	Η κωδικοποίηση των μεταβλητών	93
8.5	Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής (objective function και fitness function).....	93
8.6	Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)	95
8.7	Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης	97
8.8	Χειρισμός περιορισμών	97
9.	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	99
9.1	Εισαγωγή.....	99
9.2	Τάση λειτουργίας του συστήματος.....	100
9.3	Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος	101
10.	ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	108
10.1	Περιγραφή της λύσης του προβλήματος	108
10.2	Αρχικοποίηση αλγορίθμου.....	109
10.3	Μοντελοποίηση του προβλήματος με τον γενετικό αλγόριθμο	119
10.4	Πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης	122
10.4.1	Διασταύρωση	122
10.4.2	Μετάλλαξη.....	125

10.5	Οι επιμέρους αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στους γενετικούς	127
10.5.1	Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών μιας μεταβλητής	127
10.5.2	Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων – repair algorithm	127
10.6	Σύγκλιση του αλγορίθμου	128
10.7	Ο γενετικός αλγόριθμος.....	129
11.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	131
11.1	Εισαγωγή.....	131
11.2	Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.....	136
12.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ – ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ.....	153
13.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	155

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Το νερό είναι ίσως το πιο σημαντικό αγαθό που προσφέρει η φύση στον άνθρωπο. Αποτελεί την μεγαλύτερη ανάγκη του ανθρώπου και χωρίς αυτό δεν νοείται καν η έννοια της ζωής. Άλλωστε, η αναζήτηση ζωής σε άλλους πλανήτες ανάγεται στην αναζήτηση νερού στην επιφάνεια τους. Είναι ενδεικτικό το γεγονός ότι το 80% του σώματός μας είναι νερό – ενώ και τα υπόλοιπα έμβια όντα εξαρτώνται πλήρως από αυτό.

Η ενέργεια – στις διάφορες μορφές της – αποτελεί την βάση του σύγχρονου (τεχνολογικού ιδιαίτερα) πολιτισμού της ανθρωπότητας. Τα τεράστια άλματα της τεχνολογίας τους τελευταίους δύο αιώνες είναι άμεσα συνυφασμένα με την αξιοποίηση, μετατροπή, και παραγωγή ενέργειας, ενώ τα αποτελέσματα αυτής της ανάπτυξης είναι πάρα πολύ σημαντικά σε όλους τους τομείς της ζωής του ανθρώπου (καθημερινή ζωή – εργασία – διαπροσωπικές σχέσεις – κατοικία – μακροβιότητα – κλπ.).

Στις μέρες μας, όμως, συνεχώς αυξάνεται ο προβληματισμός όσον αφορά τα αποθέματα σε νερό και ενέργεια. Η ανεξέλεγκτη σπατάλη καθώς και η αλόγιστη ανάπτυξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας οδηγεί με μαθηματική ακρίβεια στην εξάντληση ή αχρήστευση των αποθεμάτων. Οι ανά τον κόσμο μελέτες κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου συνεχώς τόσο για το νερό όσο και για το πετρέλαιο από το οποίο παίρνουμε το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας στις μέρες μας. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι μεγάλο κομμάτι της ανθρωπότητας δεν έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό.

Για χιλιάδες χρόνια η ανθρωπότητα πίστευε ότι οι φυσικοί πόροι είναι ανεξάντλητοι. Εκμεταλλεύθηκε αλόγιστα τα φυσικά καύσιμα για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Η υπερβολική κατανάλωση των φυσικών πηγών ενέργειας οδήγησε σε φαινόμενα όπως η μόλυνση του περιβάλλοντος, ο υποβιβασμός της ποιότητας του αέρα και του νερού και η απειλή της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος, τα οποία τράβηξαν το ενδιαφέρον των επιστημόνων. Για να επιτευχθεί ο στόχος οικονομικών δραστηριοτήτων μεγάλης περιόδου, χωρίς να καταστραφεί η φυσική βάση της ανθρώπινης ζωής, θεωρείται ως προϋπόθεση η δημιουργία νέων τεχνολογιών και η υπεύθυνη χρήση των φυσικών πόρων.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα αυτή τη στιγμή είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται στα λεγόμενα αέρια θερμοκηπίου, δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το νερό (H₂O), το μεθάνιο (CH₄), τους χλωροφθοράνθρακες και άλλες πολυπλοκότερες ενώσεις που παράγονται από την καύση των φυσικών πηγών ενέργειας όπως το κάρβουνο, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο. Τα συμπεράσματα των μελετών του προβλήματος που έγιναν υπό την κηδεμονία του Διακυβερνητικού Πλαισίου της Αλλαγής Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) είναι τα ακόλουθα : *«Όσον αφορά τις παρατηρούμενες αλλαγές, έχει γίνει μια πραγματική αλλά ανώμαλη αύξηση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της Γης, από 0,3 ως 0,6 °C τα τελευταία 100 χρόνια, μια αξιοσημείωτη αλλά ανώμαλη πτώση της πλειοψηφίας των παγετώνων της Γροιλανδίας και μια αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας από 1 ως 2 mm ανά έτος» [2].*

Ο κατάλογος των προβλημάτων, όμως, είναι πολύ μεγάλος και περιλαμβάνει φαινόμενα όπως την όξινη βροχή, δηλαδή την πτώση στην Γη, μέσω της βροχής, των οξέων που δημιουργούνται από την ένωση του νερού της ατμόσφαιρας με τα αέρια των καύσεων (ιδιαίτερα του διοξειδίου του θείου και των οξειδίων του αζώτου). Άλλα προβλήματα είναι η μόλυνση των θαλασσών και τα πάρα πολλά προβλήματα που σχετίζονται με την πυρηνική ενέργεια και έχουν να κάνουν με την μόλυνση που προκαλούν οι πυρηνικές εγκαταστάσεις σε περίπτωση ατυχήματος ή αμέλειας.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, αυξάνεται συνεχώς η συζήτηση γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που αποτελούν μια από τις ελπιδοφόρες προτάσεις για το μέλλον της παραγωγής ενέργειας. Ο ήλιος, ο άνεμος, τα θαλάσσια κύματα είναι ανεξάντλητες πηγές με σχεδόν μηδενική επιβάρυνση στο περιβάλλον. Πληρούν δηλαδή όλες τις προϋποθέσεις για να στοχευθεί η έρευνα σε αυτές και να γίνει η προσπάθεια να καθιστούν βιώσιμες οι εγκαταστάσεις που σχετίζονται με αυτές.

Ο Συμβουλευτικός Όμιλος Ανανεώσιμης Ενέργειας της Μεγάλης Βρετανίας (Renewable Energy Advisory Group, REAG) έχει ορίσει την ανανεώσιμη ενέργεια σαν την έκφραση που χρησιμοποιείται για να καλυφθεί η κυκλοφορούμενη ενέργεια η οποία απαντάται στη φύση, επαναλαμβάνεται και μπορεί να

χρησιμοποιηθεί προς όφελος του ανθρώπου. Οι βασικές πηγές αυτής της ενέργειας είναι ο ήλιος, η βαρύτητα και η περιστροφή της Γης [1].

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατηγοριοποιούνται στην ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την κυματική ενέργεια, την υδροηλεκτρική ενέργεια, την παλιρροιακή ενέργεια, την γεωθερμική ενέργεια, την ενέργεια από την βιομάζα και την ενέργεια από τα απόβλητα. Όλες αυτές, κατά κύριο λόγο, πηγάζουν από την ηλιακή ενέργεια η οποία είναι 160 φορές μεγαλύτερη από την αποθηκευμένη ενέργεια των παγκόσμιων αποδεδειγμένων αποθεμάτων φυσικών καυσίμων.

Παράλληλα βελτιστοποιούνται συνεχώς οι τεχνολογίες αυτές που καθιστούν δυνατή την παραγωγή πόσιμου νερού από μη πόσιμο, δηλαδή την αφαλάτωση του νερού. Στην φύση υπάρχουν τεράστιες ποσότητες νερού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη σε τέτοιες διεργασίες, με πιο προφανές παράδειγμα, το πρακτικά ανεξάντλητο θαλασσινό νερό.

Η σύνδεση των δύο αυτών τάσεων (της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της παραγωγής νερού από αφαλάτωση) είναι μια πραγματικά ελπιδοφόρα προοπτική, καθώς συνδυάζει τις λύσεις σε δύο σημαντικά προβλήματα. Από την στιγμή που μπορεί να λειτουργήσει ένα σύστημα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εξασφαλιστεί ένα λογικό κόστος, προκύπτουν μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως είναι η παροχή νερού σε μέρη τα οποία παρουσιάζουν πρόβλημα, η παραγωγή ενέργειας με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο και η μη σπατάλη των πόρων της γης γι' αυτόν τον σκοπό.

1.2 Συστήματα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

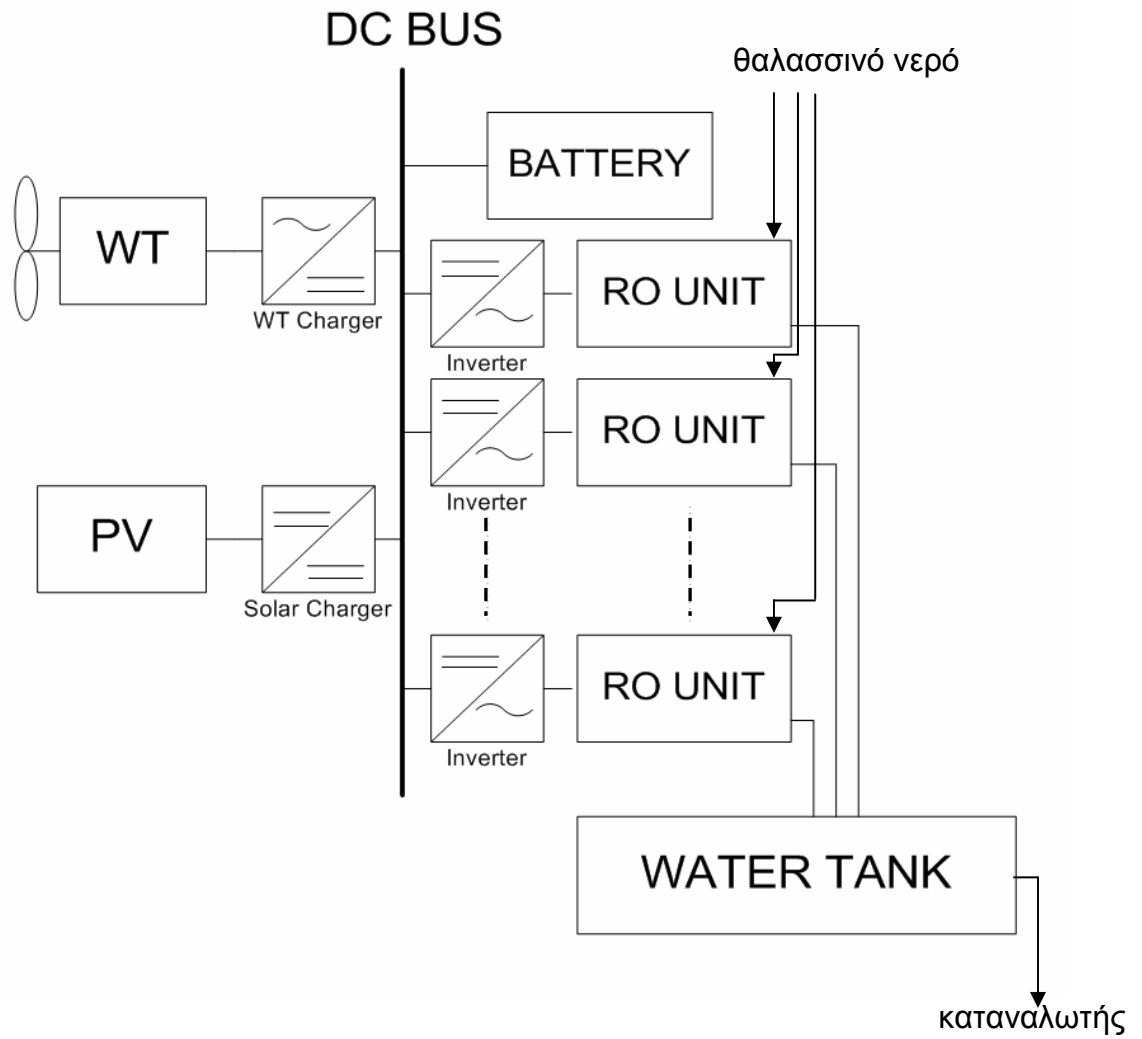
Τα συστήματα αφαλάτωσης καλούνται να δώσουν την λύση στο πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού. Η σημασία τους είναι πολύ μεγάλη καθώς αποτελούν την πλέον ορατή λύση στο πρόβλημα της έλλειψης πόσιμου νερού και έτσι έχει αναπτυχθεί η έρευνα γύρω από αυτά σε μεγάλο βαθμό.

Έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από τεχνικές αφαλάτωσης με κύρια κατηγοριοποίηση τις τεχνικές θερμικής φύσης και τις τεχνικές μεμβρανών. Οι τεχνικές θερμικής φύσης είναι οι Multiple Stage Flash (MSF), Multiple Effect Distillation (MED) και

Vapor Compression (VC), ενώ οι τεχνικές μεμβρανών είναι η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO) και η ηλεκτροδιάλυση (ElectroDialysis, ED).

Θεωρητικά, μπορεί να υπάρξει οποιοσδήποτε συνδυασμός μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αφαλάτωσης, αλλά πρακτικά χρησιμοποιούνται κάποιοι συγκεκριμένοι συνδυασμοί οι οποίοι δίνουν καλύτερα αποτελέσματα. Οι συνηθέστεροι συνδυασμοί είναι η χρησιμοποίηση ηλιακής ή αιολικής ενέργειας για αφαλάτωση με τεχνικές μεμβράνων και γεωθερμική ή ηλιακή ενέργεια για τροφοδότηση μονάδων αφαλάτωσης με τεχνικές θερμικής φύσης. Η επιλογή των συνδυασμών γίνεται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του τόπου στον οποίο θα εγκατασταθεί το σύστημα, όπως η διαθεσιμότητα και ο τύπος του νερού, ο τύπος της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας που βρίσκεται στον τόπο κ.α. [3]. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων (ηλιακή ενέργεια) και ανεμογεννητριών (αιολική ενέργεια), όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και αντίστροφη ώσμωση, όσον αφορά την μονάδα αφαλάτωσης.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται το σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, στο οποίο χρησιμοποιείται ένας κοινός δίαυλος συνεχούς τάσης (DC BUS). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV), οι ανεμογεννήτριες (WT), οι μπαταρίες (BATTERY) και οι μονάδες αφαλάτωσης (RO UNIT) είναι συνδεδεμένες στον δίαυλο αυτόν. Ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες και στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και στον κοινό δίαυλο χρησιμοποιούνται φορτιστές (Chargers) που ουσιαστικά είναι ρυθμιστές τάσης και φροντίζουν για την σωστή φόρτιση του συσσωρευτή. Επίσης ανάμεσα στις μονάδες αφαλάτωσης και τον κοινό δίαυλο χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/AC (inverters, αντιστροφείς), γιατί οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ ο δίαυλος διαρέεται από συνεχές. Οι μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν παράλληλα στο σύστημα και ο αριθμός τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις σε νερό που χρειάζεται να καλύψει το σύστημα. Τέλος, οι μονάδες αφαλάτωσης τροφοδοτούν με νερό την δεξαμενή του συστήματος (WATER TANK) από την οποία εξυπηρετείται ο καταναλωτής.



Σχήμα 1.1. Το σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία

1.3 Η δομή της εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανασκόπηση για την τροφοδότηση συστημάτων αφαλάτωσης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αναλύονται διάφορες μέθοδοι διαστασιολόγησης τέτοιων συστημάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η ηλιακή ενέργεια και το πως μπορεί αυτή να χρησιμοποιηθεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η αιολική ενέργεια και το πως μπορεί αυτή να χρησιμοποιηθεί.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στο νερό και τις ιδιότητές του και καταδεικνύει το μεγάλο πρόβλημα του νερού στην γη. Επίσης αναφέρεται εισαγωγικά και στις διάφορες μορφές αφαλάτωσης που υπάρχουν.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία (αντίστροφη ώσμωση).

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υπόλοιπα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στο σύστημα, δηλαδή οι μπαταρίες, οι ρυθμιστές τάσης (φορτιστές) και οι μετατροπείς DC/AC.

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγική περιγραφή των γενετικών αλγορίθμων, παρουσιάζοντας την αρχή λειτουργίας τους.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και αναφέρονται οι περιορισμοί που λαμβάνονται υπ' όψιν καθώς και οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν. Επίσης παρουσιάζεται ο αλγόριθμος προσομοίωσης του συστήματος.

Στο δέκατο κεφάλαιο φαίνεται πως ενεργεί ο γενετικός αλγόριθμος στο σύστημα, και αναλύεται η λειτουργία του σε διάφορα σημεία της διαδικασίας.

Στο ενδέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή και αναφέρονται κάποιες μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να γίνουν στη μέθοδο διαστασιολόγησης που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Η δυνατότητα παραγωγής νερού και ενέργειας είναι ένα ζήτημα που απασχόλησε κάποιους πρωτοπόρους επιστήμονες αλλά και φιλοσόφους από την αρχαιότητα. Η ιδέα της αξιοποίησης των πρακτικά ανεξάντλητων πηγών, όπως είναι το θαλασσινό νερό και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερως ελκυστική και πολλά υποσχόμενη αφού έρχεται να δώσει λύσεις σε προβλήματα που ταλανίζουν τις σύγχρονες κοινωνίες, όμως οι πρώτες σκέψεις επί αυτών των θεμάτων διατυπώθηκαν πριν καν εμφανιστούν τέτοιου είδους προβλήματα.

Παρότι η ανάπτυξη των επιμέρους τεχνολογιών άρχισε να αναπτύσσεται χιλιάδες χρόνια πριν, ο συνδυασμός τους είναι σχετικά πρόσφατο φαινόμενο. Τα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές αποτελούν μόνο το 0,02% της συνολικής παραγωγής νερού από αφαλάτωση [4], όμως είναι σαφές ότι υπάρχουν πολλοί λόγοι που καθιστούν τον συνδυασμό αφαλάτωσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μια βιώσιμη και αποδοτική λύση [5] :

- Πολλές άλυτες περιοχές είναι παραθαλάσσιες, όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διαθέσιμες σε μεγάλο βαθμό.
- Η ζήτηση σε πόσιμο νερό, πολύ συχνά, παρουσιάζει μια αυξημένη εποχικότητα και πιο συγκεκριμένα αυξάνεται λόγω του τουρισμού. Αυτό όμως γίνεται σε εποχές που και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδίως η ηλιακή, παρουσιάζουν αυξημένη διαθεσιμότητα.
- Τα απομακρυσμένα μέρη και τα μικρά νησιά που αντιμετωπίζουν συχνά πρόβλημα ύπαρξης φρέσκου νερού, υποφέρουν από ελλιπές ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά και η μεταφορά καυσίμων για παραγωγή ενέργειας είναι ακριβή. Έτσι, γίνεται αξιοποίηση των τοπικών πηγών ενέργειας που είναι οι ανανεώσιμες.
- Τα συστήματα αφαλάτωσης είναι μεγάλοι καταναλωτές ενέργειας. Έτσι το περιβαλλοντικό κόστος από την τροφοδότησή τους με συμβατικές μορφές

ενέργειας, όπως είναι τα ορυκτά καύσιμα, είναι ιδιαίτερα μεγάλο, πράγμα που εξαφανίζεται με την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

- Σε πολλά νησιά της Μεσογείου η κάλυψη των αναγκών σε φρέσκο νερό γίνεται με την μεταφορά νερού με πλοία, πράγμα που είναι ιδιαίτερα ακριβό. Έτσι με την αφαλάτωση υπάρχει σημαντική μείωση του κόστους του πόσιμου νερού.
- Η συντήρηση των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι συνήθως ευκολότερη σε σχέση με την συντήρηση των συμβατικών συστημάτων. Έτσι είναι καταλληλότερα για απομακρυσμένες περιοχές.

2.2 Επιλογή μορφών ενέργειας και τεχνικών αφαλάτωσης

Όπως έχει αναφερθεί, το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει όσον αφορά τον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων είναι η επιλογή των μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των τεχνικών αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή αυτή επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που έχουν να κάνουν με τον τόπο που θα εγκατασταθεί ένα τέτοιο σύστημα [3] :

- Τύπος του διαθέσιμου νερού. Άλλες τεχνικές είναι κατάλληλες για θαλασσινό νερό και άλλες για υφάλμυρο.
- Τύπος των διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Μορφολογία του τόπου που θα γίνει το σύστημα.
- Ζήτηση του νερού. Η ποσότητα του νερού που χρειάζεται να παραχθεί από το σύστημα για να καλύψει τις ανάγκες του τόπου κρίνει εν πολλοίς την τεχνική αφαλάτωσης που θα χρησιμοποιηθεί.
- Απαιτήσεις σε ποιότητα παραγόμενου νερού.

Το πιο σημαντικό κριτήριο είναι η διαθεσιμότητα και ο τύπος ενέργειας που υπάρχει. Εάν υπάρχει διαθέσιμη θερμική ενέργεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατ' ευθείαν για τεχνικές απόσταξης, όπως η Multiple Stage Flash (MSF), η Multiple Effect Distillation (MED) και η Vapor Compression (VC). Τα συστήματα MED είναι γενικά πιο «ευέλικτα» και πιο εύκολα στο να λειτουργήσουν με μη συνεχές φορτίο, ενώ είναι και πιο οικονομικά από τα συστήματα MSF. Τέλος τα συστήματα VC έχουν την χαμηλότερη απόδοση ανάμεσα στις τεχνικές απόσταξης.

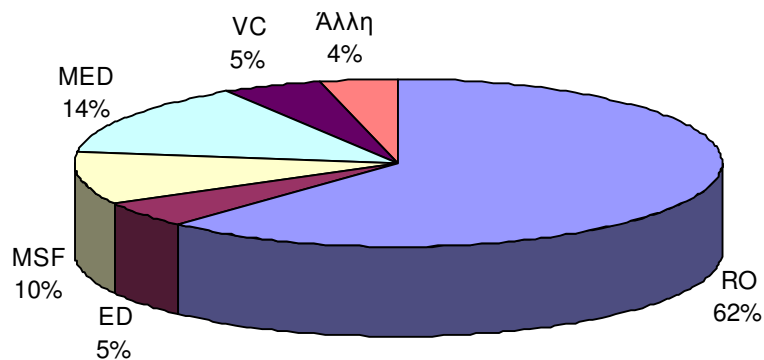
Εάν γίνεται να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από τις διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές (συνήθως αιολική και ηλιακή), τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και οι τεχνικές μεμβράνων. Οι διακοπές στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος θα μπορούσαν να αποβούν καταστροφικές για τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης, οπότε είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση ενδιάμεσων αποθηκευτικών μέσων ενέργειας, πράγμα που αυξάνει το κόστος του συστήματος. Σε απομακρυσμένες περιοχές η τεχνική της ηλεκτροδιάλυσης είναι η πιο κατάλληλη για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού καθώς είναι λιγότερο επιρρεπής σε βλάβες και η λειτουργία και η συντήρηση των συστημάτων αυτών είναι ευκολότερη σε σχέση με τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης. Επίσης τα συστήματα ηλεκτροδιάλυσης προσαρμόζονται ευκολότερα στις μεταβολές της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης, όμως, έχουν την μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, είναι κατάλληλα για αφαλάτωση θαλασσινού νερού και έχουν έτσι έχουν το μικρότερο κόστος για την παραγωγή φρέσκου νερού [5].

2.3 Συνδυασμός τεχνολογιών

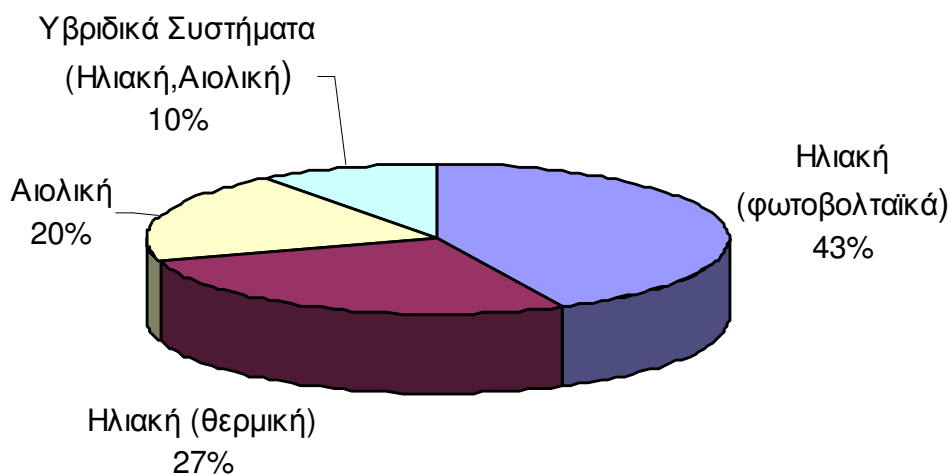
Παρότι σε θεωρητικό επίπεδο είναι δυνατός κάθε συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνικών αφαλάτωσης στην πράξη χρησιμοποιούνται κάποιοι συγκεκριμένοι συνδυασμοί οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 [6]. Οι συνδυασμοί αυτοί εμφανίζουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τους υπόλοιπους δυνατούς συνδυασμούς ως προς την δυνατότητα υλοποίησής τους από οικονομική και τεχνολογική σκοπιά και μπορούν να προκύψουν συστήματα που χαρακτηρίζονται από αντοχή στον χρόνο, λειτουργική ευκολία, χαμηλό κόστος συντήρησης, σχετικά μικρό μέγεθος και εύκολη μεταφορά στον τόπο που θα λειτουργήσει το σύστημα.

Πίνακας 2.1 : Συνδυασμοί μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνικών αφαλάτωσης		
Μορφή ΑΠΕ	Ποιότητα παρεχόμενου νερού	Τεχνική αφαλάτωσης
Θερμική	Θαλασσινό	MED
		MSF
Ηλιακή (φωτοβολταϊκά)	Θαλασσινό	RO
	Υφάλμυρο	ED
Αιολική	Θαλασσινό	RO
	Υφάλμυρο	
	Θαλασσινό	MVC
Γεωθερμική	Θαλασσινό	MED

Στο σχήμα 2.1 φαίνονται τα ποσοστά των τεχνικών αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ΑΠΕ, ενώ στο σχήμα 2.2 φαίνονται τα ποσοστά των μορφών ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αφαλάτωσης.



Σχήμα 2.1. Τεχνικές αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ΑΠΕ



Σχήμα 2.2. Μορφές ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αφαλάτωσης

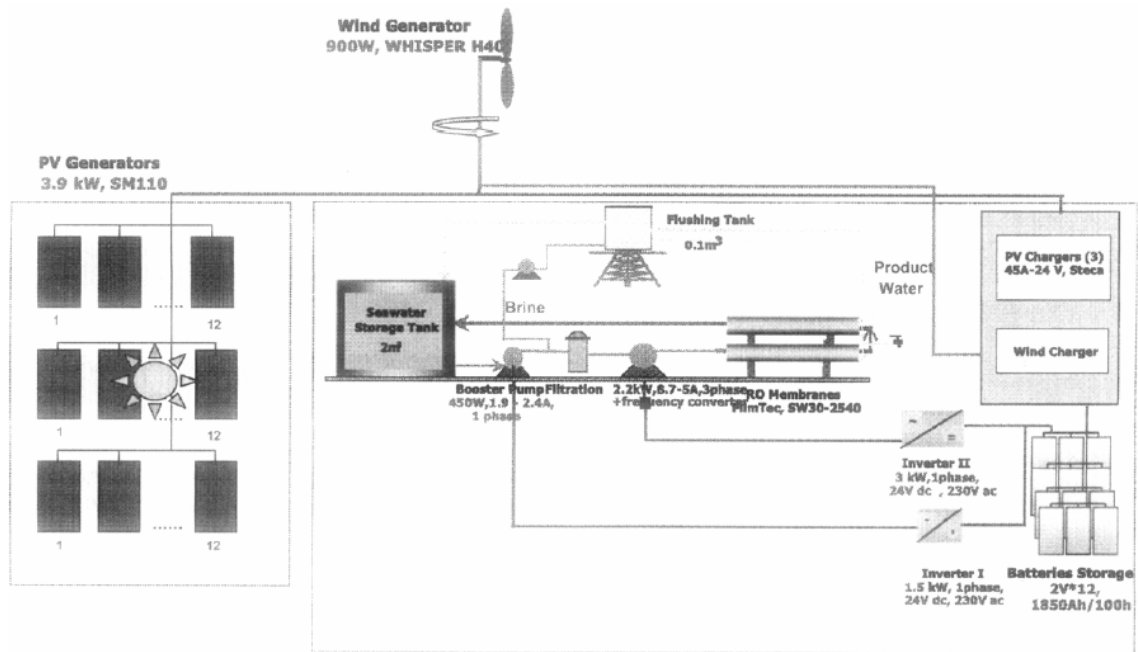
Τα συστήματα αφαλάτωσης που τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, παρόλους τους διάφορους τύπους και συνδυασμούς που μπορεί να περιέχουν, έχουν κοινές αρχές. Το πρώτο στάδιο των συστημάτων αυτών περιλαμβάνει την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των ΑΠΕ (στο σύστημα της παρούσας εργασίας αυτές είναι η ηλιακή ενέργεια με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η αιολική ενέργεια με τις ανεμογεννήτριες). Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια φορτίζει τις μπαταρίες του συστήματος οι οποίες με την σειρά τους τροφοδοτούν τις μονάδες αφαλάτωσης μέσω των μετατροπέων οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το συνεχές ρεύμα που παράγουν οι ΑΠΕ σε εναλλασσόμενο, που απαιτείται για την τροφοδοσία της μονάδας αφαλάτωσης.

Εκτός από αυτά τα κύρια μέρη του συστήματος είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν και άλλα, όπως η διασύνδεση του συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο, είτε για να χρησιμοποιηθεί ενέργεια από αυτό, είτε για να διοχετευθεί εκεί το τυχόν πλεόνασμα ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ. Επίσης συχνά χρησιμοποιούνται δεξαμενές αποθήκευσης νερού είτε για το νερό τροφοδοσίας του συστήματος είτε για το παραγόμενο πόσιμο νερό.

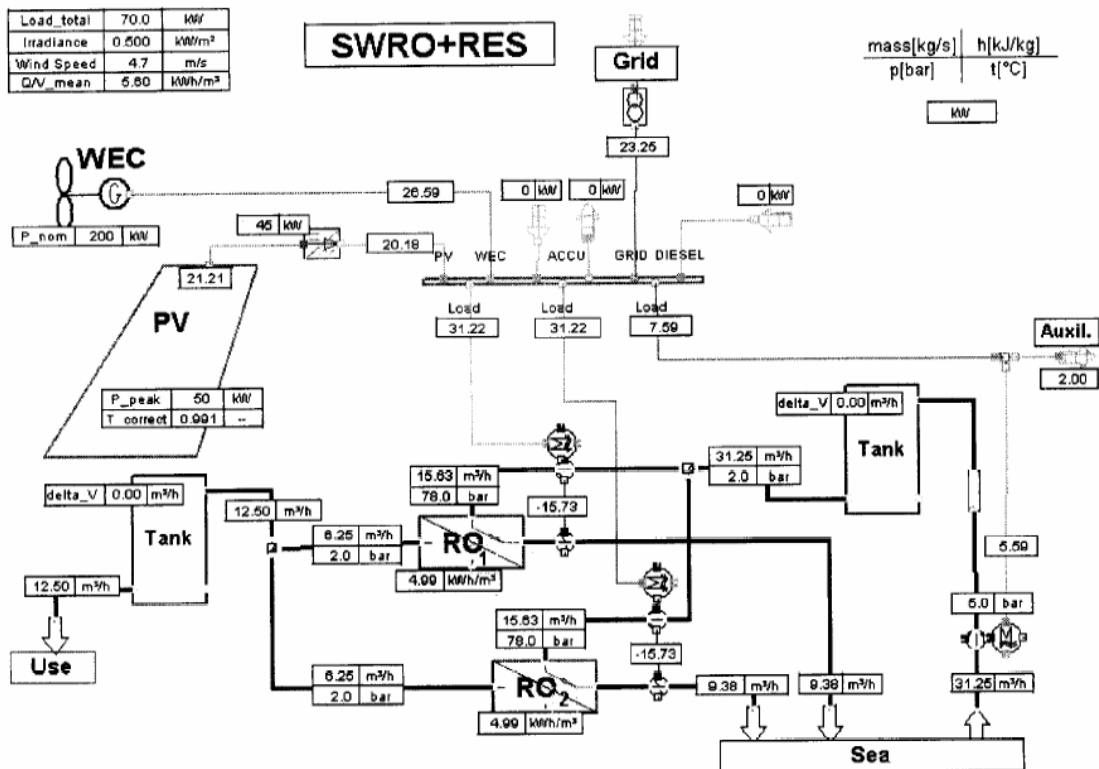
Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα [20] με δομή παρόμοια του συστήματος της παρούσας εργασίας. Το σύστημα αυτό είναι υβριδικό (χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά πλαίσια και ανεμογεννήτριες). Αυτές, μέσω των φορτιστών, φορτίζουν τους συσσωρευτές του συστήματος, από όπου τροφοδοτούνται οι αντλίες του συστήματος αφαλάτωσης, μέσω των αντιστροφών. Χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας για κάθε μία από τις δύο αντλίες που χρησιμοποιούνται. Η μονάδα αφαλάτωσης παίρνει θαλασσινό νερό από μία δεξαμενή αποθήκευσης θαλασσινού νερού που έχει το σύστημα. Τέλος, υπάρχει και μια δεξαμενή αποθήκευσης καθαρού νερού που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των μεμβράνων (flushing).

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται ένα πολυπλοκότερο σύστημα που χρησιμοποιεί και το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης [21]. Σε αυτό το σύστημα η ισχύς που είναι διαθέσιμη από τις ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και το ηλεκτρικό δίκτυο οδηγεί, τόσο τις αντλίες των δύο μονάδων αφαλάτωσης που χρησιμοποιούνται, όσο και άλλη μία η οποία αντλεί θαλασσινό νερό από την θάλασσα. Τέλος, στο σύστημα, υπάρχουν και δύο δεξαμενές αποθήκευσης νερού,

η μία για το θαλασινό νερό και η άλλη για το καθαρό νερό που παράγεται από τις μονάδες αφαλάτωσης.



Σχήμα 2.3. Σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων και ανεμογεννητριών που τροφοδοτεί μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης



Σχήμα 2.4. Σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων, ανεμογεννητριών και ηλεκτρικού δικτύου που τροφοδοτεί μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης

2.4 Διαστασιολόγηση συστημάτων αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ΑΠΕ

Μέχρι σήμερα, δεν έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την διαστασιολόγηση συστημάτων αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ΑΠΕ. Στην βιβλιογραφία, όμως, απαντάται μια σειρά από μεθόδους διαστασιολόγησης υβριδικών συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πάνω στις όποιες μπορούμε να βασιστούμε για την ανάπτυξη μεθόδων διαστασιολόγησης για συστήματα αφαλάτωσης τροφοδοτούμενα από ΑΠΕ. Μια μεγάλη κατηγορία αυτών των μεθόδων είναι η σχεδίαση χειρότερης περίπτωσης, δηλαδή η επίλυση του προβλήματος λαμβάνοντας υπ' όψιν το χειρότερο συνδυασμό απαιτούμενης ισχύος από την μονάδα αφαλάτωσης και την χειρότερη περίπτωση όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα, την περίπτωση δηλαδή που θα παραγόταν η λιγότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τις ανεμογεννήτριες, λόγω χαμηλής ηλιοφάνειας ή άπνοιας αντίστοιχα. Η λογική αυτής της κατηγορίας είναι ότι αφού βρεθεί μια λύση που ικανοποιεί τις χειρότερες συνθήκες, θα ικανοποιεί και οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες. Μια παραλλαγή αυτής της κατηγορίας είναι η επιλογή όχι της χειρότερης περίπτωσης, αλλά μιας μέσης περίπτωσης. Μετά την διαστασιολόγηση για αυτήν την μέση περίπτωση πολλαπλασιάζονται τα αποτελέσματα με έναν παράγοντα διαστασιολόγησης έτσι ώστε να αποφευχθούν τα τυχόν σφάλματα.

Στην εργασία [7] προτείνεται μια μέθοδος που βασίζεται στην πρόβλεψη της χωρητικότητας του συσσωρευτή του συστήματος και ουσιαστικά κάνει την διαστασιολόγηση κρατώντας την χωρητικότητα του συσσωρευτή σε επιτρεπτά όρια. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο προσομοίωσης που σε κάθε βήμα του (ημέρα προσομοίωσης), έχοντας υπολογίσει το φορτίο και την παραγόμενη ισχύ των ΑΠΕ, υπολογίζει την τάση του συστήματος και την ένταση του ρεύματος στον συσσωρευτή από τις παραμέτρους που αφορούν τον συσσωρευτή αλλά και τις ΑΠΕ. Έτσι μετά μπορεί να υπολογίσει την ροή ενέργειας στον συσσωρευτή, οπότε είναι σε θέση να προσδιορίσει την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, η οποία πρέπει να είναι πάνω από ένα επιτρεπτό όριο.

Στην εργασία [8] εξετάζεται μια άλλη μεθοδολογία που προτείνει, αντί να εξεταστεί η χειρότερη περίπτωση, να χρησιμοποιηθεί μία βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως το ηλεκτρικό δίκτυο, η οποία θα χρησιμοποιείται μόνο κατά τους χειρότερους μήνες, όταν δηλαδή και θα είναι απαραίτητη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται

σημαντική μείωση του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των ανεμογεννητριών που χρειάζονται, άρα και αντίστοιχη περικοπή του κόστους. Αρχικά υπολογίζεται το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των ανεμογεννητριών για κάθε μήνα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ενεργειακές απαιτήσεις του φορτίου και στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος της παραγόμενης ενέργειας στους 12 μήνες καθώς και οι αποκλίσεις. Έπειτα προστίθενται αυτές οι αποκλίσεις στους αντίστοιχους μέσους όρους. Στην συνέχεια για διάφορες χωρητικότητες του συσσωρευτή υπολογίζεται η αυτονομία του συστήματος και το κόστος του, οπότε υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή της χωρητικότητας των συσσωρευτών.

Στην εργασία [9] προτείνεται μια απλή αριθμητική μέθοδος που βασίζεται στον μηδενισμό της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος από την απαιτούμενη. Συγκεκριμένα ολοκληρώνεται, η διαφορά $\Delta P = P_{gen} - P_{dem}$ όπου P_{gen} είναι η παραγόμενη ισχύς με μεταβλητό πλήθος φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννητριών και P_{dem} είναι η απαιτούμενη ισχύς, ώστε να βρεθεί η αντίστοιχη διαφορά σε ενέργεια. Έπειτα υπολογίζεται η διαφορά της θετικής και της αρνητικής ακμής του διαγράμματος της ενέργειας που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα και αυτό το αποτέλεσμα είναι η απαιτούμενη χωρητικότητα του συσσωρευτή. Τέλος χρησιμοποιείται μια επαναληπτική μέθοδος για να καθοριστεί το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των ανεμογεννητριών που θα φέρουν την καμπύλη ενέργειας όσο γίνεται πιο κοντά στο μηδέν για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Από τις διάφορες τιμές που προκύπτουν από αυτήν την επαναληπτική μέθοδο, επιλέγεται αυτή που δίνει το χαμηλότερο κόστος.

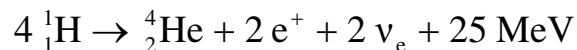
Στην εργασία [10], τέλος, προτείνεται μια μέθοδος που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση κόστους λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει η ανάγκη για κάλυψη της ζήτησης νερού. Η ελαχιστοποίηση γίνεται με έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην λύση του προβλήματος για κάθε δυνατό συνδυασμό των παραμέτρων του (αριθμός φωτοβολταϊκών, αριθμός ανεμογεννητριών, κλπ). Η μέθοδος αυτή όμως λαμβάνει υπ' όψιν της μόνο τους σημαντικότερους παράγοντες κόστους για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και όχι το πραγματικό κόστος όλου του συστήματος, ενώ δεν υπολογίζει παράγοντες όπως η αυτονομία του συστήματος. Έτσι δίνει μια προσεγγιστική λύση η οποία δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.

3. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας που υπάρχει στο πλανητικό μας σύστημα. Εκπέμπει τεράστια ποσά ενέργειας τα οποία διαχέονται και κάποια από αυτά προσπίπτουν στους πλανήτες και τα άλλα ουράνια σώματα, όπως είναι και η γη. Έτσι έχουμε μια ανεξάντλητη μετάδοση ενέργειας προς την γη, η οποία καθορίζει το μεγαλύτερο ποσοστό των φαινομένων πάνω στην γη, όπως η ζωή, ο καιρός, η μορφολογία της γης κλπ.

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται στις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις (συντήξεις) που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Οι αντιδράσεις αυτές είναι κατά κύριο λόγο μετατροπές μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου σε ήλιο και είναι εξώθερμες σε πολύ μεγάλο βαθμό. Έτσι εκλύονται πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας, τόσο μεγάλες που λόγω αυτών παρατηρείται μια ελάττωση της μάζας του ήλιου κατά 4.000.000 τόνους το δευτερόλεπτο [11]. Οι συντήξεις αυτές θα μπορούσαν να περιγραφούν με την παρακάτω συνολική αντίδραση :



όπου :

${}^1_1\text{H}$ ο πυρήνας υδρογόνου

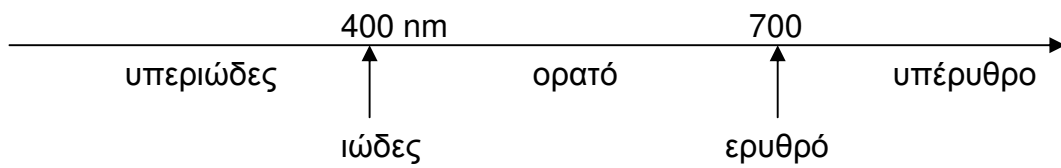
${}^4_2\text{He}$ ο πυρήνας ηλίου

e^+ το ποζιτρόνιο

ν_e το νεutrίνο

MeV μονάδα ενέργειας ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$).

Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος. Συγκεκριμένα το 44% της ηλιακής ακτινοβολίας ανήκει στο ορατό φάσμα (400 ως 700 nm), το 50% στο υπέρυθρο (>700 nm) και το υπόλοιπο 6% στο υπεριώδες (<400 nm) (σχήμα 3.1) [12].



Σχήμα 3.1. Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας

Από τις συχνότητες του ηλιακού φάσματος που έρχονται στην γη, μόνο το 75% είναι εκμεταλλεύσιμο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το ποσοστό περιλαμβάνει τα μικρά μήκη κύματος (τις μεγάλες συχνότητες δηλαδή) που αντιστοιχούν σε φωτόνια μεγάλης ενέργειας.

3.2 Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

Το ποσό της ενέργειας που μπορούμε να πάρουμε από τις φωτοβολταϊκές διατάξεις εξαρτάται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ένταση B της ηλιακής ακτινοβολίας ορίζεται ως το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m^2 επιφάνειας σε 1 sec . Η σχέση υπολογισμού της έντασης, B , είναι :

$$B = \frac{E}{S \times t} = \frac{P}{S} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.1)$$

όπου :

- E η ενέργεια,
- P η ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια,
- S το εμβαδόν της επιφάνειας και
- t ο χρόνος.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα σημεία μεταξύ του ήλιου και της επιφάνειας της γης βρίσκεται από τον τύπο :

$$B_r = \frac{E_0}{4\pi r^2 t} = \frac{P_0}{4\pi r^2} \quad (3.2)$$

όπου :

- E_0 η ολική ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο σε χρόνο t ,
- $4\pi r^2$ το εμβαδόν της εσωτερικής επιφάνειας της νοητής σφαίρας και

r η ακτίνα της νοητής σφαίρας.

Παρατηρούμε ότι η ένταση είναι αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση από τον ήλιο. Έτσι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης είναι :

$$B_R = \frac{E_0}{4\pi R^2 t} = \frac{E_0}{4\pi R^2} \quad (3.3)$$

όπου:

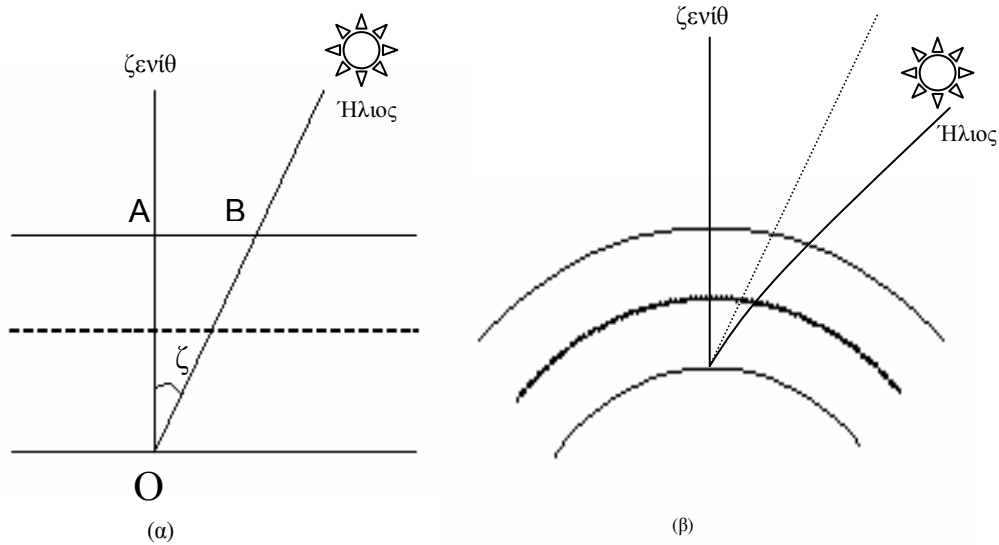
R η απόσταση ήλιου – αρχής ατμόσφαιρας.

Από εκεί και πέρα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ελαττώνεται επιπλέον μέσα στην ατμόσφαιρα της γης. Το ποσό της ελάττωσης αυτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η γεωγραφική θέση και το υψόμετρο ενός τόπου επηρεάζουν άμεσα την ένταση, όπως φαίνεται και από την εξίσωση (3.2). Επιπλέον, η σύσταση της ατμόσφαιρας στον εξεταζόμενο χώρο την κάθε στιγμή επηρεάζει σημαντικά το φαινόμενο της απορρόφησης το οποίο μειώνει κατά σημαντικό βαθμό την ένταση. Έτσι τα ποσά του όζοντος, του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα, των υδρατμών και της σκόνης που θα συναντήσει η ακτινοβολία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ένταση της.

3.3 Ακτινοβολία ενός Ήλιου

Η ενέργεια της ακτινοβολίας και η τελική της μορφή, εκτός από τους προαναφερθέντες παράγοντες, καθορίζονται και από την θέση του Ήλιου στον ουρανό. Ανάλογα με το που βρίσκεται ο Ήλιος μεταβάλλεται η διαδρομή που ακολουθεί η ακτινοβολία μέσα στην γήινη ατμόσφαιρα, δηλαδή, η μάζα αέρα μέσα από την οποία διέρχεται.

Το μήκος της διαδρομής μέχρι τη στάθμη της θάλασσας χαρακτηρίζεται από την κλίμακα μάζας αέρα AM (air mass). Μέτρο της μάζας αέρα είναι η τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης θ , δηλαδή η γωνία της θέσης του Ήλιου με την κατακόρυφο (σχήμα 3.2). Η κλίμακα μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας από την κατακόρυφη διαδρομή της (την διαδρομή που θα έκανε αν ο Ήλιος ήταν στο ζενίθ).



