



ΜΠΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗ και ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ και ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Σχεδιασμός Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής
Ενέργειας από ΑΠΕ για την Κάλυψη Αναγκών
Ηλεκτρικής Ενέργειας και Νερού με Αφαλάτωση**

Διπλωματική Εργασία

Αβραάμ Καρταλίδης
Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

Ακαδ. Υπεύθυνος: Δ. Ασημακόπουλος

Αθήνα
2011

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Πανεπιστήμιο Πειραιά

Περίληψη

Η συμπαραγωγή νερού και ηλεκτρισμού με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί λύση για την κάλυψη των αναγκών απομονωμένων περιοχών. Αυτή η εργασία, παρουσιάζει μια νέα μεθοδολογική προσέγγιση για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με κύριο σκοπό την κάλυψη αναγκών μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της μονάδας περιλαμβάνει τον υπολογισμό της εγκατεστημένης ισχύος των ανανεώσιμων μονάδων παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) των μονάδων αποθήκευσης (συσσωρευτές), ενώ δίνει πληροφορίες για την παραγωγή ενέργειας που θα απαιτηθεί από συμβατικές μορφές ενέργειας (π.χ. συμβατικό σύστημα Diesel). Ο υπολογισμός της εγκατεστημένης ισχύος των δύο μονάδων και της παραγόμενης ενέργειας γίνεται με τη χρήση απλοποιημένων μαθηματικών μοντέλων της ημερήσιας διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέθοδος που αναπτύσσεται εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της εγκατεστημένης ισχύος των συστημάτων και για τα παραγόμενα ποσά ενέργειας σε μια μικρή μονάδα αφαλάτωσης στην Τύνιδα της Τυνησίας ενώ γίνεται και μια προκαταρκτική οικονομική ανάλυση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας.

Abstract

The cogeneration of water and electricity through the exploitation of Renewable Energy Sources is becoming an increasingly promising option, especially for arid and remote areas, where alternative energy and water supply is either unavailable or too costly to develop. This thesis presents a new methodological approach for the preliminary design of a Renewable Energy (RE) power plant, primarily aimed at meeting the energy requirements of a Reverse Osmosis desalination unit. The design of the power plant's components involves the calculation of the installed capacity of each RE component (photovoltaics and Wind Energy Conversion Systems), the size of the energy storage system (Battery), and required auxiliary energy sources (Diesel Consumption). The sizing of the two RE components and the calculation of the corresponding energy production is performed using a simplified mathematical model for the diurnal variation of wind speed and solar radiation. The overall approach is applied for the sizing of components and the estimation of auxiliary energy supply needed for a small-sized desalination unit in Tunisia, and is complemented with a preliminary economic assessment of the power plant costs

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το θέμα της διαστασιολόγησης ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας για μια μονάδα αφαλάτωσης. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, συμβατικά Diesel συστήματα και μπαταρία ενώ η αφαλάτωση πραγματοποιείται με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης. Η μεθοδολογία είναι γενική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε εξωτερικό φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας.

- Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή του σκοπού της εργασίας καθώς και του προβλήματος που προσπαθεί να αντιμετωπίσει. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και ιστορική αναφορά των τεχνολογιών των ανανεώσιμων πηγών που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση καθώς και αναφορά στις τεχνολογίες αφαλάτωσης με ιδιαίτερο βάρος στη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους η αφαλάτωση με ΑΠΕ αποτελεί μια πρακτική που θα χρησιμοποιηθεί και ειδικά τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας (Φωτοβολταϊκά και Αιολικά) μαζί με την αντίστροφη όσμωση. Στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου εξηγείται και η χρησιμότητα αυτής της εργασίας.
- Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά τι περιλαμβάνει η υβριδική μονάδα παραγωγής ενέργειας και γίνεται αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να είναι γνωστά για κάθε σύστημα έτσι ώστε να είναι εφαρμόσιμη η μελέτη.
- Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί το βασικό κεφάλαιο της εργασίας και περιγράφει τους αλγορίθμους σχεδιασμού (διαστασιολόγηση) των ενεργειακών συστημάτων.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μελέτη περίπτωσης και η ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Το έκτο κεφάλαιο είναι το παράρτημα στο οποίο δίνονται αναλυτικά οι εξισώσεις των μοντέλων που περιγράφουν το σχεδιασμό.

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος OPEN-GAIN και έχει παρουσιαστεί στο International Congress on Environmental Modelling and Software 2008 στη Βαρκελώνη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή Δ. Ασημακόπουλο για την καθοδήγηση και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το ενδιαφέρον ζήτημα της αφαλάτωσης. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω για την πολύτιμη βοήθεια τους, καθώς και για την υπομονή τους, όλους τους συνεργάτες της Μονάδας Διαχείρισης Ενεργειακών & Περιβαλλοντικών Συστημάτων της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και κυρίως τον δρ Γ. Αραμπατζή.

Καρταλίδης Αβραάμ

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	10
1.1	Περιγραφή Προβλήματος	10
1.2	Σκοπός της Εργασίας	12
1.3	Ιστορικά Στοιχεία για ΑΠΕ	12
1.3.1	Αιολική Ενέργεια	12
1.3.2	Ηλιακή Ενέργεια	14
1.4	Ιστορικά Στοιχεία για Αφαλάτωση	15
1.5	Αντίστροφη Όσμωση	18
2	Αφαλάτωση με ΑΠΕ	23
2.1	Καθορισμός Προβλήματος	23
2.2	Δημιουργία Αφαλάτωσης με ΑΠΕ	25
3	Περιγραφή Ενεργειακής Μονάδας	29
3.1	Παραγωγή Ενέργειας	30
3.1.1	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	30
3.1.2	Αιολικά Συστήματα	31
3.1.3	Συμβατικά Diesel Συστήματα	31
3.1.4	Μπαταρίες	31
3.2	Καταναλωτές	32
3.2.1	Κατανάλωση Αντίστροφης Όσμωσης	32
3.2.2	Κατανάλωση Ηλεκτρικού Ρεύματος	32
3.2.3	Περίσσια Ηλεκτρικού Ρεύματος	32
3.3	Βοηθητικά Συστήματα	33
3.3.1	Αντιστροφείς	33
4	Σχεδιασμός Ενεργειακής Μονάδας	34
4.1	Μεθοδολογία Σχεδιασμού	35
4.1.1	Δεδομένα που Απαιτούνται	36
4.1.2	Βήμα Σχεδιασμού 1 - Υπολογισμός Αναγκών Ενέργειας και Ισχύος	37
4.1.3	Βήμα Σχεδιασμού 2 - Διαστασιολόγηση Ανανεώσιμων Μονάδων Παραγωγής Ενέργειας	37

4.1.4	Βήμα Σχεδιασμού 3 - Διαστασιολόγηση Βοηθητικών Συστημάτων	39
4.2	Αλγόριθμοι Σχεδιασμού	40
4.2.1	Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος	40
4.2.2	Σχεδιασμός Αιολικού Συστήματος	40
4.2.3	Σχεδιασμός Βοηθητικών Συστημάτων	41
5	Περίπτωση Εφαρμογής	48
5.1	Δεδομένα	48
5.1.1	Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά Περιοχής	48
5.1.2	Δεδομένα Συστημάτων	51
5.1.3	Μορφή Αποτελεσμάτων	54
5.2	Αποτελέσματα	55
5.2.1	Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης	55
5.2.2	Ενεργειακή Ανάλυση	56
5.2.3	Οικονομική Ανάλυση	60
5.3	Συμπεράσματα	60
6	Μαθηματικά Μοντέλα	62
6.1	Αιολικό Σύστημα	62
6.2	Φωτοβολταϊκό Σύστημα	64
6.3	Κατανομή Ηλιακής Ενέργειας	65
6.4	Κατανομή Αιολικής Ενέργειας	67
6.5	Κατανομή Ισχύος Ύβριδικού Συστήματος	69
6.6	Σύστημα Μπαταρίας	70
6.7	Συμβατικό Σύστημα Diesel	71
6.8	Μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης	71
6.9	Οικονομικά Μοντέλα	71
6.9.1	Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας	71
6.9.2	Μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης	73
6.9.3	Συνολικό Κόστος Νερού	74

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Η αναλογία του πληθυσμού (%) με πρόσβαση σε πηγή καθαρού νερού το 1990 και το 2008	11
1.2	Μια ανεμογεννήτρια μερικών <i>kW</i> παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται σε μικρά υβριδικά συστήματα	13
1.3	Ένας παλιός μύλος στο Aarhus της Δανίας	15
1.4	Η δυναμικότητα της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο το 2008 [8]	18
1.5	Η αρχή λειτουργίας της αντίστροφης όσμωσης	19
1.6	Μονογραμμικό σχήμα με τις ροές του νερού κατά την αντίστροφη όσμωση.	21
1.7	Η ροή του νερού σε σχέση με την υδροστατική πίεση διαμέσου της μεμβράνης	22
2.1	Η ανάλυση του κόστους μιας μονάδας αφαλάτωσης [11] .	24
2.2	Οι πιθανές μέθοδοι αφαλάτωσης με ΑΠΕ [12]	24
2.3	Τα ποσοστά των υφιστάμενων μονάδων αφαλάτωσης που συνδυάζουν τεχνολογίες αφαλάτωσης με ΑΠΕ [13]	25
2.4	Οι ταχύτητες του ανέμου στην Ευρώπη [14]	26
2.5	Οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στην περιοχή της Μεσογείου [15]	26
3.1	Ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτρια	29
3.2	Η διασύνδεση των στοιχείων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας	30
4.1	Ο αλγόριθμος σχεδιασμού του φωτοβολταϊκού συστήματος	41
4.2	Ο αλγόριθμος σχεδιασμού του αιολικού συστήματος	41
4.3	Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ζήτησης η οποία δεν καλύπτεται απευθείας από ανανεώσιμες πηγές	43
4.4	Περιγραφική κατανομή της διαθέσιμης ανανεώσιμης ισχύος και η σχέση του με τη ζήτηση	44
4.5	Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης της χωρητικότητας της μπαταρίας για συγκεκριμένο μήνα σχεδιασμού	45

4.6	Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ενέργειας από συμβατικό σύστημα Diesel για την τυπική ημέρα κάθε μήνα (<i>i</i>)	47
5.1	Κανονικοποιημένη καμπύλη ισχύος ταχύτητας τυπικής ανεμογεννήτριας	51
5.2	Η μονάδα αφαλάτωσης που έχει εγκατασταθεί στην Τυνησία	52
5.3	Η καμπύλη της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας αντίστροφης όσμωσης που χρησιμοποιήθηκε, σε σχέση με την αλατότητα	53
5.4	Διάγραμμα Sankey για την ενεργειακή ανάλυση του συστήματος	55
5.5	Η ενεργειακή ανάλυση για τις περιπτώσεις Diesel-Min . .	58
5.6	Η ενεργειακή ανάλυση για τις περιπτώσεις Diesel-Max . .	58
5.7	Η κατανομή των ενεργειακών δεικτών για τις περιπτώσεις Diesel-Min	59
5.8	Η κατανομή των ενεργειακών δεικτών για τις περιπτώσεις Diesel-Max	59
5.9	Εκτίμηση του συνολικού κόστους της ενεργειακής μονάδας στον κύκλο ζωής	61
6.1	Καμπύλη ισχύος ταχύτητας τυπικής ανεμογεννήτριας . . .	64
6.2	Μοντέλα ημερήσιου προφίλ για (a) ηλιακή ακτινοβολία και (b) ηλιακή ισχύ	66
6.3	Σύγκριση ανάμεσα στην ηλιακή ενέργεια που παράγεται και την ζήτηση του φορτίου	66
6.4	Μοντέλο για την ταχύτητα του ανέμου στη διάρκεια μια ημέρας	68
6.5	Το προφίλ της παραγόμενης ισχύος από το αιολικό σύστημα	68
6.6	Το προφίλ της παραγόμενης ισχύος από το συνολικό σύστημα των μονάδων ΑΠΕ	70
6.7	Η κατανάλωση ενέργειας μονάδας αφαλάτωσης σε σχέση με την αλατότητα	72

Κατάλογος πινάκων

1.1	Οι βασικές κατηγορίες νερού με βάση τη συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων.	17
1.2	Η πρόοδος στην αποδοτικότητα των μονάδων αντίστροφης όσμωσης για το θαλασσινό νερό.	20
2.1	Εγκατεστημένες μονάδες αντίστροφης όσμωσης με ΑΠΕ .	28
4.1	Οι μεταβλητές σχεδιασμού για τις ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας.	37
4.2	Οι παράμετροι σχεδιασμού για τις βοηθητικές μονάδες. .	39
5.1	Μετεωρολογικά δεδομένα ανέμου.	49
5.2	Μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου ανά μήνα.	50
5.3	Μετεωρολογικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας.	50
5.4	Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου.	51
5.5	Τεχνικά χαρακτηριστικά για τη συστοιχία μπαταρίας. . .	53
5.6	Απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς	56
5.7	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς και χωρητικότητα	57
5.8	Αριθμός δομικών μονάδων διαστασιολόγησης	57

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

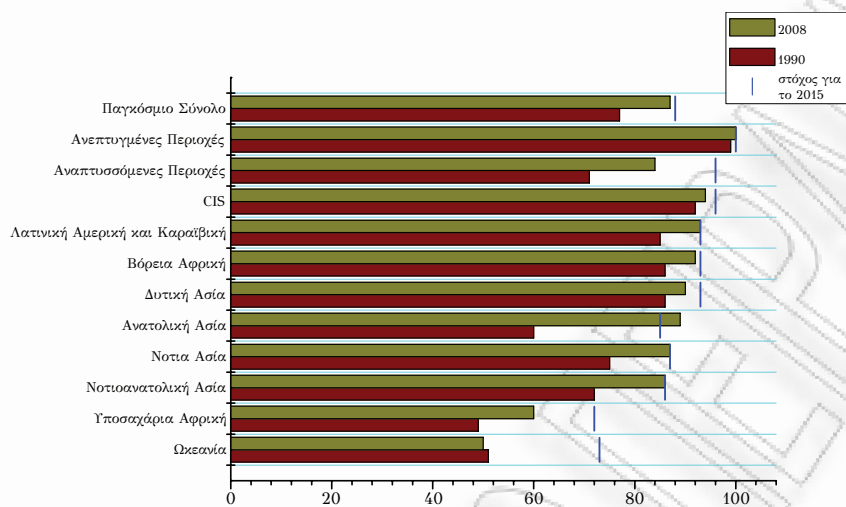
1.1 Περιγραφή Προβλήματος

Τα συστήματα αφαλάτωσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μια νέα και ταχέως αναπτυσσόμενη πρακτική ειδικά σε περιοχές με πλούσιο δυναμικό το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει αρκετό πόσιμο νερό.

Οι κυριότερες μορφές ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια ενώ και η γεωθερμία αρχίζει να συμμετέχει σε συστήματα παραγωγής νερού. Η αφαλάτωση νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τη διαθέσιμη πρωτογενή παροχή ενέργειας. Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης (Reverse Osmosis) κερδίζει το μεγαλύτερο μερίδιο ενώ υπάρχουν αρκετές θερμικές και ηλεκτροχημικές μέθοδοι. Για να εφαρμοσθεί η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης πρέπει να δοθεί τεχνικό έργο μέσω αύξησης πίεσης από μια αντλία, της οποίας η λειτουργία απαιτεί τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος ενώ σπάνια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάποια απευθείας μηχανική μέθοδος. Εάν η περιοχή στην οποία προβλέπεται να γίνει η εγκατάσταση της μονάδας αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση δεν είναι συνδεδεμένη με κεντρικό δίκτυο παροχής ρεύματος τότε η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται μπορεί να παραχθεί από συμβατικές, από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά και από συνδυασμό των δυο. Επιπλέον εάν υπάρχει δίκτυο στην περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο του ή σε συνδυασμό με ΑΠΕ.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει σαφές πως ο όρος "Υβριδικό" αναφέρεται στην παραγωγή ενέργειας σε αυτόνομο σύστημα με δύο (ή και περισσότερες) διαφορετικές τεχνολογίες ΑΠΕ. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως υβριδικά και συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν μια τεχνολογία ΑΠΕ και κάποια συμβατική μορφή ενέργειας (π.χ. γεννήτρια).

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συμβατικά, ΑΠΕ ή υβριδικά συστήματα για παραγωγή νερού σε περιοχές που δεν υπάρχει ηλεκτρικό



Εικόνα 1.1: Η αναλογία του πληθυσμού (%) με πρόσβαση σε πηγές καθαρού νερού το 1990 και το 2008

δίκτυο αφορά κυρίως μικρές απομονωμένες κοινότητες οι οποίες πρέπει να καλύψουν τη βασική ανάγκη για νερό. Όμως αμέσως γεννιέται η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται για να καλύψει και τις ηλεκτρικές ανάγκες του πληθυσμού. Η σωστή σχεδίαση της μονάδας παραγωγής ενέργειας μαζί με ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης που υπακούει σε λογικούς κανόνες εξυπηρέτησης φορτίου είναι ικανά να πετύχουν το στόχο βελτιώνοντας τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν τη χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας καθώς και τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας.

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών για τους αναπτυξιακούς στόχους του πλανήτη [1], το ποσοστό των κατοίκων που είχαν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό για το 2008 είναι περίπου 87% ενώ στην υποσαχάρια Αφρική το ποσοστό αυτό ήταν μόλις 60%. Ο στόχος για το 2015 είναι το ποσοστό αυτό στην υποσαχάρια Αφρική να ανέβει στο 80% ενώ το ποσοστό για το σύνολο του πλανήτη είναι στο 90% (Εικόνα 1.1). Στα πλαίσια αυτών των στόχων, η αφαλάτωση αλμυρού ή και υφάλμυρου νερού με ανανεώσιμες πηγές μπορεί να δώσει αξιόπιστες και οικονομικές λύσεις σε μεγάλα ή και μικρά αυτόνομα συστήματα.

1.2 Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει μια μέθοδο σχεδίασης συστημάτων παραγωγής νερού και ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη όσο το δυνατό λιγότερα δεδομένα από πλευράς μετεωρολογικών και τεχνικών χαρακτηριστικών με ταυτόχρονη χρήση ελάχιστων δεδομένων για τη ζήτηση ενέργειας και νερού.

Η μέθοδος σχεδιασμού δημιουργεί εναλλακτικά συστήματα τα οποία αξιολογούνται για την ενεργειακή και οικονομική τους απόδοση.

Η μέθοδος σχεδίασης αποτελεί το πρώτο και βασικό κομμάτι ενός γενικότερου συστήματος λήψης αποφάσεων (Decision Support System). Τα υπόλοιπα κομμάτια αφορούν την προσομοίωση, την ανάλυση ρίσκου καθώς και την ανάλυση ευαισθησίας. Τέλος όλες οι εναλλακτικές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται σε μια πολυκριτηριακή μέθοδο.

Στα πλαίσια της εργασίας, η μέθοδος σχεδίασης υλοποιήθηκε σε υπολογιστικό κώδικα με τη χρήση προγραμματισμού σε MathCAD έτσι ώστε να είναι εύκολη η εισαγωγή δεδομένων και η λήψη αποτελεσμάτων προς αξιολόγηση. Επιπλέον έγινε μελέτη εφαρμογής περίπτωσης (Case Study) για μια περιοχή κοντά στην Τύνιδα της Τυνησίας.