Σχήμα 3.2. Εξάρτηση της παραμέτρου AM από την θέση του ήλιου: απόσταση που διανύει η ακτινοβολία του Ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης: (α) θεωρητική, (β) πραγματική.

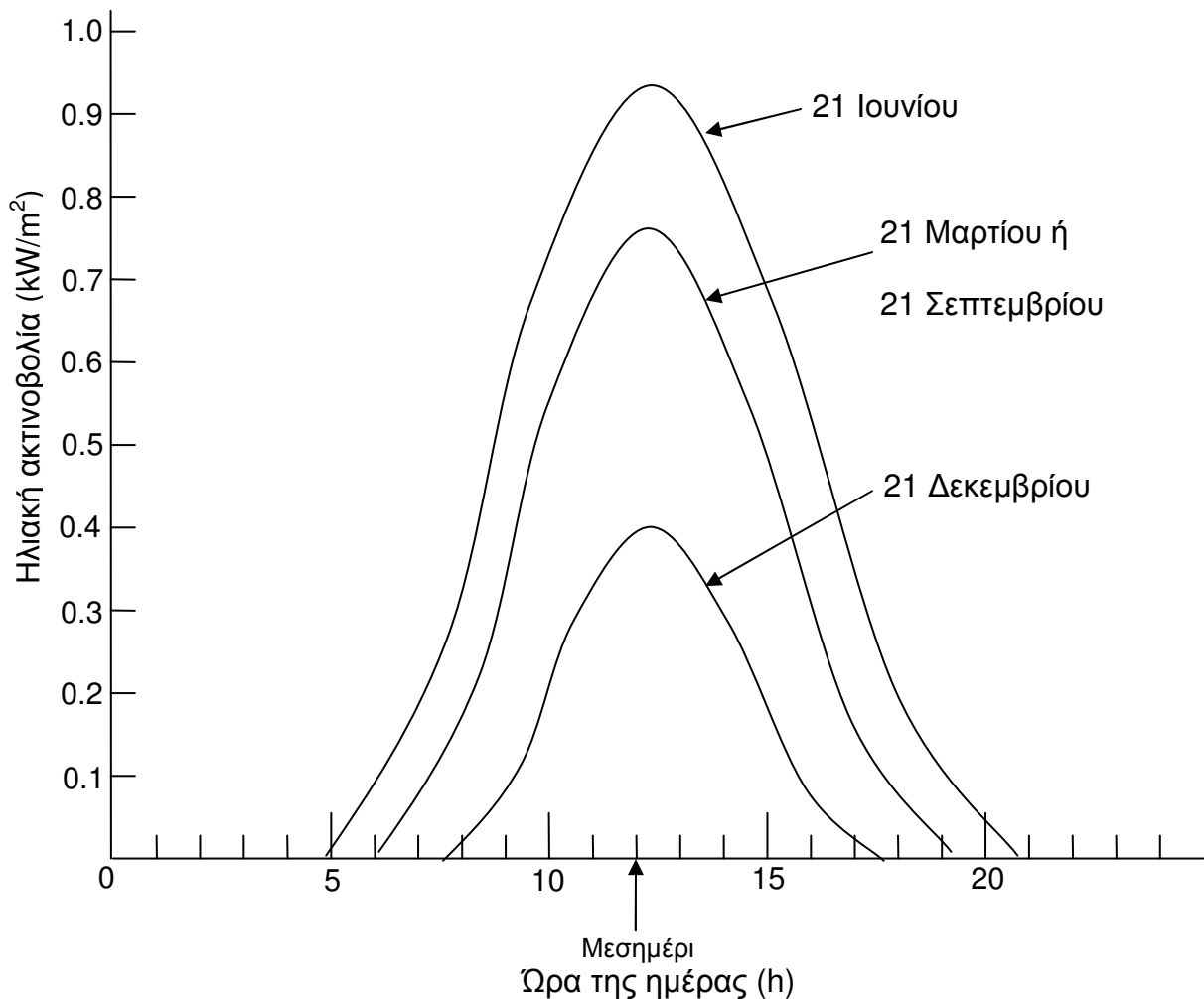
Στο σχήμα 3.2α η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και εκτείνεται άπειρα. Έτσι έχουμε $AM = \frac{OB}{OA} = \frac{1}{\cos \zeta} = \sec \zeta$. Στο σχήμα 3.2β φαίνεται η πραγματική διαμόρφωση της ατμόσφαιρας καθώς και η ατμοσφαιρική διάθλαση.

Ως AM1 ορίζεται η συνθήκη για την θέση του Ήλιου στο ζενίθ που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα (θέση που έχουμε $\sec \zeta = 1$). Αντίστοιχα AM1,5 είναι η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον Ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, AM2 για γωνία 60° κλπ.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια τοποθετημένη στην αρχή της ατμόσφαιρας της γης κάθετα στις ακτίνες θα ήταν περίπου 1350 W/m^2 . Η ηλιακή ακτινοβολία AM1,5 έχει ένταση 935 W/m^2 και ισούται περίπου με την μέση μέγιστη ισχύ που μπορεί να δεχθεί μια επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες όταν έχουμε τις καταλληλότερες συνθήκες. Χονδρικά, στρογγυλεύεται στα 1000 W/m^2 και ονομάζεται συμβατικά **ακτινοβολία ενός ήλιου** και είναι η βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά αφού χρησιμοποιείται για την εύρεση της **ισχύος αιχμής** τους.

3.4 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ανάλογα με την εποχή του χρόνου, αλλά και κατά την διάρκεια μιας ημέρας. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται η μεταβολή της ηλιακή ακτινοβολίας κατά την διάρκεια μιας μέρας για τέσσερις ενδεικτικές διαφορετικές ημερομηνίες. Η μέγιστη τιμή της έντασης, που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της, απαντάται στο ηλιακό μεσημέρι, την στιγμή δηλαδή που ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ και δεν συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι.



Σχήμα 3.3. Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας

3.5 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια παρουσιάζουν την βέλτιστη απόδοση τους όταν συμβαίνει κάθετη πρόσπτωση των ηλιακών ακτίνων πάνω τους. Οι ακτίνες όμως αλλάζουν διεύθυνση κατά την διάρκεια του χρόνου και έτσι έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί που μεταβάλλουν την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων για να

έχουμε όσο το δυνατόν κάθετη πρόσπτωση σε όλη την διάρκεια του έτους. Τέτοιοι μηχανισμοί χρησιμοποιούνται, όμως, μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

Στις 22 Μαρτίου και στις 23 Σεπτεμβρίου, ο ήλιος βρίσκεται το μεσημέρι σε τέτοια θέση ώστε η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφου του τόπου και της ευθείας που ενώνει τον τόπο με τον ήλιο, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Από τις 23 Σεπτεμβρίου και μετά η γωνία αυτή αυξάνεται, επειδή ο ήλιος κατεβαίνει χαμηλότερα, ως τις 22 Δεκεμβρίου, όποτε ο ήλιος έχει τη χαμηλότερη θέση και η γωνία αυξάνεται κατά $23,5^\circ$. Μετά τις 22 Δεκεμβρίου ο Ήλιος αρχίζει πάλι να ανεβαίνει και στις 22 Μαρτίου η γωνία γίνεται πάλι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Μετά τις 22 Μαρτίου ο ήλιος συνεχίζει να ανεβαίνει ψηλότερα και η γωνία μικραίνει σταδιακά μέχρι τις 22 Ιουνίου οπότε γίνεται $23,5^\circ$ μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος.

Έτσι η σταθερή τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου προς τα νότια για το βόρειο ημισφαίριο έχει σαν αποτέλεσμα μια ικανοποιητική πρόσπτωση συνολικής ηλιακής ενέργειας κάθε μέρα. Το μεγάλο μειονέκτημα σε αυτήν την διάταξη είναι ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά της συνολικής ηλιακής ενέργειας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ανάμεσα στις εποχές του χρόνου. Συγκεκριμένα, κατά τις ημέρες του χειμώνα η ενέργεια αυτή είναι πολύ μικρότερη από την ενέργεια που δέχονται τις ημέρες του καλοκαιριού.

Για να ελαττωθεί αυτή η διαφορά, τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία με το οριζόντιο επίπεδο ίση με $\phi+15^\circ$ (όπου ϕ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου) και έτσι η συνολική ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στα πλαίσια γίνεται μεγαλύτερη τον χειμώνα και μικρότερη το καλοκαίρι, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη σταθερότητα κατά την διάρκεια του έτους. Ουσιαστικά, δηλαδή, η μικρότερη ηλιοφάνεια κατά τις χειμερινές μέρες αντισταθμίζεται με την πιο κάθετη τοποθέτηση των πλαισίων προς τις ηλιακές ακτίνες. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές, που αντιστοιχούν σε έναν μέσο όρο της Ελλάδας, μέσω ημερήσιων αριθμών ωρών κατά τις οποίες έχουμε πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ανά εποχή του χρόνου, ανάλογα με την γωνία που είναι τοποθετημένα.

Πίνακας 3.1: Μέσος αριθμός ωρών ανάλογα με την κλίση των πλαισίων				
Προσανατολισμός Πλαισίων	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο
κατά φ	3	5,5	6,5	4
κατά φ+15°	3,5	5	5,5	4,5
κατά φ-15°	3	6	7,5	4,5

3.6 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην Γη

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας υφίσταται την επίδραση πολλών παραγόντων. Κάποιοι από αυτούς, όπως οι νεφώσεις, αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλοι όπως το όζον ή το οξυγόνο την απορροφούν. Παράγοντες όπως σταγονίδια νερού ή σκόνη οδηγούν στην διασπορά της ακτινοβολίας ενώ τελικά όταν φτάσει στο έδαφος, ένα μέρος της θα απορροφηθεί, ενώ ένα άλλο θα ανακλαστεί. Έτσι η ηλιακή ακτινοβολία διασπάται σε διάφορες συνιστώσες :

α. direct radiation: η ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ήλιο.

β. diffuse radiation: η ακτινοβολία που συνίσταται από ακτίνες που έρχονται από τον ουρανό, όμως όχι απευθείας από τον ήλιο.

γ. albedo radiation: η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του εδάφους.

Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) είναι το άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών.

3.7 Μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που συνήθως έχουμε στην διάθεση μας αφορούν το οριζόντιο επίπεδο. Είναι αναγκαίος, όμως, ο υπολογισμός της ακτινοβολίας για κάθε κλίση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Έστω, λοιπόν, $G_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β μοιρών, μετρούμενη σε Wh/m^2 . Για την $G_d(\beta)$ ισχύει [11] :

$$G_d(\beta) = R_d(\beta) + D_d(\beta) + B_d(\beta) \quad (3.4)$$

όπου :

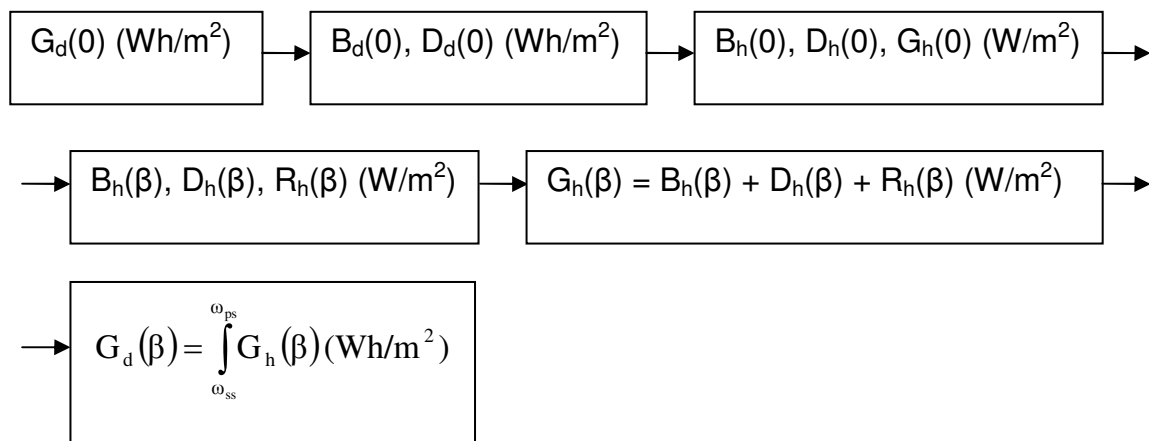
$B_d(\beta)$ είναι η direct irradiation που προσπίπτει σε πλαίσιο κλίσης β ,

$D_d(\beta)$ είναι η diffuse irradiation που προσπίπτει σε πλαίσιο κλίσης β και

$R_d(\beta)$ είναι η albedo irradiation που προσπίπτει σε πλαίσιο κλίσης β .

Πριν προχωρήσουμε παρακάτω, είναι αναγκαία η διάκριση των εννοιών irradiation και irradiance. Ο όρος irradiance αναφέρεται στην πυκνότητα ισχύος (ένταση) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και μετριέται σε W/m^2 , ενώ irradiation είναι η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κατά την διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου. Το irradiation, δηλαδή, είναι η ολοκλήρωση του irradiance στην περίοδο του χρόνου και μετριέται σε Wh/m^2 . Στην συνέχεια το irradiation σε οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται ως $B_h(0)$, $D_h(0)$ και $G_h(0)$.

Η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό του $G_d(\beta)$ φαίνεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Τα βήματα της μεθόδου υπολογισμού της ημερήσιας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδο κλίσης β .

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η μέθοδος ξεκινάει από την συνολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και καταλήγει στην μέση συνολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β μοιρών, υπολογίζοντας ενδιάμεσα τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία σε κεκλιμένο επίπεδο. Η επιλογή της κλίμακας της μιας ώρας γίνεται γιατί απλουστεύει τους υπολογισμούς, αφού για μια ώρα η συνολική ενέργεια (irradiation) ισούται κατά μέτρο με τη μέση τιμή της ισχύος (irradiance) για την συγκεκριμένη ώρα.

Έχοντας στην διάθεσή μας την συνολική ημερήσια ενέργεια υπολογίζουμε τις ποσότητες $D_d(0)$ και $B_d(0)$, θεωρώντας ότι $R_d(0) = 0$ γιατί στο οριζόντιο επίπεδο η ανακλώμενη από την γη ακτινοβολία είναι μηδενική.

Το $B_d(0)$ δίνεται από την σχέση :

$$B_d(0) = \frac{24}{\pi} B_0 \varepsilon_0 (\cos\varphi \cos\delta) (\omega_s \cos\omega_s \sin\omega_s) \quad (3.5)$$

όπου

$B_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, η ηλιακή σταθερά (η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που απέχει από τον ήλιο τόση απόσταση όση είναι η μέση απόσταση γης-ήλιου, απουσία ατμόσφαιρας)

ε_0 το τετράγωνο του λόγου της μέσης απόστασης γης-ήλιου προς την απόσταση γης-ήλιου και δίνεται από την σχέση :

$$\varepsilon_0 = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \quad (3.6)$$

όπου

d_n η μέρα του χρόνου (1,2,...,365)

φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

δ η γωνία ηλιακής απόκλισης (solar declination, η γωνία δηλαδή που σχηματίζεται ανάμεσα στο ισημερινό επίπεδο και την ευθεία γραμμή που ενώνει την γη με τον ήλιο) και δίνεται από την σχέση :

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(d_n + 284)\right] \quad (3.7)$$

και τέλος

ω_s η γωνία ανατολής του ήλιου (sunrise angle) που δίνεται από την σχέση :

$$\omega_s = -\arccos(-\tan\delta \tan\varphi) \quad (3.8)$$

ενώ ισχύει :

$$\cos\omega_s = -\tan\delta \tan\varphi \quad (3.9)$$

Το $D_d(0)$ υπολογίζεται βάσει του μοντέλου Collares-Pereira και Rabl [11]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό :

$$K_T = \frac{G_d(0)}{B_d(0)} \quad \text{και} \quad K_D = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \quad (3.10)$$

όπου :

$$K_D = 0.99 \quad \text{για} \quad K_T \leq 0.17 \quad (3.11)$$

και

$$K_D = 1.188 - 2.272K_T + 9.473K_T^2 - 21.856K_T^3 + 14.648K_T^4 \quad \text{για} \quad 0.17 \leq K_T \leq 0.8 \quad (3.12)$$

Έχοντας υπολογίσει για κάθε μέρα τα $G_d(0)$ και $B_d(0)$ μπορούμε να βρούμε και τις ωριαίες ενέργειες (hourly irradiation) $G_h(0)$ και $D_h(0)$. Το $B_h(0)$ δίνεται από την σχέση $B_h(0) = G_h(0) - D_h(0)$. Για τα $G_h(0)$ και $D_h(0)$ ισχύουν οι σχέσεις :

$$D_h(0) = r_d D_d(0) \quad \text{και} \quad G_h(0) = r_g G_d(0) \quad (3.13)$$

όπου :

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\omega_s \cos \omega_s \sin \omega_s} \quad \text{και} \quad r_g = r_d (a + b \cos \omega) \quad (3.14)$$

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

$$a = 0.409 - 0.5016 \sin(\omega_s + 1.047) \quad (3.15)$$

και

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s + 1.047) \quad (3.16)$$

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις τα ω και ω_s μετρώνται σε ακτίνια.

Στο σημείο αυτό έχουν υπολογιστεί οι ωριαίες συνολικές ενέργειες $B_h(0)$, $G_h(0)$, $D_h(0)$. Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των αντιστοίχων ποσοτήτων σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β μοιρών. Οι σχέσεις που αναφέρονται σε αυτές τις ποσότητες [Εξισώσεις (3.17), (3.20) και (3.21)] υπολογίζουν ισχύ. Έτσι, ολοκληρώνοντας τις για μια ώρα παίρνουμε τις αντίστοιχες τιμές ενέργειας.

Έτσι για την ακτινοβολία $B_h(\beta)$ έχουμε :

$$B_h(\beta) = \frac{G_h(0) D_h(0)}{\cos \theta_{zs}} \max(0, \cos \theta_s) \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.17)$$

όπου:

$$\cos \theta_s = \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \cos \omega \quad (3.18)$$

και

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega \quad (3.19)$$

Για την ακτινοβολία από ανάκλαση από την γη έχουμε :

$$R_h(\beta) = G_h(\beta) (1-\cos\beta) \rho/2 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.20)$$

όπου :

ρ είναι ο δείκτης ανάκλασης του εδάφους (αν δεν είναι γνωστός λαμβάνεται ίσος με 0.2).

Στον πίνακα 3.2 δίνονται οι τυπικές τιμές του ρ για διάφορα είδη εδάφους [11]:

Πίνακας 3.2: Συντελεστής ανάκλασης για διάφορα είδη εδάφους	
Έδαφος	Συντελεστής Ανάκλασης (ρ)
Ξηρό-Γυμνό Έδαφος	0.2
Έδαφος με Χορτάρι	0.3
Έρημος	0.4
Χιόνι	0.5-0.8

Τέλος, για τον υπολογισμό του $D_h(\beta)$ χρησιμοποιούμε το ανισοτροπικό μοντέλο του Klucher σύμφωνα με το οποίο είναι :

$$D_h(\beta) = \frac{(1 + \kappa_1 \cos^2 \theta_s \sin^3 \theta_{zs}) \left(1 + \kappa_1 \sin^3 \frac{\beta}{2}\right) D_h(0)(1 + \cos\beta)}{2} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.21)$$

όπου

$$\kappa_1 = 1 - \left(\frac{D_h(0)}{G_h(0)}\right)^2 \quad (3.22)$$

Έτσι για την μέση ωριαία ισχύ (ή την συνολική ωριαία ενέργεια) ισχύει :

$$G_h(\beta) = R_h(\beta) + D_h(\beta) + B_h(\beta) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (3.23)$$

Για την εύρεση της συνολικά ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια μέρα ολοκληρώνουμε την ποσότητα $G_h(\beta)$ για μια ημέρα σύμφωνα με το ολοκλήρωμα :

$$G_d(\beta) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta) dt \text{ (Wh/m}^2\text{)} \quad (3.24)$$

όπου :

$$\omega_{ss} = -\omega_{ps} = \max\{\omega_s, -\arccos(-\tan\delta \tan(\varphi-\beta))\} \quad (3.25)$$

είναι η γωνία ανατολής και δύσης, αντίστοιχα, με τον συλλέκτη σε κλίση β μοιρών ενώ η σχέση που συνδέει τις ποσότητες ω και $t(h)$ είναι :

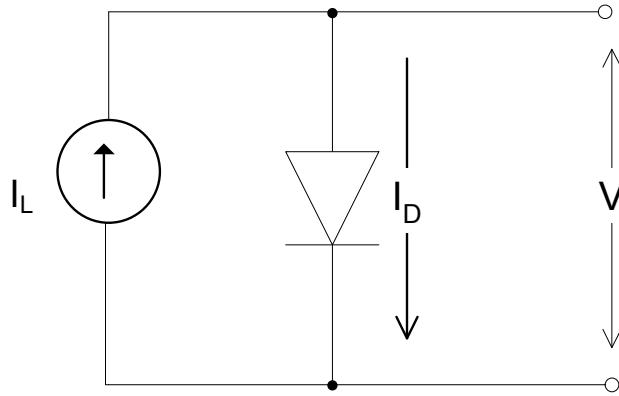
$$\omega^{(0)} = 15(t-12) \quad (3.26)$$

3.8 Φωτοβολταϊκή μετατροπή – φωτοβολταϊκά στοιχεία

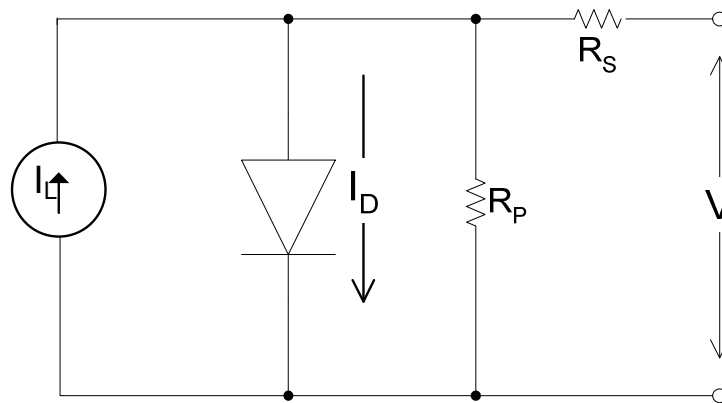
Φωτοβολταϊκή μετατροπή ονομάζεται η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (solar cells) είναι οι συσκευές που επιτυγχάνουν αυτή την μετατροπή. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε διαστημικές εφαρμογές λόγω του πολύ υψηλού κόστους τους, αλλά εδώ και αρκετό καιρό χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που όταν δέχονται το ηλιακό φως στην επιφάνειά τους εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού. Η τάση που μπορούν να δώσουν κυμαίνεται από 0.5 ως 1 Volt και η πυκνότητα ρεύματος από 20 ως 40 mA/cm² ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τέλος, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν είναι της μορφής συνεχούς ρεύματος.

Ο Becquerel παρατήρησε πρώτος το φαινόμενο της φωτοβολταϊκής μετατροπής το 1839 σε ηλεκτροχημικά στοιχεία, όμως το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο φτιάχτηκε το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson.

Το σχήμα 3.5 δείχνει το κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ στο σχήμα 3.6 φαίνεται το κύκλωμα ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι αντιστάτες R_s και R_p που έχουν προστεθεί στο πραγματικό στοιχείο αναπαριστούν τα διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο ημιαγωγών και οδηγούν σε απώλεια ενέργειας.



Σχήμα 3.5. Το κύκλωμα ενός ιδανικού φ/β στοιχείου



Σχήμα 3.6. Το κύκλωμα ενός πραγματικού φ/β στοιχείου

Το ρεύμα I που διαρρέει το στοιχείο δίνεται από την σχέση :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{e(V+IR_s)}{mkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.27)$$

όπου :

- I_0 το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης,
- e το φορτίο του ηλεκτρονίου,
- V η τάση στα άκρα του στοιχείου,
- k η σταθερά Boltzmann,
- T η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin και
- m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου.

Κάνοντας τις εξής παραδοχές :

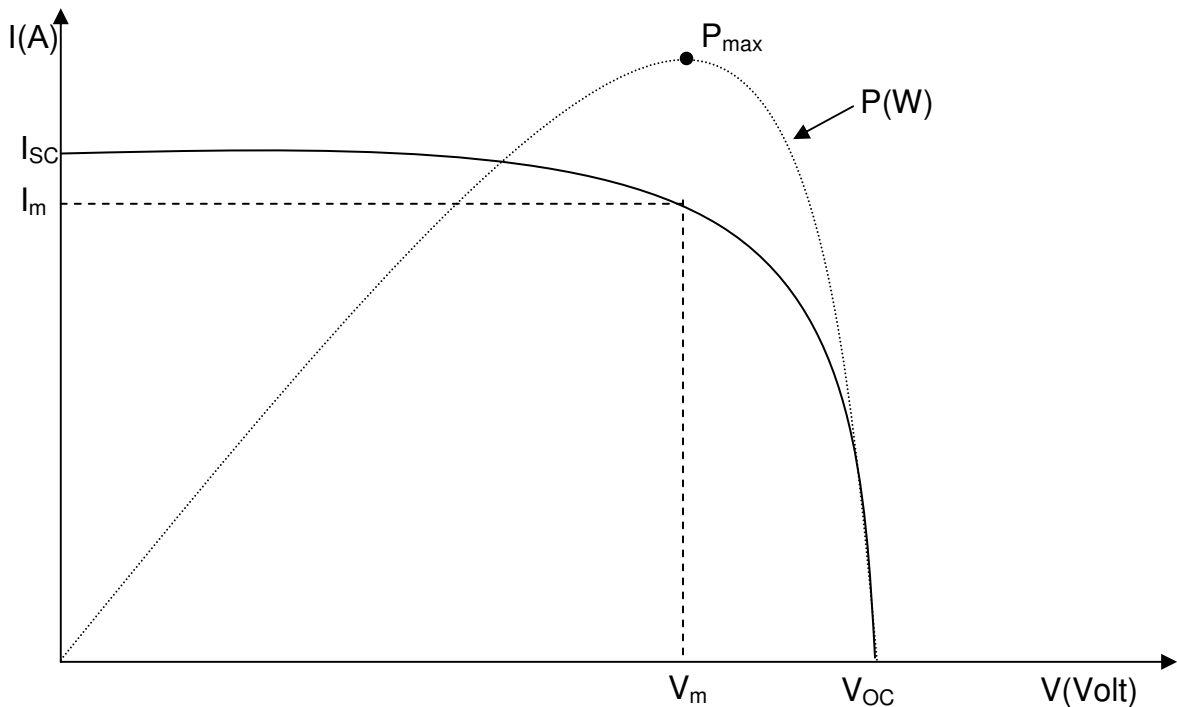
- Η επίδραση της R_p είναι αμελητέα (R_p αρκετά μεγάλη),
- το I_L είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και
- $e^{\frac{e(V+IR_s)}{mkT}} \gg 1$.

Τότε το ρεύμα του στοιχείου δίνεται από τον τύπο:

$$I = I_{SC} \left[1 - e^{-\frac{V - V_{OC} + IR_s}{V_t}} \right] \quad (3.28)$$

όπου: $V_t = mkT/e$

Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης του στοιχείου. Το ρεύμα για το οποίο έχουμε $V=0$ ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}), ενώ η τάση για την οποία ισχύει $I=0$ ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{OC}).



Σχήμα 3.8. Χαρακτηριστική $I-V$ του φ/β στοιχείου

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 υπάρχει ένα σημείο (V_m, I_m) στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος (maximum power point, MPP). Συντελεστή πλήρωσης (Fill Factor) ονομάζουμε το πηλίκο :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3.29)$$

Τέλος ενεργειακή απόδοση ενός στοιχείου, η , είναι το πηλίκο :

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_L} \quad (3.30)$$

Είναι δηλαδή ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς την ισχύ που αντιστοιχεί στο ρεύμα I_L .

3.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η τάση και η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι πάρα πολύ μικρές για έναν συνηθισμένο καταναλωτή. Έτσι χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (modules) τα οποία περιέχουν συνδεδεμένα πολλά στοιχεία με κοινή έξοδο σε σειρά αλλά και παράλληλα.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα πλαίσιο με N_P ομάδες στοιχείων συνδεδεμένες παράλληλα που η καθεμία έχει N_S στοιχεία σε σειρά, τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$I_M = I_{N_P}, \quad V_M = V_{N_S}, \quad I_{SCM} = I_{sc} N_P, \quad V_{OCM} = V_{oc} N_S$$

όπου I_M είναι το ρεύμα του πλαισίου, V_M είναι η τάση του πλαισίου, I_{SCM} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου και V_{OCM} είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης του πλαισίου.

Από τις παραπάνω σχέσεις και την Εξ. (3.28) έχουμε τελικά :

$$I_M = I_{SCM} \left(1 - e^{-\frac{V_M - V_{OCM} + I_M R_{SM}}{N_S V_t}} \right) \quad (3.31)$$

όπου:

$$R_{SM} = R_S N_S / N_P \quad (3.32)$$

Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης του πλαισίου δεν διαφέρει από το σχήμα 3.8. Υπάρχει ένα σημείο (V_{Mm}, I_{Mm}) για το οποίο έχουμε μέγιστη ισχύ. Αυτή δίνεται από τους κατασκευαστές μετρημένη σε ακτινοβολία 1000 W/m^2 , AM 1.5 και θερμοκρασία 25°C . Έχει βρεθεί ότι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία πάνω από τους 25°C η ισχύς μειώνεται κατά 0,4% για κάθε βαθμό Κελσίου. Για παράδειγμα ένα πλαίσιο με μέγιστη ισχύ 40 W στους 25°C παράγει μόνο 36,8 W στους 45°C [14].

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό μέγεθος για τα φ/β πλαίσια είναι η nominal cell operating temperature (NCOT). Η NCOT εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων των πλαισίων υπό τις εξής συνθήκες :

- ακτινοβολία 800 W/m^2 ,
- AM 1.5,
- θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και
- ταχύτητα ανέμου 1 m/s .

Η παράμετρος NCOT παίρνει τιμές από 42 ως 46°C . Όταν ο κατασκευαστής δεν δίνει την τιμή της παραμέτρου NCOT χρησιμοποιούμε την τιμή 44°C .

3.10 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων

Συνήθως χρειάζεται να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ενός φ/β πλαισίου σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Γι' αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μηχανισμοί :

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες δίνεται από την σχέση :

$$I_{sc} = C_1 G \quad (3.33)$$

όπου

G είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και

C_1 είναι μια σταθερά που υπολογίζεται από την σχέση:

$$C_1 = \frac{I_{sc}(1000 \text{ W/m}^2)}{1000} \quad (\text{Am}^2/\text{W}) \quad (3.34)$$

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης μεταβάλλεται με την θερμοκρασία των στοιχείων με ρυθμό :

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} = -2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C} \quad (3.35)$$

Η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_a σύμφωνα με την σχέση :

$$T_c - T_a = C_2 G \quad (3.36)$$

όπου:

$$C_2 = \frac{NCOT - 20}{800} \text{ (}^\circ\text{Cm}^2 / \text{W)} \quad (3.37)$$

Τέλος η αντίσταση R_s των στοιχείων των πλαισίων δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και δίνεται από την σχέση :

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_0}\right) \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (3.38)$$

όπου τα FF και FF_0 συνδέονται με τον εμπειρικό τύπο :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{SC}} = FF_0 (1 - r_s) \quad (\text{Εξ. 3.39})$$

Η τιμή της παραμέτρου r_s προκύπτει από την σχέση:

$$r_s = \frac{I_{SC} R_s}{V_{OC}} \quad (\text{Εξ. 3.40})$$

και η τιμή της παραμέτρου FF_0 υπολογίζεται από την σχέση:

$$FF_0 = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (3.41)$$

Γνωρίζοντας την μέγιστη ισχύ εξόδου στις δεδομένες συνθήκες, P_{Mm} , από τον κατασκευαστή και τις τιμές των N_p και N_s προκύπτει η μέγιστη ισχύ ενός στοιχείου στις δεδομένες συνθήκες :

$$P_m = \frac{P_{Mm}}{N_s N_p} \quad (3.42)$$

Για να ισχύει η μέθοδος αυτή πρέπει $V_{OC} > 15$, $r_s < 0.4$ και $m=1$. Έτσι υπολογίζουμε τα παραπάνω μεγέθη και παίρνουμε εύκολα, μέσω των σχέσεων (3.33) – (3.40) το γινόμενο $I_m V_m$ δηλαδή την μέγιστη ισχύ ενός στοιχείου, P_m . Η μέγιστη ισχύς του πλαισίου υπολογίζεται έπειτα μέσω της σχέσης:

$$P_{Mm} = N_s N_p P_m \quad (3.43)$$

3.11 Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στο σύστημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ως ένα σύστημα με εισόδους και εξόδους. Εκτός από την ημέρα και ώρα του έτους για την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε την ισχύ των φ/β πλαισίων και την κλίση θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, τις υπόλοιπες εισόδους τις χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες: αυτές που αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου που μας ενδιαφέρει και αυτές που σχετίζονται με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται ως είσοδοι είναι η μέση συνολική ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία G (Wh/m^2) σε οριζόντιο επίπεδο και η μέση ημερήσια ή μηνιαία θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{C}$).

Οι είσοδοι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά κάθε φ/β πλαισίου είναι ο αριθμός στοιχείων ανά πλαίσιο, N_c , η τάση εξόδου, V_m , στο σημείο μέγιστης ισχύος, το ρεύμα εξόδου, I_m , στο σημείο μέγιστης ισχύος, η τάση ανοιχτοκύκλωσης, V_{oc} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} , η μέγιστη ισχύς, P_m , και η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων, $NCOT$.

Οι έξοδοι του συστήματος είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς (σε W) για κάθε ώρα της ημέρας που εξετάζεται.

4. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

4.1 Εισαγωγή

Ο άνεμος είναι 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 [1]. Μόνο το 1% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια, όμως η ηλιακή ενέργεια που δέχεται η γη είναι τόσο μεγάλη πηγή που το 1% της ημερήσιας αιολικής ενέργειας ισούται με τις ημερήσιες παρούσες ενεργειακές ανάγκες.

Μια 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 ίση με το τριπλάσιο των αναγκών της Ευρώπης και αντιστοιχεί σε μία πετρελαιοπηγή με παραγωγή 16 εκατομμύρια βαρέλια.

Ο άνεμος είναι μία στοχαστική πηγή ενέργειας, αν εξεταστεί μέρα με τη μέρα, όμως είναι μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας, αν εξεταστεί χρόνο με το χρόνο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα τα οποία έχουν τελειοποιηθεί τα τελευταία χρόνια δείχνουν ότι η περιοδικότητα της αιολικής ενέργειας δεν αποτελεί πια φράγμα για τη χρήση της. Είναι πλέον προφανές, ότι η κύρια χρήση του ανέμου είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανεμογεννητριών, παράλληλα συνδεδεμένων με δίκτυα ηλεκτρικού ρεύματος ή παράλληλα με κινητήρες diesel για απομακρυσμένες περιοχές ή μεμονωμένες για εξειδικευμένη χρήση.

4.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια ορίζεται ως η κινητική ενέργεια των αερίων μαζών της ατμοσφαιράς [15]. Έτσι η κινητική ενέργεια μιας αέριας μάζας m (kg) που κινείται με ταχύτητα u (m/sec) θα είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} m u^2 \quad (4.1)$$

Η μάζα αυτή αν υποθέσουμε ότι διέρχεται μέσα από μία νοητή επιφάνεια A (m^2), έχει ρυθμό ροής:

$$\frac{dm}{dt} = \rho Au \quad (4.2)$$

Έτσι η ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} u^2 = \frac{1}{2} \rho Au^3 \quad (4.3)$$

Η πυκνότητα του αέρα δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho \cong 0,4644 \frac{P_0 - P_u}{\theta} \quad (4.4)$$

όπου:

ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 ,

P_0 η ατμοσφαιρική πίεση σε mm Hg,

P_u η πίεση υδρατμών σε mm Hg και

θ η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$.

Η πυκνότητα του αέρα μπορεί να υπολογιστεί και από την εξίσωση:

$$\rho = 348,8 \cdot 10^3 \frac{P_a}{\theta} \quad (4.5)$$

όπου:

ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 ,

P_a η ατμοσφαιρική πίεση σε mm Hg και

θ η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$.

Οι πιο πιθανές πρακτικά τιμές της πυκνότητας του αέρα είναι από $1,201 kg/m^3$ μέχρι $1,290 kg/m^3$ [13]. Έτσι η Εξίσωση (4.3) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P = (0.6 - 0.645)Au^3 \quad (4.6)$$

και αν θεωρήσουμε τη μέση τιμή των παραπάνω για την πυκνότητα του αέρα, η εξίσωση γίνεται:

$$P = 0.623Au^3 \quad (4.7)$$

Φυσικά Διαθέσιμο Αιολικό Δυναμικό μιας περιοχής ορίζεται η κινητική ενέργεια των αερίων μαζών που κινούνται κάθε έτος πάνω από το έδαφος της περιοχής αυτής και εξαρτάται από τις ιδιαίτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες και την τοπογραφία της. Μπορούμε να το υπολογίσουμε με την βοήθεια της εξίσωσης 4.3. Το μέρος του Φυσικά Διαθέσιμου Αιολικού Δυναμικού, που μπορεί θεωρητικά να αξιοποιηθεί από τις αιολικές μηχανές, ονομάζεται Τεχνικά Αξιοποιήσιμο Αιολικό Δυναμικό. Το μέρος του δυναμικού αυτού, που είναι οικονομικά εφικτό να αξιοποιηθεί, καλείται Οικονομικά Αξιοποιήσιμο Αιολικό Δυναμικό [16].

4.3 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συναρτήσει του ύψους. Έχουν γίνει πολλές μελέτες για να διευκρινιστούν οι νόμοι που διέπουν αυτήν την μεταβολή και οι δύο επικρατέστεροι είναι ο εκθετικός και ο λογαριθμικός νόμος.

Σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο η ταχύτητα του ανέμου u_2 σε ένα ύψος h_2 δίνεται από την σχέση :

$$u_2 = u_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a \quad (4.8)$$

όπου:

u_1 η μετρούμενη ταχύτητα σε ένα ύψος h_1 .

Το a είναι ο εκθέτης του εκθετικού νόμου και εκφράζει την φύση του εδάφους και παίρνει τιμές στο διάστημα $[1/7, 1/4]$. Στον πίνακα 4.1 φαίνονται οι τιμές του a για διάφορους τύπους εδαφών.

Ο λογαριθμικός νόμος συνδέει την ταχύτητα με το ύψος σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$u = \frac{U^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (4.9)$$

όπου:

u η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος h ,

U^* η ταχύτητα τριβής (εκφράζει την αντίσταση της επιφάνειας του εδάφους),

k η σταθερά von Karman (παίρνει τιμές από 0,35 ως 0,4) και

z_0 ο συντελεστής που εκφράζει την τραχύτητα του εδάφους.

Η σχέση που συνδέει τον συντελεστή τραχύτητας του λογαριθμικού νόμου με τον εκθέτη a είναι η εξής :

$$z_0 = 15.25e^{\left(\frac{1}{a}\right)} \quad (4.10)$$

Πίνακας 4.1: Συντελεστής a και συντελεστής τραχύτητας για διάφορα εδάφη		
Μορφή Εδάφους	Τραχύτητα	Συντελεστής a
Πεδινό	0-20	0,08-0,12
Μικρές ανωμαλίες	20-200	0,13-0,16
Δασώδες	1000-1500	0,2-0,23
Μεγάλες ανωμαλίες	1000-4000	0,25-0,4

Πρακτικά χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές του συντελεστή a :

- Για ελεύθερα πεδία ροής αέρα (θάλασσες – αεροδρόμια) : $a = 0,17$
- Για περιοχές μικρών πόλεων με μικρές κατασκευές : $a = 0,20$
- Για πυκνοκατοικημένες πόλεις με μεγάλα κτίρια : $a = 0,25$

Έχει διαπιστωθεί ότι για μικρά ύψη ο εκθετικός νόμος δίνει ακριβέστερη κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, ενώ για μεγάλα ύψη ο λογαριθμικός κανόνας είναι πιο ακριβής. Το μειονέκτημα του λογαριθμικού κανόνα, ωστόσο, είναι ότι απαιτείται ο προσδιορισμός τριών παραμέτρων:

- της ταχύτητας τριβής,
- της σταθεράς Karman (δεν έχει σταθερή τιμή) και
- του συντελεστή τραχύτητας.

Ο μη ακριβής προσδιορισμός τους αποφέρει σφάλματα μεγαλύτερα από αυτά του εκθετικού κανόνα, ο οποίος προτιμάται και λόγω της απλότητάς του.

4.4 Αξιολόγηση αιολικού δυναμικού

Η αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού είναι μια απαραίτητη διαδικασία, αφού παρέχει τα δεδομένα αυτά που χρειάζονται για να διερευνηθεί η δυνατότητα που υπάρχει σε μια περιοχή για αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πρώτο βήμα που χρειάζεται να γίνει είναι οι ανεμολογικές μετρήσεις και μετά η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού με βάση τις μετρήσεις. Το σφάλμα στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού δεν μπορεί να αποφευχθεί καθώς ο άνεμος είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο. Γι' αυτόν τον λόγο οι μετρήσεις που γίνονται πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβείς.

Οι βασικές μεταβλητές του ανέμου που μας ενδιαφέρουν είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση. Έτσι σε τακτά χρονικά διαστήματα μετρώνται αυτές οι δυο παράμετροι με την βοήθεια ειδικών συσκευών που ονομάζονται ανεμόμετρα και έτσι προκύπτουν τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής. Στη συνέχεια εξετάζονται οι μεταβολές της τιμής και της διεύθυνσης της ταχύτητας του ανέμου.

Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι μια πρώτη εκτίμηση του κατά πόσο η περιοχή έχει σημαντικό αιολικό δυναμικό. Αν η μέση τιμή της ταχύτητας μιας περιοχής είναι μικρότερη των 5 m/sec, τότε η περιοχή είναι ακατάλληλη, ενώ αν είναι μεγαλύτερη των 8 m/sec, τότε θεωρείται ιδανική περίπτωση.

Ένα επόμενο πολύ σημαντικό βήμα είναι ο καθορισμός της τυπικής απόκλισης των τιμών της ταχύτητας του ανέμου, η εύρεση δηλαδή του πόσο κοντά στην μέση τιμή βρίσκονται οι στιγμιαίες τιμές καθ' όλη την διάρκεια της μέτρησης. Αυτή η διαδικασία βοηθάει στην εκτίμηση του κατά πόσο θα υπάρξουν μεταπτώσεις στην ενδεχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτήν την περιοχή.

Τέλος πρέπει να καθοριστούν οι κύριες κατευθύνσεις που πνέουν οι άνεμοι, αφού έτσι θα καθοριστεί ο προσανατολισμός των ανεμογεννητριών. Οι συχνές και απότομες μεταβολές της διεύθυνσης μειώνουν την απόδοση των ανεμογεννητριών, αφού είναι αδύνατη η άμεση προσαρμογή τους στις νέες διευθύνσεις.

4.5 Ανεμογεννήτριες – είδη ανεμογεννητριών

Η ανεμογεννήτρια (Α/Γ) είναι η διάταξη που μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Από την εμφάνισή της μέχρι και την σημερινή της μορφή έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο της (οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματα της (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κ.λ.π.).

Οι Α/Γ μπορούν να ταξινομηθούν με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου ως εξής:

- Οριζόντιου άξονα,
- Οριζόντιου άξονα τύπου Cross-Wind και
- Κάθετου άξονα.

Στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση ροής του ανέμου σε αντίθεση με τις κάθετου άξονα που είναι κάθετος προς την επιφάνεια της γης και προς την κατεύθυνση του ανέμου. Τέλος στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα τύπου cross wind ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Μία άλλη ταξινόμηση είναι σύμφωνα με την ονομαστική τους ισχύ (P_r) ως εξής:

- Μικρές Α/Γ: $0,03 \text{ kW} \leq P_r \leq 25 \text{ kW}$
- Μεσαίες Α/Γ : $25 \text{ kW} \leq P_r \leq 250 \text{ kW}$
- Μεγάλες Α/Γ: $250 \text{ kW} \leq P_r \leq 4 \text{ MW}$

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι απλούστερες κατασκευαστικά σε σχέση με τις αντίστοιχες οριζόντιου άξονα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι οι μηχανές τύπου Savonious και οι μηχανές τύπου Darrieus. Οι πρώτες εμφανίστηκαν το 1931 από τον Savonious. 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.

Οι μηχανές τύπου Darrieus κατασκευάστηκαν από τον Γάλλο G. J. M. Darrieus το 1920 και μέχρι το 1970 βρήκαν μεγάλη εφαρμογή στον Καναδά [1]. 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 (egg beater), που μπορεί να είναι ένα, δύο τρία ή περισσότερα. Γενικά τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα των μηχανών κάθετου άξονα είναι τα εξής :

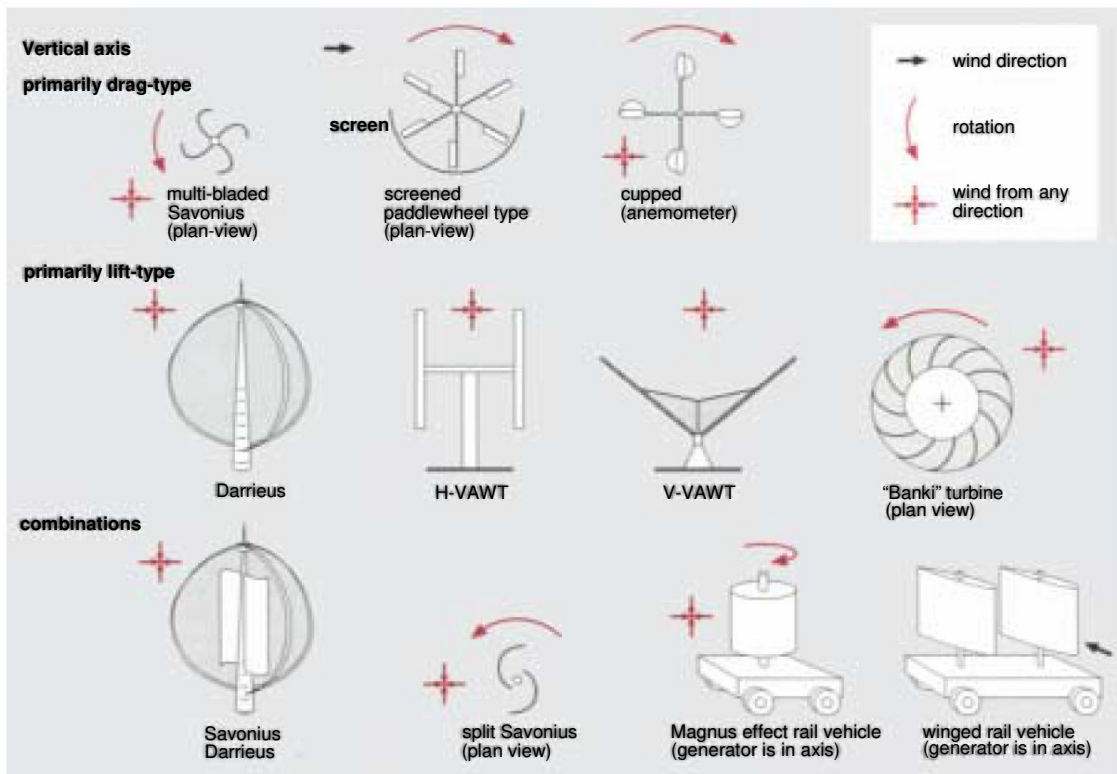
- Έχουν μικρό βάρος,
- Είναι απλές και οικονομικές στην κατασκευή,
- Δεν απαιτούν μεγάλο πύργο,

- Οι μηχανισμοί τοποθετούνται στο έδαφος,
- Δεν απαιτούν συστήματα προσανατολισμού σχετικά με τον άνεμο, αφού δεν επηρεάζονται από τις αλλαγές διεύθυνσης τους και
- Δεν απαιτούν σύστημα ελέγχου των στροφών του δρομέα στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων του ανέμου.