1.3 Ιστορικά Στοιχεία για ΑΠΕ

Ο άνθρωπος προσπάθησε από το παρελθόν να εκμεταλλευθεί τα στοιχεία της φύσης έτσι ώστε να τα χρησιμοποιήσει προς όφελος του κυρίως εκεί που οι ανάγκες ήταν μεγάλες. Έτσι προέκυψαν πολλές κατασκευές που αναλάμβαναν την εκτέλεση εργασιών οι οποίες ήταν σκληρές για τον άνθρωπο και για τα ζώα. Από τα πρώτα στοιχεία τα οποία εκμεταλλεύτηκε ο άνθρωπος ήταν ο άνεμος και τον χρησιμοποίησε για τις θαλάσσιες μεταφορές με τα ιστιοφόρα πλοία αλλά και για την παραγωγή αλευριού από τους ανεμόμυλους. Οι κοινωνίες εκμεταλλεύτηκαν την παρουσία του ανέμου προτού ανακαλύψουν τις αιτίες που τον δημιουργούν και προτού ακόμα κατανοήσουν την έννοια της ενέργειας όπως την ξέρουμε σήμερα. Ακόμα μεγαλύτερη σημασία είχε ο ήλιος για όλους τους πολιτισμούς που εκτός από θεϊκή διάσταση, του έδωσαν και πρακτική διάσταση αφού εκμεταλλεύθηκαν την θερμότητα του για ξήρανση.

1.3.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που φέρει ο άνεμος και μπορεί γενικά να εκμεταλλευτεί από τον άνθρωπο με χρήση διαφόρων τεχνολογιών. Πρωταρχική πηγή της αιολικής ενέργειας είναι η θέρμανση από τις ακτίνες του ήλιου. Ο ήλιος θερμαίνει τις αέριες μάζες στην επιφάνεια της γης και αρχίζουν να μετακινούνται λόγω διαφοράς πίεσης που οφείλεται



Εικόνα 1.2: Μια ανεμογεννήτρια μερικών kW παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται σε μικρά υβριδικά συστήματα

σε ανομοιόμορφη θέρμανση. Η περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της είναι από τις βασικότερες αιτίες για την ανομοιόμορφη θέρμανση της, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει η γεωγραφία, το ανάγλυφο αλλά και το μικροκλίμα της κάθε περιοχής [2].

Οι πρώτες αναφορές (7^{ος} αιώνας π.Χ.) κάνουν λόγο για ανεμόμυλους κάθετου άξονα στην περιοχή τους Αφγανιστάν για την άλεση του σιταριού. Οι πρώτες λεπτομερείς αναφορές για ανεμόμυλους οριζοντίου άξονα υπάρχουν σε ιστορικά κείμενα από την Περσία, το Θιβέτ και την Κίνα από τον 10^ο αιώνα περίπου. Από τη Μέση Ανατολή διαδόθηκε η χρήση τους στην Ευρώπη από τα μέσα του 12^{ου} αιώνα. Από τότε βελτιώθηκε πάρα πολύ η απόδοση τους και έως τις αρχές του 20^{ου} αιώνα αποτελούν μια σημαντική πηγή ενέργειας με εφαρμογές στο άλεσμα των σιτηρών, στο κόψιμο του ξύλου και άλλων γεωργικών προϊόντων καθώς και σε άντληση νερού για άρδευση ή αποξήρανση [3].

Οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν την αιολική ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ήταν οι Δανοί το 1891 με μια πειραματική εγκατάσταση στη περιοχή του Askov με συνολική ισχύ $18kW$.

Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με ειδικές μηχανές που ονομάζονται ανεμογεννήτριες και μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου κατευθείαν σε ηλεκτρισμό. Η ισχύς των ανεμογεννητριών που είναι διαθέσιμες σήμερα ξεκινούν από μερικά $Watt$ και φτάνουν έως και $5MW$. Οι μικρές ανεμογεννήτριες (έως $15kW$) χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτόνομες εγκαταστάσεις (Εικόνα 1.2) αλλά και ως πηγή ενέργειας σε μικρά σκάφη, ενώ οι μεγάλες χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικό δίκτυο. Σήμερα η αιολική ενέργεια αποτελεί τη δεύτερη σημαντικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μετέχει στο παγκόσμιο ενεργειακό ηλεκτρικό μείγμα με πρώτη την υδροηλεκτρική ενέργεια [4] ενώ το ποσοστό της συνεχίζει να αυξάνεται.

1.3.2 Ηλιακή Ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια ονομάζουμε την ενέργεια που στέλνει ο ήλιος (στη Γη) μέσω της ακτινοβολίας του. Η ενέργεια αυτή αποτελεί προϊόν των αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Η ηλιακή ακτινοβολία, που είναι ο φορέας της ηλιακής ενέργειας, αλληλεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον της γης με αποτέλεσμα ένα ποσοστό (περίπου 30%) να ανακλάται, ένα άλλο ποσοστό (περίπου 47%) να μετατρέπεται σε θερμότητα στον αέρα, στη Γη και στους ωκεανούς ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται στον υδρολογικό κύκλο (εξάτμιση και βροχόπτωση) καθώς και ένα μικρό ποσοστό σε φωτοσύνθεση και στη δημιουργία των ανέμων [2].

Ο ήλιος αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο στην ανθρώπινη ιστορία με αναφορές που χρονολογούνται από τότε που υπάρχουν πηγές. Θεοποιήθηκε από όλους τους λαούς του πλανήτη αναγνωρίζοντας με αυτό τον τρόπο τη σημαντικότητα του για τη δημιουργία και διατήρηση της ζωής. Η έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι συνδεδεμένη με την ίδια τη διαδικασία της ζωής στον πλανήτη.

Καθώς ο άνθρωπος κατανοούσε τα φυσικά φαινόμενα, προσπάθησε να εκμεταλλευθεί άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι αρχικά χρησιμοποίησε την ηλιακή ακτινοβολία για την ξήρανση τροφών και υφασμάτων ενώ αργότερα χρησιμοποίησε την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση νερού προς χρήση. Με την ανακάλυψη του ηλεκτρικού ρεύματος έγιναν προσπάθειες μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια μπορεί να γίνει κυρίως με δύο μεθόδους. Με τη χρήση ηλιακών θερμικών συστημάτων και με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στη πρώτη μέθοδο συγκεκριμένα κάτοπτρα εστιάζουν τις ακτίνες του ηλίου σε έναν θερμαντήρα ο οποίος θερμαίνει νερό σε υψηλή πίεση και κατόπιν ακολουθεί θερμοδυναμικό κύκλο Rankine. Στη δεύτερη μέθοδο η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρικό ρεύμα με τη χρήση φωτοβολταϊ-



Εικόνα 1.3: Ένας παλιός μύλος στο Aarhus της Δανίας

κών στοιχείων μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Το 1839 ο Becquerel, κάνοντας πειράματα με μια μπαταρία υγρού τύπου, διαπίστωσε πως η τάση στα άκρα της αύξανε όταν στις πλάκες (ηλεκτρόδια) προσέπιπτε ηλιακό φως [2]. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε αρκετά χρόνια αργότερα (1876) στο σελήνιο. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου όμως άργησε αρκετά καθώς βασίζεται στη κβαντική θεωρία. Η ανάπτυξη των ημιαγωγών στα τέλη της δεκαετίας του 1940 οδήγησε στη δημιουργία του πρώτου φωτοβολταϊκού κελιού από πυρίτιο με σημαντικό βαθμό απόδοσης. Από τις πρώτες εφαρμογές της νέας τεχνολογίας ήταν για την τροφοδοσία του δορυφόρου Vanguard 1 το 1958. Από τότε έως σήμερα η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών γνώρισε μεγάλη πρόοδο ενώ η πετρελαιϊκή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του 1970, επιτάχυνε την εξέλιξη και την εφαρμογή τους στην ηλεκτροπαραγωγή [5].

1.4 Ιστορικά Στοιχεία για Αφαλάτωση

Η αφαλάτωση είναι μια διεργασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση άλατος από ένα υγρό. Όταν το υγρό είναι νερό, τότε η διαδικασία αυτή ονομάζεται αφαλάτωση νερού. Η αφαλάτωση διακρίνεται σε φυσική και τεχνητή. Η φυσική αφαλάτωση είναι μια συνεχής διεργασία και αποτελεί μέρος του κύκλου του νερού και πραγματοποιείται με την εξάτμιση του νερού λόγω της θερμότητας και της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και με την διαδικασία της παγοποίησης στους πόλους της γης (π.χ.

δημιουργία παρόβουνων). Η τεχνητή αφαλάτωση αποτελεί την προσπάθεια του ανθρώπου να αφαιρέσει τα άλατα από το νερό με την βοήθεια ειδικών συσκευών, παρέχοντας ενέργεια για τη λειτουργία τους.

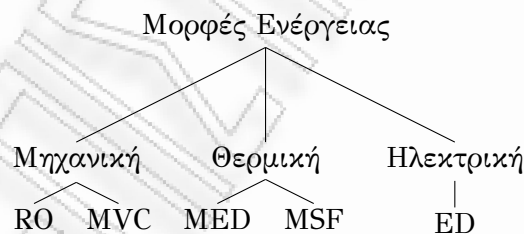
Για να γίνει αφαίρεση του νερού από το αλμυρό νερό πρέπει να εφαρμοσθεί κάποια μέθοδος διαχωρισμού. Ιστορικά, οι πρώτες μέθοδοι αφαλάτωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή φρέσκου νερού βασίστηκαν στη μέθοδο της εξάτμισης με την παροχή θερμότητας. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται ακόμα στις λεγόμενες θερμικές μεθόδους.

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των σύγχρονων πολυμερών υλικών έχει οδηγήσει στην κατασκευή μεμβρανών που επιτρέπουν την επιλεκτική διέλευση νερού (ημιπερατές μεμβράνες) ή ιόντων (ιοντικές μεμβράνες) διαμέσου της επιφάνειάς τους με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αφαλάτωσης [6].

Οι βασικές μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην αφαλάτωση είναι:

- Ηλεκτρική
- Θερμική
- Μηχανική (Πίεση)

Η κάθε μορφή ενέργειας συνεπάγεται με μια ή και περισσότερες τεχνολογίες αφαλάτωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι βασικές τεχνολογίες που είναι εφαρμόσιμες σε κάθε μορφή ενέργειας.



όπου

- RO: Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis)
- MVC: Μηχανική Συμπίεση Ατμών (Mechanical Vapor Compression)
- MED: Εξάτμιση με Πολλαπλές Βαθμίδες (Multiple Effect Distillation)
- MSF: Πολυβάθμια Εκρηκτική Εξάτμιση (Multi Stage Flash)
- ED: Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis)

Σε παρόμοιους πίνακες κατάταξης των μονάδων αφαλάτωσης με βάση τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια, η αντίστροφη όσμωση ανήκει στις μονάδες που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια πράγμα που είναι αληθές

Πίνακας 1.1: Οι βασικές κατηγορίες νερού με βάση τη συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων.

Τύπος Νερού	Κάτω Όριο (mg/lt)	Άνω Όριο (mg/lt)
Φρέσκο Νερό	5	1000
Χαμηλής Ποιότητας	1000	3000
Υφάλμυρο Νερό	3000	10000
Αλμυρό Νερό	10000	∞

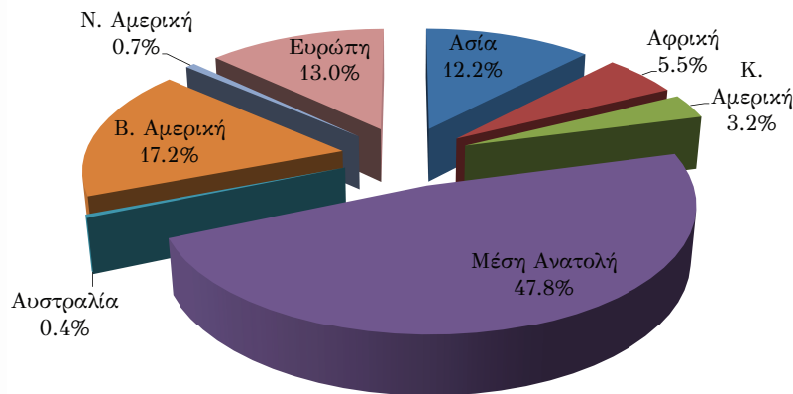
αφού οι αντλίες χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό ρεύμα. Όμως η τελική ενέργεια είναι για την πραγματοποίηση της αφαλάτωσης είναι η μηχανική. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ακόμα δυο κατηγοριοποιήσεις με κριτήρια:

- Τι βγαίνει από το αλμυρό νερό
 - Το νερό
 - Το αλάτι
- Ποιος τύπος διαχωρισμού επιλέγεται
 - Θερμότητα
 - Μεμβράνη

Στο παρόν δεν θα γίνει επιπλέον ανάλυση για το σύνολο των τεχνολογιών.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό του νερού, που αφορά μια διαδικασία αφαλάτωσης είναι η περιεκτικότητα του σε άλατα (salinity). Ως άλατα αναφέρονται γενικά τα συνολικά διαλυμένα στερεά μέσα στο νερό. Η περιεκτικότητα αυτή μετριέται γενικά σε mg/lt και ανάλογα με την τιμή της καθορίζει τέσσερις βασικές κατηγορίες του νερού σύμφωνα με τον πίνακα 1.1.

Το 50% της παγκόσμιας δυναμικότητας μονάδων αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένο στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και κυρίως στον Περσικό Κόλπο. Ένα μεγάλο ποσοστό γύρω στο 17% είναι εγκατεστημένο στη Βόρειο Αμερική ενώ η Ευρώπη και η Ασία (εκτός της Μέσης Ανατολής) έχουν από 13%. Οι υπόλοιπες περιοχές μοιράζονται από μικρότερα ποσοστά. Η παγκόσμια δυναμικότητα σήμερα είναι περίπου 60,000,000 m^3/day και αναμένεται να ξεπεράσει τα 80,000,000 m^3/day έως το 2015. Οι μονάδες για τροφοδοσία νερού σε κοινότητες μπορεί να είναι από 20 m^3/day έως 1,000,000 m^3/day (Εικόνα 1.4) [7].



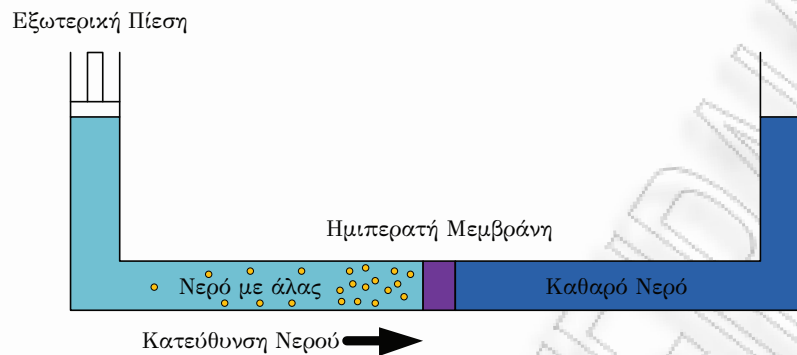
Εικόνα 1.4: Η δυναμικότητα της αφαλάτωσης σε παγκόσμιο επίπεδο το 2008 [8]

1.5 Αντίστροφη Όσμωση

Η αντίστροφη όσμωση δεν είναι τίποτα άλλο από αντιστροφή της διαδικασίας του φυσικού φαινομένου της όσμωσης. Σε δύο υγρά διαφορετικής συγκέντρωσης που χωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη, ασκείται εξωτερική πίεση στη πλευρά που υπάρχει αυξημένη συγκέντρωση άλατος (Εικόνα 1.5) οδηγώντας έτσι το διαλύτη (καθαρό νερό) προς την αντίθετη κατεύθυνση της όσμωσης στην πλευρά στην οποία υπάρχει το καθαρό νερό (στην πράξη χαμηλή συγκέντρωση άλατος). Η διεργασία της αντίστροφης όσμωσης καθιστά δυνατό το διαχωρισμό των διαλυμένων ιόντων καθώς και μεγαλύτερων σωματιδίων από ένα ρεύμα νερού ενώ το ποσοστό απόρριψης (Εξίσωση 1.2) φτάνει περίπου το 99.5%.

Οι πρώτες καταγεγραμμένες αναφορές σχετικά με ημιπερατές μεμβράνες χρονολογούνται το 1748, όταν ο Abbe Nollet παρατήρησε το φαινόμενο της όσμωσης. Γύρω στο 1850 οι Pfeffer και Traube έκαναν παρατηρήσεις σχετικά με το φαινόμενο της όσμωσης με κεραμικές μεμβράνες. Η εξέλιξη της τεχνολογίας όπως την γνωρίζουμε σήμερα ξεκινάει τη δεκαετία του 1940 όπου ο Dr. Gerald Hassler από το πανεπιστήμιο της California στο Los Angeles (UCLA) ξεκινάει να ερευνά τις οσμωτικές ιδιότητες του σελοφάν (cellophane). Ο Hassler υπέθεσε πως όσμωση λαμβάνει χώρα μέσω της εξάτμισης από την επιφάνεια της μιας μεμβράνης και πέρασμα δια μέσου ενός στρώματος αέρα προς την άλλη επιφάνεια με συμπύκνωση. Σήμερα, είναι γνωστό πως δεν υπάρχει εξάτμιση αλλά διάλυση και διάχυση στη μεμβράνη.

Το 1959 οι Reid και Breton από το πανεπιστήμιο της Florida παρου-



Εικόνα 1.5: Η αρχή λειτουργίας της αντίστροφης όσμωσης

σίασαν τις δυνατότητες για αφαλάτωση της μεμβράνης από οξική κυτταρίνη (cellulose acetate). Αξιολόγησαν διάφορους τύπους ημιπερατών μεμβρανών σε μια προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος, εστιάζοντας σε υδροφιλικές μεμβράνες πολυμερών. Οι μελέτες τους κατέληξαν πως η οξική κυτταρίνη παρουσίαζε τις καλύτερες ιδιότητες διαπερατότητας για πρακτικές εφαρμογές αλλά έπρεπε να γίνουν βελτιώσεις σχετικά με την ποσότητα της ροής και την αντοχή έτσι ώστε να μπορεί να έχει εμπορική επιτυχία.

Η μελέτη που έδειξε τη μελλοντική βιωσιμότητα της αντίστροφης όσμωσης ήρθε από το πανεπιστήμιο του UCLA από τους Sidney Loeb και Srinivasa Sourirajan. Η έρευνα τους τους οδήγησε στην κατασκευή ασύμμετρης μεμβράνης οξικής κυτταρίνης το 1960. Αυτή η μεμβράνη επέτρεπε δέκα φορές μεγαλύτερη ροή σε σχέση με τη μεμβράνη των Reid και Breton ενώ σταδιακά η έρευνα τους οδήγησε στην κατασκευή των σωληνοειδών μεμβρανών [9].

Στη δεκαετία του 1970 έγινε σημαντική πρόοδος σε θεωρητικό επίπεδο με τη διατύπωση του θεωρητικού μοντέλου μεταφοράς μάζας "εξάτμισης-διάλυσης" που διέπει την αφαλάτωση με χρήση μεμβρανών. Αν και το συγκεκριμένο μοντέλο είχε βασιστεί σε δεδομένα επάνω σε μεμβράνες οξικής κυτταρίνης, δίνει πολύ καλά αποτελέσματα και στις μεμβράνες πολυαμιδίων που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Από τη δεκαετία του 1980 και μετά, οι μονάδες αντίστροφης όσμωσης βελτίωσαν σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα τους και την ποιότητα του παραγόμενου νερού. Στον πίνακα 1.2 φαίνεται η εξέλιξη της αποδοτικότητας των μονάδων αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού. Σημαντικό ρόλο στη μείωση της ειδικής κατανάλωσης διαδραμάτισε η χρήση συσκευών ανάκτησης πίεσης [10]. Η μείωση της ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα βασικά χαρακτηριστικά μιας διεργασίας αφαλάτωσης είναι:

Πίνακας 1.2: Η πρόοδος στην αποδοτικότητα των μονάδων αντίστροφης όσμωσης για το θαλασσινό νερό.