Τα σημαντικότερα 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.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται κάποιες ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, ενώ στο Σχήμα 4.2 κάποιες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 4.1. Α/Γ κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, γιατί είναι οι πιο διαδεδομένες. Γενικά μία αιολική μηχανή αυτής της κατηγορίας αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα:

A. Ο πυλώνας

Ο πυλώνας, για τις μεγάλες ανεμογεννήτριες, είναι το πλέον δαπανηρό στοιχείο και στηρίζει το κέλυφος και το δρομέα. Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η μάζα που χρειάζεται να υποστηρίξει, οι καταπονήσεις που δέχεται από κάμψεις και στρέψεις, η ταχύτητα περιστροφής, το σημείο στολαρίσματος του δρομέα και η αντοχή του στις φυσικές φθορές.

B. Το κέλυφος

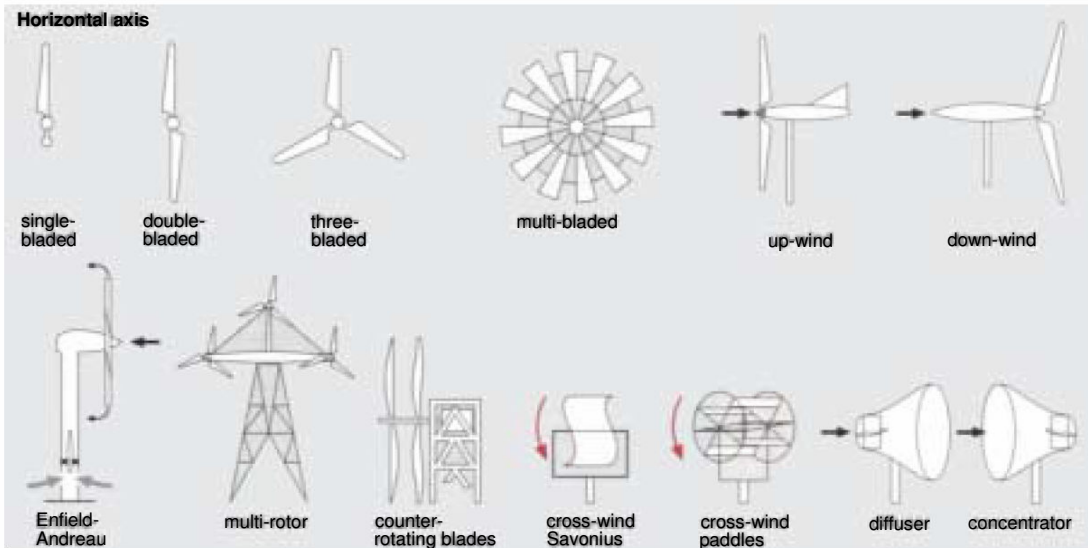
Το κέλυφος περιβάλλει και προστατεύει τα μηχανικά μέρη και τη γεννήτρια και στηρίζεται πάνω στον πυλώνα. Έτσι, πρέπει να είναι ευρύχωρο ούτως ώστε να είναι δυνατή η εμποπτεία και η συντήρηση των εξαρτημάτων και να αερίζεται επαρκώς, για να ψύχεται σωστά η γεννήτρια.

Γ. Ο 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.

Η πλήμνη είναι το τμήμα της μηχανής πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια και το οποίο συνδέεται στο εσωτερικό του κελύφους με το σύστημα μετάδοσης κίνησης (άξονα). Οι πλήμνες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις σταθερού και μεταβλητού βήματος. Στις πρώτες η απόσταση των πτερύγων (βήμα) είναι σταθερή, ενώ στις δεύτερες υπάρχει υδραυλικό σύστημα αυξομείωσης του βήματος.

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 κλπ. 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.



Σχήμα 4.2. Α/Γ οριζόντιου άξονα

Δ. Το σύστημα προσανατολισμού

Στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιείται ένας σερβοκινητήρας 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 ίση με 10° να εξασκείται ροπή επαναπροσανατολισμού του δρομέα.

Ε. Το μηχανικό σύστημα

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα, την έδρασή του, τον 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 γεννήτρια.

Ζ. Η 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 στις μικρού ή μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες (μέχρι 500 kW), λόγω 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 τροφοδοτούνται με εξωτερική πηγή άεργου ισχύος, π.χ. σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών στους ακροδέκτες της. Αυτό ονομάζεται αυτοδιέγερση της ασύγχρονης γεννήτριας και δημιουργεί προβλήματα που σχετίζονται κυρίως με την προστασία του δικτύου διανομής που είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Η χρησιμοποίηση σύγχρονων γεννητριών έχει 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.

H. Το σύστημα ελέγχου

Οι ανεμογεννήτριες έχουν ένα Ηλεκτρονικό Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου (HΣΑΕ), το οποίο είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία του ανεμοκινητήρα εντός των προδιαγραφών του. Ορισμένες διεργασίες που εκτελεί είναι:

- έλεγχος αεροδυναμικής πέδησης,
- έλεγχος μηχανικού συστήματος πέδησης,
- έλεγχος ταλαντώσεων του συστήματος,
- έλεγχος περιστροφής και
- έλεγχος βέλτιστης λειτουργίας.

Έτσι το HΣΑΕ αποφασίζει για την ενεργοποίηση ή την παύση της λειτουργίας της Α/Γ, λαμβάνοντας υπόψη τις ενδείξεις του ανεμόμετρου και τα δεδομένα του συστήματος .

4.6 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανεμογεννητριών

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μεγέθη μιας ανεμογεννήτριας είναι τα εξής :

A. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας u_{in}

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

Β. Η ονομαστική ταχύτητα u_r

Εκφράζει την τιμή της ταχύτητας του ανέμου που οδηγεί σε ιδανική λειτουργία την ανεμογεννήτρια, έτσι ώστε να αποδίδει τη μέγιστη ισχύ με την μικρότερη δυνατή καταπόνηση.

Γ. Η ταχύτητα αποκοπής u_{co}

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.

Δ. Η Ονομαστική ισχύς P_r

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.

Ε. Η διάμετρος πτερυγίων

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

Ζ. Το ύψος πυλώνα

Αυτή η παράμετρος παίζει ρόλο τόσο στη διαμόρφωση του κόστους, όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας, αφού η ταχύτητα του ανέμου, άρα και η ισχύς που αυτή μπορεί να δώσει σε μία ανεμογεννήτρια, μεταβάλλεται συναρτήσει του ύψους.

4.7 Ισχύς ανεμογεννητριών

Η ισχύς του ανέμου που προσπίπτει σε μία επιφάνεια A (m^2) είναι:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u_w^3 \quad (4.11)$$

όπου :

ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 και

u_w η ταχύτητα του αέρα σε m/s.

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ανεμοκινητήρα είναι:

$$P_m = C_p P_w = \frac{1}{2} C_p \rho A u_w^3 \quad (4.12)$$

όπου :

C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής της έλικας.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p είναι συνάρτηση του λόγου λ της γραμμικής ταχύτητας του άκρου της έλικας προς την ταχύτητα του ανέμου u_w :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (4.13)$$

$$\lambda = \frac{u_{ελ}}{u_w} = \frac{R_{ελ} \omega_{ελ}}{u_w} \quad (4.14)$$

όπου :

$u_{ελ}$ η γραμμική ταχύτητα του άκρου του έλικα σε m/s,

$R_{ελ}$ η ακτίνα του έλικα σε m και

$\omega_{ελ}$ η γωνιακή ταχύτητα του έλικα σε sec^{-1} .

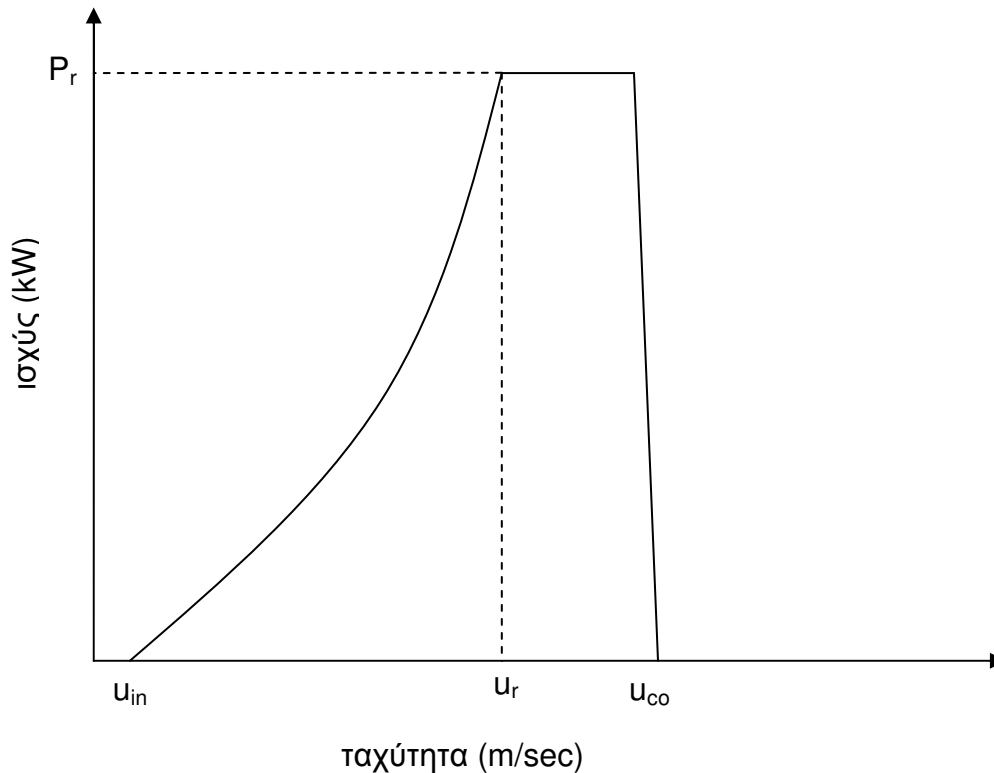
Στην περίπτωση που ο δρομέας έχει μεγάλη διάμετρο, η ταχύτητα του ανέμου είναι διαφορετική στις διάφορες θέσεις της έλικας κατά την περιστροφή της καθώς και μεταξύ των ίδιων των πτερυγίων. Για λόγους απλότητας η τιμή της ταχύτητας του ανέμου έχει θεωρηθεί ίδια σε όλη την επιφάνεια που σαρώνει η έλικα.

Η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p εξαρτάται από τη γωνία pitch, α , των πτερυγίων της έλικας. Πρόκειται ουσιαστικά για μία σχέση της μορφής:

$$C_p = C_p(\lambda, \alpha) \quad (4.15)$$

Η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ φαίνεται στο σχήμα 4.3 και η συνάρτηση που εκφράζει την καμπύλη ισχύος είναι :

$$P(v) = \begin{cases} 0 & , v \leq u_{in} \\ P_r \left(\frac{v}{u_r} \right)^2 & , u_{in} \leq v \leq u_r \\ P_r & , u_r \leq v \leq u_{co} \\ 0 & , u_{co} \leq v \end{cases} \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.3. Θεωρητική καμπύλη ισχύος Α/Γ

4.8 Η ανεμογεννήτρια στο σύστημα της παρούσας εργασίας

Για το σύστημα της παρούσας εργασίας κάθε ανεμογεννήτρια είναι ένα σύστημα με εισόδους και εξόδους. Οι εισοδοί είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου για μια ημέρα για την περιοχή που εργαζόμαστε, το ύψος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Έξοδος είναι η τελικά υπολογιζόμενη ισχύς.

Η ταχύτητα του ανέμου παρέχεται από μετρήσεις που έχουν γίνει σε συγκεκριμένο ύψος. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας στο ύψος πυλώνα που μας ενδιαφέρει γίνεται χρήση του εκθετικού νόμου (Εξ 4.8) όπου το a αποτελεί παράμετρο εισόδου.

Έχοντας την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου για οποιαδήποτε ώρα. Επειδή, όμως, οι κατασκευαστές δεν δίνουν μεγάλο πλήθος τιμών, αν έχουμε μια ταχύτητα ανέμου που δεν μας δίνεται από τον κατασκευαστή, υπολογίζουμε την ισχύ γραμμικά από τις πλησιέστερες τιμές της ταχύτητας που δίνονται. Συγκεκριμένα, αν πρέπει να υπολογιστεί η ισχύς P_x για μια ταχύτητα u_x

που δεν δίνεται, χρησιμοποιείται η αμέσως μικρότερη και η αμέσως μεγαλύτερη τιμή της ταχύτητας για τις οποίες δίνονται οι αντίστοιχες τιμές ισχύος (έστω u_1, u_2 με $u_1 \leq u_x \leq u_2$ με τιμές ισχύος P_1 και P_2 , αντίστοιχα). Η ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$P_x = P_1 + (u_x - u_1) \frac{P_2 - P_1}{u_2 - u_1} \quad (4.17)$$

Στο σύστημα των ανεμογεννητριών χρειάζονται και ρυθμιστές τάσης για την φόρτιση των μπαταριών. Συνήθως, όμως, είναι ενσωματωμένοι στις ανεμογεννήτριες και έτσι οι καμπύλες ισχύος που παρέχονται από τον κατασκευαστή αναφέρονται σε όλο το σύστημα με έξοδο την έξοδο του ρυθμιστή. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους ανεμογεννήτριες και έτσι δεν χρειάζεται να αναπτυχθεί ξεχωριστό μοντέλο για τους ρυθμιστές τάσης.

5. ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

5.1 Εισαγωγή

Το νερό είναι η σημαντικότερη πηγή ζωής για όλα τα όντα του πλανήτη. Η διατήρηση της ζωής αλλά και η εξέλιξη όλων των όντων είναι άμεσα συνυφασμένα με αυτό.

Ο πολιτισμός της ανθρωπότητας ήταν πάντα εξαρτώμενος από το νερό, πράγμα που φαίνεται εύκολα αν ανατρέξει κανείς στην ιστορία της ανθρωπότητας. Οι ποταμοί, οι θάλασσες, οι λίμνες, οι ωκεανοί ακόμα και οι οάσεις με άφθονο νερό υπήρξαν πάντοτε πόλοι για ομάδες ανθρώπων, που εγκαταστάθηκαν κοντά στις ακτές τους. Όλοι οι μεγάλοι πολιτισμοί και η οικονομική δύναμη των διαφόρων λαών γεννήθηκαν και άνθισαν κατά μήκος των μεγάλων υδάτινων ρευμάτων. Ένα πολύ από παράδειγμα της επίδρασης ενός ποταμού στην γέννηση και την ανάπτυξη ενός μεγάλου πολιτισμού είναι η αρχαία Αίγυπτος, την οποία ο Ηρόδοτος αποκαλούσε «το δώρο του ποταμού» [1]. Από το 3000 π.Χ. οι Αιγύπτιοι, παρακολουθώντας τη συμπεριφορά του ποταμού Νείλου, έφτιαξαν ένα ημερολόγιο με τρεις εποχές, στις οποίες στήριξαν όλη τη γεωργική τους καλλιέργεια, η οποία καθόριζε κατά το μεγαλύτερο μέρος την οικονομία της χώρας.

Σήμερα, οι συνθήκες είναι τελείως διαφορετικές. Η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και η τεράστια αύξηση του πληθυσμού των μεγάλων αστικών κέντρων έχει επιφέρει τεράστια αύξηση της ζήτησης του νερού και εξίσου τεράστια σπατάλη, με αποτέλεσμα οι φυσικές πηγές νερού να στερεύουν σταδιακά σε μεγάλες περιοχές του πλανήτη. Ταυτόχρονα η μόλυνση πολλών υδάτινων αποθεμάτων συνιστά μια πολύ μεγάλη απειλή. Η μόλυνση προέρχεται από λύματα οικιακής χρήσης, κυρίως όμως από τα βιομηχανικά απόβλητα, τα οποία διοχετεύονται στις λίμνες, στα ποτάμια και στη θάλασσα. Η περιεκτικότητα αυτών των λυμάτων σε μεγάλη ποικιλία επιβλαβών χημικών ουσιών, ακόμα και αυτών που έχουν υποστεί μερικό καθαρισμό, αποτελεί μία διαρκή απειλή για την υγεία και την επιβίωση τόσο των ανθρώπων όσο και της πανίδας και της χλωρίδας της ευρύτερης περιοχής όπου διοχετεύονται. Μεγάλο ρόλο στην μόλυνση των υδάτων παίζουν τα φυτοφάρμακα, τα ζιζανιοκτόνα και τα χημικά λιπάσματα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο έδαφος αλλά παρασύρονται από το νερό της βροχής, μολύνοντας όχι μόνο τα επιφανειακά νερά αλλά και τα υπόγεια αποθέματα.

Η κατάσταση έχει φθάσει σε κρίσιμο σημείο σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Η ζωή δημιουργήθηκε στο νερό και ζωή χωρίς καθαρό νερό δεν είναι δυνατό να υπάρξει. Η επιφάνεια της γης καλύπτεται από τεράστιες ποσότητες νερού που όμως μόνο το 3% είναι πόσιμο ή υφάλμυρο νερό, ενώ το υπόλοιπο 97% αποτελεί το νερό των θαλασσών και των ωκεανών [4].

5.2 Το νερό

Η Γη διαθέτει μία ολική επιφάνεια $510 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$. Από αυτά έδαφος αποτελούν μόνο τα $150 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$ ενώ τα υπόλοιπα $360 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$ αποτελούν τις υδάτινες επιφάνειες. Ο ολικός όγκος των αποθεμάτων του νερού στη Γη είναι $1,41 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, εκ των οποίων περίπου το 97% ή $1,37 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$, αποτελούν τις θάλασσες και τους ωκεανούς, δηλαδή τα πολύ αλμυρά νερά, ενώ το υπόλοιπο 3% σχηματίζει τα αποθέματα του γλυκού ή πόσιμου νερού στα οποία συγκαταλέγονται και τα υφάλμυρα νερά. Το 3% του γλυκού νερού κατανέμεται ως εξής [17]:

- πάγος στους πόλους και στους παγετώνες: $30 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- νερά μέχρι βάθους 750 m: $4,4 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- νερά σε βάθος από 750 m έως 3500 m: $5,6 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- νερά λιμνών: $12 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- ποταμοί και ρυάκια: $1,2 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- υγρασία εδάφους: $2,4 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
- υγρασία ατμοσφαιρας: $1,3 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$

Υπολογίζεται ότι μόνο το 0,75% του γλυκού ή πόσιμου νερού υπάρχει σε υγρή μορφή και ότι μόνο το 0,01% από αυτό το νερό βρίσκεται στα ποτάμια και τις λίμνες. Το γλυκό νερό προέρχεται από τη συμπύκνωση των ατμών της ατμοσφαιρας που με τις βροχοπτώσεις παρασύρεται και σχηματίζει τα υδάτινα ρεύματα στην επιφάνεια της γης. Οι ατμοί της ατμοσφαιρας σχηματίζονται από την εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια των λιμνών, των θαλασσών και των ωκεανών λόγω της θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν έχουμε βροχοπτώσεις το συμπύκνωμα των ατμών από τα σύννεφα πέφτει σαν βροχή στην επιφάνεια της γης και είτε πάει στις υδάτινες περιοχές της γης (ποτάμια,

λίμνες, θάλασσα, κ.λ.π.) είτε εισχωρεί στο έδαφος και σχηματίζει τα υπόγεια αποθέματα του νερού. Κατά την πορεία του νερού προς την θάλασσα παρασύρει ή διαλύει διάφορα συστατικά από τα πετρώματα με τα οποία έρχεται σε επαφή και εμπλουτίζεται με μία μεγάλη ποικιλία από διαλυτές ή αιωρούμενες ουσίες σχηματίζοντας τα αλμυρά ή τα υφάλμυρα νερά και έτσι εμπλουτίζει τις θάλασσες με διάφορα άλατα. Ο κύκλος αυτός της εξάτμισης και της επιστροφής του συμπυκνώματος ως βροχή, καλείται «κύκλος του ύδατος» και αποτελεί μία φυσική διεργασία αφαλάτωσης που η φύση επεξεργάζεται ασταμάτητα για εκατομμύρια χρόνια.

Τα συστατικά που παρασύρει το νερό κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας είναι ανόργανες και οργανικές ουσίες, που του προσδίδουν ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως οσμή, χρώμα, γεύση, θολότητα, σκληρότητα και το καθιστούν κατάλληλο ή ακατάλληλο για κάποια συγκεκριμένη χρήση.

Οι περισσότερες οργανικές ενώσεις στα φυσικά νερά περιέχονται σε μικρές ποσότητες και προέρχονται από σπόρους, φύλλα, κομμάτια από διάφορα φυτά κ.α., που τα παρασύρει κατά τη ροή του στην επιφάνεια της γης. Σε επιφανειακά, στάσιμα νερά, σχηματίζονται μεγάλες ποσότητες χουμικού οξέος που προέρχονται από την αποσύνθεση οργανικών ουσιών μεγάλου μοριακού βάρους.

Σήμερα πλέον τα νερά περιέχουν μεγάλες ποσότητες οργανικών ουσιών που δεν προέρχονται από την φύση, αλλά από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως οικιακά και βιομηχανικά λύματα, τα οποία αποσυντίθενται και παραμένουν στο νερό εμπλουτίζοντας το με επικίνδυνα συστατικά, καθιστώντας το έτσι ακατάλληλο για μια σειρά χρήσεων.

Οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι συνδυασμοί άνθρακα με υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο, φώσφορο και θείο, και η παρουσία τους δεν προκαλεί προβλήματα για την καταλληλότητα του.

Οι ανόργανες ουσίες είναι διάφορα μεταλλικά άλατα που η περιεκτικότητά τους καθορίζει την καταλληλότητα για μία ορισμένη χρήση. Όταν τα φυσικά νερά καταλήξουν στη θάλασσα ή σε λίμνες, τα μεν ανόργανα άλατα εμπλουτίζουν το νερό της υδάτινης λεκάνης, ενώ οι φυσικές ανόργανες ουσίες αποσυντίθενται.

5.3 Η χημεία του νερού

Το νερό έχει δύο πολύ σημαντικά χημικά χαρακτηριστικά που το ξεχωρίζουν από τα άλλα φυσικά υλικά. Παρουσιάζει πολύ μεγάλη σταθερότητα ως χημική ένωση ενώ αλλάζει εύκολα φυσική κατάσταση, από υγρό σε αέριο ή στερεό. Η αλλαγή κατάστασης δεν μεταβάλλει την αρχική του μορφή στην οποία επανέρχεται τελικά, δηλαδή στην πλέον σταθερή μορφή της υγρής φάσης. Στη φύση απαντάται ως υγρό, ως στερεό (δηλαδή ως πάγος), ως αέριο (υπό τη μορφή υδρατμών) και ως κρυσταλλικό νερό ενωμένο με διάφορες χημικές ενώσεις.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό του είναι η μεγάλη διαλυτική ικανότητα που έχει. Διαλύει στερεά, υγρά και αέρια συστατικά με μεγάλη ευκολία. Κατά τη διάλυση των περισσοτέρων στερεών ουσιών σχηματίζεται ένα διάλυμα που περιέχει τα διαλυμένα άλατα στην ιοντική τους μορφή, ενώ τα αέρια παραμένουν σε μοριακή κατάσταση. Τα διάφορα φυσικά νερά των πηγών, των ποταμών και των λιμνών έχουν πολύ χαμηλή περιεκτικότητα αλάτων ενώ στο θαλασσινό νερό η περιεκτικότητα των αλάτων είναι μεγαλύτερη, κυρίως σε χλωριούχο νάτριο, το οποίο του προσδίδει αλμυρότητα.

Το θαλάσσιο νερό και τα άλλα αλμυρά νερά ανήκουν στην κατηγορία των υδάτινων διαλυμάτων και οι περισσότερες ιδιότητες τους υπολογίζονται από τις αντίστοιχες εξισώσεις των αραιών διαλυμάτων. Τόσο η ποσότητα όσο και οι χημικές ιδιότητες των διαλυμένων αλάτων επηρεάζουν τη γεύση και τη χρησιμότητα του νερού γενικά. Ανάλογα με την ποσότητα των ολικώς διαλυμένων αλάτων (Total Dissolved Solids, TDS), κατατάσσονται σε [1] :

- κατάλληλο πόσιμο νερό με τιμή TDS < 500 ppm.
- ελαφρώς αλμυρό νερό με τιμή TDS < 1000 ppm, το οποίο γίνεται αποδεκτό και ως πόσιμο νερό.
- αλμυρό νερό με τιμή TDS > 1000 ppm και < 2000 ppm, το οποίο μόνο σε ακραίες περιπτώσεις γίνεται αποδεκτό για οικιακή χρήση.
- γλυφό νερό με τιμή TDS > 2000 ppm και < 10000 ppm TDS. Η χρησιμοποίηση του ως πόσιμο νερό προκαλεί διάφορες διαταραχές.
- πολύ αλμυρό νερό με τιμή TDS > 10000 ppm.
- θαλάσσιο και ωκεάνιο νερό με τιμή TDS > 10000 ppm και < 42000 ppm TDS.

Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι σχετική. Υπάρχουν διαβαθμίσεις ανάλογα με τη σκοπιμότητα της χρήσης του. Η περιεκτικότητα σε άλατα και η χημική σύσταση των αλάτων παρουσιάζει μεγάλη διαφορά όχι μόνο μεταξύ των διαφόρων πηγών, αλλά και για την ίδια πηγή ανάλογα με την αυξομείωση της άντλησης του νερού και τη βροχόπτωση. Το νερό στις μεγάλες υδάτινες λεκάνες, όπως οι ωκεανοί, οι θάλασσες και οι μεγάλες λίμνες, είναι ως επί το πλείστον ομοιόμορφο ακόμα και στις εκβολές των ποταμών, διότι τα ισχυρά θαλάσσια ρεύματα βοηθούν στην ομοιογενοποίηση των υδάτινων όγκων.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται κάποιες από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του νερού.

A. Αλμυρότητα

Η ολική συγκέντρωση των ιόντων σε ένα υδατικό διάλυμα είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος που καθορίζει όχι μόνο τις ιδιότητες του αλλά και την χρησιμότητα του. Η χημική ιδιαιτερότητα των ιόντων έχει μικρότερη επίδραση στις ιδιότητες του θαλάσσιου και του υφάλμυρου νερού. Η ολική συγκέντρωση των ιόντων στο νερό καλείται «αλμυρότητα» (salinity) και ορίζεται ως «το ολικό ποσό των στερεών συστατικών σε g που περιέχονται σε ένα kg νερού, όταν όλα τα ανθρακικά άλατα έχουν μετατραπεί σε οξείδια και όλα τα βρωμιούχα και ιωδιούχα άλατα έχουν αντικατασταθεί ως ισοδύναμα χλωριούχα άλατα».

Ο αναλυτικός προσδιορισμός της αλμυρότητας είναι πολύπλοκος και όχι πολύ ακριβής διότι οι διάφορες προσμίξεις, ιδίως οι οργανικές, που περιέχονται στα δείγματα του φυσικού νερού αλλοιώνουν τα αναλυτικά αποτελέσματα. Για την αποφυγή του αναλυτικού προσδιορισμού καθιερώθηκε μία δεύτερη παράμετρος η χλωρινότητα (chlorinity), Cl, η οποία ορίζεται ως «το ολικό ποσό των ιόντων χλωρίου σε g/kg νερού όταν όλα τα βρωμιούχα και τα ιωδιούχα άλατα έχουν αντικατασταθεί από τα ισοδύναμα χλωριούχα άλατα». Μία τρίτη παράμετρος η χλωριότητα (chlorosity), ορίζεται ως «το ολικό ποσό των χλωριούχων αλάτων, στα οποία περιλαμβάνονται τα βρωμιούχα και τα ιωδιούχα άλατα, ως ισοδύναμα, σε γραμμάρια ανά κυβικό μέτρο νερού θερμοκρασίας 20°C».

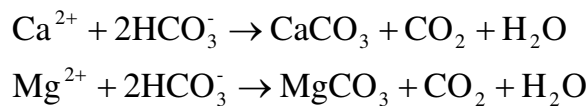
Η χλωρινότητα προσδιορίζεται ή με αναλυτικό προσδιορισμό των αλογόνων στο δείγμα ή με μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία 15 °C.

B. Σκληρότητα

Το ασβέστιο και το μαγνήσιο βρίσκονται σε μεγαλύτερη αναλογία στο νερό και αποτελούν τα στοιχεία της σκληρότητας του νερού ανεξάρτητα με τα ανιόντα με τα οποία είναι ενωμένα. Η σκληρότητα εκφράζεται ως «η ολική ποσότητα του μαγνησίου και του ασβεστίου σε eq/m³» [17]:

$$\text{σκληρότητα} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \quad (5.1)$$

Υπάρχουν δύο τύποι σκληρότητας, αυτή που οφείλεται στα όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου και του μαγνησίου και εκείνη η οποία οφείλεται στα χλωριούχα, θειικά ή νιτρικά άλατα των ιδίων κατιόντων. Η σκληρότητα των ανθρακικών αλάτων ονομάζεται «παροδική» διότι σε θερμοκρασία πάνω από 80 °C και κυρίως κατά το βρασμό του νερού τα όξινα ανθρακικά άλατα διασπώνται σχηματίζοντας αδιάλυτο ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο αποβάλλεται ελαττώνοντας την ολική σκληρότητα.



Τα αδιάλυτα ανθρακικά άλατα αποβάλλονται πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης σχηματίζοντας τον λεβητόλιθο.

Ο δεύτερος τύπος σκληρότητας ονομάζεται «μόνιμη σκληρότητα» και κατά το βρασμό δεν σχηματίζει αδιάλυτα άλατα, αλλά αποβάλλει τα χλωριούχα ή θειικά άλατα μόνο όταν κατά τη συμπύκνωση, η συγκέντρωσή τους υπερβεί το γινόμενο διαλυτότητας.

Η σκληρότητα συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό επιθεμάτων στις μεταλλικές επιφάνειες των σωληνώσεων και των εξατμιστηρίων σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης με τη μέθοδο της απόσταξης. Τα επιθέματα αποτελούνται από πέτρινα στρώματα, που ανάλογα με τις χημικές ενώσεις που τα απαρτίζουν είναι μαλακά έως πολύ σκληρά. Η σκληρότητα του νερού έχει ουσιώδη σημασία για την καλή λειτουργία μίας εγκατάστασης αφαλάτωσης, διότι καθορίζει τόσο τη μέθοδο προκατεργασίας του νερού τροφοδοσίας, όσο και την όλη οικονομία της μεθόδου αφαλάτωσης.

Γ. Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Ηλεκτρική Αγωγιμότητα ενός διαλύματος είναι η ικανότητα του να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Εάν σε ένα διαλύτη, π.χ. απεσταγμένο νερό τοποθετηθούν δύο ηλεκτρόδια και διοχετευθεί συνεχής τάση, δεν θα υπάρξει ροή ρεύματος. Εάν ο διαλύτης

περιέχει διαλυμένα άλατα, υπό μορφή ιόντων, τότε παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό το ρεύμα που μεταφέρεται διαμέσου ενός διαλύματος ηλεκτρολυτών, ονομάζεται αγωγιμότητα του διαλύματος και μετριέται σε $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Πρακτικά η αγωγιμότητα μετράται από την αντίσταση που προβάλλει ένα διάλυμα στη ροή συνεχούς ρεύματος, που δημιουργείται με τη βοήθεια δύο ηλεκτροδίων πλατίνας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων και με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Υπολογίζεται με μεγάλη προσέγγιση από την εξίσωση:

$$E_c = C_i f_{ai} \quad (5.2)$$

όπου :

E_c η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ($\mu\text{S}/\text{cm}$),

C_i η συγκέντρωση των ιόντων στο διάλυμα ($\text{eq}/\text{m}^3, \text{g}/\text{m}^3$ ή ppm) και

f_{ai} ο συντελεστής αγωγιμότητας των ιόντων ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

5.4 Χρήση του νερού

Το νερό χρησιμοποιείται για πάρα πολλούς διαφορετικούς σκοπούς. Γενικά μπορεί να καταταγεί σε τέσσερις μεγάλες ομάδες χρήσης [17]:

- οικιακή χρήση,
- κοινοτική χρήση,
- βιομηχανική χρήση και
- γεωργική χρήση.

Η οικιακή χρήση περιλαμβάνει το πόσιμο νερό, το νερό καθαρισμού σπιτιών και καταστημάτων και το νερό μαγειρέματος.

Η κοινοτική χρήση περιλαμβάνει το νερό ποτίσματος των δημόσιων χώρων, την τοπική διανομή νερού για σκοπούς πυρόσβεσης, τους υδάτινους δρόμους μεταφοράς, όπου υπάρχουν, όπως κανάλια για τη μεταφορά υλικών κλπ.

Η βιομηχανική χρήση του νερού αναφέρεται σε κάθε βιομηχανία, η οποία χρησιμοποιεί νερό είτε κατά την διαδικασία παραγωγής, είτε ως νερό ψύξης. Στη βιομηχανική χρήση ανήκουν και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ρεύματος.

Τέλος, η γεωργική χρήση του νερού περιλαμβάνει την κτηνοτροφία και τη γεωργία, που αποτελούν δύο πολύ ευαίσθητους παράγοντες ως προς την ποιότητα του νερού και την αλιεία.

Κάθε ομάδα χρήσης απαιτεί νερό διαφορετικής ποιότητας, τόσο ως προς την περιεκτικότητα των αλάτων όσο και ως προς τη βιολογική καθαρότητα. Οι γενικές προδιαγραφές, επομένως, είναι πολύ διαφορετικές για κάθε ομάδα και λιγότερο ή περισσότερο ελαστικές, ανάλογα με τη χρήση.

5.5 Κριτήρια ποιότητας νερού

Υπάρχουν παγκοσμίως καθιερωμένα πρότυπα προδιαγραφών στα οποία αναφέρεται το είδος των αλάτων και τα όρια που τίθενται στην περιεκτικότητά τους ώστε να θεωρηθεί κάποιο νερό κατάλληλο ή όχι για μια συγκεκριμένη χρήση. Παρόλα αυτά υπάρχουν αποκλίσεις σε τοπικά κρατικά πρότυπα, ιδίως για νερά που αφορούν την κοινοτική ή βιομηχανική χρήση, όπου οι προδιαγραφές είναι ελαστικές και καθορίζονται συχνά από τις ίδιες τις βιομηχανίες ανάλογα με τις διαθέσιμες πηγές νερού.

Για το πόσιμο νερό, όμως, οι προδιαγραφές είναι πολύ αυστηρές και έχουν δοθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, ο οποίος εδρεύει στη Γενεύη (World Health Organization, WHO). Ο οργανισμός αυτός εκδίδει κατά καιρούς πρότυπα περιεκτικότητας σε διάφορα άλατα ή σε ουσίες μόλυνσης των νερών, που καθορίζουν την καταλληλότητα του. Εκτός από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, ο οποίος ελέγχει κυρίως το νερό των χωρών του Τρίτου Κόσμου, τα διάφορα κράτη έχουν αναπτύξει τοπικούς οργανισμούς, τα πρότυπα των οποίων αποκλίνουν λιγότερο ή περισσότερο από αυτά του WHO, ανάλογα με τις δυνατότητες παροχής, τις ιδιαιτερότητες των αποθεμάτων που διατίθενται και την κρατική ελαστικότητα. Στον Πίνακα 5.1 δίνονται οι τιμές των κυριότερων αλάτων σε ανώτατο δεκτό όριο και σε ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπως αυτές έχουν θεσπιστεί από τον WHO.

Πίνακας 5.1 : Προδιαγραφές για το πόσιμο νερό της WHO			
Συστατικά		Περιεκτικότητα σε mg/l	
		Ανώτατο δεκτό	Ανώτατο επιτρεπτό
Ολικά διαλυμένα άλατα	TDS	500	1500
Χλωριούχα	Cl ⁻	200	600
Θειικά	SO ₄ ²⁻	200	400
Ασβέστιο	Ca ²⁺	75	100
Μαγνήσιο	Mg ²⁺	30	150
Φθοριούχα	F ⁻	0.7	1.7
Νιτρικά	NO ₃ ⁻	50	100
Χαλκός	Cu ²⁺	0.05	1.5
Σίδηρος	Fe ³⁺	0.1	1
Χλωριούχο νάτριο	NaCl	250	-
Υδρογόνο σε μονάδες	pH	7,0 ως 8,5	6,5 ως 9,2

Στον πίνακα 5.2 φαίνεται η ανώτατη τιμή μερικών από τα συστατικά που ρυπαίνουν το πόσιμο νερό. Τα συστατικά αυτά προκαλούν διάφορες βιολογικές ανωμαλίες στα νεφρά, στο συκώτι, στο δέρμα και στα μάτια, ενώ είναι πιθανό να προκαλέσουν ακόμα και καρκίνο.

Πίνακας 5.2 : Ανώτατη περιεκτικότητα ουσιών μόλυνσης του νερού			
Συστατικά Μόλυνσης	C _{max}	Συστατικά Μόλυνσης	C _{max}
Νιτρικά άλατα	10 mg/l	Υδράργυρος	0,002 mg/l
Φθοριούχα άλατα	1,4-2,4 mg/l	Θολότητα	1-5 NTU
Βάριο	1 mg/l	Κολοβακτηρίδια	1/100 ml
Άργυρος	0,05 mg/l	Ράδιο 226 και 228	5 pCi/l
Αρσενικό	0,05 mg/l	Στρόντιο 90	8 pCi/l
Μόλυβδος	0,05 mg/l	Ακτινοβολία α	15 pCi/l
Χρώμιο	0,05 mg/l	Ακτινοβολία β	50 pCi/l
Κάδμιο	0,01 mg/l	Χλωράνθρακες	0,1-0,0002 mg/l
Σελήνιο	0,01 mg/l		

Οι προδιαγραφές για την βιομηχανία είναι λιγότερο αυστηρές και κυμαίνονται σε μεγάλη κλίμακα, ανάλογα με το είδος της βιομηχανίας και τη συγκεκριμένη χρήση του νερού. Οι φαρμακευτικές βιομηχανίες και ορισμένες βιομηχανίες τροφίμων χρησιμοποιούν αφαλατωμένο ή απιονισμένο νερό αυστηρών προδιαγραφών, ενώ το νερό ψύξης έχει ελάχιστες προδιαγραφές. Για την γεωργία, η ποιότητα του νερού καθορίζεται κυρίως από το είδος του γεωργικού προϊόντος, την ποιότητα του εδάφους και του τοπικού κλίματος. Για το αφαλατωμένο νερό ακολουθούνται οι

προδιαγραφές του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας. Συνήθως το νερό κατεργάζεται κατάλληλα ώστε, εφόσον προορίζεται για πόσιμο, να γίνει εύγευστο και συγχρόνως να απολυμαίνεται.

5.6 Αφαλάτωση

Το νερό, ως φυσική πηγή ζωής, έχει απασχολήσει στο παρελθόν, πρωτοπόρους ερευνητές και κυρίως πολλούς φιλόσοφους, οι οποίοι διατύπωσαν σε διάφορα συγγράμματα τις φιλοσοφικές ιδέες τους για τη φύση του νερού, τις ιδιότητες του και τη δυνατότητα παραγωγής γλυκού νερού από αλμυρά νερά.

Παρόλο που υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία από την Αρχαιότητα έως το Μεσαίωνα, πάνω σε θέματα σχετικά με το θαλάσσιο νερό και τη δυνατότητα μετατροπής του σε γλυκό νερό, οι περιγραφές παρέμειναν σε θεωρητικό και φιλοσοφικό επίπεδο χωρίς καμία πρακτική εφαρμογή. Μεμονωμένες περιγραφές πρακτικής εφαρμογής φανερώνουν πολύ πρωτόγονους τρόπους μετατροπής του θαλάσσιου νερού σε πόσιμο. Μία απ' αυτές αναφέρεται από τον Άγιο Βασίλειο στις «ομιλίες του». Την μέθοδο αυτή την χρησιμοποιούσαν οι ναυτικοί που διέπλεαν στη Μεσόγειο Θάλασσα. Έβραζαν νερό σε ένα δοχείο και οι ατμοί που σχηματίζονταν, συλλέγονταν στην κρύα επιφάνεια σφουγγαριών, τα οποία κρατούσαν πάνω από το δοχείο βρασμού. Πιέζοντας τα σφουγγάρια μάζευαν το γλυκό νερό που προήλθε από τη συμπύκνωση των ατμών.

Κατά το Μεσαίωνα ο Giovanni Battista Della Porta, στο βιβλίο του «Magiae Naturalis», περιέγραφε διάφορους τρόπους αφαλάτωσης και μια μέθοδο παραγωγής πόσιμου νερού από την υγρασία της ατμόσφαιρας. Από όλες τις περιγραφές του για αφαλάτωση, σημαντικότερη είναι εκείνη που αναφέρεται στη χρησιμοποίηση της ηλιακής ενέργειας, ως πηγή θερμότητας για την παραγωγή πόσιμου νερού από τη θάλασσα ή από υφάλμυρα νερά.

Το 1675 κατατίθεται το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία συσκευή απόσταξης θαλάσσιου νερού, για την παραγωγή πόσιμου. Αργότερα, το 1683 κατατίθεται δεύτερο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, επίσης για απόσταξη θαλάσσιου νερού. Εγκαταστάθηκαν τρεις αποστακτήρες, δύο σε νησιά της Μάγχης και ένας στην Ηπειρωτική Αγγλία, για να αποδειχθεί η καλή λειτουργία της νέας εφεύρεσης για την παραγωγή πόσιμου νερού από τη θάλασσα.

Η πρώτη αναφορά αφαλάτωσης θαλάσσιου νερού, με πλήρη περιγραφή των επιτευγμάτων της εποχής του και ιδιαίτερα της παραγωγής πόσιμου νερού από την θάλασσα σε ποντοπόρα πλοία, δόθηκε από το Γάλλο ναύαρχο, A.F.B. Deslanes το 1724. Αργότερα, το 1739 ο μεγάλος φυσιολόγος Stephan Hales, εξέδωσε ένα βιβλίο, το οποίο περιείχε λεπτομερή περιγραφή όλων των προβλημάτων των σχετικών με την αφαλάτωση και εκτεταμένη βιβλιογραφία.

Το 1870 κατατίθεται στις ΗΠΑ το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια. Αυτό το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας περιγράφει με λεπτομέρεια όλα όσα ακόμα και σήμερα εφαρμόζονται στη συμβατική αφαλάτωση με ηλιακή ενέργεια. Περιγράφεται η συμπύκνωση και η εξάτμιση, η χρήση μαύρης επιφάνειας για μεγαλύτερη απορροφητικότητα και γίνεται αναφορά στη διάβρωση των υλικών του αποστακτήρα. Αναφέρονται μεγάλες παροχές αφαλατωμένου νερού, περιστρέφοντας τον αποστακτήρα ώστε να ακολουθεί την ηλιακή πρόσπτωση.

Δύο χρόνια αργότερα ο Σουηδός μηχανικός Carlos Wilson σχεδίασε και κατασκεύασε την πρώτη μεγάλη εγκατάσταση αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια με παραγωγή νερού ίση με 22,5 m³/day. Οι αποστακτήρες εγκαταστάθηκαν στο Charabuco, Las Salinas της Χιλής, μία περιοχή με υψόμετρο 1.200 μέτρων, όπου λειτουργούσαν διάφορα ορυχεία ορυκτών αλάτων και αργύρου. Η αφαλάτωση λειτούργησε το 1874 και τροφοδοτείτο με την άλμη την πλύσης των ορυκτών αλάτων, παρέχοντας πόσιμο νερό που κάλυπτε τις ανάγκες τόσο των εργαζομένων στα ορυχεία του νιτρικού αμμωνίου, όσο και αυτών στο παρακείμενο ορυχείο αργύρου. Η εγκατάσταση λειτούργησε επί 40 συνεχή χρόνια και σταμάτησε όταν τα ορυχεία εξαντλήθηκαν.

Το ενδιαφέρον για την αφαλάτωση αναζωπυρώθηκε στην Καλιφόρνια το 1930, όταν η περιοχή επλήγη από πολύ μεγάλη ξηρασία, αλλά η οικονομική κρίση της δεκαετίας του '30 δεν επέτρεψε την περαιτέρω έρευνα του θέματος. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου διάφορες περιοχές τόσο στην Αφρική όσο και σε πολλά νησιά του Ειρηνικού Ωκεανού, όπου έδρευαν τα συμμαχικά στρατεύματα, υπέφεραν από μεγάλη λειψυδρία και ειδικότερα από τη έλλειψη σε πόσιμο νερό. Έγιναν μεγάλες έρευνες σε διάφορα πανεπιστήμια των ΗΠΑ, για λογαριασμό του Υπουργείου Ναυτιλίας. Έτσι κατασκευάστηκαν ατομικές συσκευές αφαλάτωσης με ηλιακή ενέργεια που έσωσαν πολλές ζωές.

Μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου άρχισε να εκδηλώνεται τεράστιο ενδιαφέρον για την αφαλάτωση, το οποίο προήλθε από τη ραγδαία αύξηση της ζήτησης καλής ποιότητας νερού, τόσο στα αστικά κέντρα όσο και σε απόμακρες ή έρημες περιοχές, όπου εγκαταστάθηκαν διάφορες ομάδες. Η τεράστια αύξηση της βιομηχανίας συνέτεινε επίσης στην αναζήτηση νέων πηγών νερού.

Η έντονη πίεση είχε ως αποτέλεσμα την εντατική έρευνα για την ανεύρεση νέων υδάτινων πόρων και την προώθηση της αφαλάτωσης για περιοχές όπου υπήρχαν μόνο αλμυρά ή υφάλμυρα νερά.

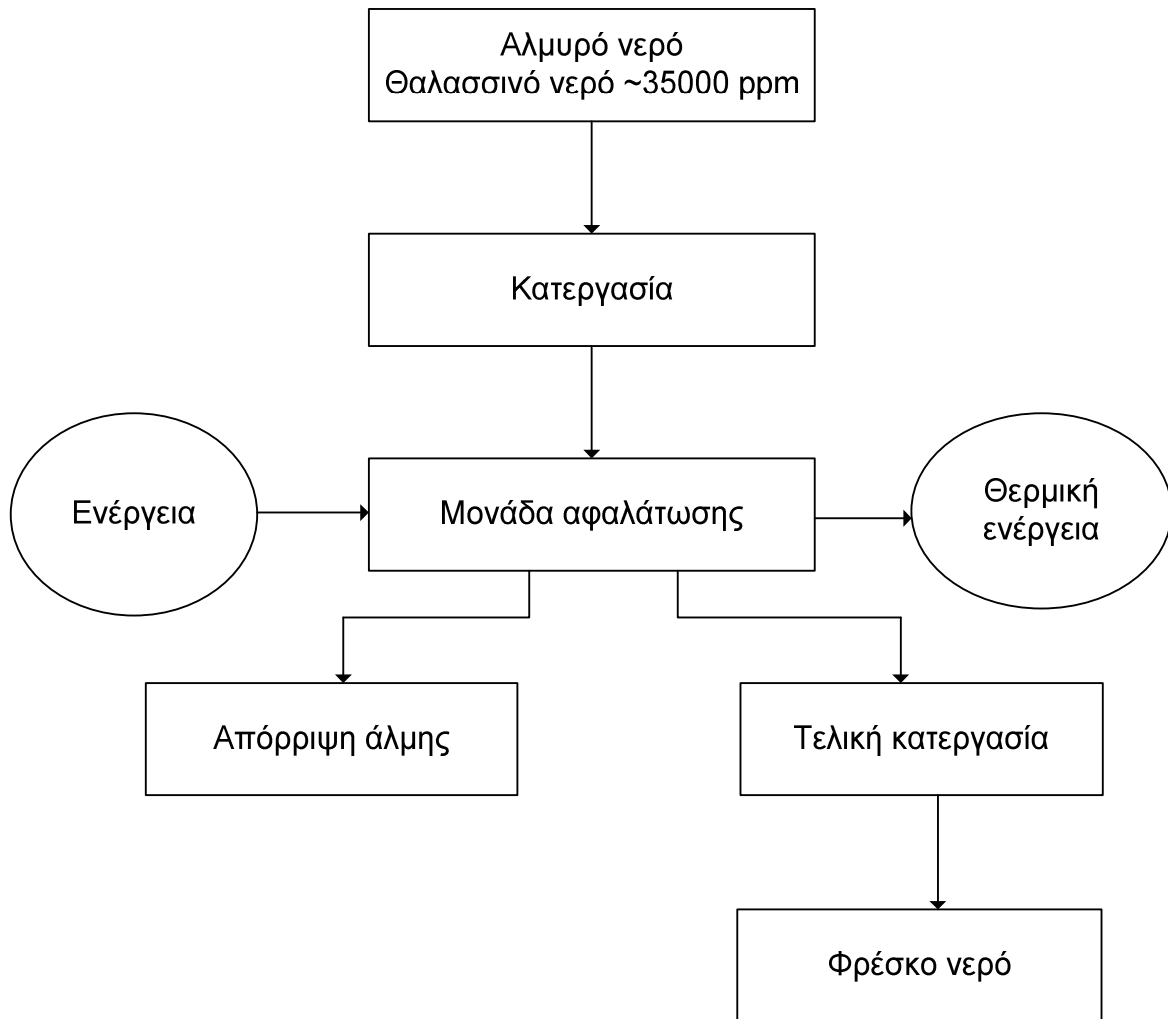
Οι ΗΠΑ, πρωτοπόροι στην έρευνα της αφαλάτωσης, διέθεσαν από το 1952 ως το 1965 περίπου 100 εκατομμύρια δολάρια για την εντατική έρευνα των μεθόδων αφαλάτωσης και την κατασκευή πέντε μονάδων αφαλάτωσης με παροχή 3785 m³/day αφαλατωμένου νερού. Στις εγκαταστάσεις αυτές έγινε εκτεταμένη μελέτη όλων των συνθηκών λειτουργίας και ερευνήθηκαν η τεχνολογία, τα κατάλληλα υλικά κατασκευής και οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας. Οι εγκαταστάσεις λειτούργησαν υπό την επίβλεψη του Γραφείου Αφαλάτωσης (Office of Saline Water, OSW), το οποίο μετά το 1965 παρέδωσε την σκυτάλη στην ιδιωτική βιομηχανία.

Συγχρόνως διάφορα άλλα κράτη προωθούσαν την έρευνα της αφαλάτωσης με σημαντικά επιτεύγματα στην τεχνολογία των μεθόδων.

5.7 Μέθοδοι αφαλάτωσης

Η αφαλάτωση είναι η διαδικασία κατά την οποία απομακρύνονται τα άλατα από το νερό με σκοπό την παραγωγή φρέσκου νερού. Τα αλατούχα διαλύματα, εκτός του θαλασσινού νερού, λέγονται υφάλμυρα νερά με συγκέντρωση αλάτων από 1000 ppm έως 11000 ppm TDS (Total Dissolved Salts). Το θαλασσινό νερό περιέχει αλμυρότητα 35000 ppm TDS ή και περισσότερο και κυρίως χλωριούχο νάτριο.

Ένα εργοστάσιο αφαλάτωσης αποτελείται από ένα σύστημα προκατεργασίας νερού, τη μονάδα αφαλάτωσης και ένα σύστημα τελικής επεξεργασίας. Το σχήμα 5.1 δείχνει ένα εργοστάσιο αφαλάτωσης με τα επιμέρους στάδια του και την ροή του νερού και της ενέργειας μέσα σε αυτό.



Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ροής ενέργειας και νερού σε μία μονάδα αφαλάτωσης

Έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από μεθόδους αφαλάτωσης αλλά δεν είναι όλες αξιόπιστες και κατάλληλες για εμπορική χρήση. Οι τεχνικές αφαλάτωσης διακρίνονται σε τεχνικές θερμικής φύσης και σε τεχνικές μεμβρανών.

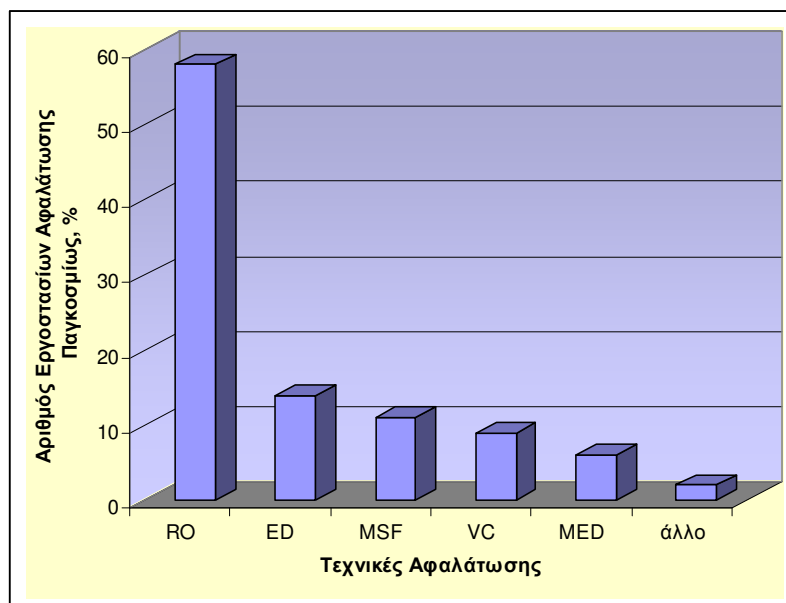
Υπάρχουν τρεις τεχνικές θερμικής απόσταξης, που χρησιμοποιούνται ευρέως: η τεχνική Multiple Stage Flash Distillation (MSF), η Multiple Effect Distillation (MED) και η Vapor Compression (VC).

Οι τεχνικές μεμβρανών αποτελούνται από: την αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO) και την ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis, ED). Η ηλεκτροδιάλυση περιορίζεται στην αφαλάτωση υφάλμυρου νερού, ενώ η αντίστροφη ώσμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην αφαλάτωση υφάλμυρου αλλά και θαλασσινού νερού.

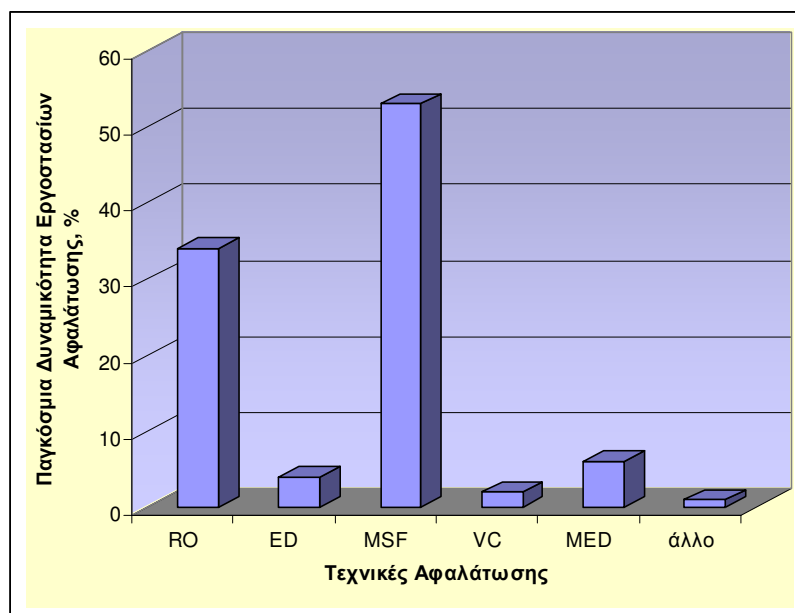
Οι πιο σημαντικοί παράμετροι στην αφαλάτωση είναι η ποιότητα του παραγόμενου νερού και η απαιτούμενη ενέργεια. Η ποιότητα του παραγόμενου νερού εξαρτάται από τη διαδικασία αφαλάτωσης. Οι τεχνικές θερμικής απόσταξης παράγουν νερό γύρω στα 20 ppm TDS, ενώ οι τεχνικές μεμβρανών παράγουν νερό των 100-500 ppm TDS. Ο πίνακας 5.3 δείχνει τις δυναμικότητες των εγκατεστημένων εργοστασίων αφαλάτωσης σε διάφορες χώρες [18]. Στα Σχήματα 5.3 και 5.4 φαίνονται κάποιοι ενδεικτικοί αριθμοί των εργοστασίων και του μέσου μεγέθους τους για κάθε τεχνολογία εκφρασμένα ως ποσοστό της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας ανά τον κόσμο.

Περιοχή	MSF	MED	VC	RO	ED
Σ. Αραβία	2700	-	50	1000	94
ΗΠΑ	50	50	130	1600	280
Κουβέιτ	350	-	-	50	-
Λιβύη	400	-	-	130	67
Ισπανία	56	-	40	230	45
Ιταλία	200	-	75	40	50
Αλγερία	60	-	30	80	16

Η συνολική παγκόσμια δυναμικότητα αφαλάτωσης στα τέλη του 1995 είχε υπερβεί τα 20 εκατομμύρια m³/day παραγόμενου πόσιμου νερού σε περισσότερες από 11066 μονάδες.



Σχήμα 5.3. Ποσοστό του αριθμού εργοστασίων αφαλάτωσης παγκοσμίως



Σχήμα 5.4. Ποσοστό της παγκόσμιας δυναμικότητας εργοστασίων αφαλάτωσης

6. ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΩΣΜΩΣΗ

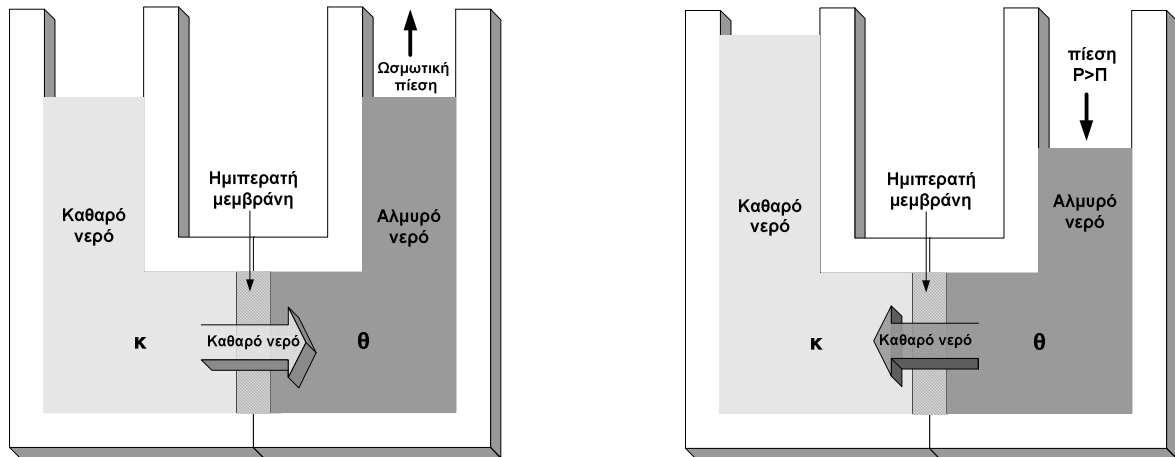
6.1 Αρχή λειτουργίας

Η διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis, RO) είναι συνέπεια της εφαρμογής μιας εξωτερικής πίεσης P , μεγαλύτερης της οσμωτικής Π , σε ένα πυκνό διάλυμα, το οποίο διαχωρίζεται από ένα αραιό διάλυμα με ένα ημιπερατό τοίχωμα ή μία διεκλεκτική μεμβράνη [1].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1, έχουμε καθαρό νερό με 400 ppm TDS στο θάλαμο κ και θαλασσινό νερό με αλμυρότητα 35 g/Kg, στο θάλαμο θ. Οι δύο θάλαμοι χωρίζονται από μία ημιπερατή μεμβράνη Μ. Λόγω της διαφοράς δυναμικού στις δύο πλευρές της μεμβράνης, παρατηρείται διάχυση νερού από τον θάλαμο κ προς τον θάλαμο θ, μέσω της μεμβράνης.

Τα άλατα λόγω της μικρής κινητικότητάς τους απορρίπτονται από τη μεμβράνη και παραμένουν στο θάλαμο κ. Με την πάροδο του φαινομένου το καθαρό νερό που διαχέεται μέσα από τη μεμβράνη μειώνεται στον θάλαμο κ οπότε αυξάνεται η συγκέντρωση των αλάτων του καθαρού νερού, ελαττώνεται η πίεση, ενώ ταυτόχρονα αραιώνει το θαλασσινό νερό και αυξάνει την πίεση στο θάλαμο θ. Έτσι κάποια στιγμή η πίεση των δύο θαλάμων εξισώνεται και έχουμε ταυτόχρονη ισοδύναμη διάχυση μορίων νερού και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στο σημείο αυτό η υδροστατική διαφορά της πίεσης ονομάζεται οσμωτική πίεση. Εφόσον δεν επεμβαίνουν άλλοι εξωτερικοί παράγοντες η οσμωτική πίεση παραμένει σταθερή στο σημείο ισοροπίας.

Η αριθμητική τιμή της οσμωτικής πίεσης είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του νερού σε άλατα και της θερμοκρασίας του. Το κανονικό θαλάσσιο νερό αλμυρότητας 35 g/kg έχει οσμωτική πίεση 23,5 bar, ενώ σε νερό με αλμυρότητα 50 g/kg η οσμωτική πίεση ανέρχεται σε 37,4 bar [18]. Αν εφαρμοστεί μία εξωτερική πίεση στην επιφάνεια του θαλασσινού νερού μεγαλύτερης της οσμωτικής ($\Delta P \gg \Delta \Pi$) το φαινόμενο της ώσμωσης αντιστρέφεται και τα μόρια του νερού διαχέονται από το θαλάσσιο νερό προς το καθαρό, από τον θάλαμο θ προς τον θάλαμο κ. Η ταχύτητα ροής του νερού είναι ανάλογη με την κινητήριο δύναμη της αντίστροφης, δηλαδή τη διαφορά της εφαρμοζόμενης πίεσης ΔP και της οσμωτικής πίεσης $\Delta \Pi$.



Σχήμα 6.1. Σχηματική ανά παράσταση της οσμωτικής πίεσης και της αντιστροφής της οσμωτικής πίεσης

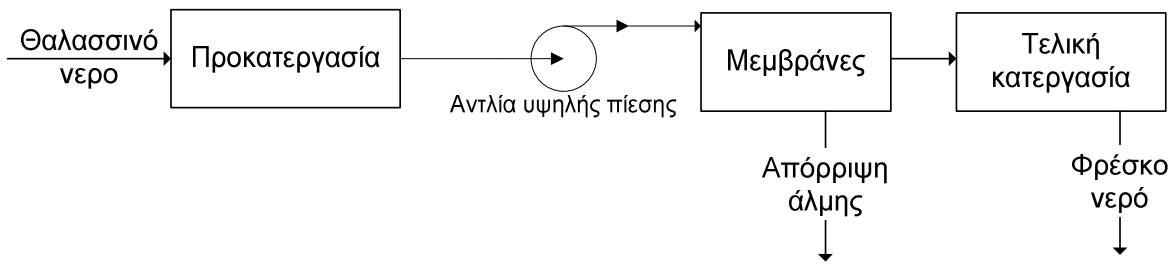
Στην αντίστροφη ώσμωση οι ιδιότητες της μεμβράνης έχουν, αντίθετα με την ώσμωση, ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία της μεθόδου (όπως π.χ. η σταθερά διαπερατότητας, η διεκλεκτικότητα κ.α).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, το θαλασσινό νερό είναι στάσιμο και η μεταφορά του νερού προς το θάλαμο κ αυξάνει την αλμυρότητα του, επομένως και την οσμωτική του πίεση, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ροή των μορίων του νερού και να απαιτείται η βαθμιαία αύξηση της πίεσης, ώστε η διαφορά $\Delta P - \Delta \Pi$ να διατηρείται σταθερή.

Στη διεργασία της αντίστροφης ώσμωσης η ροή του νερού τροφοδότησης είναι συνεχής, ενώ η ταχύτητα του ρυθμίζεται, ώστε η συγκέντρωση της άλμης να διατηρείται σε συγκεκριμένα όρια που να μην ελαττώνουν τη ροή του καθαρού νερού για την επικρατούσα πίεση.

Η πορεία της μεθόδου αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση ακολουθεί γενικά τέσσερα στάδια λειτουργίας (Σχήμα 6.2):

- προκατεργασία του νερού τροφοδότησης,
- συμπίεση του προκατεργασμένου νερού σε αντλία υψηλής πίεσης,
- αφαλάτωση από στοιχεία μεμβρανών και
- τελική κατεργασία του νερού.



Σχήμα 6.2. Τα στάδια λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης

6.2 Προκατεργασία του νερού τροφοδοσίας

Η τεχνική της αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία όλων των ειδών των νερών, από επιφανειακά νερά με μερικές εκατοντάδες ppm TDS, μέχρι και θαλασσινό νερό με ανώτατο όριο αλμυρότητας 50 g/kg.

Τα νερά που επεξεργάζεται η αντίστροφη ώσμωση έχουν σημαντικές διαφορές στα περιεχόμενα άλατα, τόσο στη χημική τους σύσταση όσο και στη συγκέντρωση. Εκτός από τα διαλυμένα άλατα περιέχουν με μικρότερη ή μεγαλύτερη αναλογία μία μεγάλη ποικιλία από αιωρούμενα συστατικά, κolloειδείς ουσίες και μικροοργανισμούς που ρυπαίνουν, δηλητηριάζουν ή αποσαθρώνουν τις μεμβράνες, μειώνοντας έτσι την απόδοση και τον χρόνο ζωής τους. Επειδή η απομάκρυνση των περισσότερων από τα προαναφερθέντα συστατικά είναι απαραίτητη για την αποδοτική και οικονομική λειτουργία της μεθόδου, απαιτείται σχολαστικός καθαρισμός του νερού πριν από την τροφοδότηση του στις μονάδες επεξεργασίας της αντίστροφης ώσμωσης. Γενικά το κόστος προκατεργασίας στην αντίστροφη ώσμωση είναι υψηλό και ανέρχεται στο 60 έως το 65% του ολικού κεφαλαίου της εγκατάστασης.

Για να είναι αποδοτικός ο καθαρισμός, μία προσεκτική ανάλυση του νερού είναι απαραίτητη. Η ανάλυση πρέπει να περιλαμβάνει τις παρακάτω φυσικές παραμέτρους και χημικά στοιχεία τα οποία θεωρούνται ιδιαίτερα καταστρεπτικά για τις μεμβράνες [1]:

- θολότητα, χρώμα, pH και μέση θερμοκρασία άντλησης,
- δείκτη πυκνότητας ιλύος για τα περιεχόμενα κolloειδή συστατικά,
- περιεκτικότητα σε κολοβακτηρίδια και σε διάφορα άλλα βακτηρίδια,

- περιεχόμενα αέρια π.χ. οξυγόνο, CO₂, υδροθείο κ.α. και
- TDS των αλάτων του νερού, αυτών της σκληρότητας (ασβέστιο και μαγνήσιο), κάλιο, σίδηρο, μαγγάνιο, βάριο και στρόντιο, πυρίτιο, θειικά άλατα, νιτρικά άλατα, αμμωνία, φωσφορικά άλατα, φθοριούχα άλατα και χλωριούχα άλατα.

Τα συστατικά αυτά αν δεν απομακρυνθούν δημιουργούν προβλήματα στην μεμβράνη, τα οποία συνοπτικά είναι [1] :

- επιθέματα στην επιφάνεια της μεμβράνης από υπέρβαση του ορίου διαλυτότητας ή από σχηματισμό αδιάλυτων αλάτων λόγω τοπικών αντιδράσεων,
- επικάλυψη στην επιφάνεια της μεμβράνης πολύ λεπτών σωματιδίων ή κολλοειδών συστατικών,
- χημικές αντιδράσεις στη διεπιφάνεια μεμβράνης-νερού τροφοδότησης,
- προσρόφηση από τις πολυμερείς ομάδες της μεμβράνης, διαφόρων μικρομορίων που περιέχονται στο νερό ή σχηματισμού λεπτού στρώματος ζελατίνης και
- φράξιμο των στοιχείων της αντίστροφης ώσμωσης από τα λεπτά αιωρούμενα συστατικά των καναλιών κυκλοφορίας της άλμης.

6.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των μεμβρανών

Το νερό, αφού συμπιεστεί στην πίεση λειτουργίας της αντίστροφης ώσμωσης, τροφοδοτείται στα στοιχεία των μεμβρανών για να αφαλατωθεί. Μια μεμβράνη, για να είναι αποδοτική για χρήση πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά [17]:

- να κατασκευάζεται εύκολα,
- να είναι φθηνή,
- να έχει ικανοποιητική διάρκεια ζωής,
- να έχει ικανοποιητική μηχανική αντοχή τόσο κατά τη συναρμολόγηση της σε στοιχεία, όσο και στην εφαρμοζόμενη πίεση κατά τη λειτουργία της,
- να έχει χημική, φυσική και θερμική σταθερότητα στα αλμυρά και κυρίως στα διάφορα θαλάσσια νερά και

- να έχει μεγάλη περατότητα στο νερό και συγχρόνως να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή απόρριψη αλάτων.

Οι παράμετροι γενικά που χαρακτηρίζουν την καλή λειτουργία μίας μεμβράνης είναι:

- η ροή του νερού δια της μεμβράνης,
- η ροή των διαλυμένων αλάτων,
- η απόρριψη των αλάτων και
- η αναλογία απόληψης.

Δύο τύποι μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης χρησιμοποιούνται εμπορικά. Αυτοί είναι οι Σπειροειδούς Περιέλιξης (Spiral Wound, SW) και οι Κοίλων Ινών (Hollow Fiber, HF) μεμβράνες. Και οι δύο τύποι μεμβρανών χρησιμοποιούνται για να αφαλατώσουν τόσο θαλασσινό όσο και υφάλμυρο νερό. Η επιλογή μεταξύ των δύο βασίζεται σε παράγοντες όπως το κόστος, η ποιότητα του νερού τροφοδοσίας και η δυναμικότητα του νερού που παράγεται.

6.4 Εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης

Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εργοστασίων αντίστροφης ώσμωσης για εφαρμογές τόσο θαλάσσιου νερού (Sea Water Reverse Osmosis, SWRO) όσο και υφάλμυρου νερού (Brackish Water Reverse Osmosis, BWRO). Η διαδικασία χρησιμοποιείται επίσης ευρύτατα στις κατασκευές, στη γεωργία, στις διαδικασίες τροφίμων και στις φαρμακευτικές βιομηχανίες.

Το 32% των συνολικών εγκατεστημένων μονάδων αντίστροφης ώσμωσης απαντάται στις ΗΠΑ, το 21% στη Σαουδική Αραβία, το 8% στην Ιαπωνία και το 8,9% στην Ευρώπη.

Μία μονάδα αντίστροφης ώσμωσης θαλασσινού νερού έχει χαμηλό αρχικό κόστος, αλλά σημαντικό κόστος συντήρησης, το οποίο οφείλεται στο υψηλό κόστος αντικατάστασης των μεμβρανών. Στην παρούσα εργασία το κόστος αντικατάστασης μεμβρανών υπολογίζεται στα πάγια έξοδα συντήρησης της μονάδας αφαλάτωσης. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται είναι επίσης σημαντικό. Η κύρια ενεργειακή απαίτηση για μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης είναι για τη συμπίεση του νερού τροφοδοσίας. Οι ενεργειακές απαιτήσεις για την αφαλάτωση θαλασσινού νερού έχουν μειωθεί

περίπου στις 5 kWh/m³ για μεγάλες μονάδες με συστήματα ανάκτησης ενέργειας, ενώ για μικρές μονάδες μπορεί να υπερβούν τις 15 kWh/m³. Για αφαλάτωση υφάλμυρου νερού η ενεργειακή απαίτηση είναι μεταξύ 1 με 3 kWh/m³ [18].

6.5 Διαδικασία καθαρισμού μεμβρανών

Η απόδοση των μεμβράνων της αντίστροφης ώσμωσης μειώνεται βαθμιαία με την χρήση, μέχρι που τελικά καθίστανται ακατάλληλες, λόγω των επικαθίσεων από τα άλατα και τις άλλες ουσίες του νερού. Πρακτικά, κλείνουν οι πόροι της μεμβράνης και έτσι δυσκολεύεται η διάχυση των μορίων του νερού κατά την ώσμωση.

Για να επιβραδυνθεί η φθορά τους και να επιμηκυνθεί η διάρκεια ωφέλιμης ζωής τους, τελείται μια διαδικασία καθαρισμού τους γνωστή ως flushing. Ουσιαστικά πρόκειται για γέμισμα του ενός θαλάμου με φρέσκο νερό, που όταν διέρχεται από την μεμβράνη για να γεμίσει τον δεύτερο θάλαμο, συμπαρασύρει τα άλατα και τα λοιπά στοιχεία που έχουν κολλήσει στην μεμβράνη. Η διαδικασία αυτή, όταν γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα βελτιώνει αισθητά την απόδοση της μεμβράνης και αυξάνει σε σημαντικό βαθμό την διάρκεια ζωής της.

Κατά την διάρκεια του flushing έχουμε απώλεια τόσο σε ενέργεια, όσο και σε νερό για το σύστημά μας, αφού για να οδηγηθεί το φρέσκο νερό στους θαλάμους χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μια αντλία (συνήθως η low-pressure pump της μονάδας αφαλάτωσης) η οποία βεβαίως καταναλώνει ισχύ για να λειτουργήσει. Το flushing διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 3 λεπτά) και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας από την σχέση 6.1 :

$$E_{fl} = P_{fl} \cdot t_{fl} \quad (6.1)$$

όπου :

E_{fl} η ενέργεια που καταναλώνεται για το flushing (Wh),

P_{fl} η ισχύς που καταναλώνεται για το flushing (W) και

t_{fl} ο χρόνος που διαρκεί το flushing (h).

Εκτός από την απώλεια ενέργειας, έχουμε και απώλεια νερού, αφού μια ποσότητα πόσιμου νερού από την δεξαμενή αποθήκευσης του χρησιμοποιείται για το flushing και μετά θα είναι άχρηστο.

6.6 Η δεξαμενή αποθήκευσης του πόσιμου νερού

Στο σύστημα της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται μια δεξαμενή αποθήκευσης του φρέσκου νερού. Το νερό από την έξοδο της μονάδας αφαλάτωσης αποθηκεύεται στην δεξαμενή και από εκεί τροφοδοτείται το δίκτυο ύδρευσης για να καλυφθεί η ζήτηση σε νερό.

Για τις ανάγκες του συστήματος, κρίθηκε προτιμότερο να κατασκευαστεί μια δεξαμενή παρά να χρησιμοποιηθεί κάποιο έτοιμο εμπορικό μοντέλο έτσι ώστε η δεξαμενή να έχει χωρητικότητα ίση με αυτήν που χρειάζεται.

Το οικονομικό κόστος της κατασκευής αυτής υπολογίζεται ανά κυβικό μέτρο χωρητικότητας και έχει βρεθεί προσεγγιστικά ύστερα από αναγωγή του κόστους των εμπορικών δεξαμενών.

Αρχικά η δεξαμενή θεωρείται ότι έχει την ελάχιστη δυνατή ποσότητα νερού.

6.7 Η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης στην εργασία

Στο σύστημα της παρούσας εργασίας η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης μοντελοποιείται ως ένα σύστημα με είσοδο την ισχύ που παρέχεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το θαλασσινό νερό που παρέχεται από εξωτερική αντλία και έξοδο το φρέσκο νερό που παράγεται και αποθηκεύεται στην δεξαμενή.

Οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης τροφοδοτούνται με ισχύ από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τον συσσωρευτή. Όταν είναι διαθέσιμη η απαιτούμενη ισχύς για να μπορέσει να λειτουργήσει, τότε λειτουργεί και παράγει τόσο νερό όσο προβλέπεται στις προδιαγραφές της μονάδας. Όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη ισχύς, τότε η μονάδα κλείνει και αν είναι δυνατόν γίνεται καθαρισμός των μεμβρανών με την διαδικασία του flushing.

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η συμπεριφορά της μονάδας αφαλάτωσης, όσον αφορά την παραγωγή ή κατανάλωση νερού ως συνάρτηση της παρεχόμενης ισχύος και περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$W = \begin{cases} 0, & \text{αν } P_{in} < P_{fl} \\ -W_{fl}, & \text{αν } P_{fl} \leq P_{in} < P_{RO} \\ W_{RO}, & \text{αν } P_{in} \geq P_{RO} \end{cases} \quad (6.2)$$

όπου:

W η ποσότητα νερού που παράγει ή καταναλώνει από την δεξαμενή η μονάδα αφαλάτωσης (αν $W > 0$ τότε παράγει νερό, ενώ αν $W < 0$ καταναλώνει) σε lt,

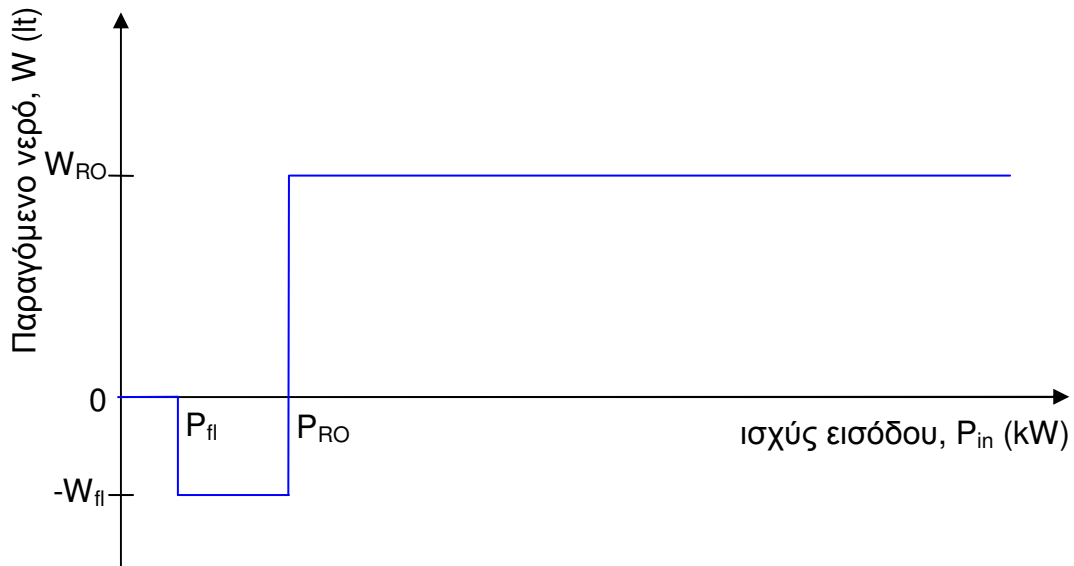
W_{fl} η ποσότητα νερού που χρειάζεται για flushing σε lt,

W_{RO} η ποσότητα νερού που παράγει σε κανονική λειτουργία σε lt,

P_{in} η διαθέσιμη ισχύς που μπορεί να παρέχεται από τον inverter σε W,

P_{RO} η ισχύς τροφοδοσίας της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης σε W και

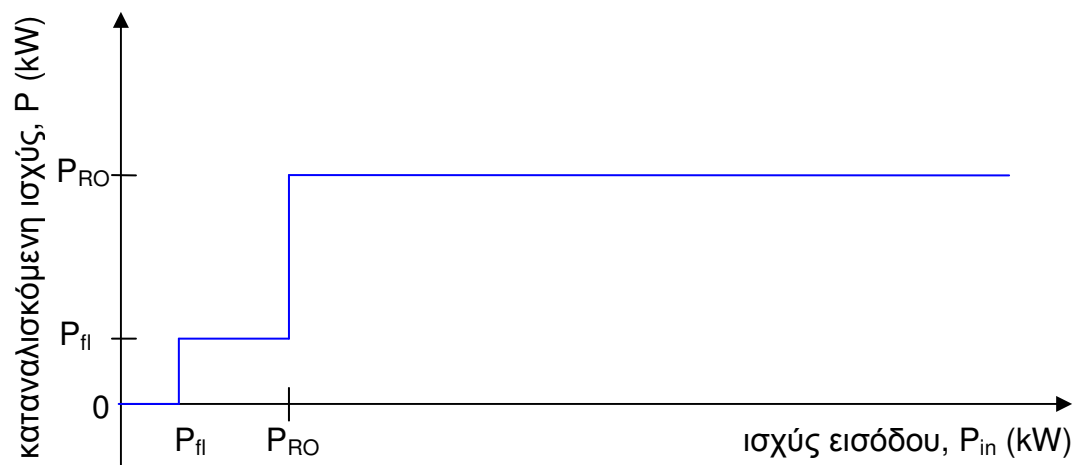
P_{fl} η ισχύς που καταναλώνεται για το flushing σε W.



Σχήμα 6.3. Η παραγωγή νερού της μονάδας αφαλάτωσης ως συνάρτηση της διαθέσιμης ισχύος εισόδου

Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η κατανάλωση ισχύος της μονάδας αφαλάτωσης ως συνάρτηση της διαθέσιμης ισχύος και περιγράφεται από την εξίσωση 6.3 :

$$P = \begin{cases} 0, & \text{αν } P_{in} < P_{fl} \\ P_{fl}, & \text{αν } P_{fl} \leq P_{in} < P_{RO} \\ P_{RO}, & \text{αν } P_{in} \geq P_{RO} \end{cases} \quad (6.3)$$

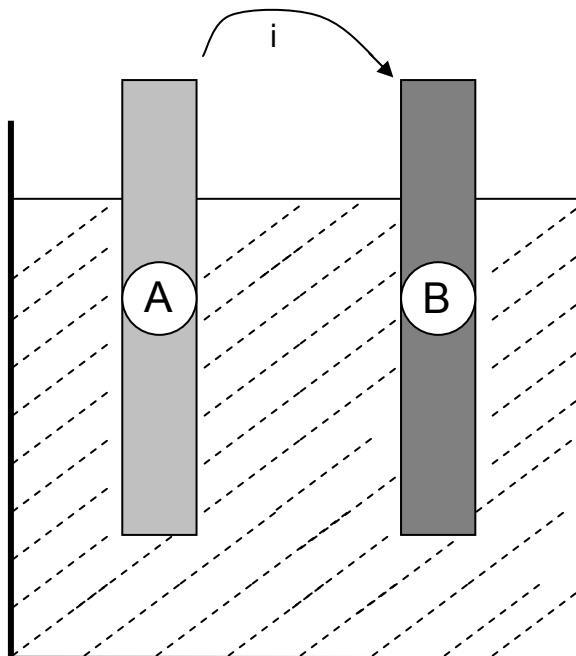


Σχήμα 6.4. Η καταναλισκόμενη ισχύς από την μονάδα αφαλάτωσης ως συνάρτηση της ισχύος εισόδου

7. ΥΠΟΛΟΙΠΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ – ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΤΑΣΗΣ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ)

7.1 Ηλεκτρικά στοιχεία – συσσωρευτές

Ηλεκτρικά στοιχεία (electric cells) λέγονται οι πηγές συνεχούς ρεύματος που στηρίζονται στην παρακάτω χημική διαδικασία: μέσα σε κατάλληλο ηλεκτρολύτη βυθίζονται δυο αγώγιμες πλάκες Α και Β από διαφορετικά υλικά (σχήμα 7.1). Εξ' αιτίας της διαφοράς του ηλεκτροχημικού δυναμικού μεταξύ της πλάκας Α και του ηλεκτρολύτη καθώς και της πλάκας Β και ηλεκτρολύτη αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών.



Σχήμα 7.1. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού στοιχείου

Έστω ότι στην πλάκα Α εμφανίζεται έλλειψη ηλεκτρονίων (θετικός ακροδέκτης) ενώ στην πλάκα Β εμφανίζεται περίσσεια ηλεκτρονίων (αρνητικός ακροδέκτης). Αν οι δύο πλάκες συνδεθούν εξωτερικά με αγωγό, τότε τα ηλεκτρόνια από τον αρνητικό ακροδέκτη θα κινηθούν προς τον θετικό ακροδέκτη για να αναπληρώσουν την έλλειψη. Έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτήσει μια ηλεκτρική συσκευή. Το παραπάνω φαινόμενο θα συνεχιστεί μέχρι την αλλοίωση των πλακών και του ηλεκτρολύτη, οπότε και θα εξουδετερωθεί η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις πλάκες και θα σταματήσει η ροή των ηλεκτρονίων, δηλαδή η διέλευση του ρεύματος.

Κατά την διάρκεια της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το στοιχείο, παρουσιάζεται και το φαινόμενο της κάλυψης της μίας ή και των δυο πλακών από αέρια που παράγονται από τις χημικές αντιδράσεις. Τα αέρια αυτά έχουν μονωτικές ιδιότητες και τείνουν να ελαττώσουν την ένταση του ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό λέγεται πόλωση (polarization) του στοιχείου και αντιμετωπίζεται κατασκευαστικά με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τον τύπο του στοιχείου.

Αν η αποκατάσταση του υλικού των πλακών και του ηλεκτρολύτη είναι αδύνατη, το στοιχείο είναι μιας χρήσης και αχρηστεύεται μετά την εκφόρτισή του. Υπάρχουν στοιχεία, όμως, στα οποία αν αντιστραφεί η φορά του ρεύματος με την χρήση εξωτερικής πηγής τάσης, αποκαθίσταται το υλικό των πλακών και ο ηλεκτρολύτης. Αυτά τα στοιχεία λέγονται Επαναφορτιζόμενα Στοιχεία (rechargeable cells). Τα επαναφορτιζόμενα στοιχεία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη: στα υγρά στοιχεία (liquid cells) και στα ξηρά στοιχεία (dry cells). Ο αριθμός φορτίσεων – εκφορτίσεων ενός επαναφορτιζόμενου στοιχείου δεν είναι απεριόριστος, αλλά εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής και από την σωστή χρήση η οποία προϋποθέτει αργό ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης, μη πλήρη εκφόρτιση και σταθερότητα στην θερμοκρασία.

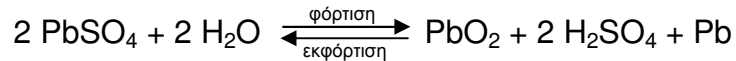
Ένα άλλο χαρακτηριστικό των στοιχείων είναι η αυτοεκφόρτιση. Στο στοιχείο, ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιείται, παρουσιάζεται μια μικρή διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος, είτε μέσω του ηλεκτρολύτη είτε μέσω της θήκης του στοιχείου, η οποία εκφορτίζει αργά το στοιχείο. Με την πάροδο του χρόνου εμφανίζεται επίσης και μια αλλοίωση των υλικών του στοιχείου, έστω και αν αυτό είναι αποθηκευμένο. Τα δύο παραπάνω φαινόμενα συντελούν στην μείωση της διάρκειας ζωής του στοιχείου.

Η χωρητικότητα (capacity) των ηλεκτρικών στοιχείων μετράται σε Ah. Η μονάδα Ah εκφράζει ηλεκτρικό φορτίο ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Cb}$). Για παράδειγμα, ένα στοιχείο με χωρητικότητα 10 Ah, μπορεί να παρέχει σε έναν καταναλωτή μέσο ρεύμα 1 A επί 10 ώρες ή μέσο ρεύμα 10 A επί μια ώρα.

7.2 Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος

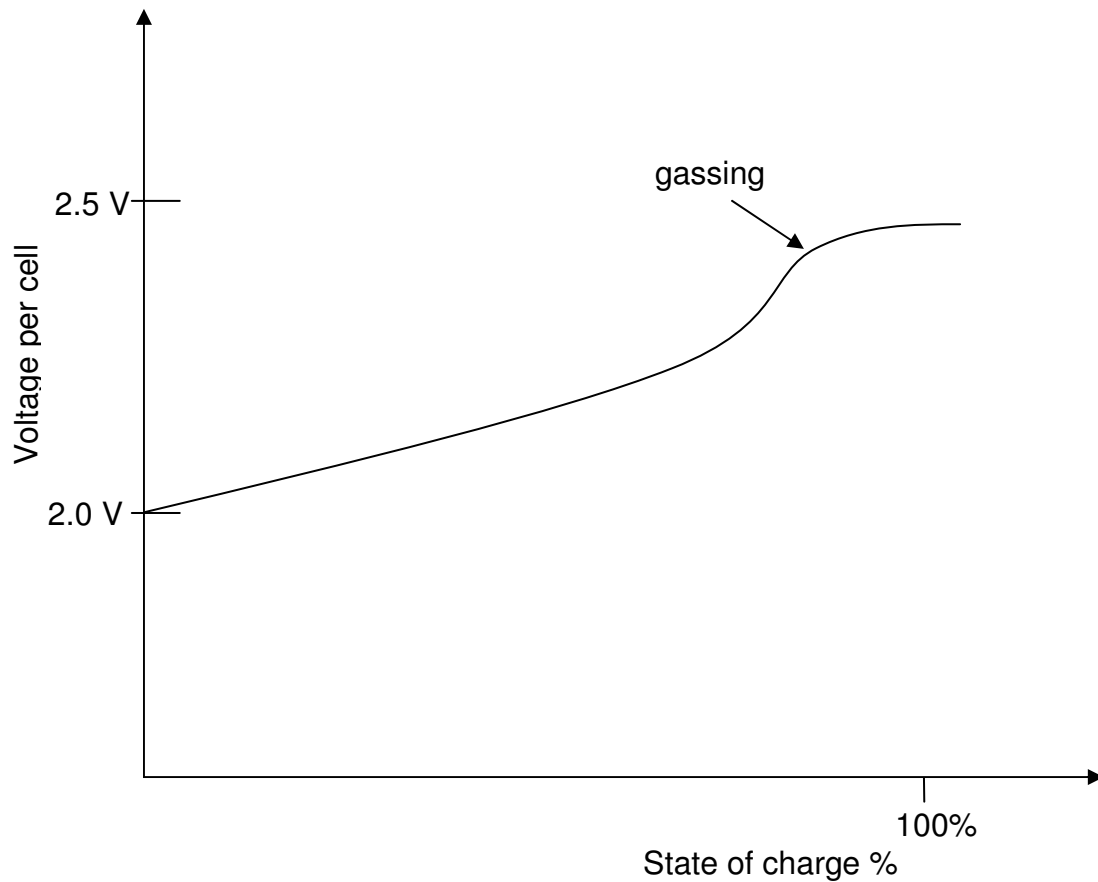
Στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ο πιο διαδεδομένος τύπος συσσωρευτών είναι ο συσσωρευτής μολύβδου-οξέος. Ο συσσωρευτής μολύβδου-οξέος είναι υγρό στοιχείο, με ηλεκτρολύτη διάλυμα θειικού οξέος σε αποσταγμένο νερό και τα ηλεκτρόδια είναι πλάκες από κράματα μολύβδου. Η λειτουργία των

συσσωρευτών μολύβδου-οξέος στηρίζεται στην ακόλουθη αμφίδρομη ηλεκτροχημική αντίδραση :



Συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούνται από στοιχεία τα οποία είναι ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών, βυθισμένα στο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο. Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται υπεροξειδίο του μολύβδου στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση των καταναλωτών, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} και παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα, ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων, ο Pb^{4+} ανάγεται σε Pb^{2+} λαμβάνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα. Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλ. τα ιόντα Pb^{2+} ενώνονται με θειικά ιόντα SO_4^{2-} από το διάλυμα και σχηματίζουν ξανά τον θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες των στοιχείων. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ, παράγεται νερό και αραιώνεται το διάλυμα. Με την φόρτιση που επακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση και η περιεκτικότητα του διαλύματος αποκαθίσταται στην κανονική της τιμή.

Κάθε φορτισμένο στοιχείο των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος έχει ονομαστική τάση 2.0V. Για την πλήρη φόρτιση κάθε στοιχείου, όμως, πρέπει να γίνει τροφοδότηση με 2.4V. Στη συνέχεια η φόρτιση του συσσωρευτή πρέπει να διακοπεί, γιατί η υπερφόρτιση των στοιχείων προκαλεί την θέρμανση του διαλύματος του θειικού οξέος, που προκαλεί εξάτμιση του νερού και φθορά του συσσωρευτή καθώς και ηλεκτρόλυση του διαλύματος με έκλυση υδρογόνου και οξυγόνου. Το φαινόμενο της μείωσης του νερού στο διάλυμα ονομάζεται gassing. Αυτό, εκτός από απώλεια υγρού, δημιουργεί κινδύνους και για την ασφάλεια της εγκατάστασης. Αν ο χώρος που βρίσκεται ο συσσωρευτής δεν αερίζεται καλά, το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα που με ένα τυχαίο σπινθήρα θα προκαλέσει έκρηξη. Το Σχήμα 7.2 δείχνει την φόρτιση ενός στοιχείου μολύβδου-οξέος.



Σχήμα 7.2. Καμπύλη φόρτισης στοιχείου μολύβδου-οξέος

Συνήθως οι συσσωρευτές περιέχουν πολλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και έτσι έχουν μεγαλύτερη τάση. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής μολύβδου 6 στοιχείων έχει τάση περίπου 12 V.

Το πιο σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τους συσσωρευτές είναι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν. Η ποσότητα εξαρτάται από την χωρητικότητα του συσσωρευτή αλλά και από την τάση που έχει στα άκρα του. Αν δηλαδή ένας συσσωρευτής έχει χωρητικότητα $C=80\text{Ah}$ και δίνει μέση τάση $V_{\text{bat}}=24\text{V}$, τότε έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας :

$$80 \text{ Ah} \cdot 24 \text{ V} = 1920 \text{ Wh} = 1.92 \text{ kWh}$$

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών μειώνεται με την χρήση, λόγω διάβρωσης των πλακών, σχηματισμού επικαθίσεων κλπ. Έτσι πρέπει η χωρητικότητα των συσσωρευτών να μην πέφτει κάτω από κάποιο όριο που εκφράζεται ως ποσοστό της αρχικής τιμής τους. Ταυτόχρονα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν και η

αυτοεκφόρτιση των συσσωρευτών που γίνεται με έναν ρυθμό της τάξεως του 2 - 5% ανά μήνα, ανάλογα και με την ηλικία τους.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ εκφόρτισης. Ουσιαστικά εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που δίνουν προς κατανάλωση, αφού η τάση μεταβάλλεται πάρα πολύ αργά και σε πρακτικές εφαρμογές την θεωρούμε σταθερή. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας 100 Ah θα εκφορτιστεί σε 10 ώρες αν η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης είναι 10 A, ενώ αν η ένταση είναι 18 A ο ίδιος συσσωρευτής θα εκφορτιστεί σε 5 ώρες και η χωρητικότητά του θα πέσει στα 90 Ah. Με μικρότερους ρυθμούς εκφόρτισης η διαθέσιμη χωρητικότητά του αυξάνεται σημαντικά. Τέλος, η χωρητικότητα αυξάνεται με την θερμοκρασία του συσσωρευτή, αλλά ταυτόχρονα επιταχύνονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και μειώνεται η διάρκεια ζωής του.

Η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης και από το βάθος κάθε εκφόρτισης. Ανάλογα με τον τύπο τους οι συσσωρευτές μολύβδου αντέχουν συνήθως 500 ως 1500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και επιτρέπουν από 10% ως και 80% βάθος εκφόρτισης. Έτσι σε έναν συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας C_N η ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα, $C(Ah)$, είναι :

$$C = \beta C_N \quad (7.1)$$

όπου

β το βάθος εκφόρτισης (%).