	1980	1990	2000
Ανάκτηση (%)	25	40-50	55-65
Πίεση Λειτουργίας (MPa)	6.9	8.25	9.7
Αλατότητα Παραγόμενου Νερού (mg/L)	500	300	<200
Ειδική Ενεργειακή Κατανάλωση (kWh/m ³)	12	5.5	4.6

Το ποσοστό ανάκτησης:

$$RecoveryRate(\%) = \frac{PermeateFlow}{FeedFlow} \cdot 100 \quad (1.1)$$

όπου *PermeateFlow* είναι η ροή του καθαρού νερού και *FeedFlow* είναι η ροή του αλμυρού νερού τροφοδοσίας (Εικόνα 1.6) ενώ *Brine* είναι η ροή της άλμης ($Brine = FeedFlow - PermeateFlow$).

Το ποσοστό απόρριψης:

$$Rejection(\%) = \frac{c_f - c_p}{c_f} \cdot 100 \quad (1.2)$$

όπου c_f είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων του νερού τροφοδοσίας και c_p είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων αλάτων στο καθαρό νερό.

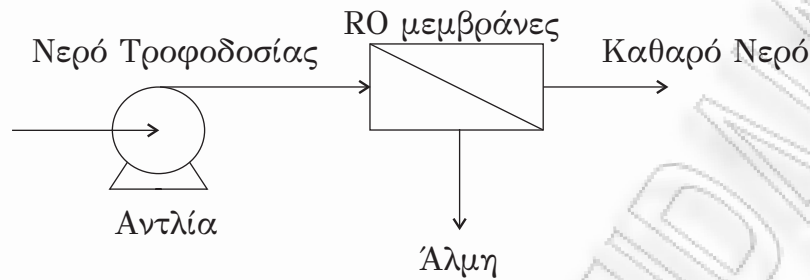
Γενικά, η απόδοση μιας διεργασίας αντίστροφης όσμωσης εξαρτάται από την ροή του νερού (water flux), την ποσότητα του απορριπτόμενου άλατος (salt rejection) καθώς και από το ποσοστό ανάκτησης του νερού (recovery rate).

Η τιμή της οσμωτικής πίεσης εξαρτάται από τη συγκέντρωση του διαλύματος σε αλάτι και δίνεται από την εξίσωση:

$$\Pi = RT \sum_i v_i c_i \quad (1.3)$$

όπου v_i είναι ο συντελεστής van't Hoff για το i ιόν. Η οσμωτική πίεση του θαλασσινού νερού είναι περίπου 2.5MPa. Όσο η εφαρμοζόμενη υδροστατική πίεση ΔP είναι μεγαλύτερη από την οσμωτική διαφορά πίεσης $\Delta \Pi$ ανάμεσα στο νερό τροφοδοσίας και το καθαρό νερό, τότε νερό θα ρέει από το νερό με άλας στο καθαρό νερό όπως φαίνεται στην εικόνα 1.7.

Για να περιγραφεί η συμπεριφορά του διαλύματος χρησιμοποιείται ένα μοντέλο μεταφοράς μάζας για τη διάχυση για την αντίστροφη όσμωση. Θεωρείται ότι η ροή του στοιχείου i που διέρχεται από τη μεμβράνη προέρχεται από διάχυση και μπορεί να βρεθεί από το γινόμενο της συγκέντρωσης και της κινητικότητας στη μεμβράνη καθώς και την οδηγούσα δύναμη (δηλαδή την ενεργό διαφορά πίεσης για το νερό και την βαθμίδα



Εικόνα 1.6: Μονογραμμικό σχήμα με τις ροές του νερού κατά την αντίστροφη όσμωση.

της συγκέντρωσης για το αλάτι).

$$J_v = \frac{-k_w D_w \bar{V}_w}{RT} \frac{\Delta P - \Delta \Pi}{\delta} \quad (1.4)$$

και

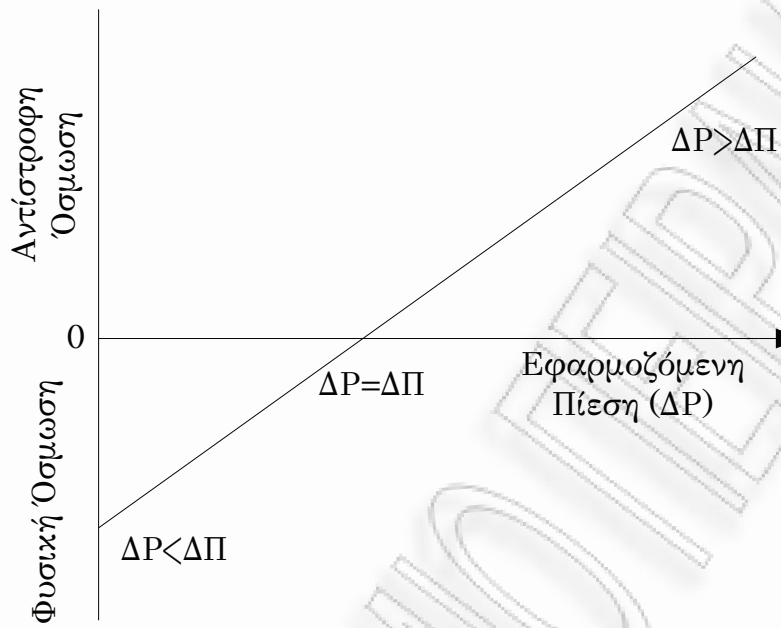
$$J_s = k_s \frac{D_s}{\delta} (c_s^f - c_s^p) \quad (1.5)$$

όπου J_v είναι η ογκομετρική ροή διαμέσου της μεμβράνης, J_s είναι η μοριακή ροή του αλάτος, k είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας, D είναι ο συντελεστής διάχυσης, \bar{V} είναι ο μερικός μοριακός όγκος, δ είναι το πάχος της μεμβράνης, R η σταθερά του αερίου, T είναι η θερμοκρασία και c η μοριακή συγκέντρωση. Οι δείκτες w και s αναφέρονται στο νερό και στο αλάτι (διαλυμένη ουσία) αντίστοιχα ενώ οι δείκτες f και p αναφέρονται στο νερό τροφοδοσίας (feed) και στο καθαρό νερό (permeate) αντίστοιχα.

Η ισχύς της αντλίας (P_{pump}) της αντίστροφης όσμωσης υπολογίζεται γενικά:

$$P_{pump} = \frac{FeedFlow \cdot (P_{feed} - P_{in})}{\eta_{pump}} \quad (1.6)$$

όπου P_{feed} είναι η πίεση στην αρχή της μεμβράνης, P_{in} η πίεση τροφοδοσίας και η_{pump} είναι ο βαθμός απόδοσης της αντλίας. Η παραπάνω εξίσωση δεν καλύπτει τις περιπτώσεις που υπάρχει κάποιο σύστημα ανάκτηση πίεσης.



Εικόνα 1.7: Η ροή του νερού σε σχέση με την υδροστατική πίεση δια μέσου της μεμβράνης

Κεφάλαιο 2

Αφαλάτωση με ΑΠΕ

2.1 Καθορισμός Προβλήματος

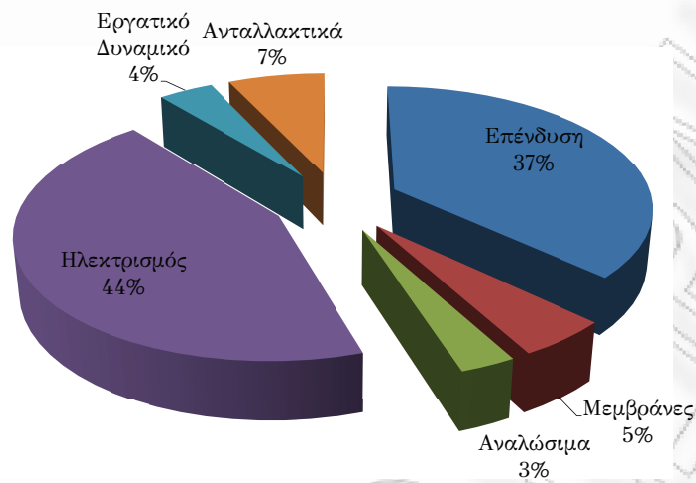
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η αφαλάτωση αλμυρού ή υφάλμυρου νερού απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας σε μορφή θερμότητας, ηλεκτρισμού ή μηχανικού έργου. Η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης απαιτεί μηχανικό έργο, αλλά αυτό δίνεται από ηλεκτροκίνητη αντλία. Τα ποσά της ενέργειας διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο. Ενδεικτικά η πιο ενεργόβορα θερμική μέθοδος χρειάζεται 50 έως $70 kWh_{th}/m^3$ ενώ η αντίστροφη όσμωση χρειάζεται από 3 έως $10 kWh_{el}/m^3$ για θαλασσινό νερό. Η ηλεκτροδιάλυση απαιτεί μικρότερα ποσά ενέργειας αλλά υπάρχει περιορισμός της μέγιστης αλατότητας του νερού που μπορεί να επεξεργαστεί.

Από την ανάλυση του κόστους στη διαδικασία της αφαλάτωσης διαπιστώνεται (Εικόνα 2.1) πως ένα μεγάλο μέρος του κόστους του παραγόμενου νερού οφείλεται στο κόστος της ενέργειας. Εάν ληφθεί υπόψη και το συνεχώς αυξανόμενο κόστος της ενέργειας, είτε αυτό προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο είτε από κάποιο τοπικό συμβατικό σύστημα ντίζελ, τότε είναι σαφές πως πρέπει να αναζητηθούν μη συμβατικοί τρόποι παροχής ενέργειας στις μονάδες αφαλάτωσης.

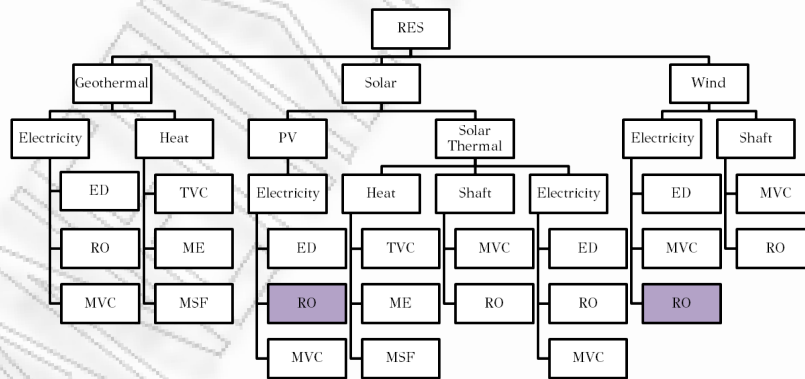
Οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να συνδυαστούν με την αφαλάτωση σε πολλές περιπτώσεις με εξαιρετικά αποτελέσματα.

Οι τεχνολογικά δυνατοί συνδυασμοί φαίνονται στο σχήμα της εικόνας 2.2. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει πως οι μισές μονάδες αφαλάτωσης με ΑΠΕ χρησιμοποιούν αντίστροφη όσμωση ως τρόπο αφαλάτωσης ενώ από αυτές περίπου τα $3/5$ τροφοδοτούνται με ενέργεια από φωτοβολταϊκά και τα υπόλοιπα $2/5$ με αιολικά (Εικόνα 2.3).

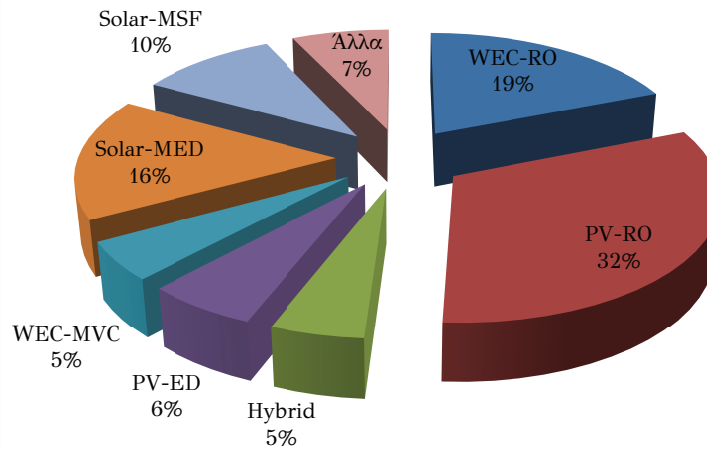
Γενικά, το κόστος παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας είναι υψηλότερο απ' ό τι με τις συμβατικές μονάδες. Όμως, πολλές φορές η μεταφορά της πρώτης ύλης (π.χ. καυσίμου) για την παραγωγή της ενέργειας κοστίζει αρκετά και μπορεί να μην είναι πραγματοποιήσιμη για μεγάλα χρονικά



Εικόνα 2.1: Η ανάλυση του κόστους μιας μονάδας αφαλάτωσης [11]



Εικόνα 2.2: Οι πιθανές μέθοδοι αφαλάτωσης με ΑΠΕ [12]



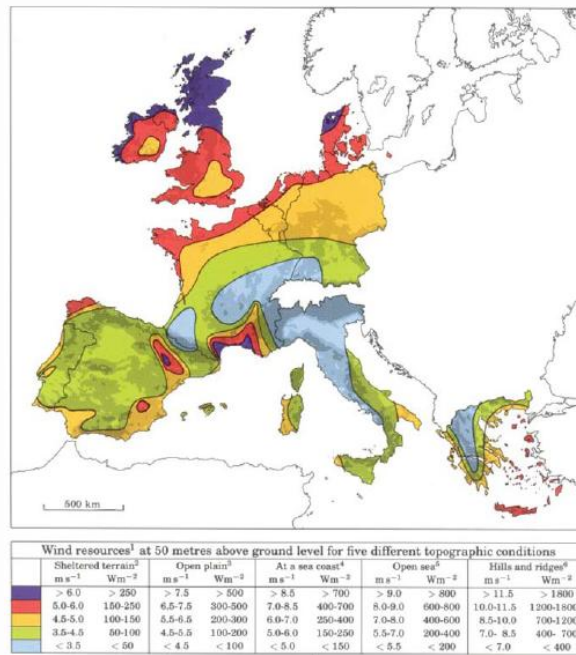
Εικόνα 2.3: Τα ποσοστά των υφιστάμενων μονάδων αφαλάτωσης που συνδυάζουν τεχνολογίες αφαλάτωσης με ΑΠΕ [13]

διαστήματα (π.χ. λόγω κακών καιρικών συνθηκών) ενώ και η διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι πάντα εφικτή ή και συμφέρουσα. Η μεγάλη ηλιοφάνεια που υπάρχει σε χώρες κοντά στον ισημερινό τις καθιστά από τη μια άνυδρες, αλλά ιδανικές για τη χρήση θερμικών-ηλιακών μεθόδων αφαλάτωσης ή σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά για χρήση με μονάδες αντίστροφης όσμωσης. Επιπλέον σε πολλά παραλιακά μέρη της Μεσογείου, η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά υψηλή ευνοώντας τη χρήση αιολικών συστημάτων (Εικόνα 2.4) για αφαλάτωση ενώ είναι γεγονός πως οι περισσότερες μονάδες αφαλάτωσης είναι εγκατεστημένες στο ίδιο σημείο (Εικόνα 2.5).

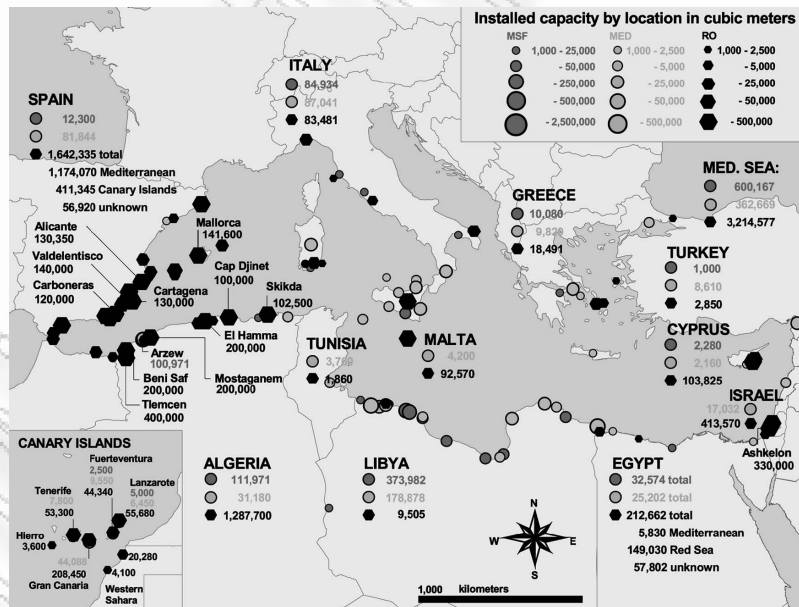
2.2 Δημιουργία Αφαλάτωσης με ΑΠΕ

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που όταν συνδυαστούν ευνοούν τη δημιουργία μιας μονάδας αφαλάτωσης με ΑΠΕ. Μερικές δυνατές καταστάσεις είναι:

- **Απομονωμένο Δίκτυο** - Εάν η τοποθεσία που θα τοποθετηθεί η αφαλάτωση είναι μακριά από το σημείο σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και η κοινότητα είναι μικρή και δυσπρόσιτη μπορεί να μην είναι αξιόπιστη και οικονομική η συχνή τροφοδοσία της μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύσιμο για τη λειτουργία της αφαλάτωσης. Σε αυτή την περίπτωση η κατασκευή ενός υβριδικού συστήματος μπορεί να έχει καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα.



Εικόνα 2.4: Οι ταχύτητες του ανέμου στην Ευρώπη [14]



Εικόνα 2.5: Οι εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στην περιοχή της Μεσογείου [15]

- **Απομονωμένο Δίκτυο - 2** - Τις περισσότερες φορές που δεν είναι οικονομικά βιώσιμη ή τεχνικά εφικτή η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου για την παροχή ενέργειας σε μια μονάδα αφαλάτωσης, η λύση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ενέργειας είναι οικονομικότερη από την εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ. Όμως εάν η περιοχή είναι περιβαλλοντικά προστατευμένη ή είναι τουριστική (οπότε δεν επιτρέπεται η ρύπανση από ήχο και καυσαέριο) επιλέγονται λύσεις ΑΠΕ (υβριδικές ή μη).
- **Μη Αξιόπιστο Δίκτυο** - Σε πολλές περιπτώσεις όπου υπάρχει κάποιο αυτόνομο δίκτυο από μια γεννήτρια για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών μιας κοινότητας είναι συχνό φαινόμενο οι διακοπές λειτουργίας και οι πτώσεις τάσεως. Η ύπαρξη ΑΠΕ δίνει μεγαλύτερη αυτονομία στην παροχή του νερού, ενώ μπορεί να λειτουργήσει θετικά και για το υπόλοιπο δίκτυο δίνοντας την περίσσεια ενέργειας.