Έτσι, η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να αποθηκευθεί σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης είναι :

$$E = CV = \beta C_N V \quad (7.2)$$

Ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών μολύβδου, η , ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ενέργειας που ανακτάται προς την ενέργεια που είχε απορροφήσει ο συσσωρευτής σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης και είναι περίπου ίσος με 85%. Επομένως, αν η ηλεκτρική ενέργεια που ζητάμε να παρέχει ο συσσωρευτής είναι E , η ενεργός χωρητικότητά του C θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης E_ϕ η οποία είναι ίση με :

$$E_{\varphi} = \frac{E}{n} \quad (7.3)$$

και επομένως η ονομαστική του χωρητικότητα είναι :

$$C_N = \frac{E_{\varphi}}{\beta n V} \quad (7.4)$$

Στα μεγάλα αυτόνομα συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε στιγμές που αυτή παράγεται σε μεγαλύτερο ποσό από τις απαιτήσεις της κατανάλωσης και η χρησιμοποίηση της στα διαστήματα που οι ανανεώσιμες πηγές αδυνατούν να καλύψουν την κατανάλωση. Η αποθήκευση αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος και γι' αυτό οι χρησιμοποιούμενες αποθηκευτικές διατάξεις πρέπει να έχουν μεγάλη χωρητικότητα και να σχηματίζονται από ομάδες μεγάλου πλήθους συσσωρευτών. Η δομή τους, δηλαδή, είναι σπονδυλωτή αφού οι ομάδες αποτελούνται από ανεξάρτητους συσσωρευτές. Έτσι η συνολική χωρητικότητα μπορεί να προσαρμοστεί στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κατανάλωσης, αυξάνοντας ή μειώνοντας το πλήθος των συσσωρευτών.

Σημαντικός παράγοντας στο κόστος του συστήματος είναι το γεγονός ότι οι συσσωρευτές θα πρέπει να αντικαθίστανται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Με δεδομένο ότι οι συσσωρευτές μολύβδου αντέχουν 500-1500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και ότι καθημερινά γίνεται περίπου ένας κύκλος, θα πρέπει να γίνεται αντικατάσταση των συσσωρευτών κάθε 2 με 5 χρόνια.

7.3 Οι συσσωρευτές στο σύστημα της παρούσας εργασίας

Στο σύστημα της εργασίας ο συσσωρευτής έχει μια αρχική χωρητικότητα C_i . Κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος αυτή η χωρητικότητα μειώνεται όταν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ στην μονάδα αφαλάτωσης, ή αυξάνεται όταν ο συσσωρευτής φορτίζεται απορροφώντας ισχύ από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης β (%) λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και αν δεν δίνεται θεωρείται ίσο με 80%. Οι συσσωρευτές δεν επιτρέπεται να φορτίζονται ή να εκφορτίζονται με ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης, αντίστοιχα, μεγαλύτερο του ενός πέμπτου της χωρητικότητάς τους. Έτσι σε κάθε φόρτιση ή εκφόρτιση των συσσωρευτών γίνεται ο απαραίτητος έλεγχος ούτως ώστε να μην ξεπεραστεί αυτή η τιμή.

Αν με $C^i(t)$ συμβολίσουμε την χωρητικότητα του συσσωρευτή την χρονική στιγμή t την i -οστή ημέρα, τότε αυτή υπολογίζεται από την σχέση:

$$C^i(t) = C^i(t-1) + \eta_b \frac{P_b^i(t)}{V_b} \Delta t \quad (7.5)$$

όπου :

i η ημέρα του χρόνου,

$C^i(t-1)$ η χωρητικότητα την προηγούμενη χρονική στιγμή (σε Ah),

η_b ο βαθμός απόδοσης κατά την εκφόρτιση (στο σύστημα μας θεωρείται σταθερός και για την φόρτιση λαμβάνεται ίσος με 80%, ενώ για την εκφόρτιση ίσος με την μονάδα),

V_b η τάση της μπαταρίας που είναι ταυτόχρονα και η τάση λειτουργίας όλου του συστήματος (θεωρείται σταθερή),

$P_b^i(t)$ η ισχύς που μεταφέρεται στην μπαταρία (σε W). Όταν η μπαταρία φορτίζεται $P_b(t) > 0$, ενώ όταν εκφορτίζεται $P_b(t) < 0$ και

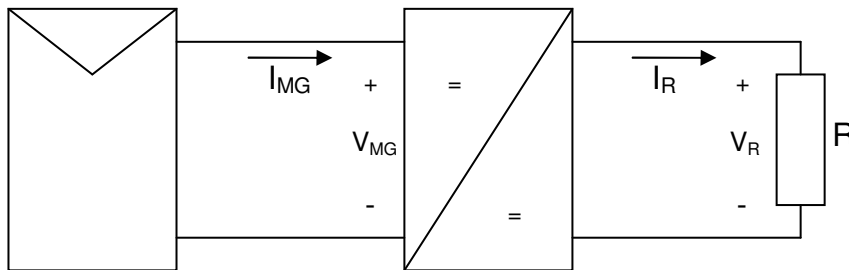
Δt το χρονικό διάστημα από την προηγούμενη μέχρι την παρούσα στιγμή. Έχει επιλεγεί η προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος να γίνεται σε ωριαία βάση, οπότε ισχύει $\Delta t = 1$.

7.4 Ρυθμιστές τάσης

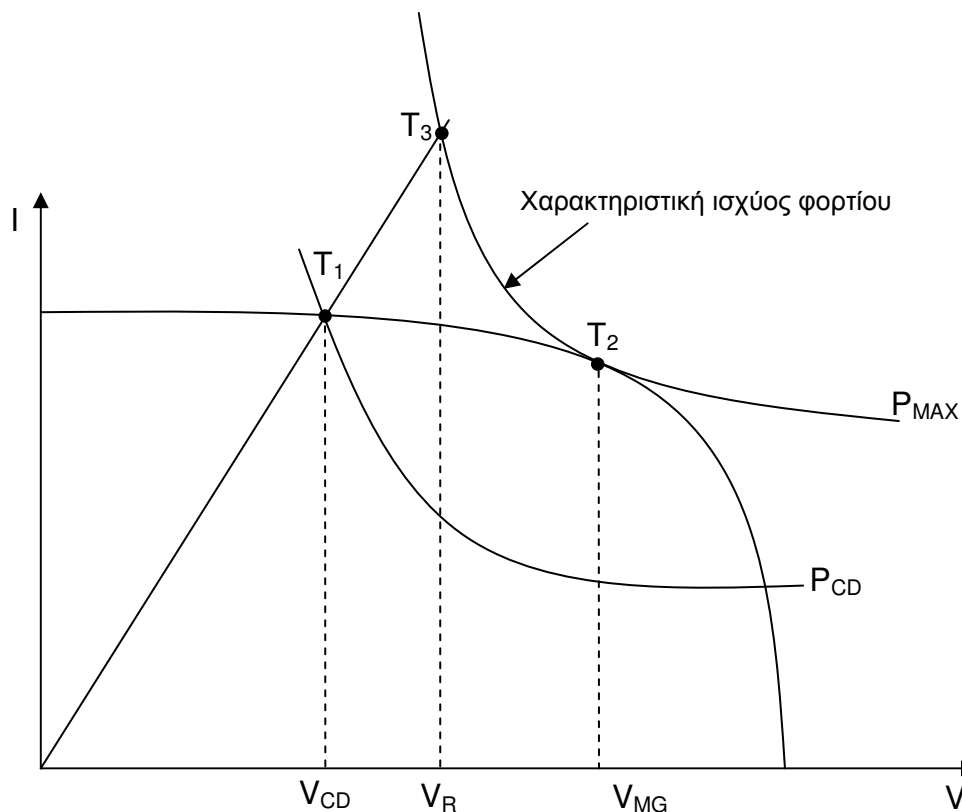
Οι ρυθμιστές τάσης αποτελούν απαραίτητα στοιχεία του συστήματος. Χρησιμοποιούνται για την προστασία του συσσωρευτή, αφού εξασφαλίζουν την σωστή φόρτισή της. Χρησιμοποιούνται τόσο σε φ/β πλαίσια, όσο και σε ανεμογεννήτριες στις οποίες είναι συχνά ενσωματωμένοι. Είναι μετατροπείς dc/dc που εμποδίζουν την υπερφόρτιση, αλλά και την εκφόρτιση κάτω από το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή.

Εκτός από τον έλεγχο της σωστής φόρτισης του συσσωρευτή, κάποιοι ρυθμιστές τάσης, με χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος, μπορούν να απορροφήσουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα φ/β πλαίσια. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται Maximum Power Point Trackers (MPPT). Η αρχή λειτουργίας των MPPT φαίνεται στο σχήμα 7.3, που εικονίζεται μια φ/β γεννήτρια, μια διάταξη MPPT και ένας αντιστάτης σαν φορτίο. Η χαρακτηριστική του φορτίου (σχήμα 7.4)

τέμνει την χαρακτηριστική του φ/β στο σημείο T_1 το οποίο βρίσκεται μακριά από το σημείο μέγιστης ισχύος T_2 . Έτσι ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας από αυτό που θα μπορούσε να παραχθεί χάνεται. Με την χρήση της διάταξης MPPT, που έχει την χαρακτηριστική καμπύλη που περνά από τα σημεία T_2 και T_3 , το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετατοπίζεται στο T_2 που είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της φ/β γεννήτριας. Έτσι παράγεται το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας από το φωτοβολταϊκό στοιχείο.



Σχήμα 7.3. Σύστημα παραγωγής ενέργειας από φ/β στοιχείο με διάταξη MPPT.



Σχήμα 7.4. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος με MPPT.

7.5 Οι ρυθμιστές τάσης του συστήματος της παρούσας εργασίας

Το σύστημα της εργασίας χρησιμοποιεί ρυθμιστές τάσης είτε με είτε χωρίς δυνατότητα MPPT. Και στις δύο περιπτώσεις, ο ρυθμιστής μοντελοποιείται ως ένα σύστημα το οποίο δέχεται στην είσοδό του μια ισχύ από τα φ/β πλαίσια και την διοχετεύει στην έξοδό του με κάποιο βαθμό απόδοσης η_s . Αυτός ο βαθμός απόδοσης δίνεται από την σχέση:

$$\eta_s = \eta_1 \eta_2 \quad (7.6)$$

όπου

η_1 ένας συντελεστής που δείχνει πόσο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος λειτουργεί η φ/β γεννήτρια και

η_2 ο βαθμός απόδοσης της συσκευής.

Το η_2 συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή. Αν δεν δίνεται, τότε λαμβάνεται ίσο με 90%. Ο συντελεστής η_1 για την περίπτωση που ο ρυθμιστής ισχύος έχει δυνατότητα MPPT είναι ίσος με την μονάδα, ενώ αν δεν έχουμε MPP Tracking θεωρείται ότι λαμβάνει μια μέση τιμή 70%.

Ο αριθμός των απαιτούμενων φορτιστών για το σύστημα εξαρτάται από τον αριθμό και την ισχύ των φ/β πλαισίων. Έστω $N_{pv/ch}$ ο αριθμός των φ/β πλαισίων που αντιστοιχούν σε έναν φορτιστή. Έχουμε :

$$N_{pv/ch} = \frac{P_{chm}}{P_{Pm}} \quad (7.7)$$

όπου

P_{chm} η ονομαστική ισχύς του φορτιστή (W) και

P_{Pm} η ισχύς αιχμής των φ/β πλαισίων (W).

Αν N_{pv} είναι ο συνολικός αριθμός των πλαισίων, τότε ο συνολικός αριθμός φορτιστών, N_{ch} , είναι :

$$N_{ch} = \frac{N_{pv}}{N_{pv/ch}} \quad (7.8)$$

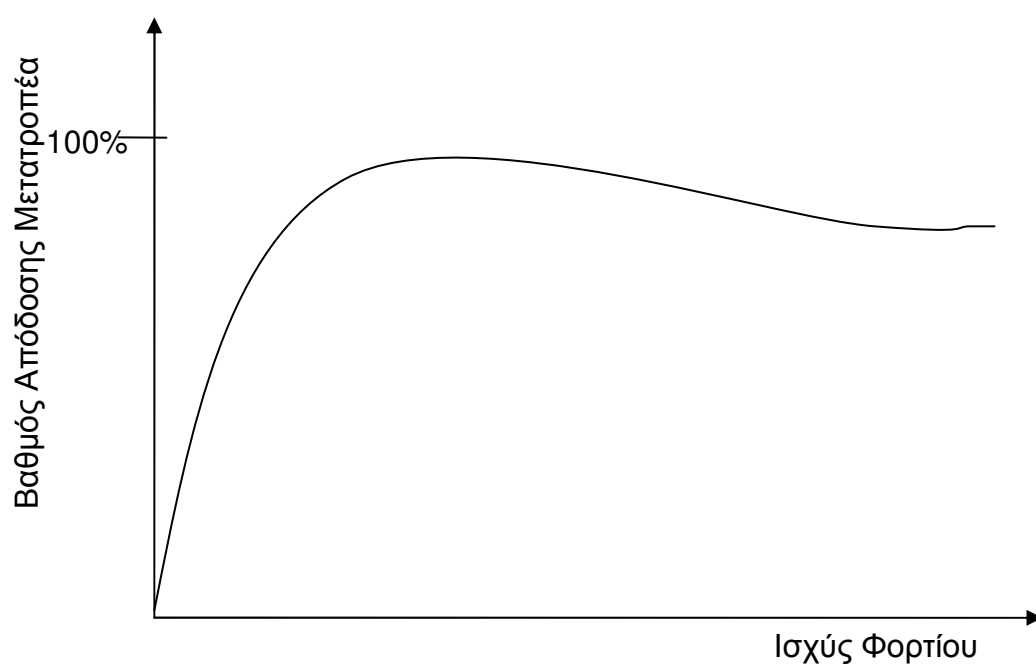
7.6 Μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς, inverters).

Τα φ/β πλαίσια, οι ανεμογεννήτριες και οι μπαταρίες παράγουν συνεχή (DC) τάση. Οι μονάδες αφαλάτωσης, όμως, λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση. Έτσι είναι αναγκαίο να υπάρχουν κάποιες συσκευές που λύνουν αυτό το πρόβλημα. Αυτές οι συσκευές είναι οι μετατροπείς dc/ac, που τροφοδοτούνται με συνεχή τάση και την μετατρέπουν σε εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό τους.

Οι μετατροπείς dc/ac των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους μετατροπείς που εγκαθίστανται σε αυτόνομα συστήματα και τους μετατροπείς που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι τελευταίοι, εκτός της μετατροπής που πρέπει να κάνουν, πρέπει να συγχρονιστούν με το ηλεκτρικό δίκτυο. Το σύστημα που εξετάζεται στην εργασία αυτή είναι αυτόνομο, άρα οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται ανήκουν στην πρώτη κατηγορία.

Οι συσκευές αυτές έχουν κάποιο βαθμό απόδοσης που μπορεί να προσεγγίζει και το 95% όταν λειτουργούν στην ονομαστική τους ισχύ. Όταν λειτουργούν σε διαφορετική ισχύ τότε η απόδοσή τους μειώνεται. Στην εργασία αυτή θεωρούμε ότι οι μετατροπείς DC/AC έχουν έναν μέσο βαθμό απόδοσης, η_i , που δίνεται από τον κατασκευαστή και αποτελεί παράμετρο εισόδου. Όταν δεν δίνεται, λαμβάνεται ίσος με 80%.

Στο σχήμα 7.5 φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα ως συνάρτηση του φορτίου εξόδου [20].



Σχήμα 7.5. Βαθμός απόδοσης μετατροπεία DC/AC σε σχέση με την ισχύ του φορτίου

8. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

8.1 Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή, για την εύρεση της οικονομικότερης λύσης για τον σχεδιασμό του συστήματος (πρόβλημα που ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους) χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι. Ονομάζονται έτσι γιατί η λειτουργία τους «προσομοιάζει» την λειτουργία του DNA. Είναι πάρα πολύ αποδοτικοί αλγόριθμοι, παρότι δεν υπάρχει ακόμη μαθηματική απόδειξη ότι συγκλίνουν στην βέλτιστη λύση. Η βασική τους ιδέα είναι ότι η ίδια η φύση μας παρέχει τον καλύτερο «αλγόριθμο βελτιστοποίησης» που είναι η φυσική επιλογή, διεργασία που εφαρμόζεται πάνω στον άνθρωπο, αλλά και σε όλα τα έμβια όντα του πλανήτη. Έτσι, παίρνοντας σαν βασική φόρμα λειτουργίας αυτές τις διεργασίες που συνιστούν την φυσική επιλογή, δημιουργήθηκαν αυτοί οι πολύ ισχυροί αλγόριθμοι.

8.2 Ιστορική αναδρομή

Από τις δεκαετίες του '50 και του '60 πολλοί επιστήμονες ασχολήθηκαν με εξελικτικά συστήματα καθοδηγούμενοι από την σκέψη ότι η «εξέλιξη» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση προβλημάτων σε τεχνολογικές, ιδιαίτερα, εφαρμογές. Η βασική ιδέα είναι η ύπαρξη ενός συνόλου από υποψήφιες λύσεις, που δημιουργείται με διεργασίες παρόμοιες με αυτές της φυσικής γενετικής μεταβολής και της φυσικής επιλογής.

Το 1965 και το 1973 ο Rechartberg [11] διατύπωσε την θεωρία των «στρατηγικών εξέλιξης» σαν μια μέθοδο βελτιστοποίησης παραμέτρων σε κατασκευές, όπως τα λεπτά μεταλλικά φύλλα των αεροπλάνων. Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε επιπλέον από τον Schwefel (1975, 1977). Οι στρατηγικές εξέλιξης παραμένουν ακόμη ένα σημαντικό πεδίο έρευνας, ανεξάρτητα από τους γενετικούς αλγόριθμους.

Το 1966 οι Fogel, Owens και Walsh εισήγαγαν τον «εξελικτικό προγραμματισμό» (evolutionary programming), στον οποίον οι υποψήφιες λύσεις ενός προβλήματος συμβολίζονται με μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων που αναπτύσσονται μεταλλάσσοντας (mutate) τυχαία τα διαγράμματα μετάπτωσης των καταστάσεων τους και επιλέγοντας το «πλέον ταιριαστό» (fittest). Ο εξελικτικός προγραμματισμός είναι επίσης ζωντανή περιοχή έρευνας (Fogel και Atman, 1993).

Οι στρατηγικές εξέλιξης, ο εξελικτικός προγραμματισμός και οι γενετικοί αλγόριθμοι απαρτίζουν τον «εξελικτικό υπολογισμό». Από το 1950 μέχρι και το 1970 αναπτύχθηκαν πολλοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης βασισμένοι στην εξέλιξη (Box 1957, Friedman 1959, Bledsoe 1961, Bremermann 1962, Reed, Tooms και Baricelli 1967). Ταυτόχρονα άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι υπολογιστές για την προσομοίωση της εξέλιξης σε βιολογικά πειράματα.

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. Η ιδιαιτερότητά του είναι ότι αρχικά ο στόχος του ήταν να μελετήσει το φαινόμενο της «προσαρμογής» στη φύση και να το εντάξει ως εργαλείο σε υπολογιστικά συστήματα. Στο βιβλίο "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" (Holland, 1975) παρουσιάζεται ο γενετικός αλγόριθμος σαν μια αφαίρεση της βιολογικής εξέλιξης και δίνεται ένα θεωρητικό πλαίσιο προσαρμογής με γενετικούς αλγορίθμους. Οι γενετικοί αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από ένα σύνολο (πληθυσμό) «χρωμοσωμάτων» (π.χ. ακολουθίες από bits) σε ένα νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας τελεστές «μετάλλαξης» (mutation) και «αντιστροφής» (inversion). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από «γονίδια» (bits) και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο «αλληλόμορφο» (allele) (π.χ. 0 ή 1). Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα του πληθυσμού στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν και κατά μέσον όρο τα χρωμοσώματα που «προσαρμόζονται» παράγουν περισσότερους απογόνους από τα λιγότερο προσαρμοσμένα. Η «διασταύρωση» ανταλλάσσει μέρη των δυο χρωμοσωμάτων που μετέχουν σε αυτή, μιμούμενη το βιολογικό επανασυνδυασμό ενός απλού χρωμοσώματος μεταξύ δύο οργανισμών. Η «μετάλλαξη» αλλάζει τυχαία τις τιμές των αλληλόμορφων κάποιων γονιδίων στα χρωμοσώματα και η «αντιστροφή» αναστρέφει την τάξη μιας «γεινιάζουσας» περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας έτσι τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα γονίδια.

Η ιδέα του Holland για μια μέθοδο βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό που αναπτύσσεται με διασταύρωση, μετάλλαξη και αντιστροφή ήταν μεγάλη καινοτομία. Πριν από αυτόν υπήρχαν μέθοδοι που χρησιμοποιούσαν πληθυσμό μόλις δύο ατόμων (γονέα – απογόνου, στρατηγικές εξέλιξης - Rechenberg) ή χρησιμοποιούσαν μόνο μετάλλαξη (εξελικτικός προγραμματισμός – Walsh) [11]. Τέλος ήταν ο πρώτος που έθεσε την υπολογιστική εξέλιξη σε ένα σταθερό

θεωρητικό μοντέλο, πάνω στο οποίο στηριζόταν η έρευνα για τους γενετικούς αλγόριθμους μέχρι και πρόσφατα.

Σήμερα ο όρος «γενετικός αλγόριθμος» χρησιμοποιείται για να δηλώσει κάτι πολύ διαφορετικό από την αρχική ιδέα του Holland. Ο λόγος είναι ότι τα τελευταία χρόνια έσπασαν τα όρια στην έρευνα που χώριζαν τους γενετικούς αλγόριθμους, τον εξελικτικό προγραμματισμό και τις στρατηγικές εξέλιξης.

8.3 Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος

Η ιδιότητα στην οποία έγκειται η ιδιαιτερότητα των γενετικών αλγορίθμων είναι ότι επιλύουν ένα πρόβλημα με «βιολογικό» τρόπο και όχι με μαθηματικό, γεγονός που τους δίνει μεγάλη ευελιξία. Βρίσκουν την βέλτιστη λύση ανεξάρτητα αν οι προδιαγραφές του προβλήματος είναι γραμμικές ή όχι, διακριτού ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακρότατων, NP ή non-NP complete.

Το βασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, λοιπόν, είναι η μεγιστοποίηση μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών. Η μεγιστοποίηση έγκειται στην εύρεση του σωστού συνδυασμού των μεταβλητών για τον οποίο η συνάρτηση παίρνει την μέγιστη τιμή της.

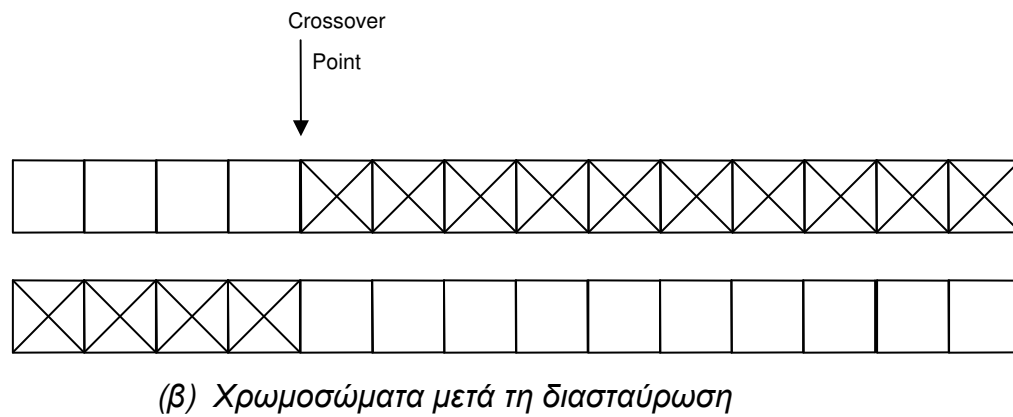
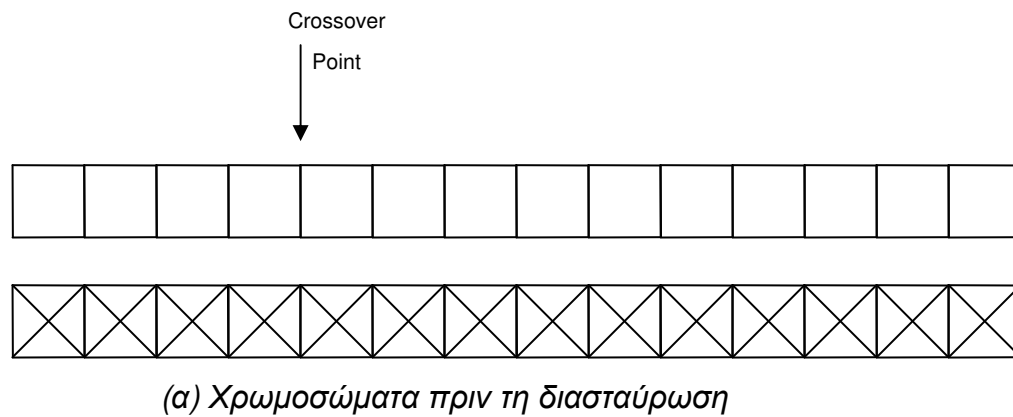
Στους γενετικούς αλγόριθμους μια υποψήφια λύση ονομάζεται χρωμόσωμα. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων. Κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει μια μεταβλητή της συνάρτησης και μπορεί να παρασταθεί από μια σειρά δυαδικών ψηφίων. Αν έχουμε την συνάρτηση $f(x,y,z,w)$, τότε μια υποψήφια λύση είναι της μορφής [x y z w] ή αν παρασταθεί με δυαδικά ψηφία, τότε είναι της μορφής [0010 | 0101 | 1101 | 0001].

Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πληθυσμού καλείται γενεά. Ο γενετικός αλγόριθμος παράγει καινούριες γενεές με ένα σύνολο από πράξεις, με την τάση αυτές να είναι «καλύτερες», δηλαδή να δίνουν μεγαλύτερη τιμή στην συνάρτηση. Σε αυτό το σημείο έγκειται η αντιστοιχία με την φυσική διαδικασία της «επιβίωσης του ισχυρότερου». Οι πράξεις αυτές που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω διαδικασία είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Ο μηχανισμός της επιλογής (selection) είναι η διαδικασία κατά την οποία επιλέγεται το κριτήριο με βάση το οποίο κάποια χρωμοσώματα επιλέγονται για τις επόμενες γενεές αφού θα συμμετέχουν στις πράξεις που έπονται της επιλογής. Είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία των γενετικών αλγορίθμων και θα γίνει

εκτενής αναφορά στους μηχανισμούς επιλογής που χρησιμοποιούνται στην παράγραφο 8.6.

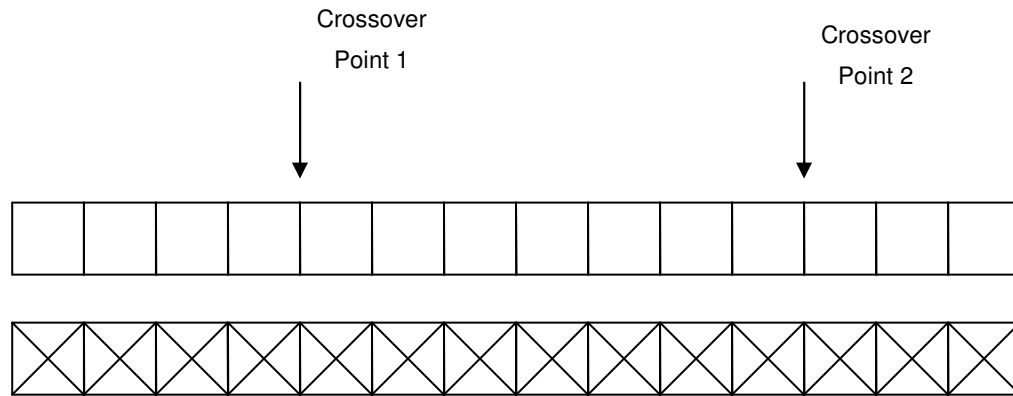
Η διασταύρωση (crossover) είναι η πράξη κατά την οποία δύο χρωμοσώματα ανταλλάσσουν τα γονίδια τους από κάποιο σημείο που επιλέγεται τυχαία και έπειτα. Η πράξη της διασταύρωσης απεικονίζεται στο σχήμα 8.1.



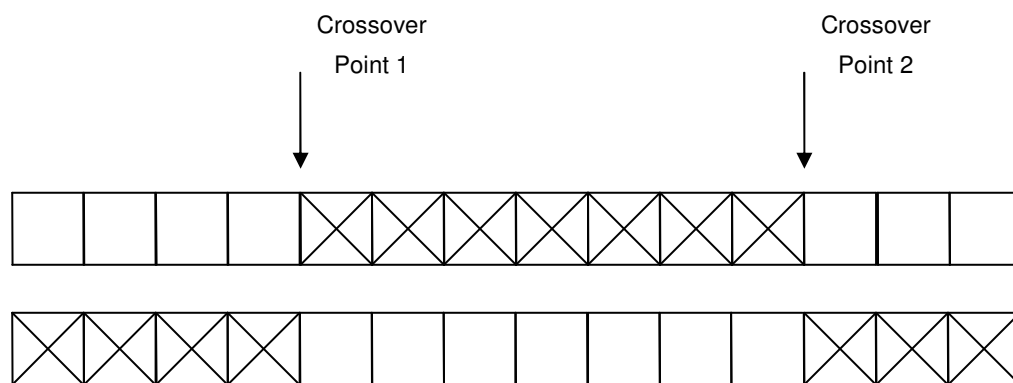
Σχήμα 8.: Η πράξη της διασταύρωσης

Στο σχήμα 8.1.α φαίνονται τα δύο χρωμοσώματα που θα διασταυρωθούν στο σημείο που έχει επιλεχθεί (crossover point), ενώ στο σχήμα 8.1.β φαίνονται τα χρωμοσώματα μετά την πράξη.

Η διασταύρωση μπορεί να γίνει σε περισσότερα από ένα σημεία. Το σχήμα 8.2 παρουσιάζει μια διασταύρωση δυο σημείων.



(α) Χρωμοσώματα πριν τη διασταύρωση

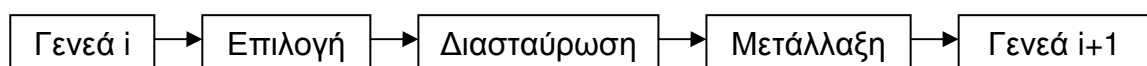


(β) Χρωμοσώματα μετά τη διασταύρωση

Σχήμα 8.2. Η πράξη της διασταύρωσης σε δύο σημεία

Η μετάλλαξη (mutation) τελείται μετά από την διασταύρωση και αλλάζει τυχαία κάποια από τα ψηφία ενός χρωμοσώματος. Για παράδειγμα, αν έχουμε το χρωμόσωμα : 0 1 0 0 1 0 1 0 και επιλέγεται τυχαία να γίνει μετάλλαξη στο τέταρτο και έβδομο γονίδιο, τότε το χρωμόσωμα μετά την μετάλλαξη γίνεται : 0 1 0 1 1 0 0 0. Η μετάλλαξη μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο του χρωμοσώματος με μια μικρή πιθανότητα.

Όταν τελειώνουν όλες οι πράξεις έχει δημιουργηθεί ένας νέος πληθυσμός από χρωμοσώματα που απαρτίζουν την επόμενη γενιά των γενετικών (σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.3. Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος σε ένα βήμα του

8.4 Η κωδικοποίηση των μεταβλητών

Στο παράδειγμα της προηγούμενης παραγράφου, χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των μεταβλητών της συνάρτησης δυαδικά ψηφία. Αυτός είναι και ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης των μεταβλητών, δηλαδή η αναπαράσταση με ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία. Όμως αυτή η κωδικοποίηση δεν είναι αποδοτική σε κάθε περίπτωση. Η επιλογή που αφορά τον τρόπο αναπαράστασης των μεταβλητών της συνάρτησης είναι μια πολύ κρίσιμη και λεπτή απόφαση στο κάθε πρόβλημα. Το βασικό πρόβλημα της χρήσης δυαδικών ψηφίων είναι ότι αν οι μεταβλητές του προβλήματος έχουν μεγάλο πεδίο τιμών, τότε απαιτούνται πολλά bits για την αναπαράστασή τους. Όταν αυξάνεται και ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων), τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται έχουν πάρα πολύ μεγάλο μήκος και έτσι ο χώρος αναζήτησης μέσα στον οποίο ο αλγόριθμος αναζητεί τη βέλτιστη λύση είναι τεράστιος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά η απόδοση των γενετικών αλγορίθμων. Το δεύτερο σημαντικό πρόβλημα που έχει εν γένει η δυαδική κωδικοποίηση είναι και η δυσκολία αναπαράστασης των πραγματικών αριθμών.

Έτσι λοιπόν, σε πολλά προβλήματα (συμπεριλαμβανομένης και της εργασίας αυτής) προτιμάται η floating-point αναπαράσταση. Σε μια τέτοια αναπαράσταση τα χρωμοσώματα έχουν την μορφή $[\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_n]$, όπου τα α_i είναι πραγματικοί αριθμοί και παίρνουν τιμές μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος $[\underline{\alpha}_i, \overline{\alpha}_i]$, όπου $\underline{\alpha}_i$ είναι το κάτω όριο και $\overline{\alpha}_i$ το άνω όριο. Οι πράξεις της επιλογής και της διασταύρωσης δεν επηρεάζονται από την αλλαγή στην κωδικοποίηση, όμως η πράξη της μετάλλαξης δεν καθορίζεται πλήρως από τον προαναφερθέν ορισμό. Έτσι λοιπόν, όταν ένα γονίδιο επιλεχθεί για μετάλλαξη, τότε η νέα του τιμή επιλέγεται τυχαία από το εύρος τιμών του.

8.5 Αντικειμενική συνάρτηση και συνάρτηση προσαρμογής (objective function και fitness function)

Αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος λέγεται η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει το πρόβλημα και είναι αυτή που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Ανάλογα με το πρόβλημα, η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφράζει οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κτλ. Συνάρτηση

προσαρμογής ενός γενετικού αλγόριθμου λέγεται μια συνάρτηση που προέρχεται από την αντικειμενική συνάρτηση μέσω κάποιας αντιστοιχίας – μετατροπής και χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο για την πράξη της επιλογής. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να πάρει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές, ενώ η συνάρτηση προσαρμογής παίρνει μόνο μη αρνητικές τιμές. Η μέθοδος με την οποία η συνάρτηση προσαρμογής χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής παρουσιάζεται στην παράγραφο 8.6, ενώ στην παρούσα παράγραφο θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αντιστοίχιση της αντικειμενικής συνάρτησης με την συνάρτηση προσαρμογής.

Κατ' αρχήν τα προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα προβλήματα μεγιστοποίησης και τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, όμως, χρησιμοποιούνται μόνο για την εύρεση του μέγιστου μιας συνάρτησης. Όταν έχουμε, λοιπόν, ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση $g(X)$, όπου X είναι το διάνυσμα των μεταβλητών, τότε για να επιλύσουμε αυτό το πρόβλημα με γενετικούς αλγόριθμους, αρκεί να μεγιστοποιήσουμε την συνάρτηση $f(X) = -g(X)$.

Έστω ότι έχουμε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης. Για να μετατραπεί η αντικειμενική συνάρτηση $g(X)$ σε συνάρτηση προσαρμογής (να παίρνει δηλαδή μόνο μη αρνητικές τιμές) χρησιμοποιείται η ακόλουθη μετατροπή:

$$f(X) = \begin{cases} g(X) + C_{\min}, & \text{αν } g(X) + C_{\min} > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (8.1)$$

Η ποσότητα C_{\min} μπορεί να είναι μια παράμετρος εισόδου ή η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της $g(X)$ για την τρέχουσα γενεά. Στην περίπτωση που έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης, τότε η αντιστοίχιση μεταξύ αντικειμενικής συνάρτησης και συνάρτησης προσαρμογής γίνεται ως εξής :

$$f(X) = \begin{cases} -g(X) + C_{\max}, & \text{αν } -g(X) + C_{\max} > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (8.2)$$

Και σε αυτήν την περίπτωση το C_{\max} μπορεί να είναι παράμετρος εισόδου αλλά πιο σωστό είναι να επιλέγεται η μέγιστη τιμή της $g(X)$ για κάθε γενιά.

8.6 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)

Η επιλογή αποτελεί την κρίσιμότερη πράξη των γενετικών αλγορίθμων, αφού αυτή καθορίζει το ποια χρωμοσώματα θα συμμετέχουν στην δημιουργία της επόμενης γενιάς. Έχουν αναπτυχθεί πολλοί μηχανισμοί επιλογής και όλοι έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: χρησιμοποιούν την συνάρτηση προσαρμογής για να επιλέξουν ποια χρωμοσώματα θα χρησιμοποιηθούν. Ένα χρωμόσωμα με μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγεί από ένα άλλο με μικρότερη τιμή.

Ίσως ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός της ρουλέτας, ο οποίος λειτουργεί ως εξής: αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση προσαρμογής, f_i , για όλα τα χρωμοσώματα μιας γενιάς (N χρωμοσώματα συνολικά). Έπειτα υπολογίζεται το άθροισμα $\sum_{i=1}^N f_i$ και για κάθε χρωμόσωμα βρίσκεται η πιθανότητα επιλογής του, p_i . Η πιθανότητα αυτή δίνεται από την σχέση :

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (8.3)$$

Αφού υπολογιστούν οι πιθανότητες p_i ακολουθεί η τυχαία παραγωγή N αριθμών μέσα στο διάστημα $[0,1]$. Ένα χρωμόσωμα επιλέγεται αν ο τυχαίος αριθμός που έχει παραχθεί γι' αυτό είναι μικρότερος από την πιθανότητα του χρωμοσώματος αυτού και μεγαλύτερη από την αμέσως μικρότερη πιθανότητα χρωμοσώματος. Ο αναμενόμενος αριθμός ενός χρωμοσώματος δίνεται από τη σχέση :

$$n_i = \frac{f_i}{\bar{f}} = N p_i \quad (8.4)$$

όπου

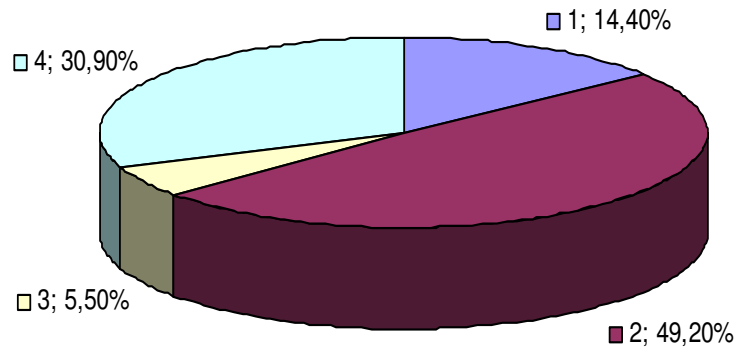
\bar{f} η μέση τιμή της συνάρτησης προσαρμογής.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα που δείχνει την λειτουργία του μηχανισμού. Έστω η συνάρτηση προσαρμογής μιας μεταβλητής $f(x) = x^2$ και έστω ότι έχουμε τα εξής τέσσερα χρωμοσώματα: [13],[24],[8] και [19] (δηλαδή $n=4$). Στον πίνακα 8.1 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 8.1 : Επιλογή με τη μέθοδο Τροχού Ρουλέτας				
x	$f(x) = x^2$	p_i	n_i	$n_{i, actual}$
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	6	4
Average	293	0.25	1	1
Max	576	0.49	1.97	2

Όπως βλέπουμε το χρωμόσωμα [24] επιλέγεται δυο φορές, τα [13] και [19] μια φορά και το [8] καμία φορά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι τα αναμενόμενα αφού οι πραγματικοί αριθμοί επιλογής των χρωμοσώματα αποτελούν στρογγυλοποιήσεις του αναμενόμενου αριθμού επιλογής για κάθε χρωμόσωμα. Το σχήμα 8.4 δείχνει την κατανομή των πιθανοτήτων για τα 1^ο [13], 2^ο [24], 3^ο [8] και 4^ο [19] χρωμόσωμα, p_i . Επειδή η γέννηση ενός τυχαίου αριθμού για την επιλογή ενός χρωμοσώματος μοιάζει με τη ρίψη της μπίλιας στη ρουλέτα, η μέθοδος αυτή ονομάστηκε μέθοδος του τροχού της ρουλέτας.



Σχήμα 8.4. Κατανομή πιθανοτήτων επιλογής χρωμοσωμάτων

Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στην «ρουλέτα», τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να «πέσει η μπίλια στην περιοχή του» και να επιλεγθεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενιά.

Η μέθοδος της ρουλέτας είναι αυτή που χρησιμοποιείται εκτενέστερα, όπως και στην παρούσα εργασία, όμως αξίζει να γίνει μια αναφορά και στους υπόλοιπους μηχανισμούς οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί. Μια παραλλαγή της

μεθόδου της ρουλέτας είναι το ελιτιστικό μοντέλο (elitist model). Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος της ρουλέτας με τη διαφορά ότι ταυτόχρονα διατηρείται το καλύτερο (fittest) χρωμόσωμα από την προηγούμενη γενιά. Το μοντέλο της αναμενόμενης τιμής (expected value model), αντιστοιχεί σε κάθε χρωμόσωμα ένα αριθμό σύμφωνα με την εξίσωση 8.4, 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 δε μπορεί πλέον να συμμετέχει σε διαδικασία επιλογής. Το ελιτιστικό μοντέλο αναμενόμενης τιμής είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μοντέλων. Όλα τα παραπάνω μοντέλα προτάθηκαν από τον De Jong το 1975. Το 1985 ο Baker πρότεινε μια μέθοδο επιλογής γνωστή ως sorted selection model. Σε αυτή την 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 γενιά. Για τα υπόλοιπα χρωμοσώματα ο αριθμός συμμετοχής τους στην επόμενη γενιά προκύπτει γραμμικά. Τέλος, εκτός από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα υπάρχουν και πολλές άλλες, αλλά η αναφορά τους είναι έξω από τον σκοπό αυτής της εργασίας.

8.7 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που παίρνουν μέρος στις πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης επηρεάζουν τις πιθανότητες διασταύρωσης, p_c και μετάλλαξης, p_m . Όταν έχουμε ένα πλήθος 40 χρωμοσωμάτων και η πιθανότητα διασταύρωσης είναι 50%, τότε είναι αναμενόμενο να έχουμε 20 χρωμοσώματα που θα λάβουν μέρος στις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης.

Ο καθορισμός των πιθανοτήτων αυτών ποικίλει ανάλογα με το πρόβλημα. Η βιβλιογραφία δίνει κάποιες ενδεικτικές τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται και στην εργασία αυτή :

- για μεγάλους πληθυσμούς (50 – 100) : $p_c=60\%$ και $p_m=0.1\%$
- για μικρούς πληθυσμούς (10 – 50) : $p_c=90\%$ και $p_m=1\%$

8.8 Χειρισμός περιορισμών

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης συνήθως υπόκεινται σε μια σειρά από περιορισμούς (constraints). Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τις μεταβλητές του

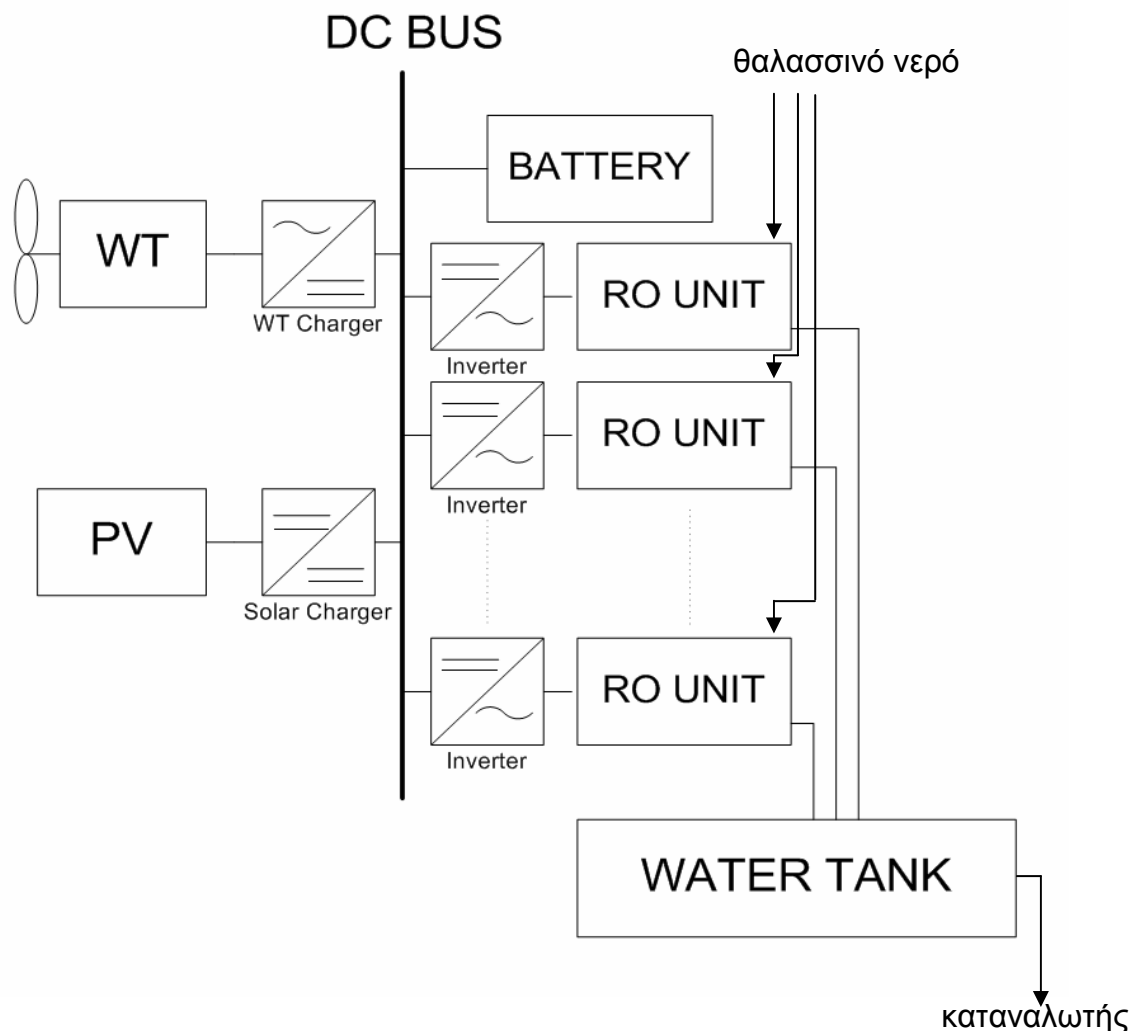
προβλήματος και έχουν να κάνουν, συνήθως, με το πεδίο τιμών των μεταβλητών (π.χ. τιμές που έχουν φυσική σημασία), αλλά και σε εξαρτήσεις ανάμεσα στις μεταβλητές, εξαρτήσεις των μεταβλητών με τα δεδομένα εισόδου κλπ. Ο βασικός γενετικός αλγόριθμος δεν λαμβάνει υπ' όψιν τέτοιους περιορισμούς, με αποτέλεσμα, κατά την εφαρμογή του να δημιουργούνται λύσεις (χρωμοσώματα) που να παραβιάζουν αυτούς τους περιορισμούς. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη ανάπτυξης μηχανισμών χειρισμού των περιορισμών (ουσιαστικά χειρισμού των παραγόμενων λύσεων που τους αντιβαίνουν).