Εδώ και πολλά χρόνια γίνονται προσπάθειες εγκατάστασης μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με ΑΠΕ. Αρχικά η πηγή ενέργειας ήταν οι ανεμογεννήτριες ενώ πρόσφατα έχουν εγκατασταθεί συστήματα με φωτοβολταϊκά καθώς και υβριδικά. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με ΑΠΕ στην Ευρώπη και τη Βόρειο Αφρική.

Πίνακας 2.1: Εγκατεστημένες μονάδες αντίστροφης όσμωσης με ΑΠΕ

Περιοχή	Δυναμικότητα (m^3/hr)	ΑΠΕ	Έτος Εγκατάστασης
Ile du Planier, France	0.5	4kW W/T	1982
Island of Suderoog, Germany	0.25-0.37	6kW W/T	1983
Island of Helgoland, Germany	40	1.2MW & Diesel	1988
Fuerteventura, Spain	2.3	225kW W/T & 160kW Diesel & Flywheel	1995
Pozo Izquierdo, Gran Canaria, Spain	8 × 1.0	2 × 230kW W/T	1995
Therasia Island, Greece	0.2	15kW W/T & 440Ah Bat	1995
Tenerife, Spain	2.5-4.5	30kW W/T	1997
Island of Syros, Greece	2.5-37.5	500kW W/T (Grid and S/A)	1998
Keratea, Greece	0.13	900W W/T & 4kWp PV & Bat	2001
Pozo Izquierdo, Gran Canaria, Spain	0.8	15kW W/T & 190Ah Bat	2003
Loughborough University, UK	0.5	2.5kW W/T	2001
Ksar Ghilene, Tunisia	2.08	10.5kWp PV	2006
Azla - Tazekra - Amellou - (Tangarfa), Marocco	1 (0.5)	4kWp (2.5kWp) & 650Ah (450Ah) Bat	2006
Milos, Greece	2×41	850kW W/T (Grid)	2007
Irakleia, Greece	3.3	30kW W/T & Bat (Offshore)	2007

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή Ενεργειακής Μονάδας

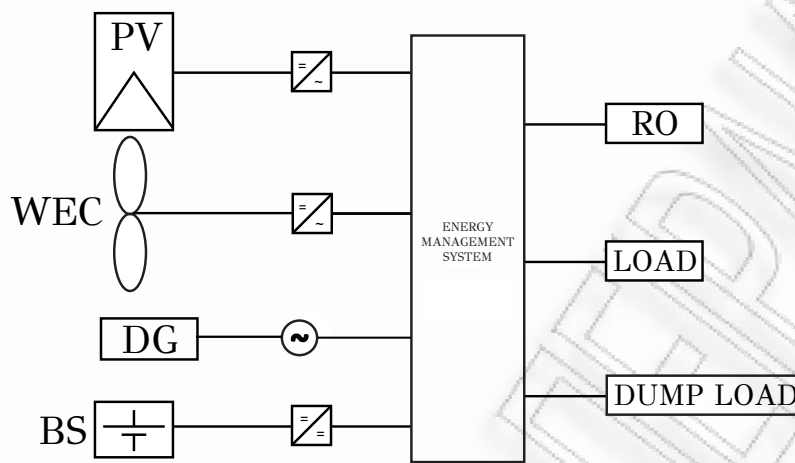
Η μονάδα παραγωγής ενέργειας (Εικόνα 3.1) του συστήματος που πρόκειται να διαστασιολογηθεί στη γενικότερη περίπτωση μπορεί να περιέχει τα εξής βασικά στοιχεία παραγωγής ή και αποθήκευσης ενέργειας:

- Φωτοβολταϊκά (PV)
- Ανεμογεννήτριες (WEC)
- Ηλεκτροπαραγωγά Ζεύγη Diesel (DG)
- Μπαταρίες (BS)

Η μπαταρία αποτελεί μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Φορτίζει με ενέργεια από τα υπόλοιπα στοιχεία παραγωγής ενέργειας και την αποδίδει στη ζήτηση.



Εικόνα 3.1: Ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτρια



Εικόνα 3.2: Η διασύνδεση των στοιχείων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας

Στη γενικότερη περίπτωση οι καταναλώσεις ενέργειας είναι:

- Κατανάλωση Αντίστροφης Όσμωσης (RO)
- Κατανάλωση Ηλεκτρικού Ρεύματος (LOAD)
- Απόρριψη Περίσσειας Ηλεκτρικής Ενέργειας (DUMP LOAD)

Επίσης υπάρχουν αντιστροφείς (inverters) μετατροπής του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο εκεί που είναι απαραίτητο καθώς και το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System).

Η διασύνδεση των στοιχείων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα και ποιος είναι ο ρόλος τους.

3.1 Παραγωγή Ενέργειας

3.1.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Το βασικό στοιχείο δομικό στοιχείο παραγωγής ενέργειας με φωτοβολταϊκά είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (ή φωτοβολταϊκό πάνελ). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός πλαισίου που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Ισχύς - P_{PV} (kWp)

- Βαθμός Απόδοσης - η_{PV} (%)
- Επιφάνεια - A_{module} (m^2)
- Θερμικός Συντελεστής Ισχύος - α_{PV} (%)

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται σε συνθήκες STC¹. Έτσι η ισχύς μπορεί να υπολογισθεί άμεσα από τον βαθμό απόδοσης και από την επιφάνεια του πλαισίου.

3.1.2 Αιολικά Συστήματα

Τα αιολικά συστήματα μετατρέπουν την κινητική ενέργεια που υπάρχει στον άνεμο σε περιστροφική κινητική ενέργεια και μετά με τη βοήθεια γεννήτριας σε συνεχές ή εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Ονομαστική Ισχύς - P_{WEC} (kW)
- Καμπύλη Απόδοσης - $P_{wturb}(v)$ (kW)
- Ύψος - H (m)

3.1.3 Συμβατικά Diesel Συστήματα

Τα συμβατικά Diesel συστήματα μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που υπάρχει στο καύσιμο σε παλινδρομική κίνηση και με την βοήθεια γεννήτριας σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής Diesel που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Ονομαστική Ισχύς - P_{DG} (kW)
- Καμπύλη Κατανάλωσης - $\dot{m}(P_{diesel})$ ($\frac{kg}{s}$)

3.1.4 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες αποτελούν μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Αποθηκεύουν σε χημική ενέργεια ενέργεια που τους δίνεται από το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταριών που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Τάση - $V_{batcell}$ (V)

¹Standard Test Conditions είναι οι συνθήκες που αναφέρονται σε ηλιακή ακτινοβολία ενός ήλιου ($1000W/m^2$) με κατανομή συχνότητας που προκύπτει από 1.5 μάζα αέρα και θερμοκρασία $25^\circ C$. Όλοι οι κατασκευαστές δίδουν τον βαθμό απόδοσης των πλαισίων τους σε αυτές τις συνθήκες.

- Χωρητικότητα - $C_{batcell}$ (Ah)
- Βαθμός Απόδοσης Φόρτισης/Εκφόρτισης Μπαταρίας - $\eta_{batcell}$ (%)
- Βάθος Εκφόρτισης - (DoD) (%)

3.2 Καταναλωτές

Οι καταναλώσεις ενέργειας στο σύστημα είναι όλες ηλεκτρικές. Όμως γίνεται διαχωρισμός του φορτίου στην ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται η μονάδα αντίστροφης όσμωσης και στην ενέργεια που χρειάζεται το δίκτυο για την κάλυψη γενικών ηλεκτρικών αναγκών.

3.2.1 Κατανάλωση Αντίστροφης Όσμωσης

Η μονάδα αντίστροφης όσμωσης χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια για την αφαλάτωση νερού. Ειδικές αντλίες ανεβάζουν την πίεση του νερού και το εξαναγκάζουν να περάσει μέσα από ειδικές μεμβράνες. Οι μεμβράνες κρατούν το μεγαλύτερο μέρος των διαλυμένων αλάτων του νερού που διέρχεται, ενώ μια σημαντική ποσότητα νερού απομακρύνεται με μεγάλη ποσότητα άλατος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Μέγιστη Παροχή - Q_{max} (m^3)
- Ειδική Καμπύλη Κατανάλωσης Ενέργειας - $Sp(sal)$ (kWh/m^3)

3.2.2 Κατανάλωση Ηλεκτρικού Ρεύματος

Οι ηλεκτρικές ανάγκες αποτελούν τις γενικές ηλεκτρικές ανάγκες που έχει μια αυτόνομη κοινότητα και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση προφίλ ζήτησης ισχύος ή ως ένα σταθερό φορτίο.

3.2.3 Περίσσεια Ηλεκτρικού Ρεύματος

Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατόν να υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικού ρεύματος (Ηλεκτρικής Ενέργειας). Αυτή η περίσσεια πρέπει να καταναλωθεί γιατί διαφορετικά θα έχει αρνητικές συνέπειες για τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες. Για το σκοπό αυτό υπάρχει μια συσκευή, συνήθως μια ειδική ηλεκτρική αντίσταση, που έχει ως σκοπό την κατανάλωση της περισσειας ενέργειας.

3.3 Βοηθητικά Συστήματα

3.3.1 Αντιστροφείς

Οι αντιστροφείς (inverters) είναι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο (ή το αντίθετο) με την βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων (ηλεκτρονικά ισχύος). Ανάλογα με την πρωταρχική πηγή του ρεύματος, είναι δυνατό να είναι εξοπλισμένοι με βοηθητικές διατάξεις για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αντιστροφέων που θα χρειαστούν στην ανάλυση είναι:

- Ονομαστική Ισχύς - P_{inv} (kW)
- Βαθμός Απόδοσης - η_{inv} (%)

Ο βαθμός απόδοσης που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς είναι υπολογισμένος κατά το πρότυπο Euro-ETA².

²Ο βαθμός απόδοσης Euro-ETA (η_{Euro}) είναι σταθμισμένος βαθμός απόδοσης που υπολογίζεται από την εξίσωση $\eta_{Euro} = 0.03 \times \eta_{5\%} + 0.06 \times \eta_{10\%} + 0.13 \times \eta_{20\%} + 0.1 \times \eta_{30\%} + 0.48 \times \eta_{50\%} + 0.2 \times \eta_{100\%}$ όπου $\eta = P_{AC}/P_{DC}$ ενώ το ποσοστό φανερώνει για ποια ισχύ σε σχέση με την ονομαστική επιτυγχάνεται αυτός ο βαθμός. Σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές αντιστροφέων δίνουν τον βαθμό απόδοσης με βάση αυτό το πρότυπο.

Κεφάλαιο 4

Σχεδιασμός Ενεργειακής Μονάδας

Για το σωστό σχεδιασμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας με ΑΠΕ που θα καλύπτει ανάγκες νερού μέσω αφαλάτωσης και ανάγκες ηλεκτρικού ρεύματος μιας κοινότητας είναι σημαντικός ο υπολογισμός και η εκτίμηση μιας σειράς παραμέτρων που αφορούν το μέγεθος των αναγκών σε νερό και ηλεκτρικό ρεύμα, τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συστημάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Τέλος βασικό στοιχείο του σχεδιασμού είναι η μεθοδολογία και οι κανόνες-στόχοι που τον διέπουν.

Οι στόχοι του σχεδιασμού σε ένα υβριδικό σύστημα, που θεωρήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι οι ακόλουθοι:

- Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να χρησιμοποιούνται στο μέγιστο δυνατό βαθμό (στόχος MAX-RES).
- Η περίσσεια ενέργεια να είναι όσο το δυνατό λιγότερη (στόχος MIN-UNDELIVER).
- Το κόστος της εγκατάστασης να είναι το ελάχιστο δυνατό (στόχος MIN-CAP).
- Το κόστος λειτουργίας να είναι το ελάχιστο δυνατό (στόχος MIN-OP).
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να είναι ελάχιστες (στόχος MIN-ENV)

Για λόγους που αφορούν τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης υπάρχουν δύο ακόμα λειτουργικοί περιορισμοί που θα ληφθούν υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού.

- Υπάρχει πάντα διαθέσιμη ενέργεια για την παραγωγή νερού (Περιορισμός συνεχούς λειτουργίας).
- Η ισχύς που δίνεται στη μονάδα αντίστροφη όσμωσης είναι σταθερή (Περιορισμός σταθερής λειτουργίας).

Οι στόχοι του σχεδιασμού, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς οδηγούν στη δημιουργία ενός συνόλου κανόνων σχεδιασμού που πρέπει να ικανοποιούνται σε μεγάλο ή μικρό βαθμό, αφού πολλοί από τους στόχους έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Έτσι, οι παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν αυτούς τους κανόνες, τελικά αποτελούν μεταβλητές απόφασης και γι' αυτό το λόγο εξετάζονται σενάρια σχεδιασμού. Με αυτή την προσέγγιση, μπορούν να βρεθούν μέγιστα, ελάχιστα αλλά και ενδιάμεσα μεγέθη και χωρητικότητες για τις ενεργειακές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας.

Ο σχεδιασμός απαντάει στο ερώτημα: *Πόσα φωτοβολταϊκά, πόσες ανεμογεννήτριες και τι μέγεθος πρέπει να έχει το σύστημα της μπαταρίας έτσι ώστε να δουλεύει το ενεργειακό σύστημα σύμφωνα με τους κανόνες;*

4.1 Μεθοδολογία Σχεδιασμού

Στη γενικότερη περίπτωση, στην παραγωγή ενέργειας συμμετέχουν φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μηχανές Diesel και μπαταρίες τα οποία λειτουργούν παράλληλα. Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε τεχνολογίας ως προς το διαμοιρασμό του φορτίου αποτελεί μια σημαντική σχεδιαστική παράμετρο με επιπτώσεις στο κόστος, στην ευστάθεια και γενικά στη λειτουργία της μονάδας.

Η διακύμανση στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές λόγω αυξομειώσεων των αρχικών συνθηκών (π.χ. ήλιος και άνεμος), γενικά δεν συμπίπτει με τη διακύμανση της ζήτησης. Όμως σε ένα αυτόνομο σύστημα πρέπει να διατηρείται η παροχή ενέργειας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και αυτό για το σχεδιασμό παίζει σημαντικό ρόλο. Η ενέργεια που απορροφάται από το σύστημα κατά τις περιόδους που δεν υπάρχει σχετική ταύτιση ζήτησης και παραγωγής θα πρέπει να έχει παραχθεί και να έχει αποθηκευθεί κατά τις περιόδους που υπάρχει πλεόνασμα.

Γενικά, κατά το σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αναλυτικά δεδομένα σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής εγκατάστασης έτσι ώστε μέσα από τη διαδικασία της προσομοίωσης για πολλά διαφορετικά συστήματα να προκύψει αυτό που ικανοποιεί καλύτερα

τους στόχους και τους περιορισμούς του σχεδιασμού.

Ο σκοπός του σχεδιασμού ως μέρος του συστήματος λήψης απόφασης έχει ως σκοπό να δώσει τις αρχικές ενδείξεις για τα μεγέθη των μονάδων που θα εγκατασταθούν και γι' αυτό το σκοπό θα χρησιμοποιηθούν μέσες μηνιαίες τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία, για την ταχύτητα του ανέμου και για την θερμοκρασία καθώς και μέσες τιμές για τις διάφορες καταναλώσεις έτσι ώστε να υπολογιστούν τα μεγέθη των μονάδων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως και τα διάφορα βοηθητικά συστήματα. Ο σχεδιασμός γίνεται σε τρία διακριτά βήματα τα οποία πραγματοποιούνται σε σειρά. Αυτά είναι:

- **Βήμα 1:** Υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης και του φορτίου για την περίοδο σχεδιασμού καθώς και η ισχύς η οποία πρέπει να είναι διαθέσιμη.
- **Βήμα 2:** Υπολογίζονται τα βασικά μεγέθη των συστημάτων παραγωγής ενέργειας (Φωτοβολταϊκά και Ανεμογεννήτριες).
- **Βήμα 3:** Υπολογίζονται τα μεγέθη των βοηθητικών συστημάτων (Μπαταρίες, Μηχανές Diesel και Αντιστροφείς)

4.1.1 Δεδομένα που Απαιτούνται

Η μέθοδος σχεδιασμού που περιγράφεται, βασίζεται στη χρήση ενός ελάχιστου συνόλου μετεωρολογικών δεδομένων για την υποψήφια προς εγκατάσταση περιοχή ενώ γίνεται χρήση από ελάχιστα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που απαρτίζουν την εγκατάσταση. Συγκεκριμένα για το σχεδιασμό απαιτούνται:

- **Μηνιαίο Ηλιακό Προφίλ** σε $kWh/m^2/month$. Το προφίλ μετασχηματίζεται για γωνία πρόσπτωσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής έτσι ώστε να αποδίδεται μέγιστη ενέργεια σε ετήσια βάση.
- **Κατανομή ταχύτητας ανέμου.** Συγκεκριμένα:
 - Μέση ταχύτητα ανέμου και παράμετρος k της κατανομής που δίδει τη συνάρτηση κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου Weibull.
 - Το ύψος των μετρήσεων.
 - Ο συντελεστής της εκθετικής μεταβολής για τη μετατροπή των ταχυτήτων από το ύψος των μετρήσεων στο ύψος εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.
- **Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου.**

Πίνακας 4.1: Οι μεταβλητές σχεδιασμού για τις ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Παράμετρος Σχεδιασμού	Περιγραφή
Αριθμός Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρόκειται να εγκατασταθούν
Αριθμός Ανεμογεννητριών	Ο αριθμός των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των υπομονάδων που απαρτίζουν τις μονάδες παραγωγής ενέργειας και νερού και απαιτούνται για τους υπολογισμούς έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 3

4.1.2 Βήμα Σχεδιασμού 1 - Υπολογισμός Αναγκών Ενέργειας και Ισχύος

Σε αυτό το αρχικό στάδιο σχεδιασμού υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Οι ενεργειακές απαιτήσεις εξαρτώνται κυρίως από τη δυναμικότητα της μονάδας και από την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας. Η απαιτούμενη ισχύς της μονάδας θεωρείται πως παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια λειτουργίας της.

Η ισχύς που χρειάζεται να δίνει κάθε στιγμή η μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι το άθροισμα της ζήτησης της αντίστροφης όσμωσης με την εξωτερική ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος.

$$P_d = P_{ro} + P_{el} \quad (4.1)$$

όπου P_{ro} είναι η ισχύς της αντίστροφης όσμωσης και P_{el} η εξωτερική ηλεκτρική ισχύς.

4.1.3 Βήμα Σχεδιασμού 2 - Διαστασιολόγηση Ανανεώσιμων Μονάδων Παραγωγής Ενέργειας

Σε αυτό το στάδιο γίνεται υπολογισμός της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας (Φωτοβολταϊκά και Ανεμογεννήτριες). Ο υπολογισμός θα γίνει με γνώμονα πως πρέπει να ικανοποιούνται όσο το δυνατό περισσότερο οι περιορισμοί καθώς και οι σχεδιαστικοί στόχοι που αναλύθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

Για το σκοπό αυτό ορίζουμε ως μεταβλητές σχεδιασμού για κάθε σύστημα όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πρακτικά η μεταβλητή σχεδιασμού για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών είναι ισοδύναμη με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ καθώς και ισοδύναμη με τη συνολική επιφάνεια πλαισίων (για δεδομένο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου). Η μεταβλητή σχεδιασμού για την περίπτωση των ανεμογεννητριών είναι ισοδύναμη με τη συνολικά εγκατεστημένη ισχύ των ανεμογεννητριών. Οι παραπάνω μεταβλητές σχεδιασμού επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό κόστος της επένδυσης.

Ο κανόνας σχεδιασμού ο οποίος θα επιτρέψει τον προσδιορισμό της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ συνοφίζεται ως εξής:

Η ποσότητα της ανανεώσιμης ενέργειας που παραδίδεται σε μια συγκεκριμένη περίοδο σχεδιασμού ισούται με την ενέργεια που απαιτείται από τη μονάδα αφαλάτωσης και την ζήτηση του δικτύου για την ίδια περίοδο.

Ο κανόνας σχεδιασμού είναι σε συμφωνία με με τους στόχους σχεδιασμού "MAX-RES" and "MIN-UNDELIVER" καθώς και με τον περιορισμό της συνεχούς λειτουργίας. Πρέπει εδώ να ειπωθεί πως ο περιορισμός της σταθερής λειτουργίας δεν διασφαλίζεται σε αυτό το σημείο του σχεδιασμού αλλά ερευνάται στο τρίτο βήμα του σχεδιασμού. Οι αναλυτικοί αλγόριθμοι του σχεδιασμού δίνονται σε επόμενη ενότητα.

Ο παραπάνω κανόνας σχεδιασμού μπορεί να οδηγήσει σε διάφορες πιθανές εγκαταστάσεις ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας αφού η ίδια ποσότητα ενέργειας μπορεί να παραχθεί από διαφορετικούς συνδυασμούς ΑΠΕ. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί οδηγούν σε διαφορετικά επίπεδα ικανοποίησης των στόχων σχεδιασμού "MIN-CAP" και "MIN-OP" καθώς και έχουν και διαφορετική συνεισφορά στον περιορισμό της σταθερής λειτουργίας.

Για να μπορέσουν να ερευνηθούν οι πιθανοί συνδυασμοί καθώς και οι συνέπειες τους στους διάφορους δείκτες θα χρησιμοποιηθεί μια μεταβλητή απόφασης. Αυτή η μεταβλητή απαιτείται για να υπολογιστεί η ενέργεια που παράχθηκε από κάθε ανανεώσιμη πηγή στο υβριδικό σύστημα σε σχέση με τη συνολική ενέργεια από ΑΠΕ. Έτσι ορίζεται ως α το ποσοστό της ανανεώσιμης ενέργειας που παράχθηκε από φωτοβολταϊκά, δηλαδή:

$$E_{WEC} = \alpha * E_{RES} \quad (4.2)$$

Ενώ η ενέργεια που παράχθηκε από ανεμογεννήτριες είναι:

$$E_{PV} = (1 - \alpha)E_{RES} \quad (4.3)$$

όπου E_{RES} είναι η συνολική ανανεώσιμη ενέργεια που παράχθηκε. Σύμφωνα με τον κανόνα σχεδιασμού αυτή η ενέργεια πρέπει να είναι:

$$E_{RES} = \int_0^T P_d dt \quad (4.4)$$

Πίνακας 4.2: Οι παράμετροι σχεδιασμού για τις βοηθητικές μονάδες.

Παράμετρος Σχεδιασμού	Περιγραφή
Αριθμός Συστοιχιών Μπαταριών	Ο αριθμός των συστοιχιών μπαταριών που πρόκειται να εγκατασταθούν
Αριθμός Μηχανών Diesel	Ο αριθμός των συμβατικών συστημάτων Diesel που πρόκειται να εγκατασταθούν

όπου T είναι η χρονική περίοδος του σχεδιασμού.

Ετσι μπορεί να εξεταστούν περιπτώσεις σχεδιασμού για διακριτές τιμές του α (ανάμεσα στο 0 και το 1) καθώς και για τις περιπτώσεις μόνο φωτοβολταϊκών (δηλαδή $\alpha = 0$) και μόνο ανεμογεννητριών ($\alpha = 1$).

4.1.4 Βήμα Σχεδιασμού 3 - Διαστασιολόγηση Βοηθητικών Συστημάτων

Οι παράμετροι σχεδιασμού για τα βοηθητικά συστήματα δίνονται στον πίνακα 4.2.

Ο συνολικός αριθμός των μπαταριών (και κατ'επέκταση η συνολική χωρητικότητα) επηρεάζει σημαντικά το κόστος εγκατάστασης "MIN-CAP". Όμως η χρήση συμβατικών συστημάτων Diesel δεν επηρεάζει σημαντικά το συνολικό κόστος εγκατάστασης αλλά επηρεάζει το κόστος λειτουργίας "MIN-OP" καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις "MIN-ENV" [17], [18].

Οι κανόνες σχεδιασμού που θα επιτρέψουν τον προσδιορισμό των βοηθητικών συσκευών συνοψίζονται ως εξής:

1. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συμβατικών Diesel συστημάτων πρέπει να είναι ίση με τη συνολική ισχύ που χρειάζεται η μονάδα αντίστροφης όσμωσης μαζί με την ιστορικά μεγαλύτερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Η ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα από ΑΠΕ, καλύπτεται πρώτα από την περίσσεια ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στις μπαταρίες και έπειτα από ενέργεια που παρέχεται από τα συμβατικά συστήματα Diesel.

Και οι δύο κανόνες βασίζονται στον περιορισμό σταθερής λειτουργίας. Ο πρώτος κανόνας χρειάζεται για να διασφαλίσει τη σταθερή λειτουργία κατά τις χρονικές εκείνες περιόδους όπου οι ανανεώσιμες πηγές

ενέργειας δεν είναι ικανές να διασφαλίσουν την παροχή της απαραίτητης ισχύος. Ο δεύτερος κανόνας είναι σε συμφωνία με το στόχο σχεδιασμού "MIN-UNDELIVER". Οι αναλυτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2.

Οι παραπάνω κανόνες σχεδιασμού οδηγούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς επειδή η ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται από ΑΠΕ μπορεί να καλυφθεί από συστήματα με διαφορετικές βοηθητικές μονάδες. Έτσι μια νέα μεταβλητή απόφασης χρειάζεται για να ορίσει το σύστημα ως προς τη χρησιμοποίηση των συμβατικών συστημάτων Diesel. Αυτή η μεταβλητή απόφασης επηρεάζει τους στόχους σχεδιασμού "MIN-CAP", "MIN-OP" και "MIN-ENV" με τρόπο έτσι ώστε οι στόχοι να έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Γι' αυτό το σκοπό ορίζονται δύο ακραίες περιπτώσεις όπως φαίνεται παρακάτω:

1. Η περίπτωση "Diesel-Min" εκφράζει την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ενέργειας και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ελαχιστοποιώντας τη χρήση συμβατικών συστημάτων Diesel.
2. Η περίπτωση "Diesel-Max" εκφράζει την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης της μονάδας παραγωγής ενέργειας ελαχιστοποιώντας την απαιτούμενη μπαταρία και την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων ΑΠΕ μεγιστοποιώντας τη χρήση συμβατικών συστημάτων Diesel.

Όπως θα γίνει σαφές παρακάτω, η μεταβλητή απόφασης δίνεται στο μοντέλο επιλέγοντας μήνα σχεδιασμού και κατ' επέκταση τις τιμές για τους διαθέσιμους ανανεώσιμους πόρους (ταχύτητα ανέμου και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας).

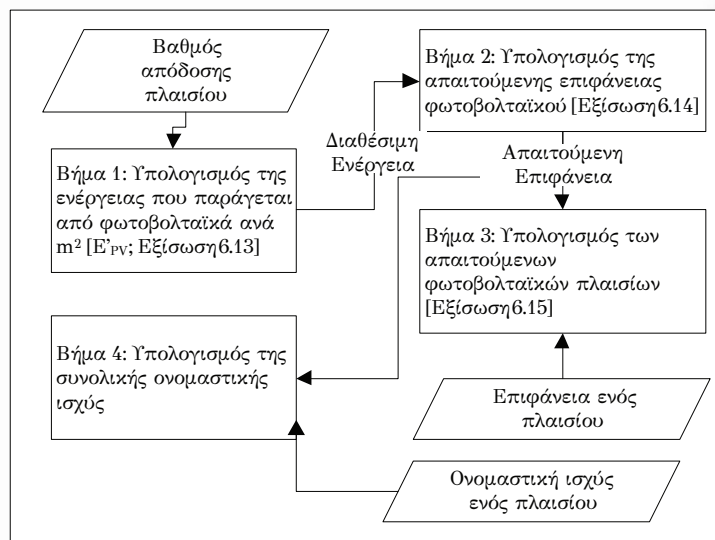
4.2 Αλγόριθμοι Σχεδιασμού

4.2.1 Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκού Συστήματος

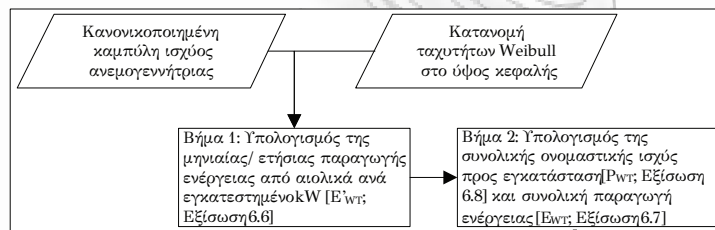
Ο σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στον κανόνα σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.1.3. Οι εξισώσεις που αφορούν στο σχεδιασμό δίνονται στη παράγραφο 6.2 ενώ ο αλγόριθμος σχεδιασμού περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 4.1.

4.2.2 Σχεδιασμός Αιολικού Συστήματος

Ο σχεδιασμός του αιολικού συστήματος βασίζεται στον κανόνα σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 4.1.3. Οι εξισώσεις που αφορούν στο σχεδιασμό δίνονται στη παράγραφο 6.1 ενώ ο αλγόριθμος σχε-



Εικόνα 4.1: Ο αλγόριθμος σχεδιασμού του φωτοβολταϊκού συστήματος



Εικόνα 4.2: Ο αλγόριθμος σχεδιασμού του αιολικού συστήματος

διασμού περιγράφεται σχηματικά στην εικόνα 4.2.

4.2.3 Σχεδιασμός Βοηθητικών Συστημάτων

Ο υπολογισμός της χωρητικότητας της μπαταρίας και της χρήσης των συμβατικών συστημάτων Diesel παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.1.4. Όμως η απευθείας εφαρμογή αυτού του κανόνα είναι δυνατή εάν είναι γνωστή η λεπτομερής κατανομή της ανανεώσιμης πηγής για τη συγκεκριμένη περίοδο σχεδιασμού (π.χ. ωριαία μετεωρολογικά δεδομένα για τον άνεμο). Όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή δεδομένα υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι που μπορούν να ακολουθηθούν. Η πρώτη βασίζεται σε εμπειρικούς και πρακτικούς σχεδιαστικούς κανόνες ενώ η δεύτερη βασίζεται σε μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πόρων. Οι δύο αυτές μέθοδοι περιγράφονται παρακάτω.

Μέθοδος Α - Εμπειρικός Σχεδιασμός

Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες οι οποίοι προέρχονται είτε από μετρήσεις σε πραγματικές εγκαταστάσεις, είτε από λεπτομερείς προσομοιώσεις σε παρόμοιες συνθήκες.

Γενικά, τέτοιοι εμπειρικοί κανόνες υπάρχουν κυρίως για τις ανεμογεννήτριες περιορίζοντας την εφαρμογή του μέτρου σε μονάδες που παράγουν ενέργεια μόνο από αιολικά. Ένας γενικός κανόνας για αυτές τις μονάδες είναι πως το μέγεθος της μπαταρίας πρέπει να διασφαλίζει την αυτόνομη λειτουργία για χρονικό διάστημα 3 ημερών [17], [18], [19], [20].

Αυτή η πρακτική οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου των συμβατικών συστημάτων Diesel κοντά στο 45% σε σχέση με όταν δεν υπάρχει καθόλου μπαταρία.

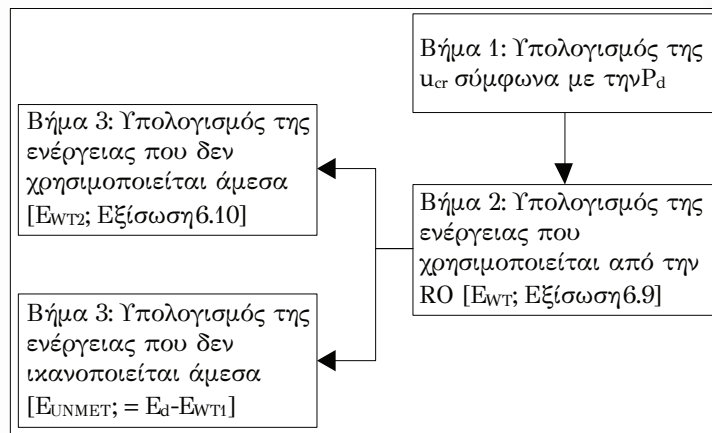
Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούν να οριστούν δύο περιπτώσεις σε συνδυασμό με αυτά που αναφέρονται στην ενότητα 4.1.4.

1. Στην περίπτωση "Diesel-Max" η ζήτηση η οποία δεν καλύπτεται απευθείας από ανανεώσιμες πηγές καλύπτεται εξολοκλήρου από συμβατικά συστήματα Diesel καθώς δεν υπάρχει εγκατεστημένη μπαταρία. Η κατανάλωση του πετρελαίου είναι ίση με την ενέργεια που χρειάζεται και δεν καλύπτεται από ΑΠΕ. Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό της ενέργειας που χρειάζεται και δεν καλύπτεται από ΑΠΕ παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3.
2. Στην περίπτωση "Diesel-Min" υπάρχει εγκατεστημένη μπαταρία, ικανή να υποστηρίξει αυτόνομη λειτουργία 3 ημερών. Τα συμβατικά συστήματα Diesel καταναλώνουν λιγότερο πετρέλαιο κατά 45% σε σχέση με την κατανάλωση στην περίπτωση "Diesel-Max"

Μέθοδος Β - Σχεδιασμός με Μοντελοποίηση

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό της επίδρασης που έχουν οι μεταβολές των ανανεώσιμων πόρων εντός μια μικρής χρονικής περιόδου (συνήθως μια ημέρα) στην απόδοση του συστήματος για όλη την περίοδο σχεδιασμού. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στα βήματα που περιγράφονται παρακάτω:

1. Εκτιμάται η μορφή της κατανομής του ανανεώσιμου πόρου εντός μιας ημέρας.
2. Η κατανομή του ανανεώσιμου πόρου μετασχηματίζεται σε κατανομή ισχύος για την ίδια μέρα έτσι ώστε η ενέργεια που παράγεται

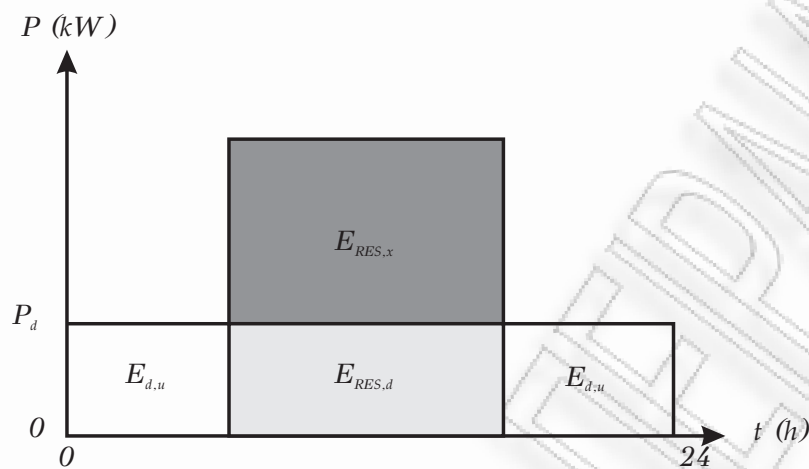


Εικόνα 4.3: Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ζήτησης η οποία δεν καλύπτεται απευθείας από ανανεώσιμες πηγές

για την περίοδο σχεδιασμού να είναι ίση με την ανανεώσιμη ενέργεια που υπολογίστηκε στο βήμα 1 του σχεδιασμού λαμβάνοντας υπόψιν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων που θα συμμετέχουν.

3. Η μοντελοποίηση της κατανομής του ανανεώσιμου πόρου, επιτρέπει τον υπολογισμό της ζήτησης της ενέργειας που δεν καλύπτεται από τις ανανεώσιμες πηγές καθώς και τον υπολογισμό της ανανεώσιμης ενέργειας που δεν απορροφά το σύστημα και απορρίπτεται (περίσσεια).
4. Τα παραπάνω ενεργειακά μεγέθη μαζί με την εφαρμογή του κανόνα σχεδιασμού 2 της ενότητας 4.1.4 χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση της μπαταρίας και του υπολογισμού της ενέργειας που χρειάζεται να δοθεί από το συμβατικό σύστημα Diesel.

Ένα απλό, περιγραφικό μοντέλο για την κατανομή της ισχύος των ανανεώσιμων πόρων P_{RES} μέσα σε χρονική περίοδο T και η σχέση του με τη ζήτηση ισχύος P_d παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4 έτσι ώστε να περιγράψει τα βήματα 3 και 4 που αναφέρονται παραπάνω. Η ακριβής μορφή της κατανομής των ανανεώσιμων πόρων εξαρτάται από το είδος της ανανεώσιμης πηγής που χρησιμοποιείται (φωτοβολταϊκά, αιολικά ή και τα δύο), από το μέγεθος των συστημάτων και από την εκτιμώμενη κατανομή του ανανεώσιμου πόρου για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Οι εκτιμώμενες κατανομές ισχύος παρουσιάζονται στην εικόνα 6.3 για την ισχύ από τα φωτοβολταϊκά, στην εικόνα 6.5 παρουσιάζεται η κατανομή για την ισχύ από ανεμογεννήτριες ενώ ένας συνδυασμός για το υβριδικό σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 6.6.



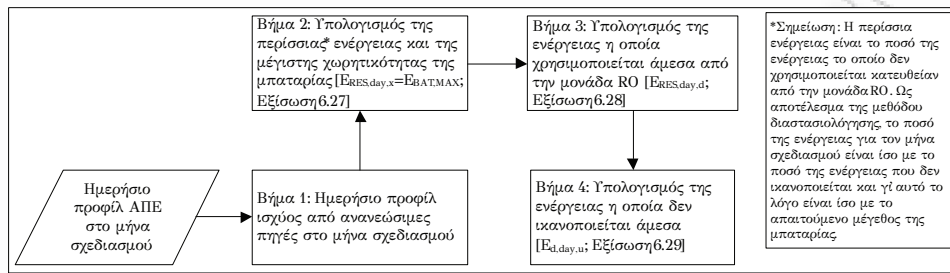
Εικόνα 4.4: Περιγραφική κατανομή της διαθέσιμης ανανεώσιμης ισχύος και η σχέση του με τη ζήτηση

Στο γράφημα της εικόνας 4.4 διακρίνονται τρεις περιοχές οι οποίες αναπαριστούν διαφορετικές ενεργειακές ποσότητες. Αυτές είναι:

- $E_{RES,d}$: Είναι η ανανεώσιμη ενέργεια η οποία παράγεται και κατευθείαν δίνεται στη ζήτηση.
- $E_{RES,x}$: Είναι η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας. Μέρος ή το σύνολο αυτής της ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να φορτιστεί η μπαταρία (ανάλογα με το μέγεθος και την κατάσταση φόρτισης της).
- $E_{d,u}$: Είναι η ποσότητα της ενέργειας η οποία δεν καλύπτεται άμεσα από τις ανανεώσιμες πηγές. Μέρος ή το σύνολο αυτής της ενέργειας μπορεί να καλυφθεί από τη μπαταρία. Εάν η μπαταρία δεν έχει αρκετή ενέργεια για να καλυφθεί η ζήτηση, τότε θα χρησιμοποιηθεί ενέργεια από συμβατικά συστήματα Diesel.