Πολλοί μηχανισμοί διαχείρισης περιορισμών χρησιμοποιούν την λεγόμενη penalty function, η οποία λειτουργεί ως εξής: ο αλγόριθμος τρέχει κανονικά και λύνει το πρόβλημα χωρίς να λαμβάνει υπ' όψιν τους περιορισμούς. Όταν κατά την διαδικασία προκύπτουν χρωμοσώματα που παραβιάζουν τους περιορισμούς, τότε η πιθανότητα των χρωμοσωμάτων αυτών να επιλεγθούν κατά την πράξη της επιλογής μειώνεται. Αυτό γίνεται προσθέτοντας στην συνάρτηση προσαρμογής μια συνάρτηση penalty που μειώνει την τιμή προσαρμογής των χρωμοσωμάτων αυτών. Υπάρχουν διάφορες συναρτήσεις penalty, με βασική κατηγοριοποίηση το αν η συνάρτηση είναι μια σταθερά (το penalty είναι συγκεκριμένο για κάθε χρωμόσωμα που παραβιάζει τους περιορισμούς) ή εξαρτάται από το κατά πόσο το εκάστοτε χρωμόσωμα παραβιάζει τους περιορισμούς (όσο περισσότερο τους παραβιάζει, τόσο μεγαλύτερο και το penalty).

9. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

9.1 Εισαγωγή

Όπως έχει προαναφερθεί, το σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι ένα υβριδικό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανεμογεννητριών) που τροφοδοτεί μονάδες αφαλάτωσης με σκοπό να καλυφθεί μια συγκεκριμένη ζήτηση σε νερό. Το σύστημα φαίνεται στο σχήμα 9.1. Τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια.



Σχήμα 9.1. Το σύστημα της εργασίας

Η διαστασιολόγηση που γίνεται σε αυτό το σύστημα έχει άμεση σχέση με τις καιρικές συνθήκες, την ζήτηση σε νερό και το κόστος της εγκατάστασης. Έτσι έχει

αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος προσομοίωσης που χρησιμοποιείται κατά την διαστασιολόγηση, ο οποίος αναλύεται παρακάτω.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1, για κάθε μονάδα αφαλάτωσης του συστήματος (ο αριθμός τους εξαρτάται από την ζήτηση σε νερό) αντιστοιχεί και ένας μετατροπέας dc/ac. Αυτό γίνεται λόγω της δυσκολίας των μετατροπέων να συνδεθούν παράλληλα, ώστε να παράγουν αθροιστικά αρκετή ισχύ σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει η ισχύς εξόδου του μετατροπέα να είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που καταναλώνει η μονάδα αφαλάτωσης. Τέλος, ο φορτιστής των ανεμογεννητριών φαίνεται στο σχήμα, αλλά, όπως έχει προαναφερθεί, βρίσκεται ενσωματωμένος στις ανεμογεννήτριες, οπότε δεν μοντελοποιείται.

9.2 Τάση λειτουργίας του συστήματος

Η επιλογή της τάσης λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως οι μέγιστες τάσεις εξόδου των ανεμογεννητριών και των φ/β πλαισίων, η επιτρεπτή τάση λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης αλλά και τα χαρακτηριστικά των διαφόρων επιμέρους συσκευών (ρυθμιστές τάσης, μετατροπείς κλπ.)

Στην παρούσα εργασία, έχει επιλεγεί ως τάση λειτουργίας του συστήματος, V_b , η τάση εξόδου του φορτιστή της ανεμογεννήτριας. Γνωρίζοντας την μέγιστη τάση εξόδου των φωτοβολταϊκών πλαισίων V_{pv}^m μπορούμε να βρούμε πόσα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να συνδεθούν σε σειρά :

$$n_{pv}^s = \frac{V_{ch_{in}}}{V_{pv}^m} \quad (9.1)$$

όπου:

$V_{ch_{in}}$ η τάση εισόδου του φορτιστή.

Επίσης αν V_{bn} είναι η ονομαστική τάση ενός συσσωρευτή, τότε ο αριθμός των μπαταριών που πρέπει να συνδεθούν σε σειρά είναι :

$$n_b^s = \frac{V_b}{V_{bn}} \quad (9.2)$$

9.3 Αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης λειτουργίας του συστήματος χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την λειτουργία του συστήματος όσον αφορά την ισχύ και το νερό που παράγονται, αποθηκεύονται και καταναλώνονται ανά ώρα στην διάρκεια ενός έτους. Ο αλγόριθμος είναι ενσωματωμένος στον γενετικό αλγόριθμο και χρησιμοποιείται για να κρίνει αν μια λύση που παράχθηκε από τον γενετικό αλγόριθμο είναι αποδεκτή ή όχι. Ουσιαστικά κρίνει αν παράγεται αρκετή ενέργεια για την αφαλάτωση και αν παράγεται αρκετό νερό ώστε να καλύψει την ζήτηση.

Ο αλγόριθμος έχει σαν εισόδους τα χαρακτηριστικά μεγέθη όλων των συσκευών που απαρτίζουν το σύστημα (φωτοβολταϊκά πλαίσια – ανεμογεννήτριες – φορτιστές – μπαταρίες – μονάδες αφαλάτωσης –μετατροπείς dc/ac), την λύση που προτείνει ο γενετικός αλγόριθμος (το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των ανεμογεννητριών, των φορτιστών των μπαταριών και το μέγεθος της δεξαμενής) και τα μετεωρολογικά στοιχεία της υπό μελέτη περιοχής.

Αρχικά υπολογίζει την παραγόμενη ισχύ, P_{re} , από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φ/β πλαίσια και ανεμογεννήτριες), την οποία τροφοδοτούν στο υπόλοιπο σύστημα (μπαταρίες και μονάδες αφαλάτωσης):

$$P_{re} = n_s P_{pv} + P_{wt} \quad (9.3)$$

όπου :

n_s η απόδοση των solar chargers (%),

P_{pv} η συνολική ισχύς των φ/β πλαισίων (W) και

P_{wt} η συνολική ισχύς των ανεμογεννητριών (W).

Αν συμβολίσουμε με P_L την ισχύ εισόδου του μετατροπέα dc/ac, τότε :

$$P_L = \frac{P_{RO}}{n_i} \quad (9.4)$$

όπου :

P_{RO} η κατανάλωση της μονάδας αφαλάτωσης (W) και

n_i ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα dc/ac (%).

Τέλος συμβολίζουμε ως $W_{\text{απ}}$ την ποσότητα του νερού που απαιτείται και W_{RO} την ποσότητα νερού που παράγεται αν λειτουργήσει η μονάδα αφαλάτωσης και P_f την ισχύ που απαιτείται για flushing της μονάδας αφαλάτωσης.

Η βασική ιδέα της προσομοίωσης είναι ως εξής :

- αν $P_{re} = P_L$ και $W_{RO} = W_{\text{απ}}$ τότε η κατάσταση της μπαταρίας και της δεξαμενής δεν μεταβάλλονται.
- αν $P_{re} = P_L$ και $W_{RO} > W_{\text{απ}}$ τότε η κατάσταση της μπαταρίας δεν μεταβάλλεται αλλά το υπόλοιπο νερό που δεν καταναλώνεται ($W_{RO}-W_{\text{απ}}$) αποθηκεύεται στην δεξαμενή, μέχρι αυτή να γεμίσει.
- αν $P_{re} = P_L$ και $W_{RO} < W_{\text{απ}}$ τότε η κατάσταση της μπαταρίας δεν μεταβάλλεται και το έλλειμμα σε νερό προσπαθεί να το καλύψει η δεξαμενή. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει.
- αν $P_{re} > P_L$ και $W_{RO} = W_{\text{απ}}$ τότε η μπαταρία φορτίζεται με την περίσσεια ισχύος που δεν καταναλώθηκε, $P_{re}-P_L$, ενώ η δεξαμενή δεν μεταβάλλεται.
- αν $P_{re} > P_L$ και $W_{RO} > W_{\text{απ}}$ τότε η μπαταρία φορτίζεται με την περίσσεια ισχύος που δεν καταναλώθηκε, $P_{re}-P_L$, μέχρι να φορτιστεί πλήρως ενώ η δεξαμενή αποθηκεύει το υπόλοιπο του νερού, $W_{RO}-W_{\text{απ}}$, μέχρι να γεμίσει.
- αν $P_{re} > P_L$ και $W_{RO} < W_{\text{απ}}$ τότε η μπαταρία φορτίζεται με την περίσσεια ισχύος που δεν καταναλώθηκε, $P_{re}-P_L$, ενώ η δεξαμενή προσπαθεί να καλύψει το έλλειμμα σε νερό. Αν αυτό δεν είναι εφικτό ο αλγόριθμος αποτυγχάνει.
- αν $P_{re} < P_L$ και οι μπαταρίες μπορούν να τροφοδοτήσουν τις μονάδες αφαλάτωσης τότε η μπαταρία εκφορτίζεται κατά P_L-P_{re} και :
 - αν $W_{RO} = W_{\text{απ}}$ τότε η ποσότητα νερού της δεξαμενής δεν μεταβάλλεται.
 - αν $W_{RO} > W_{\text{απ}}$ τότε η δεξαμενή αποθηκεύει το επιπλέον νερό μέχρι να γεμίσει.
 - αν $W_{RO} < W_{\text{απ}}$ τότε η δεξαμενή προσπαθεί να καλύψει το υπόλοιπο απαιτούμενο νερό. Αν δεν μπορεί τότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει.
- αν $P_{re} < P_L$ και οι μπαταρίες δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν την αφαλάτωση τότε η αφαλάτωση δεν λειτουργεί και :
 - αν η δεξαμενή μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε νερό από μόνη της τότε η μπαταρία φορτίζεται από την P_{re} και αν μπορεί να τροφοδοτήσει το

flushing τότε αυτό γίνεται και η μπαταρία εκφορτίζεται κατά P_{fl} , διαφορετικά δεν γίνεται flushing, το οποίο θα γίνει όποτε υπάρχει η δυνατότητα.

- αν η δεξαμενή δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε νερό από μόνη της τότε ο αλγόριθμος αποτυγχάνει.

Η παραπάνω περιγραφή του αλγορίθμου είναι για ένα βήμα του, δηλαδή για μία ώρα (time-step αλγορίθμου). Το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται για έναν χρόνο ($364 \cdot 24 = 8760$ ώρες) και αν δεν αποτύχει τότε η προσομοίωση θεωρείται επιτυχής.

Όσον αφορά την κλίση των φ/β πλαισίων υπάρχουν δύο επιλογές. Είτε να χρησιμοποιηθεί μια κλίση για όλο τον χρόνο, είτε να χρησιμοποιηθούν δύο κλίσεις ανάλογα με την εποχή. Έτσι υπάρχουν δύο εκδόσεις του αλγορίθμου, ο SIM1 που προσομοιώνει το σύστημα για μια κλίση θ για όλο τον χρόνο και ο SIM2 που προσομοιώνει το σύστημα για δύο κλίσεις θ_1 και θ_2 . Η πρώτη κλίση αφορά την περίοδο από τον Ιανουάριο μέχρι τα μέσα του Απρίλη και από τα μέσα Οκτωβρίου μέχρι και τον Δεκέμβρη, ενώ η δεύτερη το υπόλοιπο χρονικό διάστημα. Σε αριθμούς ημερών του χρόνου αυτό μεταφράζεται ως εξής :

- για την θ_1 : 1 – 104 και 290 – 365.
- για την θ_2 : 105 – 289.

Στο σχήμα 9.2 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου SIM1($N_1, N_2, N_3, h, \theta, N_6, N_7$) και στο σχήμα 9.3 το αντίστοιχο διάγραμμα για τον αλγόριθμο SIM2($N_1, N_2, N_3, h, \theta_1, \theta_2, N_6, N_7$).

Στους αλγόριθμους χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συμβολισμοί :

- N_1 : ο αριθμός των φ/β πλαισίων (#),
- N_2 : ο αριθμός των ανεμογεννητριών (#),
- N_3 : ο αριθμός των μπαταριών (#),
- h : το ύψος του πυλώνα των ανεμογεννητριών (m),
- θ : η κλίση των φ/β πλαισίων στον SIM1 ($^\circ$),
- θ_1 : η πρώτη κλίση των φ/β πλαισίων στον SIM2 ($^\circ$),
- θ_2 : η δεύτερη κλίση των φ/β πλαισίων στον SIM2 ($^\circ$),
- N_6 : το μέγεθος της δεξαμενής (lt),

N_7 : ο αριθμός των μονάδων αφαλάτωσης (#),

$P_{re}^i(t)$: η ισχύς που παράγει ένα φ/β πλαίσιο με κλίση θ κατά την ώρα t την i -οστή ημέρα του έτους (W),

$t_1^{i,\theta}$: η ώρα της i -οστής ημέρας κατά την οποία αρχίζει η ηλιακή ακτινοβολία να είναι διαθέσιμη για κλίση θ (h),

$t_2^{i,\theta}$: η ώρα από την οποία σταματάει να είναι διαθέσιμη η ηλιακή ακτινοβολία για κλίση θ (h),

$P_{wt}^{i,h}(t)$: η ισχύς που παράγει μία ανεμογεννήτρια με ύψος πυλώνα h κατά την ώρα t την i -οστή ημέρα του έτους (W),

$C^i(t)$: η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών κατά την ώρα t για την i -οστή ημέρα (Ah),

DOD: το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών (%),

P_{RO} : η ισχύς λειτουργίας μίας μονάδας αφαλάτωσης (W) και

$W^i(t)$: η ποσότητα νερού που υπάρχει στην δεξαμενή κατά την ώρα t της i -οστής ημέρα (lt).

Έτσι η συνολική ισχύς των ΑΠΕ για την ώρα t την ημέρα i είναι :

$$P_{re}^i(t) = n_s N_1 P_{pv}^{i,\theta}(t) + N_2 P_{wt}^{i,h}(t) \quad (9.5)$$

Για τις μπαταρίες ισχύει :

$$C^i(t) = C^i(t-1) + n_b \frac{P_b^i(t)}{V_b} \Delta t \quad (9.6)$$

Η αρχική συνολική χωρητικότητα των μπαταριών, $C^0(0)$, υπολογίζεται ως εξής:

$$C^0(0) = \left(1 - \frac{DOD}{2}\right) C_n \quad (9.7)$$

όπου:

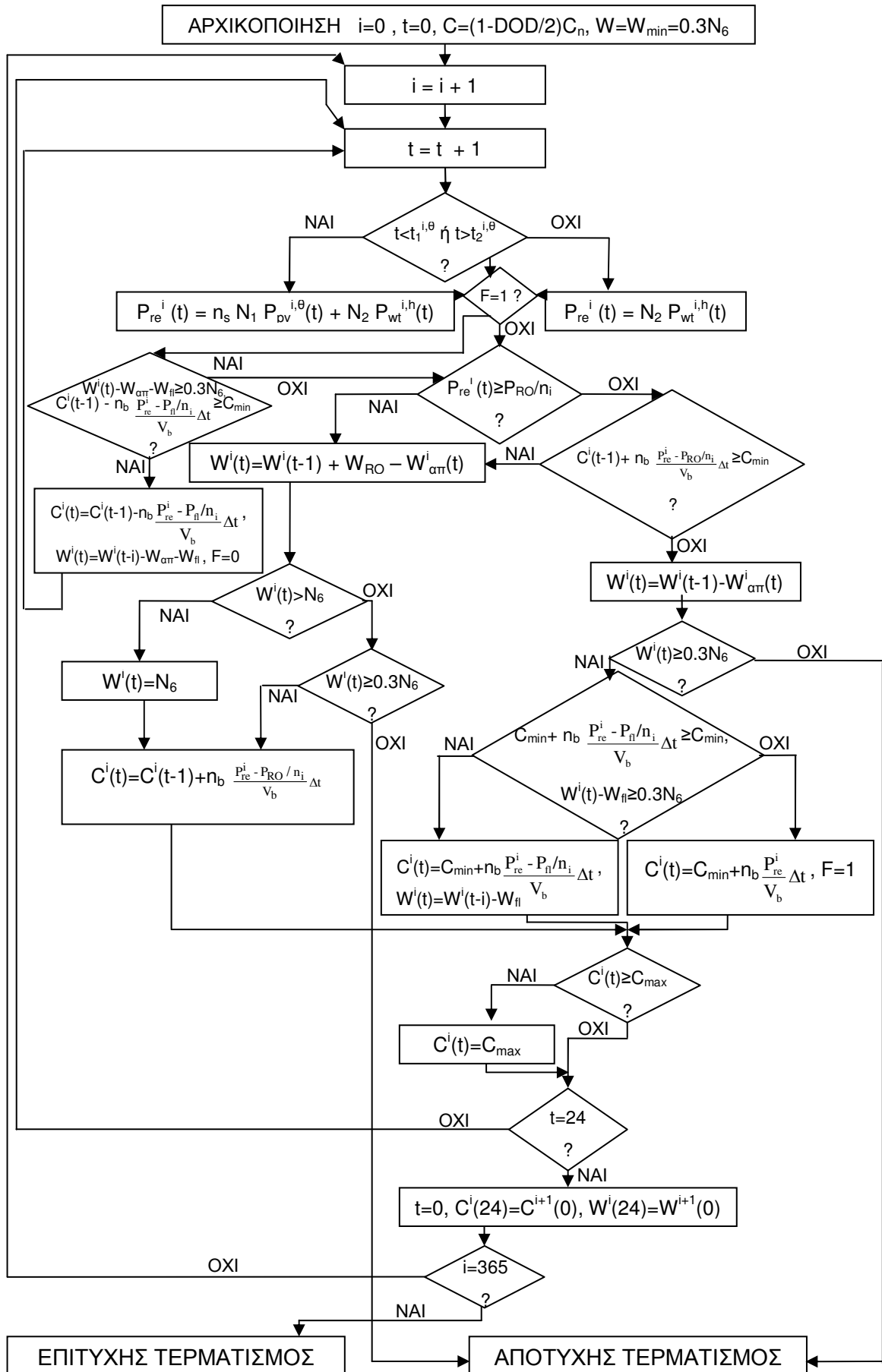
C_n η χωρητικότητα της μπαταρίας του συστήματος (Ah).

Επίσης ισχύει η σχέση :

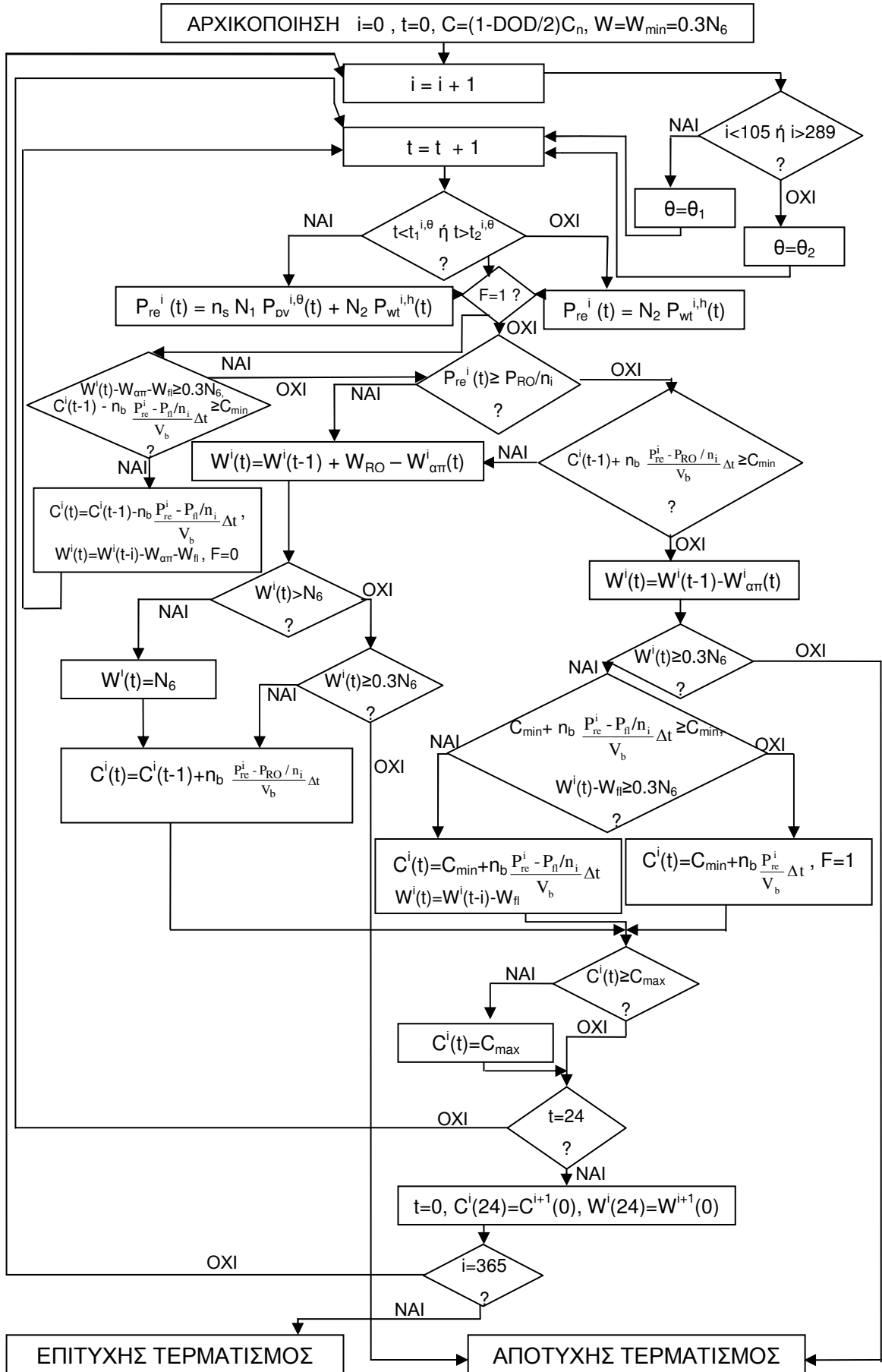
$$C^i(24) = C^{i+1}(0) \quad (9.8)$$

Οι συσσωρευτές δεν επιτρέπεται να φορτίζονται ή να εκφορτίζονται με ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης, αντίστοιχα, μεγαλύτερο του ενός πέμπτου της χωρητικότητάς τους. Έτσι σε κάθε φόρτιση ή εκφόρτιση των συσσωρευτών γίνεται ο απαραίτητος έλεγχος ούτως ώστε να μην ξεπεραστεί αυτή η τιμή. Στο τέλος της προσομοίωσης πρέπει η μπαταρία είναι περισσότερο ή εξίσου φορτισμένη από την αρχή της προσομοίωσης, ούτως ώστε να εξασφαλισθεί ότι παρότι η προσομοίωση γίνεται για έναν χρόνο, το σύστημα θα λειτουργήσει κανονικά για τα είκοσι χρόνια που θεωρείται ότι είναι ο χρόνος ζωής του συστήματος.

Τέλος, θεωρείται ότι η δεξαμενή αρχικά έχει την ελάχιστη δυνατή ποσότητα νερού, η οποία είναι το 30% της χωρητικότητας της.



Σχήμα 9.2. Ο αλγόριθμος SIM1(N1,N2,N3,h,θ,N6,N7)



Σχήμα 9.3. Ο αλγόριθμος SIM2($N_1, N_2, N_3, h, \theta_1, \theta_2, N_6, N_7$)

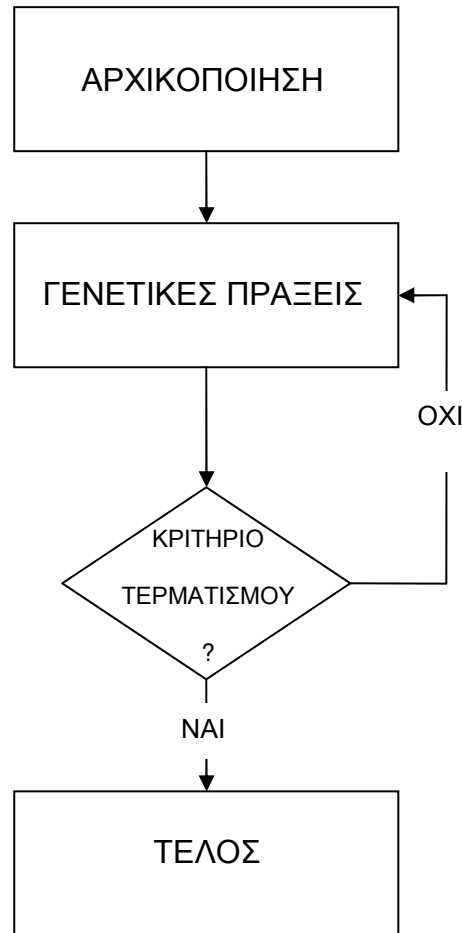
10. ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

10.1 Περιγραφή της λύσης του προβλήματος

Το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός συστήματος σαν αυτό που εικονίζεται στο σχήμα 9.1, με σκοπό την κάλυψη μιας ζήτησης σε νερό με το ελάχιστο οικονομικό κόστος για είκοσι χρόνια. Η διαστασιολόγηση τελείται αναφορικά με το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των ανεμογεννητριών, των μπαταριών, των φορτιστών των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των μονάδων αφαλάτωσης, καθώς και για το μέγεθος (χωρητικότητα) της δεξαμενής.

Σαν είσοδο του αλγόριθμου δίνονται οι τύποι με τα χαρακτηριστικά μεγέθη όλων των στοιχείων του συστήματος (φ/β πλαίσια, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες, φορτιστές, μετατροπείς και μονάδες αφαλάτωσης) καθώς και μια σειρά από παραμέτρους των γενετικών πράξεων. Αν δοθούν στην είσοδο πολλοί τύποι στοιχείων, τότε ο αλγόριθμος εκτελείται για κάθε δυνατό συνδυασμό τους και θα βρει την οικονομικότερη λύση για κάθε ξεχωριστή περίπτωση. Στο τέλος επιλέγεται η βέλτιστη (από όλες τις δυνατές) λύση.

Όπως φαίνεται συνοπτικά στο σχήμα 10.1, ο αλγόριθμος αρχικά χρησιμοποιεί μια ρουτίνα αρχικοποίησης και στην συνέχεια τελούνται οι γενετικές πράξεις μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού.



Σχήμα 10.1. Ο γενετικός αλγόριθμος

10.2 Αρχικοποίηση αλγορίθμου

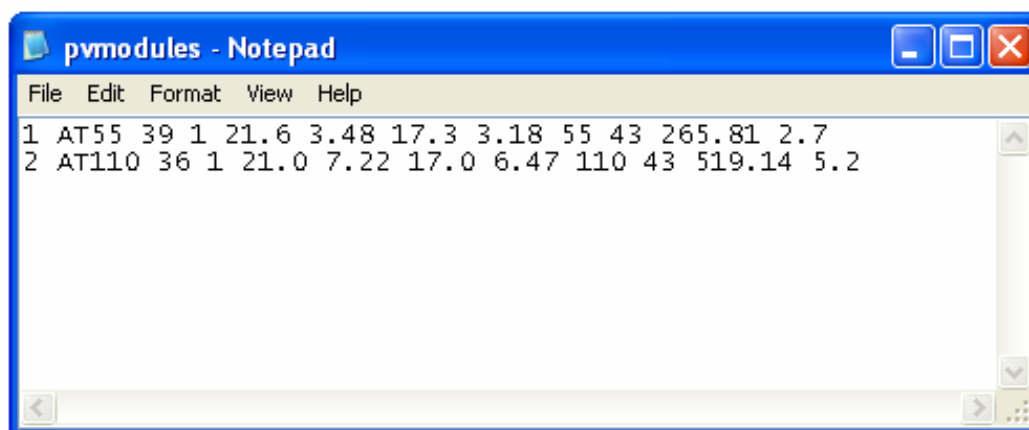
Το πρώτο βήμα του αλγορίθμου είναι η αρχικοποίηση του. Αυτή περιλαμβάνει το διάβασμα όλων των στοιχείων εισόδου και τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις γενετικές πράξεις.

Οι είσοδοι διαβάζονται από αρχεία και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου και η δεύτερη τις παραμέτρους του συστήματος και της προσομοίωσής. Οι παράμετροι του συστήματος αναφέρονται στα χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων, των ανεμογεννητριών, των μπαταριών, των φορτιστών, των μετατροπέων και των μονάδων αφαλάτωσης καθώς και με την ζήτηση του νερού, το ετήσιο προφίλ ακτινοβολίας, του ανέμου και της θερμοκρασίας και τον συντελεστή ανάκλασης της περιοχής υπό μελέτη. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση όλων των εισόδων:

A. Φ/β πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο `pvmodules.txt` στον φάκελο `INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES` (σχήμα 10.2). Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- ο αριθμός των φ/β στοιχείων που περιλαμβάνει σε σειρά,
- ο αριθμός των φ/β στοιχείων που περιλαμβάνει σε παραλληλία,
- η τάση βραχυκύκλωσης (V),
- το ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης (A),
- η τάση στο σημείο MPP (V),
- το ρεύμα στο σημείο MPP (A),
- η ισχύς αιχμής (V),
- η τιμή του NCOT (°C),
- το κόστος εγκατάστασης (€) και
- το κόστος συντήρησης (€).



Σχήμα 10.2. Το αρχείο `pvmodules.txt` με τα είδη των φ/β πλαισίων

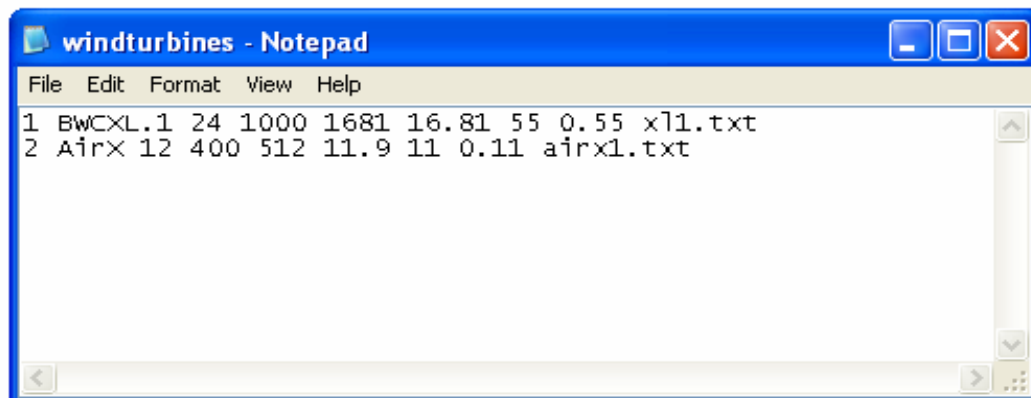
B. Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο `windturbines.txt` στον φάκελο `INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES` (σχήμα 10.3).

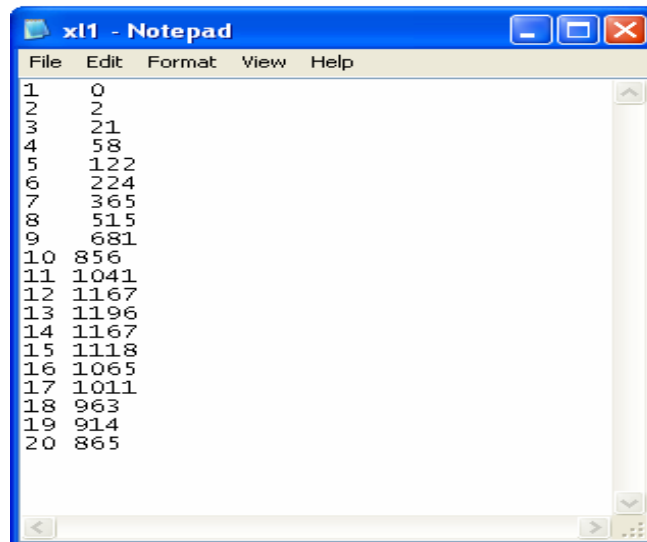
Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- η τάση εξόδου (V),
- η ονομαστική ισχύς (W),
- το κόστος εγκατάστασης (€) ,
- το κόστος συντήρησης (€),
- το κόστος εγκατάστασης του ιστού ανά μέτρο (€),
- το κόστος συντήρησης του ιστού ανά μέτρο (€) και
- το όνομα του αρχείου που έχει την καμπύλη ισχύος.

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει δύο στήλες. Η μία αντιπροσωπεύει την στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου (m/s) και η άλλη την στιγμιαία ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας και βρίσκεται στον φάκελο INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES\WT POWER CURVES (σχήμα 10.4).



Σχήμα 10.3. Το αρχείο windturbines.txt με τους τύπος ανεμογεννητριών

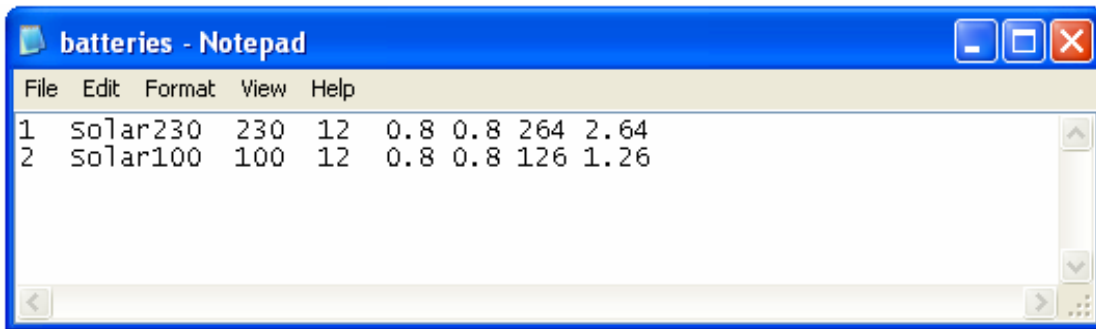


Σχήμα 10.4. Το αρχείο xl1.txt με την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας BCXL.1

Γ. Μπαταρίες

Οι μπαταρίες με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο batteries.txt στον φάκελο INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES (σχήμα 10.5). Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- η χωρητικότητα (Ah),
- η τάση (V),
- το βάθος εκφόρτισης,
- ο βαθμός απόδοσης φόρτισης,
- το κόστος εγκατάστασης (€) και
- το κόστος συντήρησης (€).

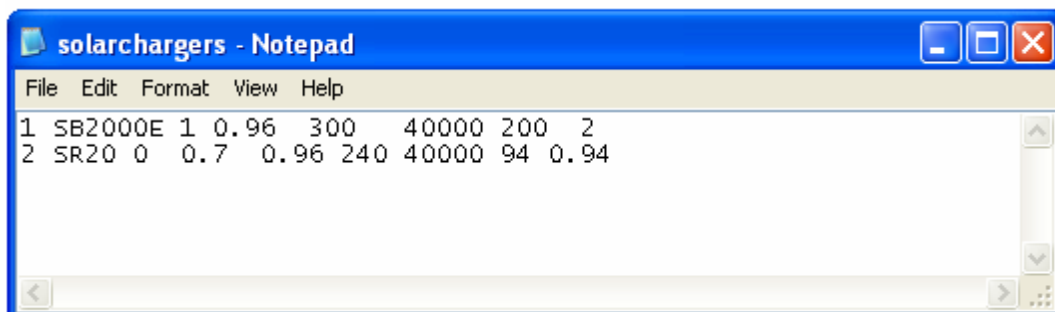


Σχήμα 10.5. Το αρχείο *batteries.txt* με τους τύπος μπαταριών

Δ. Φορτιστές

Οι φορτιστές με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο *solarchargers.txt* στον φάκελο *INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES* (σχήμα 10.6). Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- ο τύπος (με ή χωρίς MPPT – 1 ή 0 αντίστοιχα),
- ο βαθμός απόδοσης (αν είναι με MPPT έχουν μια απόδοση, αλλιώς δύο),
- η μέγιστη ισχύς (W),
- ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (h),
- το κόστος εγκατάστασης (€) και
- το κόστος συντήρησης (€).

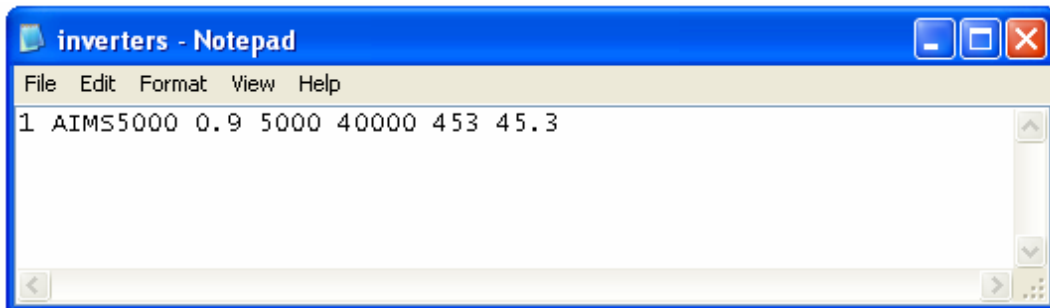


Σχήμα 10.6. Το αρχείο *solarchargers.txt* με τους τύπος φορτιστών

Ε. Μετατροπείς DC/AC

Οι μετατροπείς (DC/AC) με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο inverters.txt στον φάκελο INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES (σχήμα 10.7). Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- ο βαθμός απόδοσης,
- η μέγιστη ισχύς (W),
- ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (h),
- το κόστος εγκατάστασης (€) και
- το κόστος συντήρησης (€).



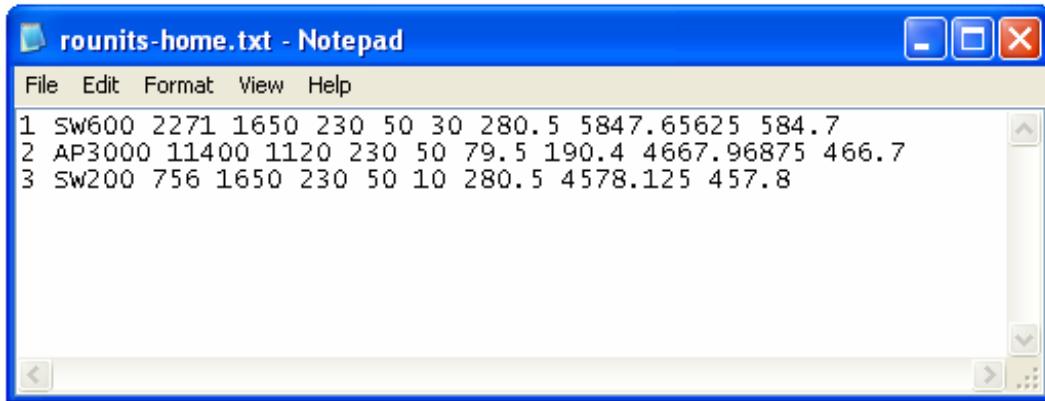
Σχήμα 10.7. Το αρχείο inverters.txt με τους τύπος μετατροπέων

ΣΤ. Μονάδες αφαλάτωσης

Οι μονάδες αφαλάτωσης με τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους βρίσκονται στο αρχείο rounits.txt στον φάκελο INPUT_DATA\SYSTEM DEVICES (σχήμα 10.8). Από το αρχείο αυτό επιλέγεται το συγκεκριμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί κατά την βελτιστοποίηση και διαβάζονται τα χαρακτηριστικά του, τα οποία κατά σειρά είναι :

- το όνομα,
- η ποσότητα παραγόμενου νερού (lt),
- η ισχύς λειτουργίας (W),
- η τάση λειτουργίας (V),
- η συχνότητα λειτουργίας (hz),
- το νερό που καταναλώνει το flushing (lt),

- η ισχύς που καταναλώνει το flushing (W),
- το κόστος εγκατάστασης (€) και
- το κόστος συντήρησης (€).



```
rounits-home.txt - Notepad
File Edit Format View Help
1 SW600 2271 1650 230 50 30 280.5 5847.65625 584.7
2 AP3000 11400 1120 230 50 79.5 190.4 4667.96875 466.7
3 SW200 756 1650 230 50 10 280.5 4578.125 457.8
```

Σχήμα 10.8. Το αρχείο rounits.txt με τους τύπος μονάδων αφαλάτωσης

Z. Μετεωρολογικά δεδομένα

Η ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου δίνονται στα αρχεία που βρίσκονται στους φακέλους INPUT_DATA\RADIATION DATA, INPUT_DATA\TEMPERATURE DATA και INPUT_DATA\WIND DATA αντίστοιχα. Το αρχείο με την ακτινοβολία περιέχει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου μελέτης και τον συντελεστή ανάκλασης του εδάφους, ενώ το αρχείο με την ταχύτητα του ανέμου περιέχει το ύψος μέτρησης των δεδομένων καθώς και τον εκθέτη του εκθετικού νόμου ανάλογα με το έδαφος του τόπου.

Αυτά τα μεγέθη δίνονται είτε σε μέσες μηνιαίες τιμές (12 τιμές) είτε σε μέσες ημερήσιες τιμές (365 τιμές). Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται αναγωγή σε μέσες ωριαίες τιμές (8760 τιμές) γιατί ο αλγόριθμος προσομοίωσης έχει βήμα μιας ώρας.

H. Ζήτηση νερού

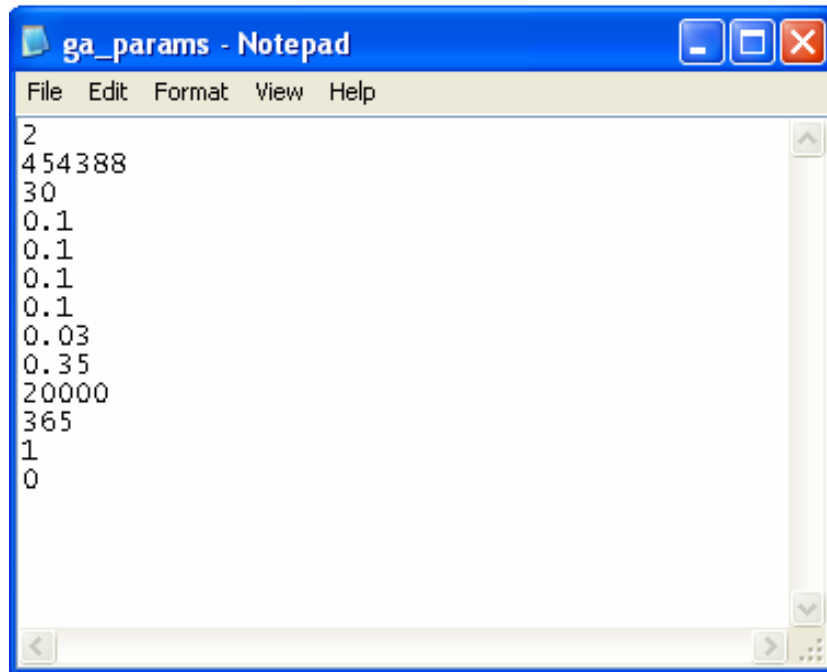
Η ζήτηση του νερού βρίσκεται στα αρχεία του φακέλου INPUT_DATA\WATER DEMANDS και δίνεται είτε σε μέσες ωριαίες είτε σε μέσες μηνιαίες τιμές.

Μετά το διάβασμα όλων των παραπάνω εισόδων ακολουθεί ο υπολογισμός των ισχύων που παράγει ένα φ/β πλαίσιο και μία ανεμογεννήτρια κάθε ώρα για ένα έτος για όλες τις δυνατές κλίσεις (θ) των πλαισίων και όλα τα δυνατά ύψη (h) πυλώνων. Ισχύει ότι $0 \leq \theta \leq 90$ και $8 \leq h \leq 15$.

Θ. Παράμετροι γενετικών

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία των παραμέτρων εισόδου είναι αυτή που αφορά τις παραμέτρους των γενετικών πράξεων. Όλες οι παράμετροι διαβάζονται από το αρχείο `ga_params.txt` που βρίσκεται στον φάκελο `\INPUT_DATA` (σχήμα 10.9). Κατά σειρά είναι :

- το αν έχουμε μία ή δύο κλίσεις,
- το `rand seed`,
- το πλήθος 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,
- ο αριθμός των ημερών που διαρκεί η προσομοίωση,
- η ημέρα που ξεκινάει η προσομοίωση και
- επιλογή μοντέλου ηλιακής ακτινοβολίας (ισοτροπικό ή ανισοτροπικό – 1 ή 0 αντίστοιχα).



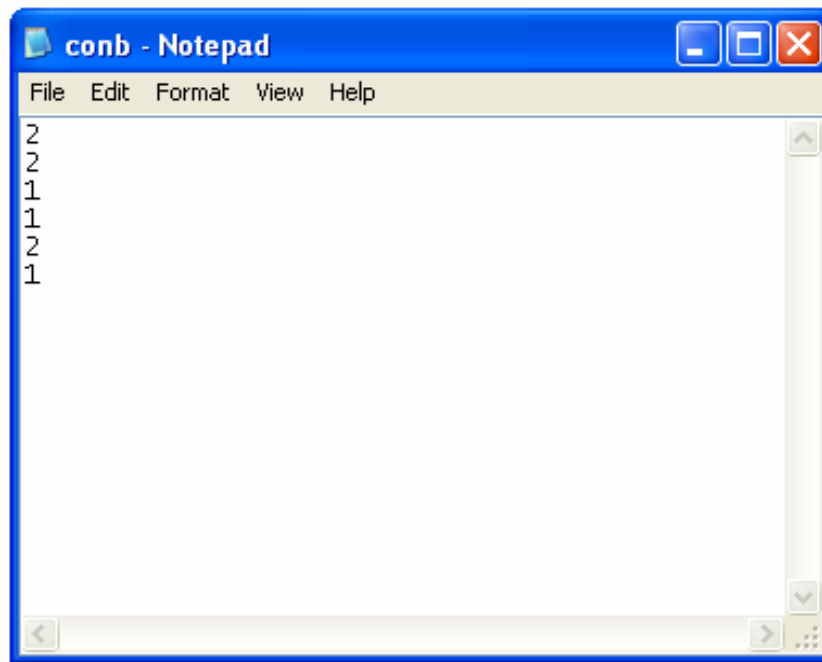
Σχήμα 10.9. Το αρχείο *ga_params.txt* με τις παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου.

I. Επιλογή τύπου στοιχείων

Η επιλογή του τύπου όλων των στοιχείων του συστήματος, όταν ο αλγόριθμος εκτελείται για ένα συνδυασμό στοιχείων γίνεται με το αρχείο *conb.txt* που είναι στο φάκελο *\INPUT_DATA* (σχήμα 10.10). Το αρχείο περιέχει έξι αριθμούς που ο καθένας αντιπροσωπεύει τον τύπο του κάθε στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, όταν διαβάζεται ο αριθμός 2 για τα φ/β πλαίσια, τότε χρησιμοποιείται ο δεύτερος τύπος φ/β πλαίσιο κατά αύξοντα αριθμό του αρχείο που περιέχει τα φ/β πλαίσια *rnmodules.txt*.

Κατά σειρά διαβάζονται :

- ο τύπος του φ/β πλαισίου,
- ο τύπος της ανεμογεννήτριας,
- ο τύπος του φορτιστή,
- ο τύπος του μετατροπέα,
- ο τύπος της μπαταρίας και
- ο τύπος της μονάδας αφαλάτωσης.