Η διαστασιολόγηση της μπαταρίας και ο υπολογισμός της ενέργειας που δίνει το συμβατικό σύστημα Diesel εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στην ποσότητα της ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα και στη περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό γίνεται διάκριση σε τρεις περιπτώσεις:

1. $E_{RES,x} = E_{d,u}$ Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας ισούται με την ενέργεια που δεν καλύπτεται άμεσα.
Όλη η περίσσεια ενέργειας θα αποθηκευτεί στη μπαταρία και θα



Εικόνα 4.5: Ο αλγόριθμος διαστασιολόγησης της χωρητικότητας της μπαταρίας για συγκεκριμένο μήνα σχεδιασμού

αποδοθεί **όλη** στην ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Έτσι η χωρητικότητα της μπαταρίας ισούται με την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας και δεν χρειάζεται η χρήση συμβατικού συστήματος Diesel.

2. $E_{RES,x} > E_{d,u}$ Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα.

Μέρος της περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στη μπαταρία ικανοποιεί **όλη** τη ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα. Έτσι η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι ίση με την ενέργεια που δεν καλύπτεται άμεσα και δεν χρειάζεται η χρήση συμβατικού συστήματος Diesel, ενώ υπάρχει και απόρριψη της ενεργειακής περίσσειας.

3. $E_{RES,x} < E_{d,u}$ Η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας είναι μικρότερη από την ζήτηση που δεν καλύπτεται άμεσα.

Όλη η περίσσεια ενέργειας θα δοθεί στη μπαταρία και θα καλύψει ένα μέρος της ζήτησης που δεν καλύπτεται άμεσα. Το υπόλοιπο θα καλυφθεί από το συμβατικό σύστημα Diesel. Η χωρητικότητα της μπαταρίας ισούται με την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας και η ενέργεια που αποδίδεται από το συμβατικό σύστημα Diesel ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στη ζήτηση ενέργειας που δεν καλύπτεται άμεσα μείον την περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας $E_{d,u} - E_{RES,x}$

Ο αλγόριθμος για τη διαστασιολόγηση της μπαταρίας παρουσιάζεται για ένα μήνα σχεδιασμού στην εικόνα 4.5. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας από συμβατικό σύστημα Diesel παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6 για κάθε μήνα (i) λειτουργίας της εγκατάστασης [21]. Αυτή η μοντελοποίηση εφαρμόζεται σε όλα τα διαφορετικά συστήματα που παράγονται για τις διάφορες τιμές της μεταβλητής α . Για να ορισθούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις για τη συμβατική κατανάλωση ενέργειας, ο σχεδιασμός του συστήματος επαναλαμβάνεται για δύο μήνες:

1. Για το μήνα όπου η ανανεώσιμη πηγή (ηλιακή ακτινοβολία ή ταχύτητα ανέμου) είναι ελάχιστη (Σχεδιασμός - "Χειρότερο Σενάριο"). Αυτή η περίπτωση οδηγεί στον υπολογισμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας με τρόπο έτσι ώστε να μεγιστοποιείται το μέγεθος των εγκατεστημένων συστημάτων και να γίνεται μεγάλη χρήση των ανανεώσιμων πηγών γενικά. Έτσι ελαχιστοποιείται η χρήση των συμβατικών συστημάτων Diesel. Αυτό είναι το σενάριο ελάχιστου Diesel (**Diesel-Min**). Σε αυτή την περίπτωση, η υπολογισμένη μπαταρία χρησιμοποιείται πλήρως αφού κατά τη διάρκεια του έτους αναλαμβάνει την κάλυψη του φορτίου. Κατά τους περισσότερους μήνες, η ενέργεια που δεν καλύπτεται θα είναι μικρή λόγω της μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος από ΑΠΕ και έτσι μεγάλο ποσοστό της ενέργειας δεν θα μπορέσει να αποδοθεί στο φορτίο.
2. Για το μήνα όπου η ανανεώσιμη πηγή είναι μέγιστη (Σχεδιασμός - "Καλύτερο Σενάριο"). Αυτή η περίπτωση οδηγεί στον υπολογισμό της μονάδας παραγωγής ενέργειας με τρόπο έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το μέγεθος των εγκατεστημένων συστημάτων ΑΠΕ αλλά έτσι γίνεται μέγιστη η χρήση των συμβατικών συστημάτων Diesel (**Diesel-Max**). Η υπολογιζόμενη μπαταρία είναι σχετικά μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για το σύνολο των μηνών αφού η μπαταρία δεν πρόκειται ποτέ να είναι φορτισμένη πλήρως κατά τη διάρκεια του έτους (εκτός από το μήνα σχεδιασμού).

Ο υπολογισμός της ενέργειας από συμβατικά συστήματα Diesel δίνεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο υπολογισμού (Εικόνα 4.6) για την τυπική μέρα του μήνα i από την εξίσωση

$$E_{DIESEL,i} = E_{RES,d,day,i} - E_{BAT,i} \quad (4.5)$$

ενώ για όλο το έτος η ενέργεια είναι:

$$ConvEnergy = \sum_{i=1}^{12} E_{DIESEL,i} \times MonthDays_i \quad (4.6)$$

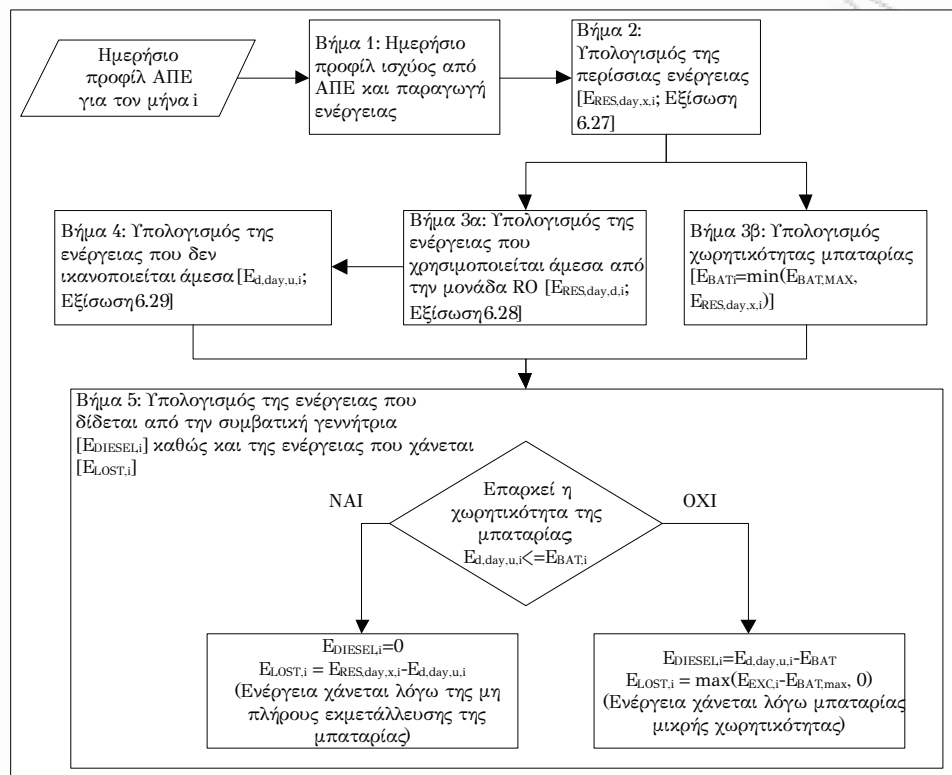
όπου $MonthDays_i$ οι μέρες του μήνα i (π.χ. $MonthDays_1 = 31$ κτλ).

Η ανανεώσιμη ενέργεια η οποία τελικά δεν αποδίδεται, για την τυπική ημέρα του μήνα i σύμφωνα με τον αλγόριθμο υπολογισμού είναι:

$$E_{LOST,i} = \begin{cases} E_{RES,day,x,i} - E_{d,day,u,i} & E_{d,day,u,i} \leq E_{BAT,i} \\ \max(E_{RES,day,x,i} - E_{BAT,max}, 0) & E_{d,day,u,i} > E_{BAT,i} \end{cases} \quad (4.7)$$

Η μη αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια, για το σύνολο του έτους είναι:

$$RE_{undelivered} = \sum_{i=1}^{12} E_{LOST,i} \times MonthDays_i \quad (4.8)$$



Εικόνα 4.6: Ο αλγόριθμος υπολογισμού της ενέργειας από συμβατικό σύστημα Diesel για την τυπική ημέρα κάθε μήνα (i)

Κεφάλαιο 5

Περίπτωση Εφαρμογής

5.1 Δεδομένα

Στην περίπτωση εφαρμογής, θα γίνει διαστασιολόγηση των συστημάτων ΑΠΕ μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με βάση τους κανόνες και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν. Η μονάδα θα παράγει $24m^3$ καθαρό νερό ανά ημέρα, θα χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα ενώ θα υπάρχει συμβατικό σύστημα Diesel και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρία.

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Υπάρχουν δύο κατηγορίες δεδομένων που παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες.

- Η ενότητα 5.1.1 παρουσιάζει τα μετεωρολογικά δεδομένα για την περιοχή της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η ενότητα 5.1.2 παρουσιάζει τα δεδομένα των ενεργειακών συστημάτων. Περιλαμβάνει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων, των μπαταριών καθώς και των συμβατικών συστημάτων Diesel.

Τα δεδομένα για την οικονομική ανάλυση δίνονται στην ενότητα 5.2.3.

5.1.1 Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά Περιοχής

Η μονάδα αφαλάτωσης και τα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας που θα εξεταστούν, βρίσκονται στην περιοχή της Τύνιδας στην Τυνησία. Συγκεκριμένα, στο ερευνητικό κέντρο C.R.T.En. (Centre de Recherches et Technologies de l'Énergie) που βρίσκεται στο προάστιο Borj Cedria της Τύνιδας. Οι συντεταγμένες του ερευνητικού κέντρου είναι $36^{\circ}43'00''N$ και $10^{\circ}25'40''E$.

Πίνακας 5.1: Μετεωρολογικά δεδομένα ανέμου.

Παράμετρος	Τιμή
Ύψος από το έδαφος (<i>m</i>)	10
Μέση ταχύτητα ανέμου (<i>m/s</i>)	4.99
Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου (<i>m/s</i>)	0.00
Μέγιστη ταχύτητα ανέμου (<i>m/s</i>)	18.50
Σταθερά <i>k</i> της Weibull	1.519
Σταθερά <i>c</i> της Weibull (<i>m/s</i>)	5.54
Τυπική απόκλιση (<i>m/s</i>)	3.36
Συντελεστής εκθετικού νόμου	0.14

Αιολικά Δεδομένα

Τα δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 είναι από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην Τυνησία το διάστημα 21/12/2006 έως 10/04/2007.

Εάν χρησιμοποιηθεί ο εκθετικός νόμος για ύψος 50 *m* τότε η μέση ενεργειακή πυκνότητα ισούται με 394 *W/m²*. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που γίνεται στον "Ατλαντα της Αιολικής Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών" [22] για τη συγκεκριμένη ενεργειακή πυκνότητα η περιοχή ανήκει στην αιολική ενεργειακή κλάση 3 ενώ είναι πολύ κοντά στην κλάση 4. Έτσι μια εγκατάσταση αιολικής μονάδας στην περιοχή κρίνεται συμφέρουσα.

Για να υπολογιστεί η διαθέσιμη ανανεώσιμη ενέργεια με τη μέθοδο του ημερήσιου προφίλ, είναι απαραίτητη η χρήση μέσων μηνιαίων τιμών για την ταχύτητα του ανέμου. Αυτές μπορούν να παρθούν από τη βάση δεδομένων του προγράμματος RetScreen [23]. Οι μέσες μηνιαίες τιμές για την περιοχή της Τύνιδας (γεωγραφικό πλάτος 35°N και γεωγραφικό μήκος 10°E) παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Ηλιακά Δεδομένα

Για τα δεδομένα για τη μέση ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων της εφαρμογής Meteonorm 6 για την Τύνιδα [24]. Ο πίνακας 5.3 έχει τις συνολικές μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και τις μέσες ημερήσιες. Οι τιμές του πίνακα αφορούν κεκλιμένο επίπεδο 30° επειδή αυτή η τιμή είναι κοντά στο γεωγραφικό μήκος της περιοχής και με αυτό τον τρόπο υπάρχει μεγιστοποίηση της λαμβανόμενης ακτινοβολίας σε ετήσια βάση.

Πίνακας 5.2: Μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου ανά μήνα.

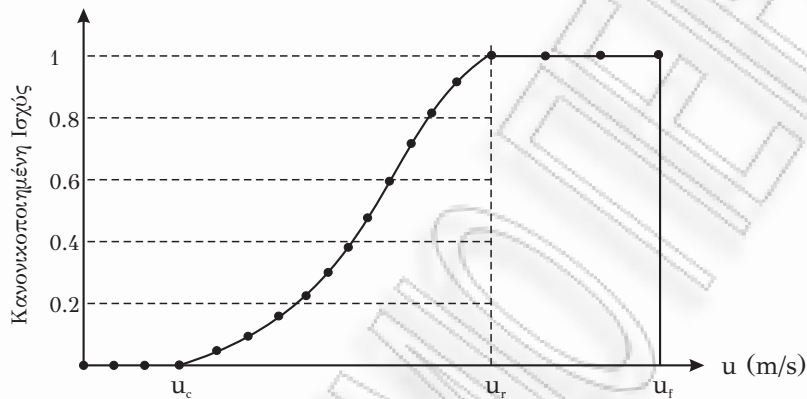
Μήνας	Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)
Ιανουάριος	5.29
Φεβρουάριος	5.67
Μάρτιος	5.44
Απρίλιος	5.63
Μάιος	5.35
Ιούνιος	4.38
Ιούλιος	4.08
Αύγουστος	4.74
Σεπτέμβριος	4.37
Οκτώβριος	5.01
Νοέμβριος	5.01
Δεκέμβριος	5.27
Μέση Ετήσια	5.01

Πίνακας 5.3: Μετεωρολογικά δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας.

Μήνας	Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ²) ανά μήνα	Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ²) ανά ημέρα	Μέση Ηλιακή Ακτινοβολία (kWh/m ²)
Ιανουάριος	123	3.97	0.165
Φεβρουάριος	122	4.36	0.182
Μάρτιος	169	5.45	0.227
Απρίλιος	175	5.83	0.243
Μάιος	204	6.80	0.283
Ιούνιος	211	7.03	0.293
Ιούλιος	227	7.32	0.305
Αύγουστος	217	7.00	0.292
Σεπτέμβριος	194	6.47	0.270
Οκτώβριος	173	5.58	0.233
Νοέμβριος	139	4.63	0.193
Δεκέμβριος	125	4.03	0.168

Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Επιφάνεια πλαισίου (m^2)	A_{module}	1.176
Ονομαστική ισχύς πλαισίου (kWp)	P_{PV}	0.14
Απόδοση πλαισίου (%)	η_{PV}	11.9
Συνολικές απώλειες (%)	$\eta_{PV,loss}$	28



Εικόνα 5.1: Κανονικοποιημένη καμπύλη ισχύος ταχύτητας τυπικής ανεμογεννήτριας

5.1.2 Δεδομένα Συστημάτων

Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό μονοκρυσταλλικό πλαίσιο. Τα χαρακτηριστικά του πλαισίου παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4. Οι απώλειες του αντιστροφέα και των καλωδιώσεων υπολογίζονται στο 28% λαμβάνοντας ως παραδοχή πως ο βαθμός απόδοσης του αντιστροφέα είναι 90% και ο βαθμός απόδοσης των καλωδιώσεων συνολικά είναι 80%.

Αιολικό Σύστημα

Η εικόνα 5.1 παρουσιάζει την κανονικοποιημένη καμπύλη (Ισχύος - Ταχύτητας) της τυπικής ανεμογεννήτριας. Έχει παραχθεί από τους αντίστοιχους μέσους όρους πολλών κανονικοποιημένων ανεμογεννητριών. Με τον όρο κανονικοποίηση εννοείται μια ανεμογεννήτρια που οι τιμές της ισχύος έχουν διαιρεθεί με την ονομαστική της ισχύ.

Το ύψος κεφαλής για την ανεμογεννήτρια είναι 50m και οι συνολικές απώλειες είναι 28% (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών του αντιστροφέα).



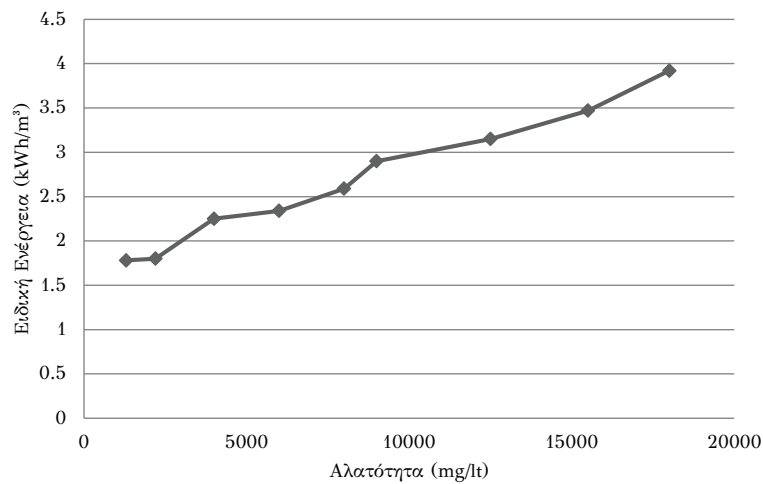
Εικόνα 5.2: Η μονάδα αφαλάτωσης που έχει εγκατασταθεί στην Τυνησία

Σύστημα Μπαταρίας

Το σύστημα της μπαταρίας αποτελείται από συστοιχίες μπαταριών συνδεδεμένες μεταξύ τους με τρόπο έτσι ώστε να σχηματίζουν την επιθυμητή τάση λειτουργίας [17]. Το στοιχειώδες δομικό στοιχείο για το σύστημα αυτό έχει επιλεγεί να είναι μια μπαταρία με τάση 2 V και χωρητικότητα 800 Ah. Εάν θεωρηθεί η τάση λειτουργίας 48 V τότε πρέπει να φτιαχτούν συστοιχίες από 24 μονάδες-μπαταρίες εν σειρά έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση. Έτσι σχηματίζεται μια συστοιχία μπαταρίας με 48 V και 800 Ah. Εάν χρειάζεται περισσότερη χωρητικότητα, τότε συνδέονται παράλληλα όμοιες συστοιχίες των 800 Ah. Άρα η ελάχιστη χωρητικότητα μπαταρίας σύμφωνα με την επιλεγμένη συνδεσμολογία είναι σε ενέργεια $800Ah \times 48V = 38.4kWh$. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

Μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης

Η μονάδα αντίστροφης όσμωσης καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργεια για την παραγωγή του νερού. Οι καταναλώσεις αυτές αφορούν τις αντλίες υψηλής πίεσης που ωθούν το νερό διαμέσου των μεμβρανών. Η ενέργεια που χρειάζεται μια δεδομένη μονάδα για να παράξει ένα κυβικό μέτρο



Εικόνα 5.3: Η καμπύλη της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας της μονάδας αντίστροφης όσμωσης που χρησιμοποιήθηκε, σε σχέση με την αλατότητα

Πίνακας 5.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά για τη συστοιχία μπαταρίας.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Αριθμός στοιχείων εν σειρά		24
Τάση (V)	$V_{batcell}$	2
Χωρητικότητα (Ah)	$C_{batcell}$	800
Απόδοση φόρτ/εκφόρτ (%)	$\eta_{batcell}$	90
Επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (%)	DoD	100

καθαρού νερού ονομάζεται ειδική ενέργεια. Η ειδική ενέργεια εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Η σημαντικότερη είναι η αλατότητα του νερού. Η μονάδα που έχει επιλεγεί (Εικόνα 5.2) μπορεί να αφαλατώσει νερό αλατότητας (TDS) έως και (sal_{max}) 18000mg/l ενώ έχει δυναμικότητα $Q_{max} = 24\text{m}^3/\text{day}$. Το γράφημα που δίνει την ειδική κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την αλατότητα για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3.

Βοηθητικά Δεδομένα

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω βοηθητικά δεδομένα:

- Θερμογόνος δύναμη καυσίμου - $H_u = 10.7\text{kWh/l}$
- Βαθμός απόδοσης συμβατικού συστήματος Diesel - $\eta_{dsl} = 0.3$

5.1.3 Μορφή Αποτελεσμάτων

Από το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί θα επιστραφούν συστήματα τα οποία πληρούν και υπακούν στους κανόνες και τα κριτήρια σχεδιασμού που αναπτύχθηκαν. Για τιμές του α (εξισώσεις 4.2 και 4.3) από 0 έως 1 με βήμα 0.25 (δηλαδή 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1) και για Diesel-Min και Diesel-Max προκύπτουν δέκα διατάξεις.

Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο είναι α) αποτελέσματα διαστασιολόγησης, β) αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης και γ) αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης. Στα αποτελέσματα διαστασιολόγησης δίνονται τα μεγέθη (εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων και μέγεθος μπαταρίας) τα οποία πρέπει να εγκατασταθούν ενώ στα αποτελέσματα ενεργειακής ανάλυσης παρουσιάζονται οι παρακάτω ετήσιες ενεργειακές ποσότητες:

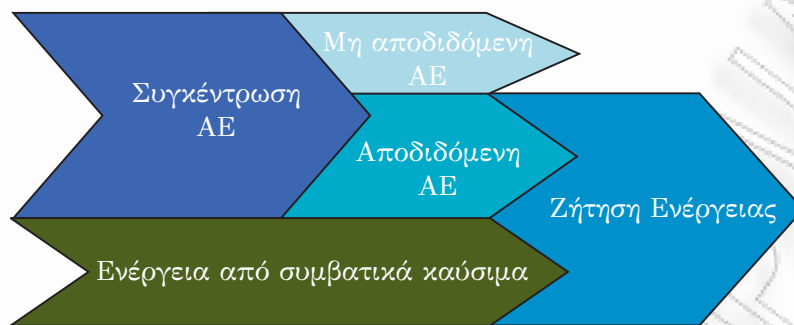
- **Ζήτηση Ενέργειας:** Η ζήτηση ενέργειας που χρειάζεται για τη λειτουργία της μονάδας αντίστροφης όσμωσης.
- **Συγκέντρωση ΑΕ:** Η συνολική ενέργεια που συγκεντρώνεται από ΑΠΕ.
- **Αποδιδόμενη ΑΕ:** Η συνολική ενέργεια που αποδίδεται στη ζήτηση από ΑΠΕ.
- **Μη Αποδιδόμενη ΑΕ:** Η συνολική ενέργεια από ΑΠΕ που δεν αποδίδεται στη ζήτηση
- **Ενέργεια από Συμβατικά Καύσιμα:** Η ενέργεια που πρέπει να δωθεί στο σύστημα από συμβατικές πηγές (Μηχανή Diesel).

Οι παραπάνω ποσότητες αναπαριστούν ποσά ενέργεια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τις κατάλληλες σχέσεις και παρουσιάζονται σχηματικά στο διάγραμμα τύπου Sankey της εικόνας 5.4.

Οι ακόλουθοι δύο δείκτες είναι σημαντικοί και παρουσιάζονται και αυτοί στα αποτελέσματα:

- **Αποδιδόμενη ΑΕ προς Ζήτηση Ενέργειας :** Αναπαριστά το κομμάτι της ζήτησης που καλύπτεται από ΑΠΕ.
- **Αποδιδόμενη ΑΕ προς Συγκεντρωμένη ΑΕ:** Αναπαριστά το κομμάτι της ανανεώσιμης ενέργειας που συγκεντρώνεται και χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών.

Επίσης, στα αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης παρουσιάζεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης και ένα ενδεικτικό κόστος λειτουργίας. Η



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα Sankey για την ενεργειακή ανάλυση του συστήματος

οικονομική ανάλυση στη παρούσα εργασία είναι ενδεικτική για να εντοπίσει ποια από τις εναλλακτικές έχει την καλύτερη οικονομική συμπεριφορά και όχι τόσο για να δώσει μια τιμή που να μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα.

5.2 Αποτελέσματα

5.2.1 Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης

Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης τα οποία δίδουν το μέγεθος του συστήματος, σύμφωνα με το μοντέλο, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες και για τους δύο κανόνες σχεδιασμού "Diesel-Min" και "Diesel-Max":

- **Πίνακας 5.6:** Παρουσιάζει την απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ (ή χωρητικότητα) των συσκευών χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος της ελάχιστης μονάδας αλλά μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Πρόκειται για το μαθηματικό μέγεθος και όχι για τεχνικά εφικτή λύση (εν γένει).
- **Πίνακας 5.7:** Παρουσιάζει την τελικά προτεινόμενη εγκατεστημένη ισχύ (ή χωρητικότητα των συσκευών) ώστε να καλύπτεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς (ή χωρητικότητα)(Ονομαστική ισχύς-χωρητικότητα μονάδας × Αριθμός δομικών μονάδων).
- **Πίνακας 5.8:** Παρουσιάζει τον αριθμό των δομικών μονάδων που πρέπει να εγκατασταθούν έτσι ώστε να καλύπτεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς.

Θα πρέπει να αναφερθεί εδώ πως ενώ η δομική μονάδα των φωτοβολταϊκών είναι σχετικά μικρής ισχύος (δηλαδή ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι κοντά στα 100W), η δομική μονάδα των αιολικών μπορεί να είναι από

Πίνακας 5.6: Απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς

α	Απαιτού- μενη ισχύς φωτοβολταϊ- κών (kWp)	Απαιτού- μενη ισχύς αιολικών (kW)	Χωρητικό- τητα μπαταρίας (kWh)	Χρήση πετρελαίου (kWh/yr)
Diesel-Min				
0.00	32.95	0	122.43	0
0.25	24.71	8.44	109.41	0
0.50	16.47	16.96	112.99	0
0.75	8.24	25.45	132.12	0
1.00	0	33.93	156.78	0
Diesel-Max				
0.00	17.87	0	46.78	7534.84
0.25	13.40	3.75	35.75	6810.33
0.50	8.93	7.48	30.86	6085.83
0.75	4.47	11.24	31.48	5525.08
1.00	0	14.98	36.58	5514.69

μερικά Watt έως πολλά MW. Επιπλέον, για λόγους οικονομίας κλίμακας δεν επιλέγονται πολλές μικρές ανεμογεννήτριες, αλλά μια μεγάλη. Στην περίπτωση που εξετάζεται, η εγκατεστημένη ισχύς της ανεμογεννήτριας είναι όσο η απαιτούμενη. Ακόμα, για να γίνει σαφέστερη η επίδραση του μεγέθους της μπαταρίας, τα ενεργειακά μεγέθη που προκύπτουν έχουν υπολογισθεί και αυτά με την απαιτούμενη ισχύ και όχι με την προτεινόμενη προς εγκατάσταση (δηλαδή με βάση τα στοιχεία του πίνακα 5.6 και όχι του 5.7).

5.2.2 Ενεργειακή Ανάλυση

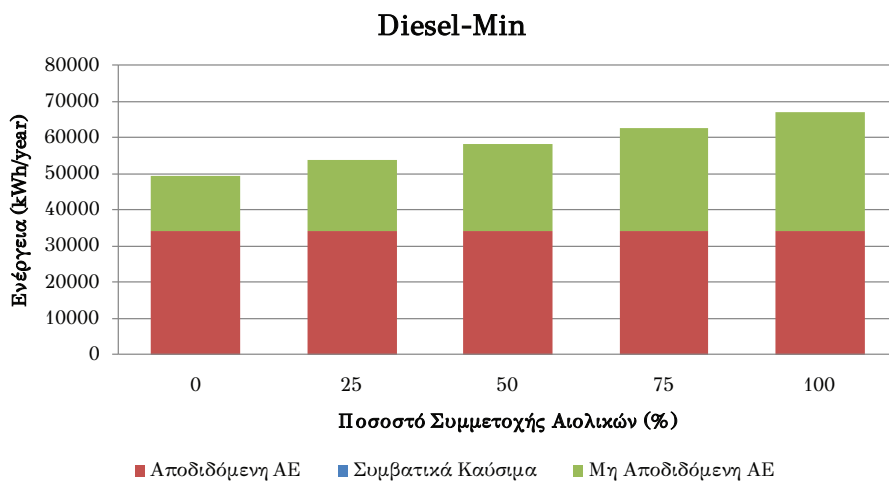
Στη συνέχεια, ακολουθούν γραφήματα τα οποία παρουσιάζουν την ενεργειακή ανάλυση. Τα γραφήματα των εικόνων 5.5 και 5.6 παρουσιάζουν τα ενεργειακά μεγέθη που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1.3 για τις περιπτώσεις Diesel-Min και Diesel-Max αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται πως το άθροισμα της μη αποδιδόμενης ανανεώσιμης ενέργειας με την αποδιδόμενη ανανεώσιμη ενέργεια είναι η συγκεντρωμένη ανανεώσιμη ενέργεια. Τέλος, η ετήσια ζήτηση ενέργειας είναι σε κάθε περίπτωση $E_{d,year} = 34339.2kWh$.

Πίνακας 5.7: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς και χωρητικότητα

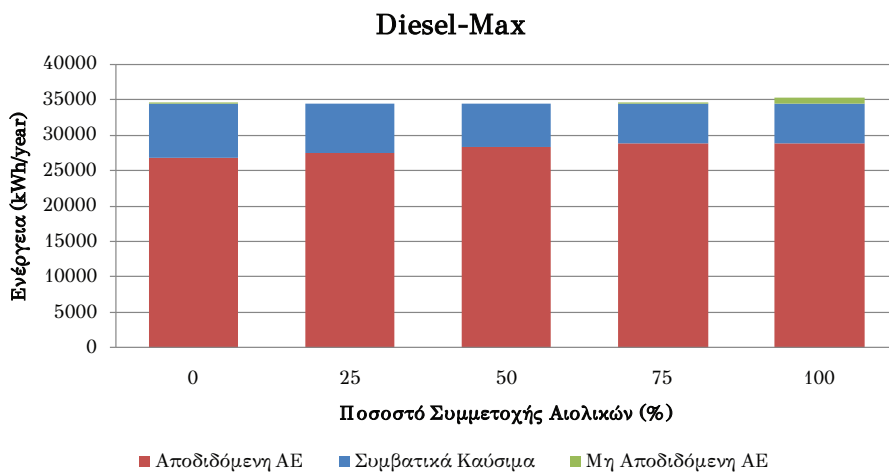
α	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (kWp)	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών (kW)	Εγκατεστημένη χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)
Diesel-Min			
0.00	33.04	0	153.6
0.25	24.78	16.02	115.2
0.50	16.52	32.04	115.2
0.75	8.26	32.04	115.2
1.00	0	48.06	192
Diesel-Max			
0.00	17.92	0	76.8
0.25	13.44	16.02	38.4
0.50	8.96	16.02	38.4
0.75	4.48	16.02	38.4
1.00	0	16.02	38.4

Πίνακας 5.8: Αριθμός δομικών μονάδων διαστασιολόγησης

α	Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	Αριθμός ανεμογεννητριών	Αριθμός συστοιχιών μπαταρίας
Diesel-Min			
0.00	236	0	4
0.25	177	1	3
0.50	118	2	3
0.75	59	2	4
1.00	0	3	5
Diesel-Max			
0.00	128	0	2
0.25	96	1	1
0.50	64	1	1
0.75	32	1	1
1.00	0	1	1



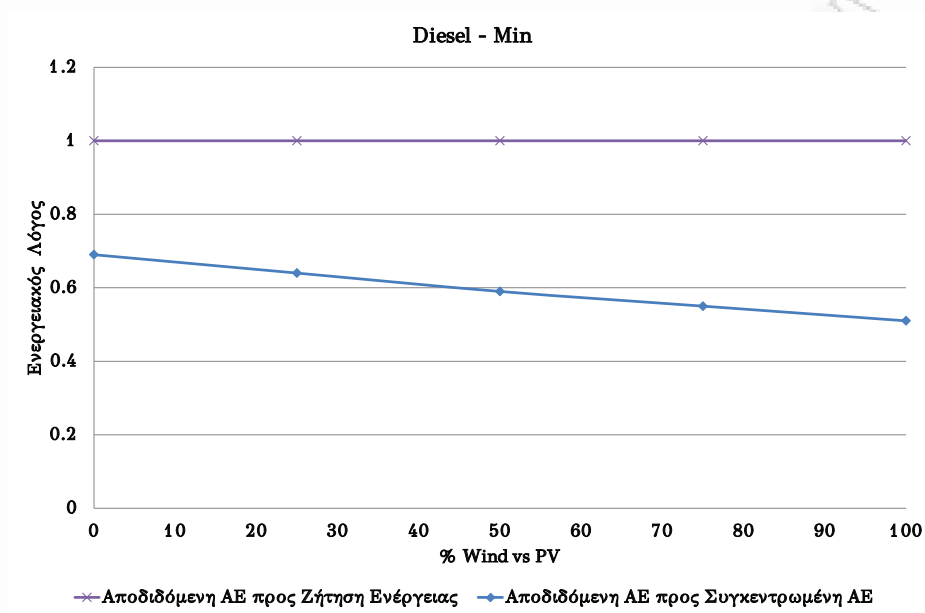
Εικόνα 5.5: Η ενεργειακή ανάλυση για τις περιπτώσεις Diesel-Min



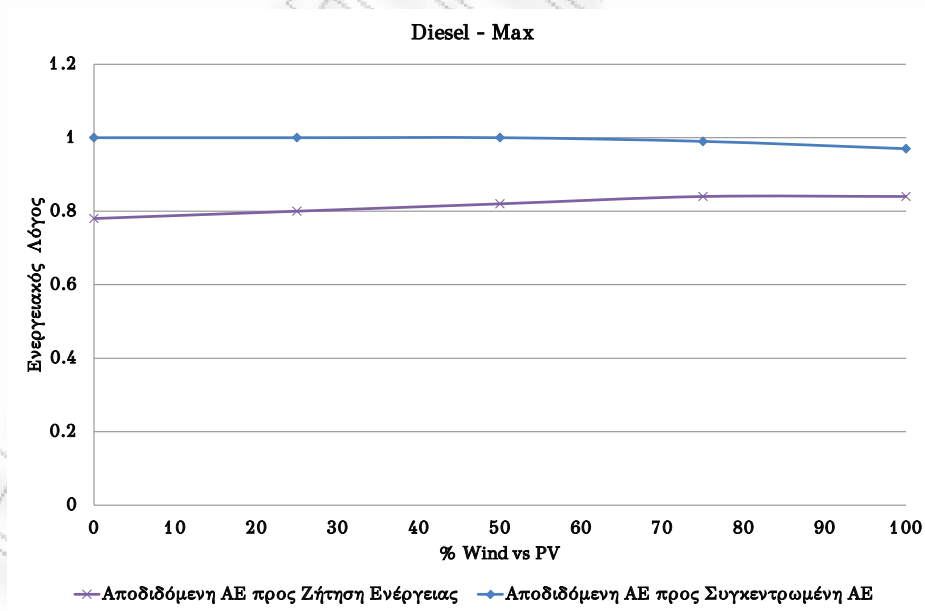
Εικόνα 5.6: Η ενεργειακή ανάλυση για τις περιπτώσεις Diesel-Max

Ενεργειακοί Δείκτες

Στα γραφήματα των εικόνων 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται οι βασικοί ενεργειακοί δείκτες της ανάλυσης. Αυτοί οι δείκτες και στα δύο γραφήματα ποσοτικοποιούν το κατά πόσο το κάθε σύστημα που προέκυψε από το σχεδιασμό ικανοποιεί τους στόχους του σχεδιασμού "MAX-RES" και "MIN-UNDELIVERED" έτσι όπως ορίστηκαν στην αρχή του κεφαλαίου 4.



Εικόνα 5.7: Η κατανομή των ενεργειακών δεικτών για τις περιπτώσεις Diesel-Min



Εικόνα 5.8: Η κατανομή των ενεργειακών δεικτών για τις περιπτώσεις Diesel-Max

5.2.3 Οικονομική Ανάλυση

Για την οικονομική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του πίνακα 5.6 για τα μεγέθη των εγκατεστημένων ισχύων του κάθε συστήματος καθώς και η υπολογισμένη κατανάλωση Diesel σύμφωνα με τα γραφήματα των εικόνων 5.5 και 5.6. Επιπλέον παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν (σύμφωνα με αυτά που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 6.9) για την ανάλυση αυτή είναι:

- Διάρκεια ζωής της επένδυσης - $Duration = 20year$
- Κόστος καυσίμου Diesel - $FuelPrice = 1€/lt$
- Διάρκεια ζωής της μπαταρίας - $BatLife = 5year$

Στο γράφημα της εικόνας 5.9 μπορεί να γίνει σύγκριση ως προς το προβλεπόμενο συνολικό κόστος για κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η κάθε καμπύλη αφορά τις εκτιμήσεις του κόστους για τις περιπτώσεις Diesel-Min και Diesel-Max σε σχέση με τη συμμετοχή των αιολικών στο μείγμα των ΑΠΕ.

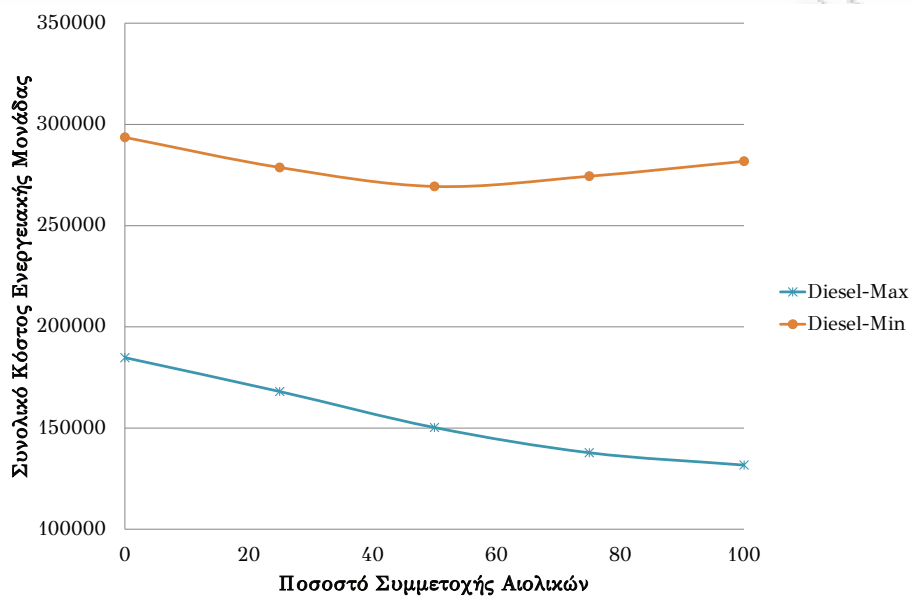
Εώς τώρα, έχει γίνει αναφορά μόνο για το κόστος της ενεργειακής μονάδας. Για να υπολογισθεί το κόστος του νερού σύμφωνα με την εξίσωση 6.47 πρέπει να γίνουν εκτιμήσεις για τα κόστη που περιγράφονται στην ενότητα 6.9.2.