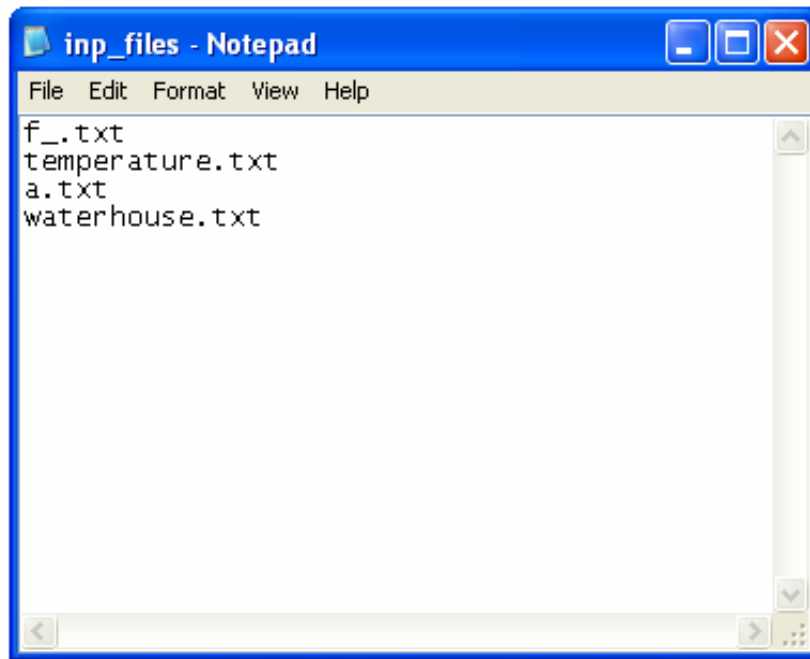


Σχήμα 10.10. Το αρχείο conb.txt με τους τύπους των στοιχείων

K. Επιλογή των αρχείων μετεωρολογικών δεδομένων και ζήτησης νερού

Η επιλογή των αρχείων μετεωρολογικών δεδομένων και ζήτησης νερού γίνεται από το αρχείο inp_files.txt που βρίσκεται στον φάκελο \INPUT_DATA (σχήμα 10.11). Κατά σειρά διαβάζονται :

- το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τα δεδομένα της ακτινοβολίας,
- το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τα δεδομένα της θερμοκρασίας,
- το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου και
- το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τα δεδομένα της ζήτησης νερού.



Σχήμα 10.11. Το αρχείο *inp_files.txt* με την επιλογή των δεδομένων

Όταν τελειώσει όλη αυτή η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί ο γενετικός αλγόριθμος.

10.3 Μοντελοποίηση του προβλήματος με τον γενετικό αλγόριθμο

Όπως έχει αναφερθεί, ο γενετικός αλγόριθμος καταλήγει στην οικονομικότερη λύση (ουσιαστικά ελαχιστοποιεί την συνάρτηση κόστους, που θα αναφερθεί παρακάτω) επιλέγοντας τις λύσεις από το σύνολο πιθανών λύσεων για τις οποίες τα γονίδια των χρωμοσωμάτων-λύσεων οδηγούν σε επιτυχή προσομοίωση.

Το σύνολο των παραμέτρων αποτελείται από το πλήθος των φ/β πλαισίων, των ανεμογεννητριών, των μπαταριών και των μονάδων αφαλάτωσης, καθώς και το ύψος του πυλώνα των ανεμογεννητριών, την κλίση των φ/β πλαισίων και την χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης νερού. Η μοντελοποίηση γίνεται για δύο περιπτώσεις :

- για μία σταθερή κλίση των φ/β πλαισίων κατά την διάρκεια του έτους και
- για δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων κατά την διάρκεια του έτους.

Στην πρώτη περίπτωση τα χρωμοσώματα του γενετικού έχουν την μορφή $c_1=[N_1|N_2|N_3|N_4|b|N_6|N_7]$ όπου :

- N_1 το πλήθος των φ/β πλαισίων,
- N_2 το πλήθος των ανεμογεννητριών,
- N_3 το πλήθος των μπαταριών,
- N_4 το ύψος του πυλώνα,
- b η κλίση των φ/β πλαισίων,
- N_6 το μέγεθος της δεξαμενής (σε m^3) και
- N_7 το πλήθος των μονάδων αφαλάτωσης.

Στην δεύτερη περίπτωση (αν έχουμε δηλαδή δύο κλίσεις) τα χρωμοσώματα έχουν την μορφή $c_2=[N_1|N_2|N_3|N_4|b_1|b_2|N_6|N_7]$ όπου b_1 η πρώτη κλίση και b_2 η δεύτερη κλίση.

Στα χρωμοσώματα δεν περιλαμβάνεται ο αριθμός των φορτιστών και των μετατροπέων. Αυτό γίνεται γιατί ο αριθμός των φορτιστών καθορίζεται μονοσήμαντα από τον αριθμό των φ/β πλαισίων (Εξ. 7.8) και ο αριθμός των μετατροπέων (dc/ac) καθορίζεται επίσης μονοσήμαντα από τον αριθμό των μονάδων αφαλάτωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε έναν μετατροπέα (dc/ac) για κάθε μονάδα αφαλάτωσης με τον περιορισμό ότι η ισχύς εξόδου του μετατροπέα είναι μεγαλύτερη ή ίση με την ισχύ λειτουργίας της μονάδας και ότι η τάση και συχνότητα του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα συμπίπτουν με την τάση και συχνότητα λειτουργίας της μονάδας αφαλάτωσης. Έτσι το να προστεθούν δύο επιπλέον γονίδια στα χρωμοσώματα (δύο επιπλέον παράμετροι βελτιστοποίησης στον αλγόριθμο) θα είχε ως αποτέλεσμα μόνο την αύξηση της πολυπλοκότητάς του και του χρόνου που θα χρειαζόταν για να καταλήξει στην βέλτιστη λύση. Βέβαια, παρότι οι φορτιστές και οι μετατροπείς (dc/ac) δεν αποτελούν παραμέτρους ελαχιστοποίησης του γενετικού αλγόριθμου, τον επηρεάζουν αφού εισέρχονται στην συνάρτηση κόστους.

Το πλήθος των χρωμοσωμάτων ανά γενεά, όπως είδαμε, λαμβάνεται σαν παράμετρος εισόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή που χρησιμοποιείται είναι 30 χρωμοσώματα ανά γενεά. Η τιμή αυτή προέκυψε ύστερα από δοκιμές, οι οποίες έδειξαν ότι με μικρότερες τιμές ο αλγόριθμος δεν φτάνει στην βέλτιστη λύση ενώ με μεγαλύτερες καθυστερεί σημαντικά [11].

Όσον αφορά την κωδικοποίηση των μεταβλητών επιλέχθηκε η floating point αναπαράσταση, αν και οι μεταβλητές παίρνουν ακέραιες τιμές. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί η ύπαρξη χρωμοσωμάτων πολύ μεγάλου μήκους που περιπλέκουν τις πράξεις και ιδιαίτερα τις συναρτήσεις ελέγχου. Έπειτα από κάθε πράξη όμως ακεραιοποιούνται οι μεταβλητές (κρατώντας, βέβαια, την floating point αναπαράσταση για λόγους συμβατότητας) έτσι ώστε να έχουν φυσική σημασία.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δίνεται από την σχέση :

$$g(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7) = N_1(C_1 + 20C_{1m}) + N_2(C_2 + 20C_{2m} + N_4C_h + 20N_4C_{hm}) + \\ + N_3(7C_3 + 13C_{3m}) + N_5[C_5(Y_{5m} + 1) + C_{5m}(20 - Y_{5m} - 1)] + 1000N_6C_6 + \\ + N_7[C_7 + 20C_{7m} + C_4(Y_{4m} + 1) + C_{4m}(20 - Y_{4m} - 1)] \quad (10.1)$$

όπου :

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_h$ τα κόστη εγκατάστασης των φ/β πλαισίων, ανεμογεννητριών, μπαταριών, μετατροπών (dc/ac), φορτιστών, δεξαμενής (ανά m^3), μονάδων αφαλάτωσης και πυλώνα (ανά m),

$C_{1m}, C_{2m}, C_{3m}, C_{4m}, C_{5m}, C_{7m}, C_{hm}$ τα κόστη συντήρησης ανά χρόνο των φ/β πλαισίων, ανεμογεννητριών, μπαταριών, μετατροπών (dc/ac), φορτιστών, μονάδων αφαλάτωσης και πυλώνα,

N_5 ο αριθμός των φορτιστών και

Y_{4m}, Y_{5m} οι φορές που θα χρειαστεί να αλλαχθούν οι μετατροπείς (dc/ac) και οι φορτιστές αντίστοιχα στην διάρκεια των είκοσι ετών.

Τέλος οι μπαταρίες θεωρούμε πως έχουν χρόνο ζωής τρία χρόνια.

Επειδή το πρόβλημα που έχουμε είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης πρέπει να κάνουμε τον παρακάτω μετασχηματισμό, σύμφωνα με την εξ 8.2 :

$$f(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7) = \begin{cases} C_{\max} - g(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7), & \text{αν } C_{\max} - g(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (10.2)$$

Η συνάρτηση $f(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, N_7)$ είναι η συνάρτηση προσαρμογής του γενετικού αλγόριθμου και χρησιμοποιείται από την πράξη της επιλογής για τα χρωμοσώματα που θα πάρουν μέρος στις πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η ποσότητα C_{\max} είναι η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της $g(.)$ και δεν λαμβάνεται σταθερά, αλλά υπολογίζεται για κάθε γενεά.

Οι περιορισμοί του προβλήματος φαίνονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$N_1 \geq 0, N_2 \geq 0, N_3 \geq 1, N_5 \geq 0, N_6 \geq 1, N_7 \geq 1 \quad (10.3)$$

$$8 \leq N_4 \leq 15 \quad (10.4)$$

$$0 \leq b \leq 90 \text{ ή } 0 \leq b_1 \leq 90 \text{ και } 0 \leq b_2 \leq 90 \quad (10.5)$$

και

$$\text{SIM1}(N_1, N_2, N_3, N_4, b, N_6, N_7) = 1 \text{ ή } \text{SIM2}(N_1, N_2, N_3, N_4, b_1, b_2, N_6, N_7) = 1 \quad (10.6)$$

όπου θεωρούμε ότι όταν επιτυγχάνει η προσομοίωση (ο αλγόριθμος SIM1 ή SIM2), επιστρέφει την τιμή 1. Οι αλγόριθμοι SIM1 και SIM2 χρησιμοποιούνται για να εξεταστεί το αν μια υποψήφια λύση ικανοποιεί την ζήτηση σε νερό.

Τέλος ο μηχανισμός επιλογής που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος του τροχού της ρουλέτας.

10.4 Πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης στον αλγόριθμο είναι διαφοροποιημένες από αυτές που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 8. Κάποιοι από τους τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι ομοιόμορφοι, δηλαδή η δράση τους είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της εξέλιξης του αλγορίθμου, ενώ άλλοι τελεστές δεν είναι ομοιόμορφοι αφού η δράση τους μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη των γενεών. Όλοι οι τελεστές που χρησιμοποιούνται ενδείκνυνται για προβλήματα με floating point αναπαράσταση και έχουν αποδειχθεί πολύ ισχυροί.

10.4.1 Διασταύρωση

Για την διασταύρωση των χρωμοσωμάτων χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τελεστές :

- **Απλή διασταύρωση (simple crossover, sc).**

Εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει αναφερθεί στην παράγραφο 8.3. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρείται ότι η απλή διασταύρωση συμβαίνει σε ένα μόνο σημείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα p_{sc} , κάποιο χρωμόσωμα από αυτά που έχουν προκύψει από την επιλογή που έχει προηγηθεί να συμμετάσχει σε απλή διασταύρωση λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή για πληθυσμό γενεών ίσο με 30 χρωμοσώματα είναι $p_{sc} = 10\%$. Η επιλογή των

χρωμοσωμάτων που θα διασταυρωθούν γίνεται με την γέννηση ενός τυχαίου αριθμού r ($0 \leq r \leq 1$) για κάθε χρωμόσωμα. Αν για κάποιο χρωμόσωμα ισχύει $r \leq p_{sc}$ τότε αυτό το χρωμόσωμα επιλέγεται για διασταύρωση. Αν ο συνολικός αριθμός χρωμοσωμάτων που έχουν επιλεχθεί για απλή διασταύρωση είναι περιττός, τότε επιλέγεται ένα ακόμα χρωμόσωμα (επιλέγεται το πρώτο χρωμόσωμα που δεν έχει επιλεγεί). Η διασταύρωση εν συνεχεία λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα χρωμοσώματα που έχουν επιλεχθεί με αύξουσα σειρά (το πρώτο με το δεύτερο – το τρίτο με το τέταρτο κ.ο.κ.)

- **Απλή αριθμητική διασταύρωση (simple arithmetical crossover, sac)**

Αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1...u_m]$ και $c_2=[w_1...w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη απλής αριθμητικής διασταύρωσης τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1=[u_1...u'_k...u_m]$ και $c'_2=[w_1...w'_k...w_m]$, όπου:

$$u'_k = aw_k + (1-a)u_k \text{ και}$$

$$w'_k = au_k + (1-a)w_k,$$

$$k \in [1, m]$$

Το k επιλέγεται τυχαία ενώ το a επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται μέσα στο πεδίο εφικτών λύσεων, χωρίς να παραβιάζουν τους περιορισμούς. Συγκεκριμένα το a είμαι μια τυχαία επιλογή στο διάστημα:

$$a \in \begin{cases} [\max(\alpha, \beta), \min(\gamma, \delta)] & , \text{αν } u_k > w_k \\ [0, 0] & , \text{αν } u_k = w_k \\ [\max(\gamma, \delta), \min(\alpha, \beta)] & , \text{αν } u_k < w_k \end{cases} \quad (10.7)$$

όπου:

$$\alpha = \frac{(I_k^{c_2} - w_k)}{(u_k - w_k)} \quad (10.8)$$

$$\beta = \frac{(u_k^{c_1} - u_k)}{(w_k - u_k)} \quad (10.9)$$

$$\gamma = \frac{(I_k^{c_1} - u_k)}{(w_k - u_k)} \quad (10.10)$$

$$\delta = \frac{(u_k^{c_2} - w_k)}{(u_k - w_k)} \quad (10.11)$$

Οι ποσότητες $I_k^{c_i}$ και $u_k^{c_i}$ συμβολίζουν το κάτω και άνω φράγμα του γονιδίου k του χρωμοσώματος i . Τα $I_k^{c_i}$ και $u_k^{c_i}$ δεν λαμβάνονται σταθερά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, αλλά υπολογίζονται με την βοήθεια του αλγορίθμου `dyn_bnd` (θα εξηγηθεί παρακάτω) κάθε φορά που λαμβάνει χώρα απλή αριθμητική διασταύρωση. Η πιθανότητα για `sac` λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή είναι $p_{sac} = 10\%$. Η επιλογή και ο τρόπος για `sac` γίνεται όπως και στην απλή διασταύρωση. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας αριθμός r ($0 \leq r \leq 1$). Αν $p_{sc} \leq r \leq p_{sac}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε απλή αριθμητική διασταύρωση.

- **Ολική αριθμητική διασταύρωση (whole arithmetical crossover, wac).**

Αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1...u_m]$ και $c_2=[w_1...w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη ολικής αριθμητικής διασταύρωσης τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1 = ac_2 + (1-a)c_1$ και $c'_2 = ac_1 + (1-a)c_2$. Το a είναι μια σταθερά και επιλέγεται από το διάστημα $[0,1]$. Η επιλογή του a μέσα από το διάστημα αυτό εγγυάται ότι οι απόγονοι θα βρίσκονται μέσα στο πεδίο εφικτών λύσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε $a = 0,75$. Η πιθανότητα για `wac`, p_{wac} , λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι $p_{wac} = 10\%$. Η επιλογή και ο τρόπος για `wac` γίνεται όπως και στην απλή αριθμητική διασταύρωση. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας αριθμός r ($0 \leq r \leq 1$). Αν $p_{sac} \leq r \leq p_{wac}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε ολική αριθμητική διασταύρωση.

Οι τρεις παραπάνω τελεστές διασταύρωσης εφαρμόζονται στην σειρά, όπως παρουσιάστηκαν αμέσως μετά την πράξη της επιλογής. Τα χρωμοσώματα που επιλέγονται για κάποιο είδος διασταύρωσης δεν μπορούν να συμμετέχουν σε άλλο είδος διασταύρωσης. Από τους τρεις τελεστές, μόνο η `sac` και η `wac` εγγυώνται ότι οι απόγονοι που προκύπτουν δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς. Η `sc` μπορεί να δώσει λύση έξω από το σύνολο των επιτρεπτών λύσεων. Για την εξάλειψη αυτών των λύσεων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος `repair` που περιγράφεται στην παράγραφο 10.6. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόζεται σε κάθε γενεά μετά την ολοκλήρωση των πράξεων της διασταύρωσης.

10.4.2 Μετάλλαξη

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης θεωρούμε πάντα ότι σε ένα χρωμόσωμα μόνο ένα γονίδιο μεταλλάσσεται. Για την 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 εύρος τιμών του, που υπολογίζεται με την βοήθεια του αλγόριθμου `dyn_bnd`. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή είναι $p_{um} = 10\%$. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων τα οποία θα δώσουν κάποιο γονίδιο για um γίνεται με την γέννηση κάποιου τυχαίου αριθμού r (με $0 \leq r \leq 1$) και αν $r \leq p_{um}$ τότε το χρωμόσωμα επιλέγεται για μετάλλαξη.

- **Boundary μετάλλαξη (boundary mutation, bm)**

Το γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και παίρνει, με ίση πιθανότητα, τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή από το επιτρεπτό εύρος τιμών του, το οποίο προκύπτει από τον αλγόριθμο `dyn_bnd`. Η πιθανότητα boundary μετάλλαξης p_{bm} είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 3%. Η επιλογή κάποιου χρωμοσώματος για bm γίνεται όπως στην ομοιόμορφη μετάλλαξη με $p_{um} \leq r \leq p_{bm}$.

- **Μη ομοιόμορφη μετάλλαξη (non-uniform mutation, num)**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χαρακτηρισμός «μη ομοιόμορφη» συνίσταται στο γεγονός ότι η δράση του τελεστή αυτού δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται κατά την διάρκεια του αλγόριθμου. Οι γενετικοί αλγόριθμοι σε προβλήματα με μεταβλητές πραγματικούς αριθμούς και σε μεγάλα πεδία τιμών αυτών των μεταβλητών παρουσιάζουν προβλήματα στην τοπική αναζήτηση. Τοπική αναζήτηση είναι η αναζήτηση κοντά στην βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ενώ, δηλαδή, μπορούν να φτάσουν εύκολα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης, παρουσιάζουν δυσκολίες στο τοπικό ψάξιμο. Η δυνατότητα του αλγορίθμου να εκτελεί επιτυχώς και τοπική αναζήτηση λέγεται *fine local tuning*. Η μετάλλαξη num χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της δυνατότητας του *fine local tuning* του συστήματος.

Αν σε ένα χρωμόσωμα έχει επιλεγθεί (πάντα με τυχαίο τρόπο) το γονίδιο g_k για μετάλλαξη τότε το νέο γονίδιο g'_k δίνεται από την σχέση :

$$g'_k = \begin{cases} g_k + \rho(\overline{g_k} - g_k) & , \text{ με πιθανότητα } 0,5 \\ g_k - \rho(g_k - \underline{g_k}) & , \text{ με πιθανότητα } 0,5 \end{cases} \quad (10.12)$$

όπου $[\overline{g_k}, \underline{g_k}]$ το επιτρεπτό εύρος τιμών τον γονιδίου g_k (υπολογίζεται από τον dyn_bnd) και ρ η συνάρτηση :

$$\rho = u \left(1 - \frac{t}{T} \right)^B \quad (10.13)$$

όπου :

- u ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα $[0,1]$ (παράγεται για κάθε γενεά),
- t ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς,
- T ο συνολικός αριθμός γενεών και
- B ο συντελεστής ανομοιομορφίας που είναι σταθερός κατά την διάρκεια του αλγορίθμου και παίρνει τιμές στο διάστημα $[2,5]$ (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε $B=3,5$).

Όταν το t είναι μικρό τότε ο τελεστής ψάχνει ομοιόμορφα όλο το πεδίο των λύσεων ($\rho \rightarrow u$), ενώ όσο μεγαλώνει ($\rho \rightarrow 0$) ψάχνει πιο τοπικά. Όσο μεγαλύτερο είναι το B τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η τοπική αναζήτηση. Η πιθανότητα για μη ομοιόμορφη μετάλλαξη, ρ_{num} , είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 35%. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη ώστε να ενισχύεται η δυνατότητα fine local tuning του συστήματος. Η επιλογή χρωμοσώματος για num γίνεται όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά με $\rho_{\text{bm}} \leq r \leq \rho_{\text{num}}$.

Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται μετά τις πράξεις της διασταύρωσης με την 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 οι απόγονοι που προκύπτουν ανήκουν στο σύνολο των επιτρεπτών λύσεων.

10.5 Οι επιμέρους αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στους γενετικούς

10.5.1 Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών μιας μεταβλητής

Ο αλγόριθμος `dyn_bnd` χρησιμοποιείται από τους γενετικούς τελεστές για την εύρεση του πεδίου επιτρεπτών τιμών μιας μεταβλητής σε ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα. Το πεδίο αυτό δεν παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά είναι συνάρτηση των τιμών των υπολοίπων γονιδίων του συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πάντα, βέβαια, το πεδίο τιμών που βρίσκει ο αλγόριθμος `dyn_bnd` είναι υποσύνολο του πεδίου τιμών που ορίζουν οι συνολικοί περιορισμοί.

Η βασική του λειτουργία είναι να μειώνει σταδιακά το εξεταζόμενο γονίδιο και να εκτελεί τον αλγόριθμο προσομοίωσης SIM1 ή SIM2 μέχρι να αποτύχει. Η τελευταία τιμή για την οποία η προσομοίωση ήταν επιτυχής ορίζεται ως το κάτω φράγμα του πεδίου τιμών του γονιδίου, ενώ ως άνω φράγμα ορίζεται το γενικό άνω φράγμα του γονιδίου. Αν δεν επιτύχει η προσομοίωση καμία φορά, τότε το γονίδιο αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί επιτυχής προσομοίωση, οπότε και το κάτω φράγμα ορίζεται η πρώτη τιμή για την οποία είχαμε επιτυχή προσομοίωση. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για όλα τα γονίδια εκτός από αυτά που αναφέρονται στην κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τα οποία ο αλγόριθμος επιστρέφει μόνο το γενικό εύρος επιτρεπτών τιμών τους όπως περιγράφεται από την Εξ. (10.5).

10.5.2 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων – repair algorithm

Όπως έχουμε δει, υπάρχουν κάποιες περιπτώσεις που μπορούν να δημιουργηθούν χρωμοσώματα εκτός του συνόλου επιτρεπτών λύσεων. Αυτό, για παράδειγμα μπορεί να γίνει από τον τελεστή της απλής διασταύρωσης ή από την λανθασμένη επιλογή γονιών. Ο `repair algorithm` χρησιμοποιείται για να εξαλείψει αυτά τα χρωμοσώματα και να τα αντικαταστήσει με άλλα που δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς.

Ο σχεδιασμός ενός `repair` αλγόριθμου εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και πολλές φορές μπορεί να είναι δυσκολότερος από όλα τα υπόλοιπα μέρη του γενετικού αλγόριθμου. Η βασική ιδέα της διόρθωσης είναι το χρωμόσωμα να

τροποποιηθεί, έτσι ώστε να διατηρήσει την ομοιότητα με τους γονείς του. Συγκεκριμένα ο repair αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία εξετάζει από ποια πράξη προήλθε το εσφαλμένο χρωμόσωμα. Αν είναι από μετάλλαξη τότε απλά αντικαθιστά το χρωμόσωμα με αυτό που είχε την θέση του την προηγούμενη γενιά, δηλαδή ακυρώνει την μετάλλαξη. Αν προήλθε από διασταύρωση, τότε παίρνει την θέση του ο γονέας που προσφέρει την βέλτιστη από τις δύο λύσεις.

10.6 Σύγκλιση του αλγορίθμου

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που προκύπτουν στους γενετικούς αλγόριθμους είναι το κριτήριο λήξης τους. Η συνθήκη, δηλαδή, που ελέγχει αν η λύση που έχει προκύψει από την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι η βέλτιστη. Το χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων είναι ότι προσεγγίζουν εύκολα την περιοχή της βέλτιστης τιμής και δεν πέφτουν στην παγίδα άλλων τοπικών ακρότατων.

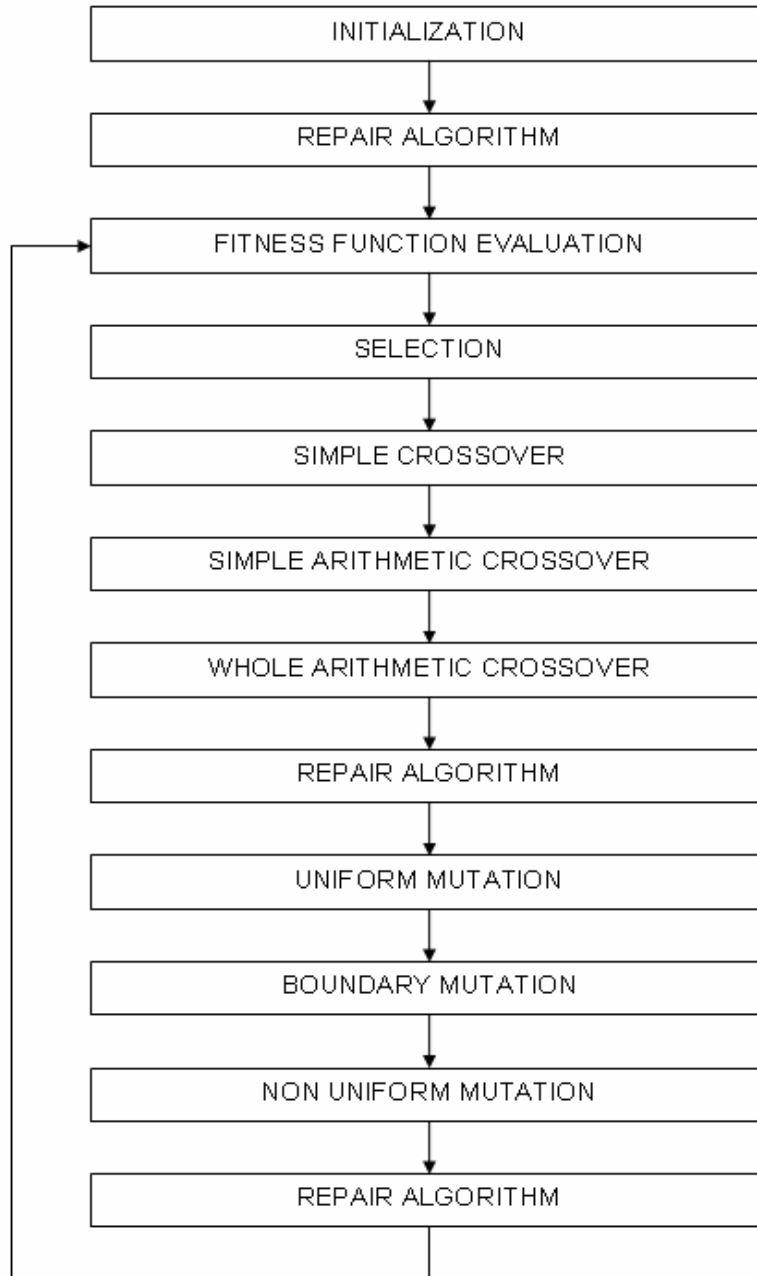
Το πιο απλό κριτήριο λήξης είναι ο τερματισμός του αλγορίθμου μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών. Το ποιο είναι το κρίσιμο πλήθος γενεών πέρα από το οποίο είμαστε σίγουροι ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει στην βέλτιστη λύση προκύπτει από εξέταση πολλών περιπτώσεων και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων.

Ένα άλλο κριτήριο που χρησιμοποιείται είναι το κριτήριο της «σύγκλισης του πληθυσμού». Ένας πληθυσμός θεωρείται ότι συγκλίνει όταν η διαφορά της μέσης τιμής της συνάρτησης κόστους του από την βέλτιστη τιμή είναι μικρότερη από κάποιο ποσοστό της βέλτιστης τιμής.

Η ύπαρξη του τελεστή μη ομοιόμορφης μετάλλαξης προϋποθέτει την εκ των προτέρων γνώση του συνολικού αριθμού γενεών. Αυτό σημαίνει ότι στην παρούσα εργασία δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το κριτήριο «σύγκλισης του πληθυσμού» γιατί σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι γνωστός ο συνολικός αριθμός γενεών. Έτσι λοιπόν ο αλγόριθμος εκτελείται για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Ύστερα από πολλές δοκιμές, ο αριθμός αυτός επιλέχθηκε να είναι ίσος με 20000 γενεές. Με λιγότερες γενεές ο αλγόριθμος δεν έβρισκε την βέλτιστη λύση, ενώ με περισσότερες απλά καθυστερούσε.

10.7 Ο γενετικός αλγόριθμος

Στο σχήμα 10.12 φαίνονται τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου:



Σχήμα 10.12. Τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, αρχικά εκτελείται η συνάρτηση αρχικοποίησης. Αυτή ουσιαστικά γεννά με τυχαίο τρόπο ένα αρχικό σύνολο λύσεων το οποίο είναι και η πρώτη γενιά του γενετικού. Το εύρος τιμών των γονιδίων σε αυτή την φάση είναι το γενικό εύρος τιμών, που έχει να κάνει μόνο με τους περιορισμούς του αλγορίθμου. Επειδή η πρώτη γενιά προέκυψε με τυχαίο

τρόπο, είναι πιθανό κάποια χρωμοσώματα να παραβιάζουν τους περιορισμούς (ειδικότερα να οδηγούν σε αποτυχημένη προσομοίωση). Έτσι αμέσως μετά εκτελείται ο repair αλγόριθμος για να «διορθώσει» τις εσφαλμένες λύσεις. Στην συνέχεια εκτελείται η ρουτίνα αποτίμησης της συνάρτησης προσαρμογής για κάθε χρωμόσωμα (fitness function evaluation). Σε αυτή την διαδικασία λαμβάνει χώρα η αντιστοίχιση 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 την δυνατότητα να δώσουν απογόνους παίρνοντας μέρος στις πράξεις διασταύρωσης και μετάλλαξης. Ακολουθεί η εφαρμογή των τελεστών διασταύρωσης με την εξής σειρά :

- απλή διασταύρωση,
- απλή αριθμητική διασταύρωση και
- ολική αριθμητική διασταύρωση.

Ύστερα εκτελείται για μια ακόμη φορά ο repair αλγόριθμος για να διορθώσει τα τυχόν λανθασμένα χρωμοσώματα και ακολουθούν οι τελεστές της μετάλλαξης με την σειρά :

- ομοιόμορφη μετάλλαξη,
- boundary μετάλλαξη και
- μη ομοιόμορφη μετάλλαξη.

Σε αυτό το σημείο έχουν ολοκληρώσει τις ενέργειές τους όλοι οι τελεστές, οπότε εκτελείται για τελευταία φορά ο repair αλγόριθμος για τις τελικές διορθώσεις. Έπειτα ο αλγόριθμος εξετάζει την τιμή της fitness evaluation function, όπου γίνεται έλεγχος αν ικανοποιείται η συνθήκη τερματισμού. Αν ικανοποιείται τότε ο αλγόριθμος λήγει, ενώ αν δεν ικανοποιείται συνεχίζει τις πράξεις από αυτό το σημείο έχοντας αυξήσει γενεά.

11. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

11.1 Εισαγωγή

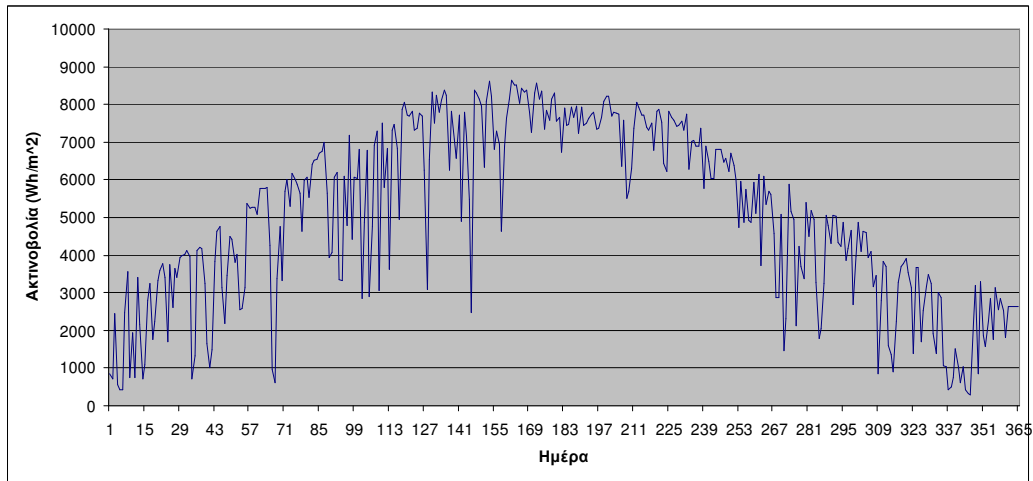
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης για διάφορες περιπτώσεις. Κάποιες από αυτές έχουν γίνει για έναν συγκεκριμένο συνδυασμό φ/β πλαισίων, ανεμογεννητριών, μπαταριών, φορτιστών, μετατροπέων και μονάδων αφαλάτωσης, ενώ κάποια δίνουν τις συνολικές λύσεις για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε με τις εξής παραμέτρους :

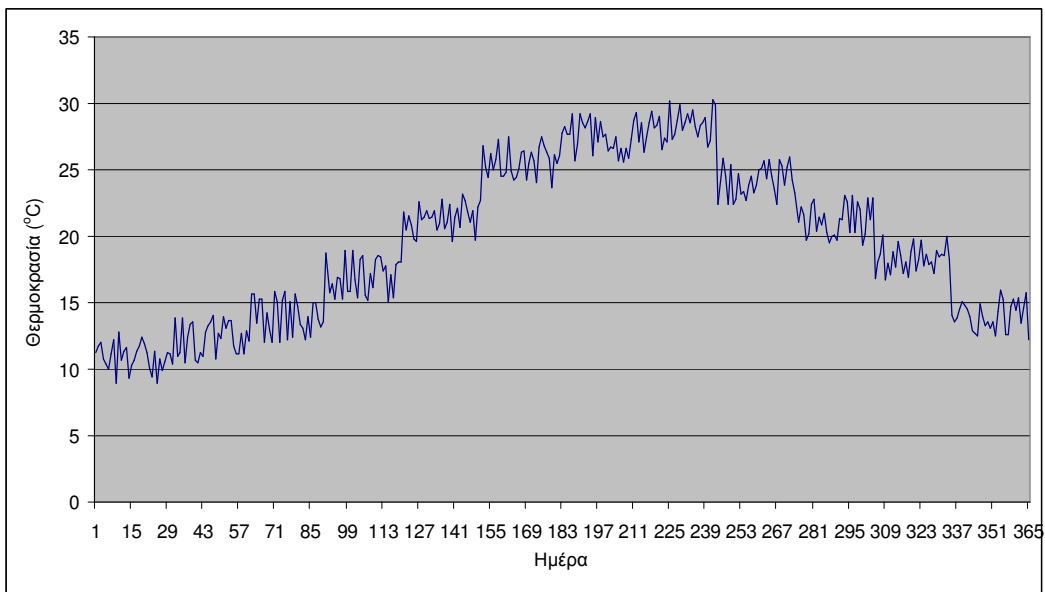
- πλήθος χρωμοσωμάτων ανά γενεά: 30
- πιθανότητα απλής διασταύρωσης: 10%
- πιθανότητα απλής αριθμητικής διασταύρωσης: 10%
- πιθανότητα ολικής αριθμητικής διασταύρωσης: 10%
- πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης: 10%
- πιθανότητα boundary μετάλλαξης: 3%
- πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης: 35%
- αριθμών γενεών: 20000

Το γεωγραφικό πλάτος του τόπου για τον οποίο έγινε η διαστασιολόγηση είναι 35°, ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους έχει τιμή 0,2 και ο εκθέτης του εκθετικού νόμου για την ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή 0,2.

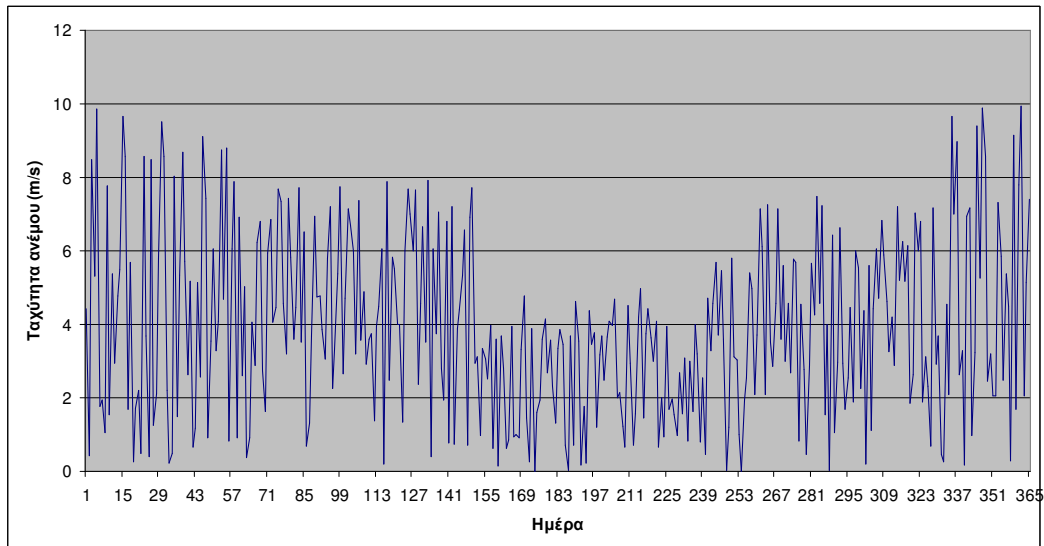
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα διαγράμματα της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της μέσης ημερήσιας ταχύτητας του ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 11.1. Η μέση ημερήσια ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους 2003.

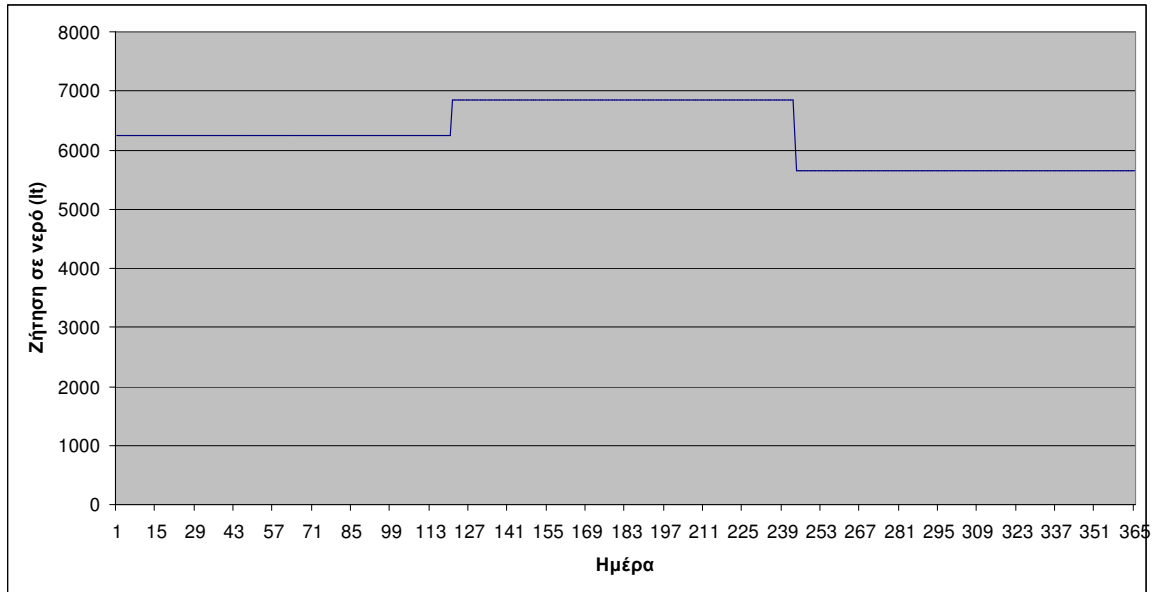


Σχήμα 11.2. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του έτους 2003.

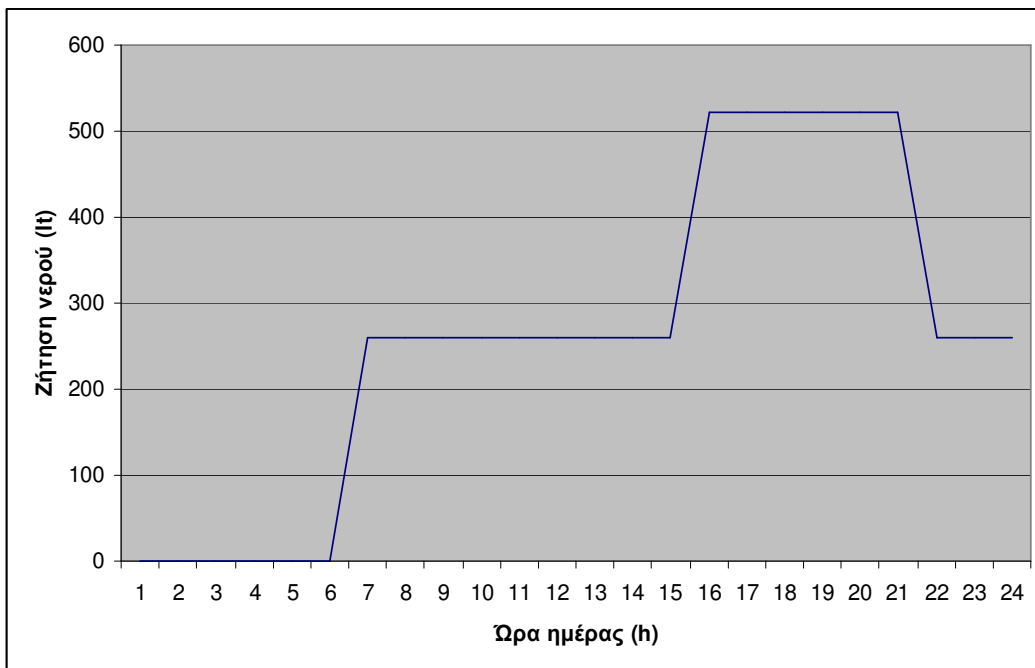


Σχήμα 11.3. Η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου κατά τη διάρκεια του έτους 2003.

Η διαστασιολόγηση έγινε για μία ή δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων για τα δεδομένα ζήτησης νερού μιας μικρής κοινότητας 15 σπιτιών ή ενός σπιτιού για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των στοιχείων του συστήματος, οπότε και βρέθηκε για κάθε περίπτωση η συνολικά βέλτιστη λύση. Παρακάτω φαίνονται τα δυο προφίλ της ζήτησης νερού που χρησιμοποιήθηκαν (το προφίλ ζήτησης νερού για την κοινότητα αντιστοιχεί σε μια μικρή απομονωμένη κοινότητα 15 σπιτιών, ενώ το προφίλ για το σπίτι αντιστοιχεί σε ένα τυχαίο σπίτι – σχήματα 11.4.α και 11.5.α αντίστοιχα). Η ζήτηση του νερού δεν παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της ημέρας, αλλά θεωρείται ότι είναι μηδενική κατά την διάρκεια της νύχτας και αυξημένη στις ώρες αιχμής, δηλαδή το μεσημέρι. Στα σχήματα 11.4.β και 11.5.β φαίνονται τα αντίστοιχα προφίλ για μία τυχαία μέρα του χρόνου.

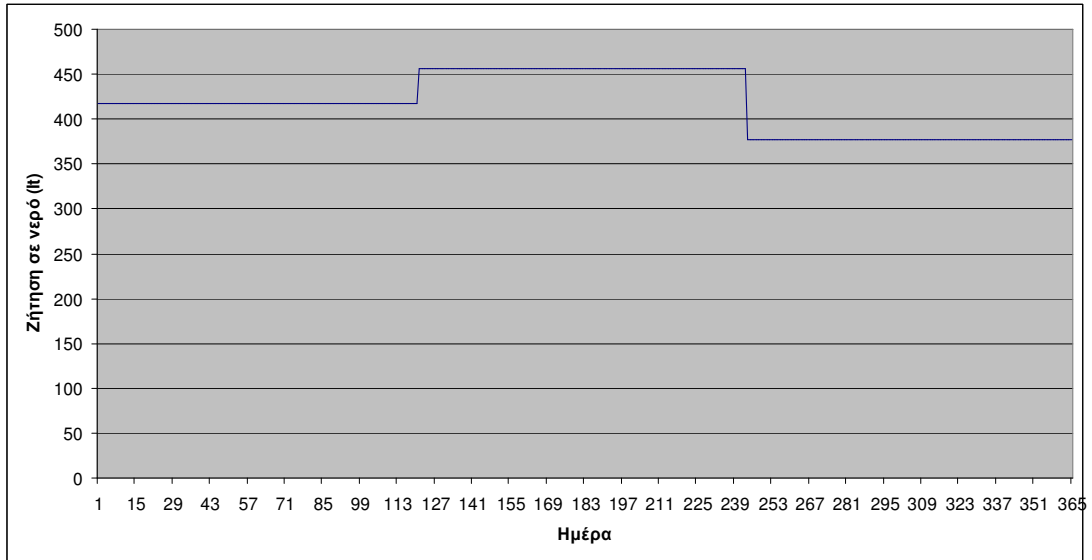


Σχήμα 11.4.α. Η ημερήσια ζήτηση νερού μιας κοινότητας 15 σπιτιών

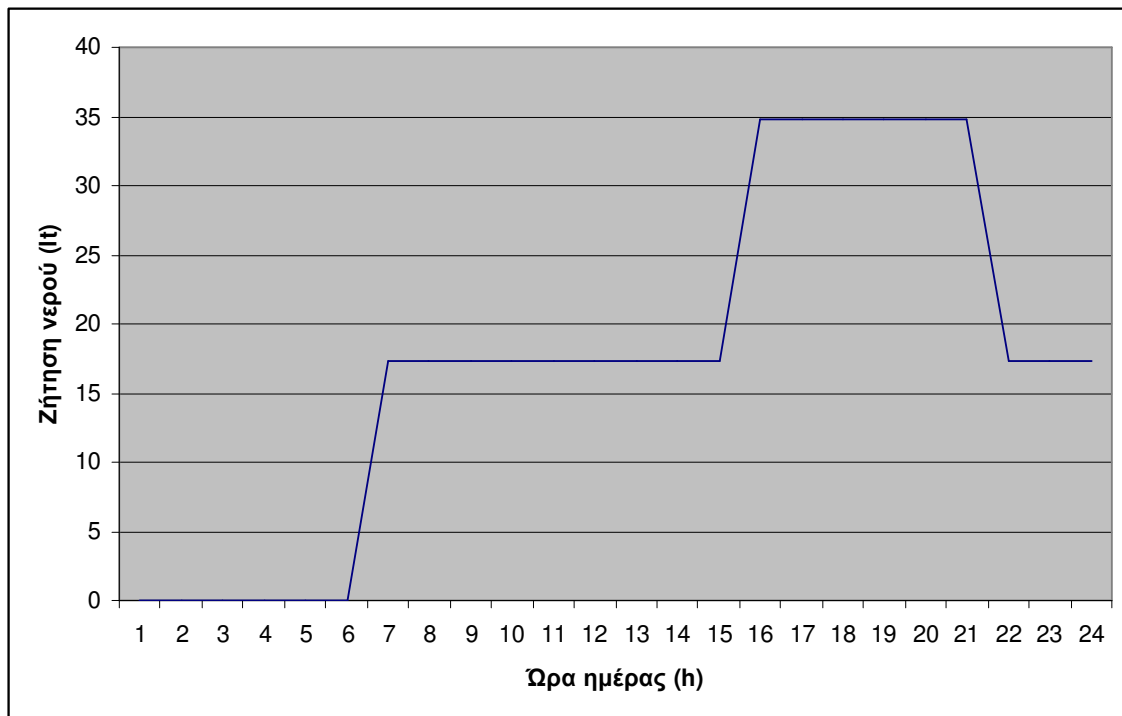


Σχήμα 11.4.β. Η ωριαία ζήτηση νερού μιας κοινότητας 15 σπιτιών στην διάρκεια μιας ημέρας

Η ημέρα που αναπαριστάται στο σχήμα 11.4.β είναι μια μέρα του χειμώνα. Σε όλες τις εποχές του χρόνου η αναλογία στην ζήτηση του νερού παραμένει ίδια. Θεωρείται, δηλαδή, ότι τις πρώτες ώρες υπάρχει μηδενική ζήτηση νερού, μετά για κάποιες ώρες μια μέτρια ζήτηση και υπάρχουν και 5 ώρες αιχμής (μεσημέρι προς απόγευμα) με αυξημένη κατανάλωση νερού.



Σχήμα 11.5.α. Η ημερήσια ζήτηση νερού ενός σπιτιού



Σχήμα 11.5.β. Η ωριαία ζήτηση νερού ενός σπιτιού στην διάρκεια μιας ημέρας

11.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς

Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου διαστασιολόγησης για το σπίτι, για έναν συνδυασμό στοιχείων και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι κατά μέσο όρο 4 ώρες σε έναν υπολογιστή AMD AthlonXP 1800+ στα 1.54 GHz με 768 MB RAM και λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP σε αντίθεση με την γραμμική λύση, δηλαδή την προσομοίωση του συστήματος για όλες τις δυνατές τιμές των παραμέτρων βελτιστοποίησης και εξαγωγή της βέλτιστης οικονομικά λύσης από αυτές για τις οποίες η προσομοίωση ήταν επιτυχής, η οποία χρησιμοποιήθηκε για επαλήθευση και απαιτεί περίπου 30 ώρες.

Ο αλγόριθμος εκτελέστηκε για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των στοιχείων και κατέληξε στην ολική βέλτιστη λύση για κάθε περίπτωση (μία ή δύο κλίσεις, δεδομένα ζήτησης νερού για κοινότητα ή για σπίτι). Οι συνδυασμοί εξάγονται από τους τύπους των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 11.1:

Πίνακας 11.1 : Τύποι και κόστη των στοιχείων του συστήματος			
Είδος	Τύπος	Κόστος Αγοράς (€)	Κόστος Συντήρησης (€ / έτος)
Φ/β πλαίσιο	AT 55	265,81	2,7
	AT 110	519,14	5,2
Ανεμογεννήτρια	BWCXL.1	1681	16,81
Μπαταρία	Solar 230	264	2,64
	Solar 100	126	1,26
Φορτιστής	SB 2000E	200	2
	SR20	94	0,94
Μετατροπέας (dc/ac)	AIMS 5000	453	45,3
Πυλώνας	BWCXL.1	55 (€/m)	0,55 (€/m)
Δεξαμενή	-	260 (€/m ³)	1 (€/m ³)
Μονάδα Αφαλάτωσης	AP3000	4667.97	466.7

Στον πίνακα 11.2 φαίνεται το ολικό κόστος του συστήματος (κόστος εγκατάστασης και συντήρησης) για 20 χρόνια για κάθε δυνατό συνδυασμό τύπων στοιχείων για την περίπτωση της διαστασιολόγησης για το σπίτι για μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ στον πίνακα 11.3 φαίνεται το ολικό κόστος του

συστήματος (κόστος εγκατάστασης και συντήρησης) για 20 χρόνια για κάθε δυνατό συνδυασμό για το σπίτι με δύο κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Και οι δύο πίνακες αναφέρονται σε υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας.

Πίνακας 11.2: Το ολικό κόστος του συστήματος (κόστος εγκατάστασης και συντήρησης) για 20 χρόνια όλων των δυνατών συνδυασμών για το σπίτι και μία κλίση των πλαισίων

PV	WT	BT	INV	CH	RO	Cost (€)
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	57246.53
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	54211.46
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	53618.74
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	55021.65
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	51892.13
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	54176.47
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	53516.43
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	54817.57

Πίνακας 11.3 : Το ολικό κόστος του συστήματος (κόστος εγκατάστασης και συντήρησης) για 20 χρόνια όλων των δυνατών συνδυασμών για το σπίτι και δύο κλίσεις των πλαισίων

PV	WT	BT	INV	CH	RO	Cost (€)
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	57179.61
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	54210.62
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	53275.13
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	55011.85
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	50466.29
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	54175.63
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	53229.01
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	54816.45

Στον πίνακα 11.4 φαίνεται το ολικό κόστος του συστήματος για 20 χρόνια για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς για την κοινότητα για μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ στον πίνακα 11.5 για δύο κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Και οι δύο πίνακες αναφέρονται σε υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας.

Πίνακας 11.4 : Αποτελέσματα όλων των δυνατών συνδυασμών για μια κοινότητα 15 σπιτιών και μία κλίση των πλαισίων						
PV	WT	BT	INV	CH	RO	Cost (€)
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	139859.20
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	139946.68
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	143659.70
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	147385.81
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	133473.63
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	142042.33
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	136559.41
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	147737.29

Πίνακας 11.5 : Αποτελέσματα όλων των δυνατών συνδυασμών για μια κοινότητα 15 σπιτιών και δύο κλίσεις των πλαισίων						
PV	WT	BT	INV	CH	RO	Cost (€)
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	139107.74
AT55	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	139626.87
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	142528.42
AT55	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	147255.83
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SB2000E	AP3000	133407.55
AT110	BWCXL.1	Solar230	AIMS5000	SR20	AP3000	141883.53
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SB2000E	AP3000	136522.45
AT110	BWCXL.1	Solar100	AIMS5000	SR20	AP3000	145920.89

όπου :

PV τα φωτοβολταϊκά πλαίσια,

WT οι ανεμογεννήτριες,

BT οι μπαταρίες,

CH οι φορτιστές,

RO η μονάδα αφαλάτωσης και

INV ο μετατροπέας (dc/ac).

Στον πίνακα 11.6 φαίνεται ο βέλτιστος συνδυασμός για το σπίτι και την κοινότητα, για μία και δύο κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων και το κόστος του για υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας.

Πίνακας 11.6 : Αποτελέσματα διαστασιολόγησης όλων των συνδυασμών								
	Σπίτι				Κοινότητα			
	Μία Κλίση		Δύο Κλίσεις		Μία Κλίση		Δύο Κλίσεις	
PV (#)	AT110	7	AT110	7	AT110	26	AT110	26
WT (#)	BWCXL.1	7	BWCXL.1	6	BWCXL.1	15	BWCXL.1	15
BT (#)	Solar230	2	Solar230	2	Solar230	12	Solar230	12
INV (#)	AIMS5000	1	AIMS5000	1	AIMS5000	1	AIMS5000	1
CH (#)	SB2000E	2	SB2000E	2	SB2000E	9	SB2000E	9
RO (#)	AP3000	1	AP3000	1	AP3000	1	AP3000	1
h (m)	11		14		13		13	
b (°)	39		46 και 11		34		34 και 0	
V _b (Volt)	24		24		24		24	
Tank (lt)	6400		6862		9828		9592	
Κόστος (€)	51892.13		50466.29		133473.63		133407.55	

όπου :

h το ύψος πυλώνα,

b η κλίση των φ/β πλαίσιων,

V_b η τάση λειτουργίας του συστήματος και

Tank η δεξαμενή αποθήκευσης νερού.

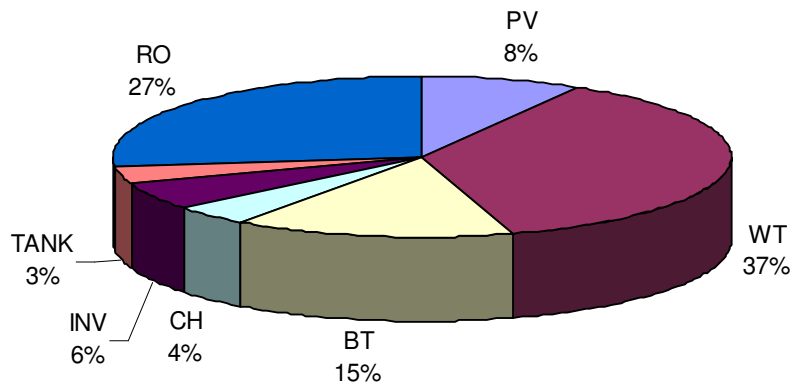
Στον πίνακα 11.7 φαίνονται τα αποτελέσματα των διαστασιολογήσεων για σύστημα τροφοδοσίας μόνο με φωτοβολταϊκά πλαίσια και μόνο με ανεμογεννήτριες όσον αφορά τους βέλτιστους συνδυασμούς για το σπίτι και την κοινότητα για μία κλίση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Πίνακας 11.7 : Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για διάφορα συστήματα για τον βέλτιστο συνδυασμό										
		PV (#)	WT (#)	BT (#)	CH (#)	h (m)	b (°)	Tank (lt)	RO (#)	Cost (€)
Σπίτι	μόνο PV	36	-	4	13	-	70	6426	1	69627.35
	μόνο WT	-	17	2	-	13	-	9726	1	76077.43
	υβριδικό	7	7	2	2	11	39	6400	1	51892.13
Κοινότητα	μόνο PV	166	-	8	60	-	2	9230	1	214889.23
	μόνο WT	-	47	34	-	15	-	9855	1	289042.03
	υβριδικό	26	15	12	9	13	34	9828	1	133473.63

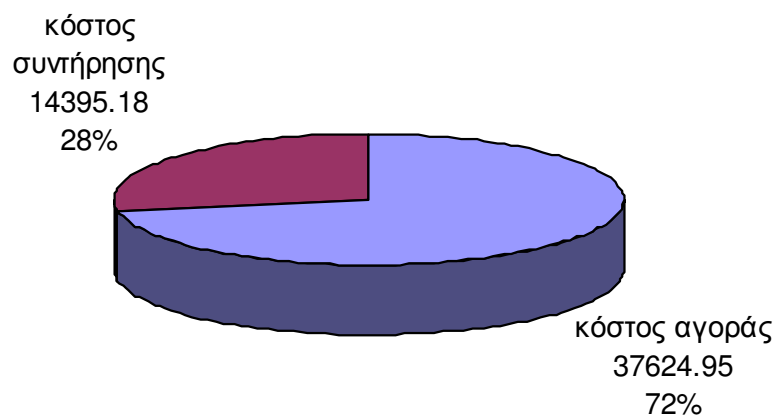
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι για το πιο οικονομικό σύστημα είναι το υβριδικό, το δαπανηρότερο είναι το σύστημα με τις ανεμογεννήτριες, ενώ το φωτοβολταϊκό σύστημα βρίσκεται ενδιάμεσα από άποψης κόστους.

Στους παρακάτω πίνακες και σχήματα φαίνονται τα κόστη και οι συμμετοχές των επιμέρους στοιχείων στο ολικό κόστος (κόστος αγοράς και συντήρησης) του συστήματος στους συνδυασμούς που έδωσαν τις βέλτιστες λύσεις για το σπίτι και την κοινότητα, για μία ή δύο κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και η επί τοις εκατό συμμετοχή του κόστους αγοράς και του κόστους συντήρησης στο ολικό κόστος. Στο κόστος αγοράς περιλαμβάνεται και το κόστος αντικατάστασης των στοιχείων του συστήματος κατά την διάρκεια των 20 ετών.

Πίνακας 11.8 : Κόστη των επιμέρους στοιχείων για το σπίτι και μία κλίση		
Στοιχείο	Κόστος αγοράς (€)	Κόστος Συντήρησης (€)
PV	3633.98	728.00
WT	16002.00	3200.40
BT	7392.00	137.28
CH	2000.00	60.00
INV	2265.00	679.50
Tank	1664.00	128.00
RO	4667.97	9334.00
Άθροισμα	37624.95	14395.18
Συνολικό Κόστος (€)	51892.13	



Σχήμα 11.6. Επί τοις εκατό συμμετοχή των επιμέρους στοιχείων στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση του σπιτιού για μια κλίση των φ/β πλαισίων

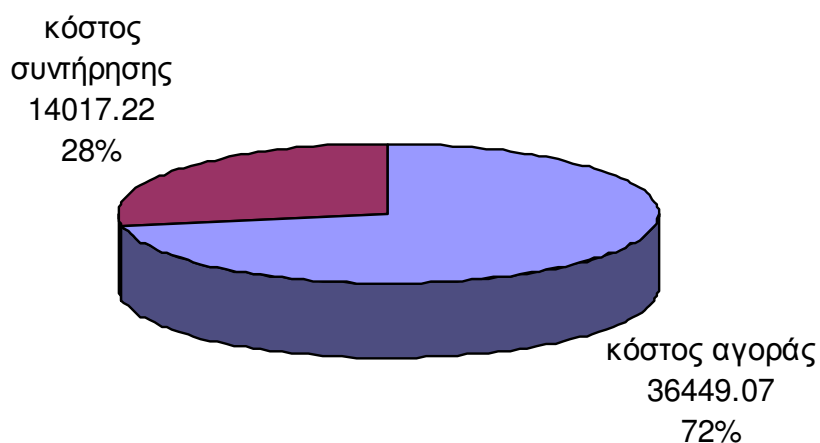


Σχήμα 11.7. Επί τοις εκατό συμμετοχή του κόστους αγοράς και του κόστους συντήρησης στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση του σπιτιού για μια κλίση των φ/β πλαισίων

Πίνακας 11.9 : Κόστη των επιμέρους στοιχείων για το σπίτι και δύο κλίσεις		
Στοιχείο	Κόστος αγοράς (€)	Κόστος Συντήρησης (€)
PV	3633.98	728.00
WT	14706.00	2941.20
BT	7392.00	137.28
CH	2000.00	60.00
INV	2265.00	679.50
Tank	1784.12	137.24
RO	4667.97	9334.00
Άθροισμα	36449.07	14017.22
Συνολικό Κόστος (€)	50466.29	

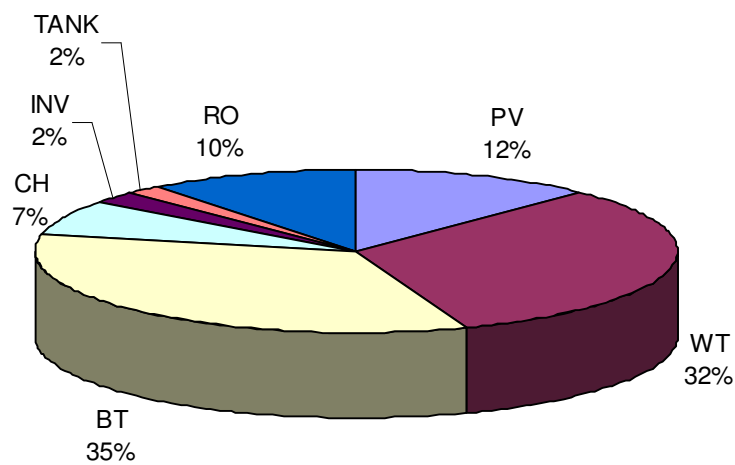


Σχήμα 11.8. Επί τοις εκατό συμμετοχή των επιμέρους στοιχείων στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση του σπιτιού για δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων

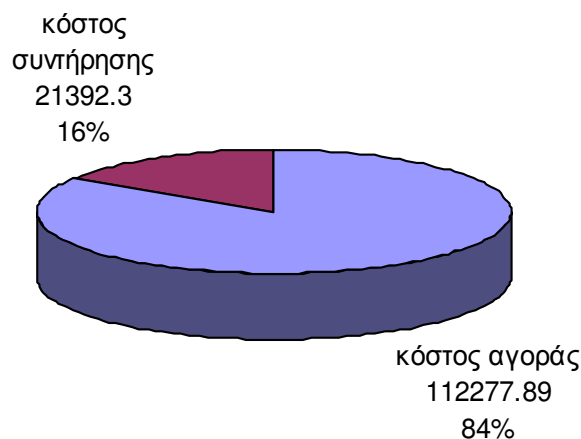


Σχήμα 11.9. Επί τοις εκατό συμμετοχή του κόστους αγοράς και του κόστους συντήρησης στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση του σπιτιού για δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων

Πίνακας 11.10 : Κόστη των επιμέρους στοιχείων για την κοινότητα και μία κλίση		
Στοιχείο	Κόστος αγοράς (€)	Κόστος Συντήρησης (€)
PV	13497.64	2704.00
WT	35940.00	7188.00
BT	44352.00	823.68
CH	9000.00	270.00
INV	2265.00	679.50
Tank	2555.28	196.56
RO	4667.97	9334.00
Άθροισμα	112277.89	21392.30
Συνολικό Κόστος (€)	133473.63	

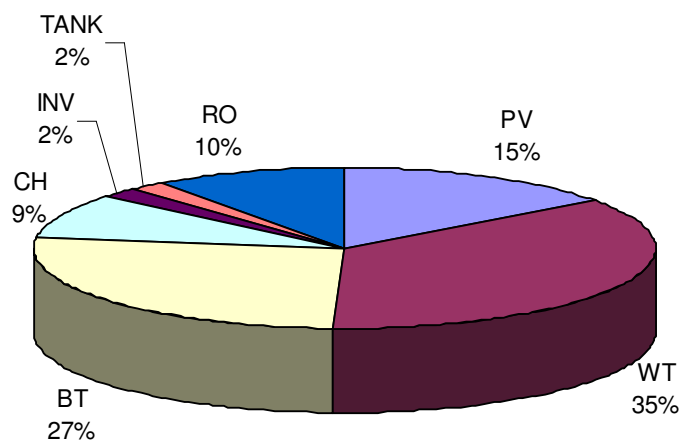


Σχήμα 11.10. Επί τοις εκατό συμμετοχή στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση της κοινότητας για μια κλίση των φ/β πλαίσιων

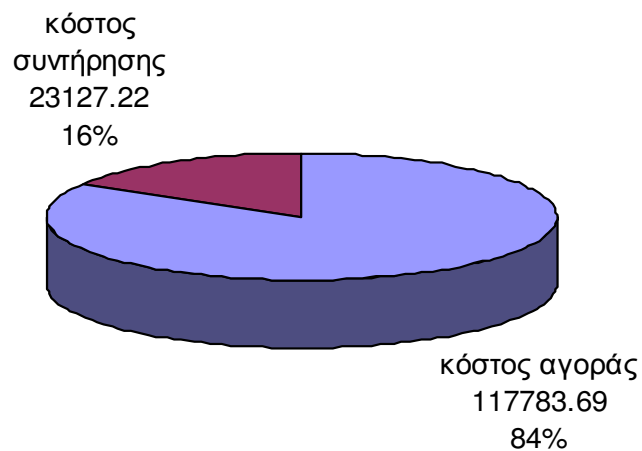


Σχήμα 11.11. Επί τοις εκατό συμμετοχή του κόστους αγοράς και του κόστους συντήρησης στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση της κοινότητας για μια κλίση των φ/β πλαίσιων

Πίνακας 11.11 : Κόστη των επιμέρους στοιχείων για την κοινότητα και δύο κλίσεις		
Στοιχείο	Κόστος αγοράς (€)	Κόστος Συντήρησης (€)
PV	17650.76	3536.00
WT	41667.00	8333.40
BT	36960.00	686.40
CH	12000.00	360.00
INV	2265.00	679.50
Tank	2572.96	197.92
RO	4667.97	9334.00
Άθροισμα	117783.69	23127.22
Συνολικό Κόστος (€)	140910.91	



Σχήμα 11.12. Επί τοις εκατό συμμετοχή των επιμέρους στοιχείων στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση της κοινότητας για δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων



Σχήμα 11.13. Επί τοις εκατό συμμετοχή του κόστους αγοράς και του κόστους συντήρησης στο ολικό κόστος του συστήματος στην βέλτιστη λύση της κοινότητας για δύο κλίσεις των φ/β πλαισίων

Στο σχήμα 11.14 φαίνεται η μορφή του αρχείου εξόδου που δείχνει τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης για τον βέλτιστο συνδυασμό για το σπίτι και για μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαίσιων:

```

21111.txt - Notepad
File Edit Format View Help
-----INPUT_DATA-----
Radiation profile: f_.txt
Temperature profile: temperature.txt
wind profile: a.txt
wind turbine: Number 1 in windturbines.txt
Pv module: Number 2 in pvmodules.txt
Pv charger: Number 1 in solarchargers.txt
Inverter: Number 1 in inverters.txt
Battery: Number 1 in batteries.txt
Ro unit: Number 1 in rounits.txt
water demands : waterhouse_alt_profile.txt

-----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 number: 20000

-----OUTPUT_DATA-----
Voltage of operation : 24 volts
Number of pv modules in series: 2. Total number of pvmodules : 7
Number of wind turbines: 7
Number of batteries in series: 2. Total number of batteries : 2
Height of tower: 11 meters.
Number of solar chargers: 2.
Number of inverters : 1.
water tank capacity: 6400 lt.
Number of RO units: 1
Cost: 51892.13 Euros.
Total run time of algorithm: 5333 seconds
Pv module inclinations: 39
=====
Installation Cost:37624.95
Maintenance Cost:14395.18
PV Installation Cost:3633.98
PV Maintenance Cost:728.00
WT Installation Cost:16002.00
WT Maintenance Cost:3200.40
BT Installation Cost:7392.00
BT Maintenance Cost:137.28
Charger Installation Cost:2000.00
Charger Maintenance Cost:60.00
Inverter Installation Cost:2265.00
Inverter Maintenance Cost:679.50
water Tank Installation Cost:1664.00
water Tank Maintenance Cost:128.00
RO Installation Cost:4667.97
RO Maintance Cost:9334.00
    
```

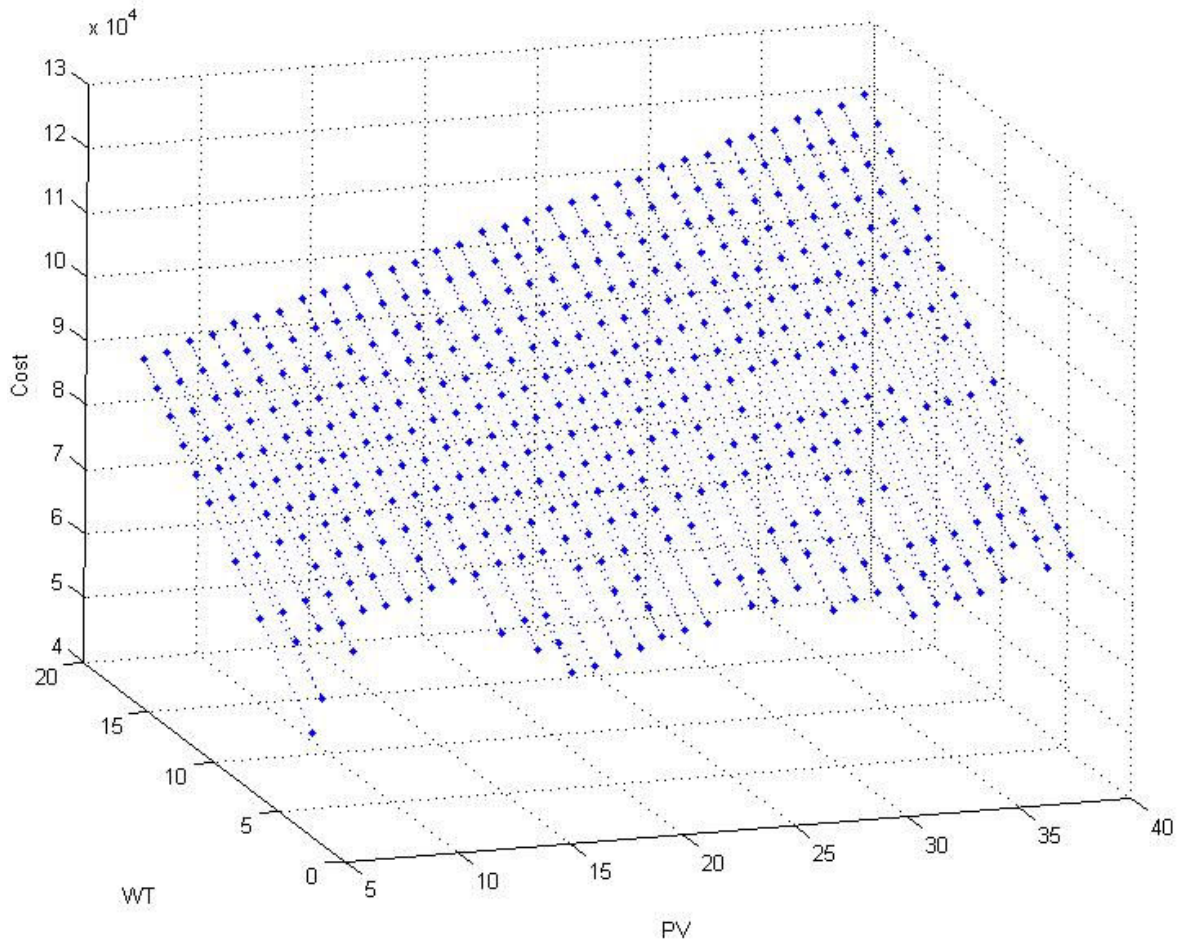
Σχήμα 11.14. Η μορφή του αρχείου εξόδου

Το σχήμα 11.15 δείχνει το διάγραμμα της συνάρτησης κόστους συναρτήσει του αριθμού των φωτοβολταϊκών πλαίσιων και των ανεμογεννητριών για τον βέλτιστο συνδυασμό στοιχείων για το σπίτι και για μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαίσιων.

Οι λύσεις που αναπαριστώνται στο διάγραμμα ικανοποιούν τους περιορισμούς, δηλαδή έχουν περάσει επιτυχή προσομοίωση. Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων έχουν θεωρηθεί σταθερές, εκτός των φορτιστών των οποίων ο αριθμός εξαρτάται από τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι τιμές αυτές είναι ίσες με:

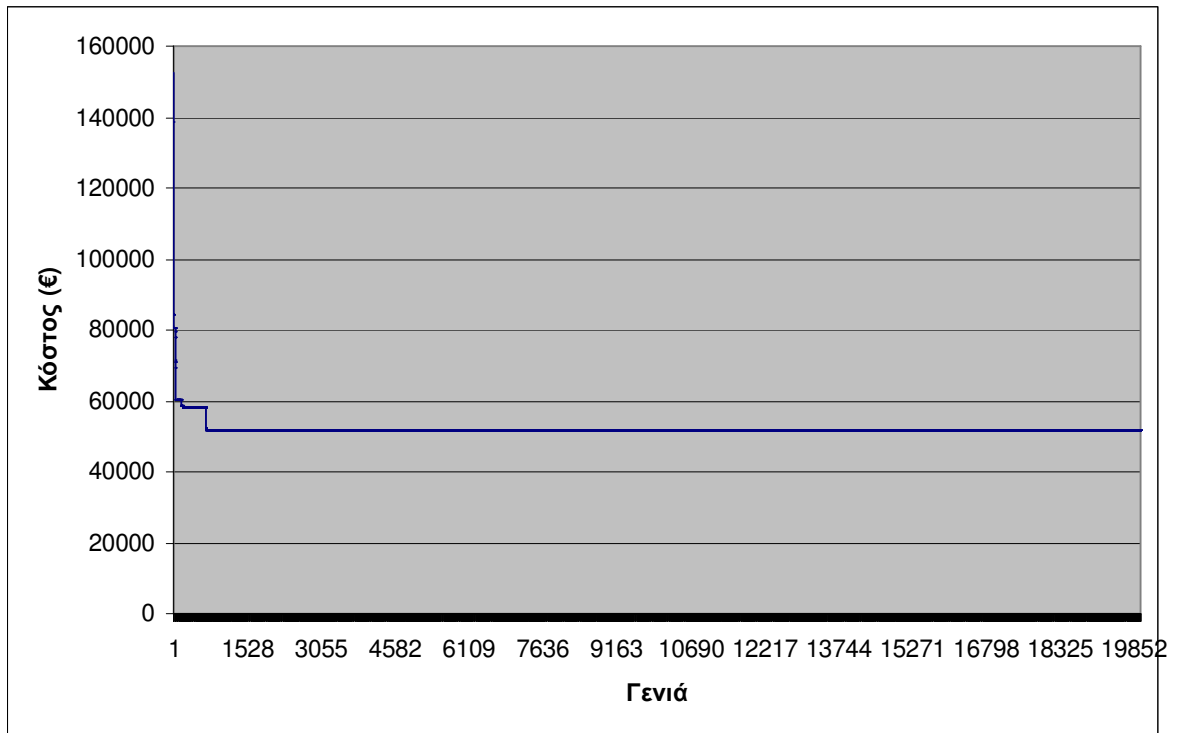
- Συσσωρευτές: 2
- Ύψος πυλώνα: 11 m
- Κλίση φ/β πλαισίων: 39°
- Μέγεθος δεξαμενής: 6400 lt
- Μονάδες αφαλάτωσης: 1
- Μετατροπείς dc/ac: 1
- Χωρητικότητα συσσωρευτών : 230 Ah

Η συνάρτηση κόστους έχει πολλά τοπικά ελάχιστα στα οποία ο αλγόριθμος καταφέρνει και δεν «παγιδεύεται» βρίσκοντας το ολικό ελάχιστο.



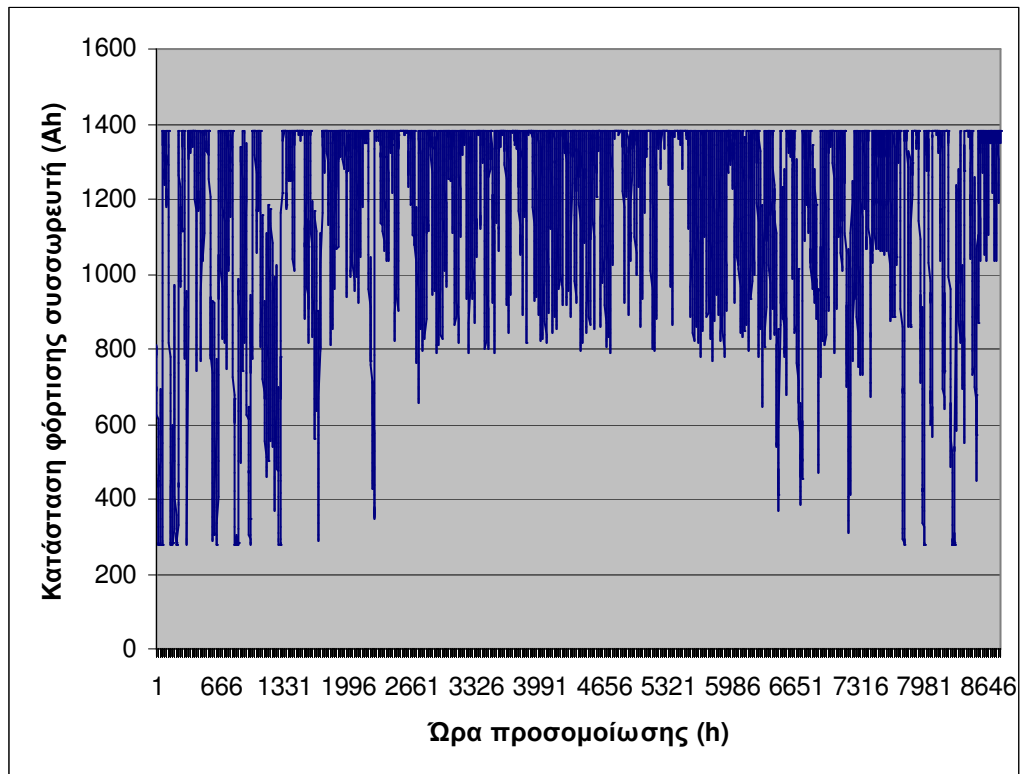
Σχήμα 11.15. Η συνάρτηση κόστους ως συνάρτηση του αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων και του αριθμού των ανεμογεννητριών

Το σχήμα 11.16 δείχνει την πορεία της συνάρτησης κόστους κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου για την περίπτωση του βέλτιστου συνδυασμού για το σπίτι και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η διαστασιολόγηση εκτελέστηκε και για μεγαλύτερο αριθμό γενεών και τα αποτελέσματα παρέμειναν τα ίδια.



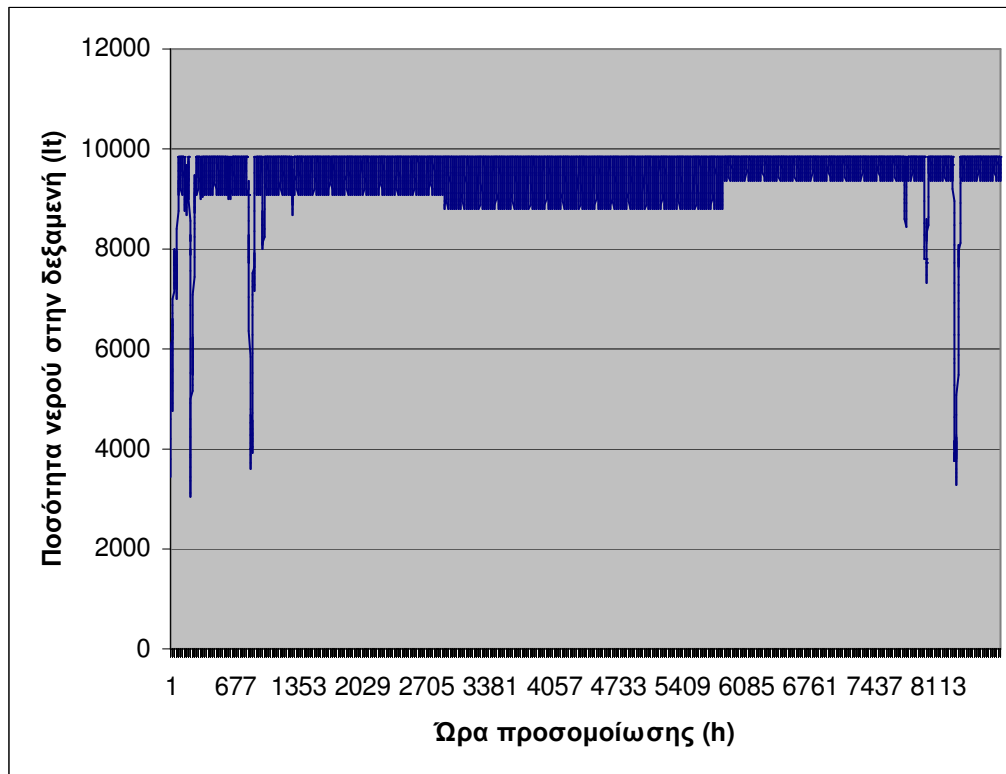
Σχήμα 11.16. Η συνάρτηση κόστους ως συνάρτηση του αριθμού γενιάς κατά την εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου

Στο σχήμα 11.17 φαίνεται η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή του συστήματος κατά την διάρκεια του έτους, ανά ώρα, για την περίπτωση του βέλτιστου συνδυασμού για την κοινότητα και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



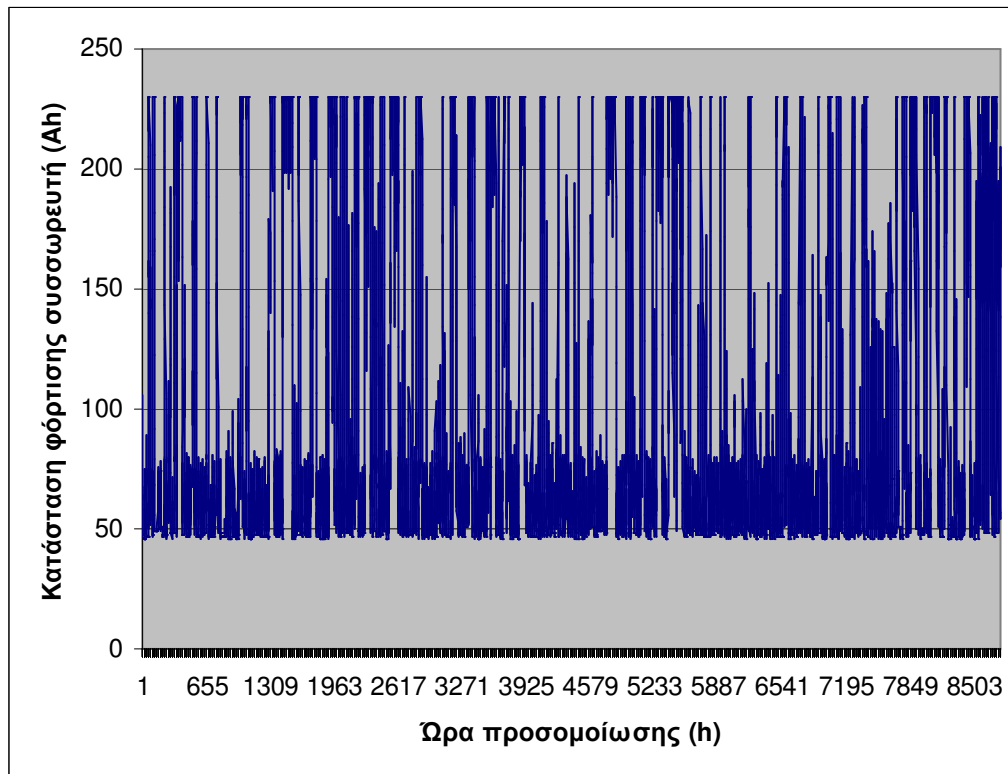
Σχήμα 11.17. Η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή κατά την διάρκεια του έτους προσομοίωσης για τον βέλτιστο συνδυασμό της κοινότητας

Στο σχήμα 11.18 φαίνεται η ποσότητα του νερού που βρίσκεται στην δεξαμενή κατά την διάρκεια του έτους, ανά ώρα, για την περίπτωση του βέλτιστου συνδυασμού για την κοινότητα και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όπως φαίνεται, η δεξαμενή είναι ουσιαστικά συνεχώς γεμάτη καθώς η μονάδα αφαλάτωσης παράγει μεγάλη ποσότητα νερού και έτσι την διατηρεί γεμάτη, καθώς η κατανάλωση είναι μικρότερη.



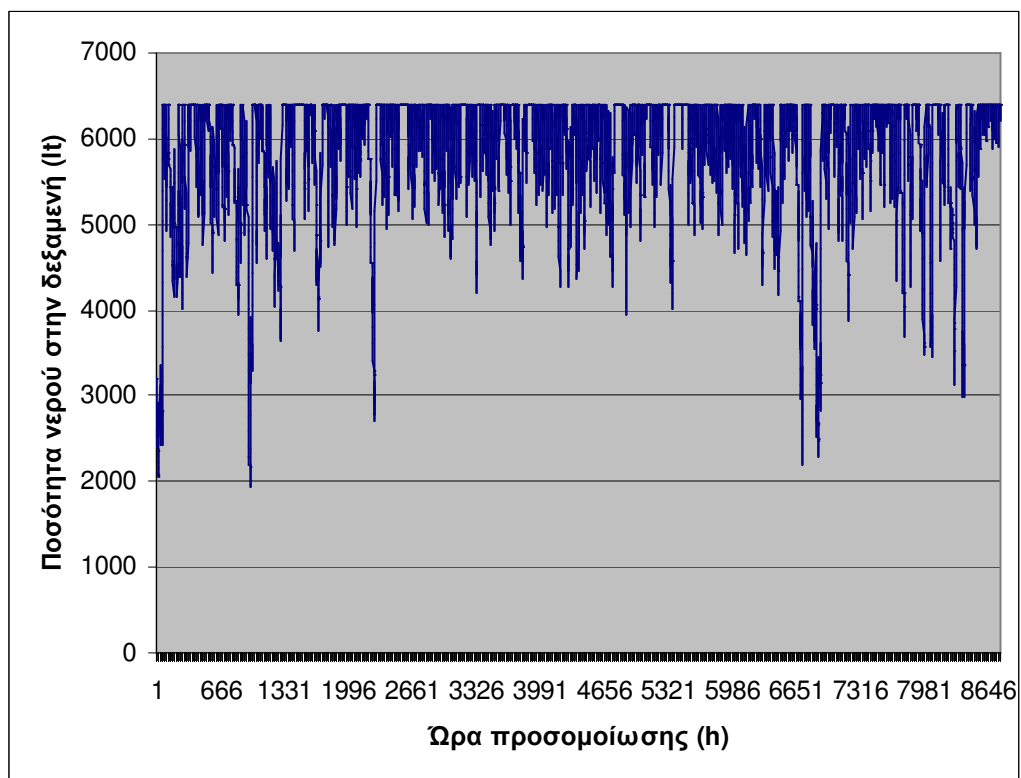
Σχήμα 11.18. Η ποσότητα νερού στην δεξαμενή κατά την διάρκεια του έτους προσομοίωσης για τον βέλτιστο συνδυασμό της κοινότητας

Στο σχήμα 11.19 φαίνεται η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή του συστήματος κατά την διάρκεια του έτους, ανά ώρα, για την περίπτωση του υβριδικού συστήματος για τον βέλτιστο συνδυασμό για το σπίτι και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Σχήμα 11.19. Η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή κατά την διάρκεια του έτους προσομοίωσης για τον βέλτιστο συνδυασμό του σπιτιού

Στο σχήμα 11.20 φαίνεται η ποσότητα του νερού που βρίσκεται στην δεξαμενή κατά την διάρκεια του έτους, ανά ώρα, για την περίπτωση του βέλτιστου συνδυασμού για το σπίτι και μία κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όπως φαίνεται, η δεξαμενή είναι ουσιαστικά συνεχώς γεμάτη καθώς η μονάδα αφαλάτωσης παράγει μεγάλη ποσότητα νερού και έτσι την διατηρεί γεμάτη, καθώς η κατανάλωση είναι μικρότερη.



Σχήμα 11.20. Η ποσότητα νερού στην δεξαμενή κατά την διάρκεια του έτους προσομοίωσης για τον βέλτιστο συνδυασμό του σπιτιού

12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ – ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν έναν πολύ σημαντικό τομέα έρευνας στις μέρες μας. Η δυνατότητα να αποκτήσουμε ενέργεια από ανεξάντλητες πηγές, χωρίς κόστος στο περιβάλλον, είναι ανεκτίμητης σημασίας. Ταυτόχρονα η αξιοποίηση του θαλασσινού νερού για παραγωγή πόσιμου νερού είναι άλλη μια σημαντική καινοτομία που αναμένεται να λύσει πολλά σημαντικά προβλήματα.

Η διαστασιολόγηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που τροφοδοτούν μονάδες αφαλάτωσης αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα καθώς αποτελεί το εργαλείο με το οποίο βρίσκεται η οικονομικότερη λύση για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τέτοιων συστημάτων και είναι η διαδικασία η οποία θα καταδείξει το κατά πόσο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνολογία.

Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία έγκειται σε αυτόν ακριβώς τον συνδυασμό των δύο επιμέρους μεγάλων τομέων έρευνας, της ενέργειας και του νερού. Με ένα αρχικό κόστος εγκατάστασης, κάποιο ετήσιο κόστος συντήρησης και πρώτη ύλη το θαλασσινό νερό, μπορούμε να έχουμε πόσιμο νερό που να τροφοδοτεί και να καλύπτει τις ανάγκες μιας ολόκληρης πόλης σε νερό.

Η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, είναι γρηγορότερη σε σχέση με άλλες μεθόδους διαστασιολόγησης, ενώ επίσης λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους κόστους του συστήματος άσχετα από την σημαντικότητα τους στο ολικό κόστος. Το σημαντικότερο, όμως, πλεονέκτημα της είναι ότι λόγω της χρησιμοποίησης των γενετικών αλγορίθμων, δεν «παγιδεύεται» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.

Μελετώντας τα αποτελέσματα της μεθόδου, είναι φανερό ότι το κόστος του συστήματος δεν είναι απαγορευτικό για την εφαρμογή του σε πραγματικό επίπεδο. Πόσο μάλλον, όταν είναι δεδομένο ότι η τεχνολογία, όσον αφορά όλα τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος, αναπτύσσεται και στο άμεσο μέλλον μπορούμε να προσδοκούμε ακόμα καλύτερες, αποδοτικότερες και πιο οικονομικές λύσεις, όσον αφορά την απόδοση και το κόστος όλων των επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Μια αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι το ότι όλες οι βέλτιστες λύσεις χρησιμοποιούν φορτιστές με MPPT, παρά το ότι αυτοί είναι πιο ακριβοί. Η

καλύτερη διαχείριση ενέργειας που εξασφαλίζουν αυτού του τύπου οι φορτιστές, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την οικονομικότερη συνολικά λύση.

Μια επέκταση θα ήταν το σύστημα να έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει και άλλες μεθόδους αφαλάτωσης και όχι μόνο την αντίστροφη ώσμωση.

Τέλος, μια άλλη σημαντική επέκταση του συστήματος θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη ενός γραφικού user-interface για ευκολότερη χρησιμοποίηση της μεθόδου από τον χρήστη καθώς και η διασύνδεση του με μια βάση δεδομένων με μετεωρολογικά δεδομένα ή και με δεδομένα για τους τύπους των στοιχείων.

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μ. Κουνενάκη, «Οικονομοτεχνική Μελέτη Μονάδας Αφαλάτωσης με τη χρήση ΑΠΕ», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2002.
- [2] J. T. Houghton, G. J. Jenkins, J. J. Ephraums, “Climate Change : The IPCC Scientific Assessment”, Cambridge University Press, UK,1990.
- [3] V. Belessiotis, E. Delyannis, “Water shortage and renewable energies (RE) desalination – possible technological applications”, Desalination, 139, 133-138, 2001.
- [4] Sotiris A.Kalogirou, “Effect of fuel cost on the price of desalination water : a case for renewables”, Desalination, 138, 137-144, 2001.
- [5] Lourdes Garcia-Rodriguez, “Seawater desalination driven by renewable energies: a review”, Desalination, 143, 103-113, 2001.
- [6] Eftihia Tzen, Richard Morris, “Renewable energy sources for desalination”, Solar Energy, 75, 375-379, 2003.
- [7] T.R. Morgan, T.H. Marshall and B.J. Brnikworth, “ ‘ARES’ – A refined simulation program for the sizing and optimization of autonomous hybrid energy systems”, Solar Energy 59, 205-215,1997.
- [8] Ali Naci Celik, “Techno-economic analysis of autonomous PV-wind hybrid energy systems using different sizing methods”, Energy Conversion and Management, 44, 1951-1968, 2003.
- [9] W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez, “Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system”, Electric Power Systems Research, 39, 35-38,1996.
- [10] Ali M. El-Nashar, “Optimum Selection of Cogeneration Systems for Power and Desalination”, Desalination, 71, 211-232,1989.
- [11] Α. Ποτηράκης, «Ανάπτυξη Λογισμικού Διαστασιολόγησης Υβριδικού Συστήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2003.
- [12] Α. Νεοκλέους, Σ. Κωνσταντινίδη, «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα, 1991.

- [13] Ι. Παπαστυλιανού, «Οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση μικρών απομονωμένων υβριδικών ενεργειακών συστημάτων», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2000.
- [14] F. Treble, “Generating Electricity From The Sun”, Pergamon Press, 1991.
- [15] Γ. Παναγιωτόπουλος, Α. Ψειρίδη, «Αξιοποίηση επενδύσεων εκμετάλλευσης αιολικού δυναμικού», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 1991.
- [16] Γ. Καρινιωτάκης, «Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης προδιαγραφών αιολικού πάρκου», Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 1990.
- [17] Δεληγιάννη, «Μέθοδοι και Συστήματα Αφαλάτωσης», Αθήνα, 1995.
- [18] C.R.E.S. Center of Renewable Energy Sources, “Desalination Guide Using Renewable Energies”, 1998.
- [19] J. K. Kaldellis, “Optimum autonomous win – power system sizing for remote consumers, using long-term wind speed data”, Applied Energy, 71, 215-233, 2002.
- [20] E. Tzen, D. Thefilloyiannakos, M. Sigalas, K. Karamanis, “Design and Development of a Hybrid Autonomous System for Seawater Desalination”, Desalination, 166, 267-274, 2004.
- [21] Sultan A. Kershman, Jurgen Rheinlander, Hansjorg Gabler, “Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources – hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya”, Desalination, 153, 17-23, 2002.