- Το κόστος εγκατάστασης μιας μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης δυναμικότητας $Q_{max} = 24m^3/day$ εκτιμάται σε $IC_{ro} = 60000€$.
- Το κόστος των χημικών ανά κυβικό παραγόμενου νερού είναι κατά προσέγγιση $Chem = 0.05€/m^3$
- Το ποσοστό αντικατάστασης των μεμβρανών ως προς το κόστος της εγκατάστασης της μονάδας αφαλάτωσης είναι περίπου $membrer = 23.3%$. Αυτή η τιμή είναι ισοδύναμη με ένα ανηγμένο κόστος μεμβράνης $0.08€/m^3$ (παραγόμενο νερό).

Από τα παραπάνω προκύπτουν ενδεικτικές τιμές για το νερό (LWC) από $1.22€/m^3$ έως $1.52€/m^3$ για τις περιπτώσεις του Diesel-Max και τιμές από $2.00€/m^3$ έως $2.14€/m^3$ για τις περιπτώσεις του Diesel-Min.

5.3 Συμπεράσματα

Στις περιπτώσεις Diesel-Min (Εικόνα 5.5) είναι δυνατόν η χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας να είναι σχεδόν μηδενική. Αυτό όμως έχει ως



Εικόνα 5.9: Εκτίμηση του συνολικού κόστους της ενεργειακής μονάδας στον κύκλο ζωής

αποτέλεσμα την εγκατάσταση συστημάτων ΑΕ μεγάλης ισχύος και ένα μεγάλο κομμάτι της παραγόμενης ενέργειας να μη χρησιμοποιείται. Όσο περισσότερα φωτοβολταϊκά συμμετέχουν στο ενεργειακό μείγμα, τόσο καλύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ γίνεται.

Στις περιπτώσεις Diesel-Max (Εικόνα 5.6) υπάρχει σημαντική συμμετοχή συμβατικών πηγών ενώ όσο αυξάνεται η συμμετοχή των αιολικών μειώνεται η χρήση από το πετρέλαιο αλλά και ένα μικρό ποσοστό ΑΕ δεν αξιοποιείται.

Από την εικόνα 5.9 είναι σαφές πως το κόστος στις περιπτώσεις Diesel-Max είναι αρκετά μικρότερο. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και στη χαμηλή τιμή του συμβατικού καυσίμου. Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή την εικόνα είναι πως στην περίπτωση Diesel-Min το συνολικό κόστος παρουσιάζει ελάχιστο στην περίπτωση που η συμμετοχή των αιολικών είναι ανάμεσα στο 20% με 50%. Αυτό οφείλεται στο ότι ελαχιστοποιείται η χωρητικότητα της μπαταρίας με αποτέλεσμα το κόστος συντήρησης (δηλαδή της αντικατάστασης των μπαταριών) στον κύκλο ζωής να είναι μικρό.

Αν και η περίπτωση Diesel-Min δίνει υψηλές τιμές νερού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκεί που η αυτονομία του συστήματος αποτελεί βασικό στόχο, δηλαδή σε απομακρυσμένες ή νησιωτικές περιοχές ενώ η περίσσεια ενέργειας, όταν αυτή είναι διαθέσιμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων αναγκών.

Κεφάλαιο 6

Μαθηματικά Μοντέλα

6.1 Αιολικό Σύστημα

Η παραγωγή ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια εξαρτάται από τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος [17], η οποία καμπύλη δίνεται από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή συσχετίζει την ταχύτητα του ανέμου (u) στο ύψος κεφαλής της ανεμογεννήτριας με την ισχύ που παράγεται (P_W). Η εικόνα 6.1 παρουσιάζει την καμπύλη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας με πτερύγια ελεγχόμενου βήματος [25].

Τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη είναι αυτά τα οποία εμφανίζονται στο γράφημα. Αυτά είναι η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (u_c), η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (u_f), η ταχύτητα ονομαστικής ισχύος (u_r) και η ονομαστική ισχύς (P_r). Οι κατασκευαστές συνήθως καθορίζουν την καμπύλη της ισχύος δίνοντας διακριτά σημεία τα οποία και παρουσιάζονται στην εικόνα 6.1. Για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί μπορεί η καμπύλη να μοντελοποιηθεί από τη συνεχή εξίσωση 6.1

$$P_W(u) = \begin{cases} 0 & u \leq u_c \\ P_r[\alpha_1(u - u_c) + \alpha_2(u - u_c)^2 + \dots] & u_c < u < u_r \\ P_r & u_r \leq u \leq u_f \\ 0 & u > u_f \end{cases} \quad (6.1)$$

όπου P_W μετριέται σε kW και u σε m/s . Για το κομμάτι ταχυτήτων $u_c < u < u_r$ θεωρείται μια πολυωνυμική κατανομή. Οι συντελεστές της πολυωνυμικής κατανομής προκύπτουν μετά από αναδρομή των διακριτών σημείων. Η συγκεκριμένη καμπύλη μπορεί να μοντελοποιηθεί τουλάχιστον με μια καμπύλη δευτέρου βαθμού. Για προβλήματα διαστασιολόγησης είναι δυνατό να οριστεί μια κανονικοποιημένη καμπύλη ισχύος η οποία αναπαριστά την ισχύ που παράγεται ανά kW εγκατεστημένης ισχύος:

$$P'_W(u) = \frac{P_W(u)}{P_r} = \begin{cases} 0 & u \leq u_c \\ \alpha_1(u - u_c) + \alpha_2(u - u_c)^2 + \dots & u_c < u < u_r \\ 1 & u_r \leq u \leq u_f \\ 0 & u > u_f \end{cases} \quad (6.2)$$

Η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου μέσα σε μια περίοδο T (συνήθως ετήσια) μοντελοποιείται από την κατανομή Weibull. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός εύρους ταχυτήτων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κατανομής πυκνότητας πιθανότητας της Weibull [20]:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{u}{c}\right)^k \quad (6.3)$$

όπου k είναι ο παράγοντας μορφής (αδιάστατος) και c είναι η παράμετρος κλίμακας (σε m/s) η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$c = \frac{\bar{u}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6.4)$$

όπου \bar{u} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου και Γ είναι η συνάρτηση Γάμμα.

Συνήθως η ταχύτητα του ανέμου μετρείται σε υψόμετρο $h_{ref} = 10m$. Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος κεφαλής του ρότορα h υπολογίζεται από τον εκθετικό νόμο:

$$u = u_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (6.5)$$

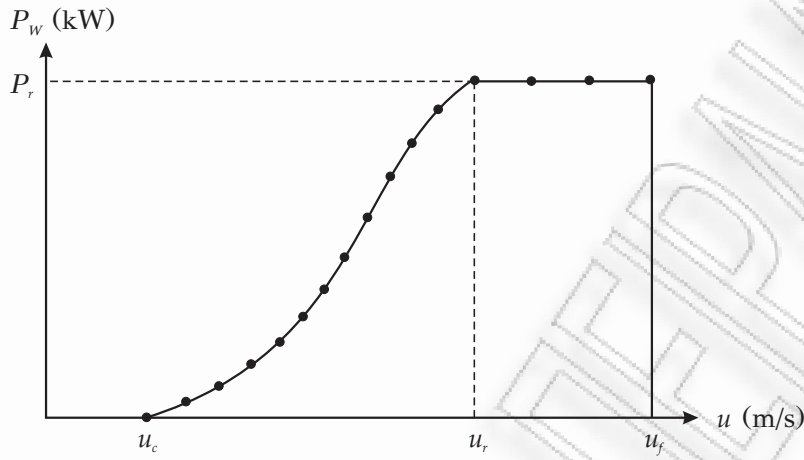
όπου u_{ref} είναι η μετρούμενη ταχύτητα στο ύψος αναφοράς και α είναι ο εκθέτης της μεταβολής ταχύτητας. Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για να μετασχηματισθεί είτε το προφίλ της ταχύτητας είτε ολόκληρη η κατανομή Weibull στο ύψος του ρότορα.

Η ενέργεια που παράγεται ανά kW ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την κανονικοποιημένη καμπύλη ισχύος:

$$E'_{WT} = T \times \eta_{WT,loss} \times \int_{u_c}^{u_f} P'_W(u) f(u) du \quad (6.6)$$

Η ενέργεια που παράγεται κατά την περίοδο T εξαρτάται από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ P_{WT} :

$$E_{WT} = P_{WT} E'_{WT} \quad (6.7)$$



Εικόνα 6.1: Καμπύλη ισχύος ταχύτητας τυπικής ανεμογεννήτριας

Η παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνολικής εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος που χρειάζεται να δώσει ενέργεια ίση με E_d σε περίοδο T , δηλαδή:

$$P_{WT} = \frac{E_d}{E'_{WT}} \quad (6.8)$$

Τελικά, τα ποσά ενέργειας που παράγονται σε μια περίοδο T από ταχύτητα ανέμου που είναι χαμηλότερη (E_{WT1}) ή μεγαλύτερη (E_{WT2}) από μια κρίσιμη ταχύτητα u_{cr} δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_{WT1} = P_{WT} \times T \times \eta_{WT,loss} \times \int_{u_c}^{u_{cr}} P'_W(u) f(u) du \quad (6.9)$$

$$E_{WT2} = P_{WT} \times T \times \eta_{WT,loss} \times \int_{u_{cr}}^{u_f} P'_W(u) f(u) du = E_{WT1} - E_{WT} \quad (6.10)$$

6.2 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής, από την επιφάνεια του πλαισίου και από την απόδοση του. Η παραγόμενη ισχύς (σε kW) σε συγκεκριμένη στιγμή προσδιορίζεται από την εξίσωση [26]:

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \eta_{PV,loss} A_{module} G(t) \quad (6.11)$$

όπου η_{PV} είναι ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, $\eta_{PV,loss}$ είναι ένας γενικός συντελεστής απωλειών (καλωδιώσεις, συνδέσεις κτλ.),

A_{module} είναι το εμβαδόν του πλαισίου (m^2) και G είναι η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2). Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του όμως στα πλαίσια της ανάλυσης αυτής δεν είναι σημαντικός παράγοντας. Η ενέργεια που παράγεται (kWh) από N_{PV} πλαίσια σε περίοδο T ωρών είναι:

$$E_{PV}(t) = N_{PV} \times T \times (\eta_{PV} \eta_{PV,loss} A_{module} \bar{G}) \quad (6.12)$$

όπου \bar{G} είναι η μέση ηλιακή ακτινοβολία στην περίοδο T .

Για προβλήματα διαστασιολόγησης είναι χρήσιμο να υπολογισθεί η ενέργεια που παράγεται ανά τετραγωνικό μέτρο πλαισίου για μια περίοδο T . Αυτή είναι:

$$E'_{PV}(t) = T \times (\eta_{PV} \eta_{PV,loss} A_{module} \bar{G}) \quad (6.13)$$

Η συνολική επιφάνεια φωτοβολταϊκών που απαιτείται για να παραχθεί ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας E_d σε περίοδο T είναι:

$$A_{PV} = \frac{E_d}{E'_{PV}} \quad (6.14)$$

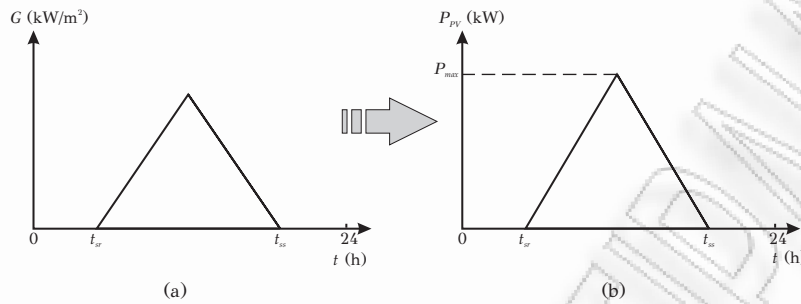
Τελικά ο απαιτούμενος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων δίνεται από τη σχέση:

$$N_{PV} = \left\lceil \frac{A_{PV}}{A_{module}} \right\rceil \quad (6.15)$$

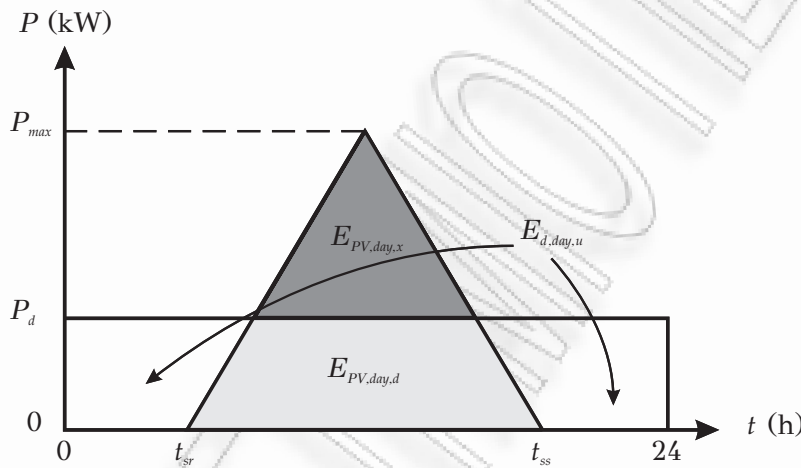
όπου ο τελεστής $\lceil x \rceil$ είναι η συνάρτηση οροφής (δέχεται το μεγαλύτερο ακέραιο).

6.3 Κατανομή Ηλιακής Ενέργειας

Για να παραχθεί η κατανομή της ηλιακής ισχύος που παράγεται από φωτοβολταϊκά χρειάζεται ένα μοντέλο για την ηλιακή ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη περίοδο. Η περίοδος που εξετάζουμε είναι μια ημέρα ενώ η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να μοντελοποιηθεί κατά προσέγγιση από μια τριγωνική κατανομή όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2a. Αυτό το μοντέλο είναι εμπλουτισμένο σε σχέση με αυτό που περιγράφεται στο [17]. Οι ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου (t_{sr} και t_{ss} αντίστοιχα) μπορούν να υπολογιστούν από τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη της περιοχής για κάθε ημέρα (για σχεδιαστικούς λόγους θεωρείται μια τυπική μέρα κάθε μήνα). Το προφίλ της ηλιακής ακτινοβολίας μετασχηματίζεται σε προφίλ ηλιακής ισχύος (που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα) χρησιμοποιώντας την εξίσωση 6.11. Το μετασχηματισμένο προφίλ φαίνεται στην εικόνα 6.2b.



Εικόνα 6.2: Μοντέλα ημερήσιου προφίλ για (a) ηλιακή ακτινοβολία και (b) ηλιακή ισχύ



Εικόνα 6.3: Σύγκριση ανάμεσα στην ηλιακή ενέργεια που παράγεται και την ζήτηση του φορτίου

Στο μετασχηματισμένο προφίλ φαίνονται αναλυτικά οι χρόνοι ανατολής και δύσης (t_{sr} και t_{ss}) καθώς και η μέγιστη ισχύς η οποία παράγεται (P_{max}). Εξισώνοντας τη συνολική ηλιακή ενέργεια που παράγεται σε μια ημέρα με την ενέργεια που προκύπτει από την ολοκλήρωση του προφίλ της ισχύος μπορεί να υπολογισθεί η P_{max} .

$$E_{PV,day} = 24 \times (\eta_{PV} \eta_{PV,loss} A_{module} \bar{G}_{day}) = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} P_{PV}(t) dt \quad (6.16)$$

και

$$P_{max} = \frac{2 \times 24 \times (\eta_{PV} \eta_{PV,loss} A_{module} \bar{G}_{day})}{t_{ss} - t_{sr}} \quad (6.17)$$

Η εικόνα 6.3 παρουσιάζει την ίδια κατανομή με την αυτή της παραγόμενης ισχύος ενώ παρουσιάζει και τη σταθερή ζήτηση (P_d) με την οριζόντια γραμμή. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνονται οι περιοχές που αναλύθηκαν περιγραφικά στην παράγραφο 4.1.4 υποθέτοντας τυχαία κατανομή.

Έτσι και σε αυτή την περίπτωση διακρίνονται τρεις περιοχές και αυτές υπολογίζονται με βάσει τις ακόλουθες εξισώσεις:

- Περίσσια ηλιακής ενέργειας:

$$E_{PV,day,x} = \frac{(P_{max} - P_d)^2(t_{ss} - t_{sr})}{2P_{max}} \quad (6.18)$$

- Ηλιακή ενέργεια που δίνεται στη ζήτηση άμεσα:

$$E_{PV,day,d} = E_{PV,day} - E_{PV,day,x} \quad (6.19)$$

- Ενέργεια που δεν ικανοποιείται άμεσα:

$$E_{PV,day,u} = E_{d,day} - E_{PV,day,d} \quad (6.20)$$

- Ζητούμενη ημερήσια ενέργεια

$$E_{d,day} = 24 \times P_d \quad (6.21)$$

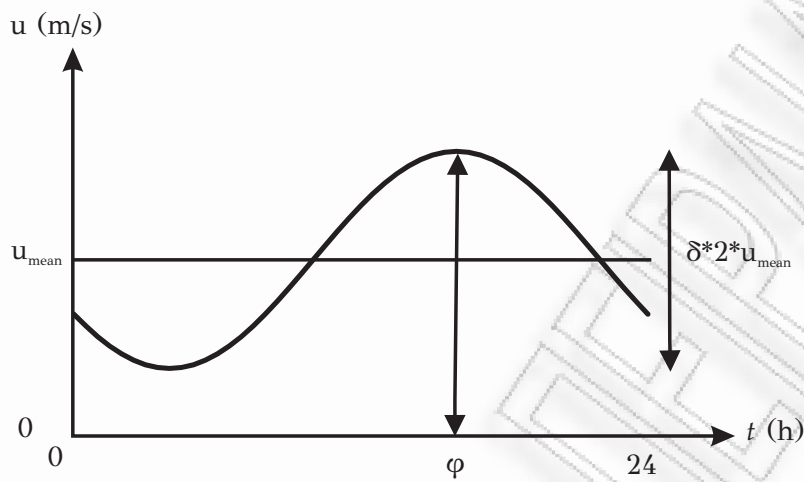
6.4 Κατανομή Αιολικής Ενέργειας

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι στοχαστικό φαινόμενο το οποίο κατά βάση δεν ακολουθεί κάποιο επαναλαμβανόμενο φυσικό νόμο όπως συμβαίνει με τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας όπου η περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο καθορίζει τη διακύμανση της ακτινοβολίας. Η ημερήσια μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου επηρεάζεται από πολλούς παραμέτρους όπως το ανάγλυφο της περιοχής, το υψόμετρο, οι θερμοκρασίες και όλα εκείνα τα στοχαστικά μετεωρολογικά φαινόμενα. Μετά από αναλύσεις σε χρονοσειρές για διάφορες περιοχές προέκυψε πως η ημερήσια κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια συνημιτονοειδή καμπύλη της μορφής:

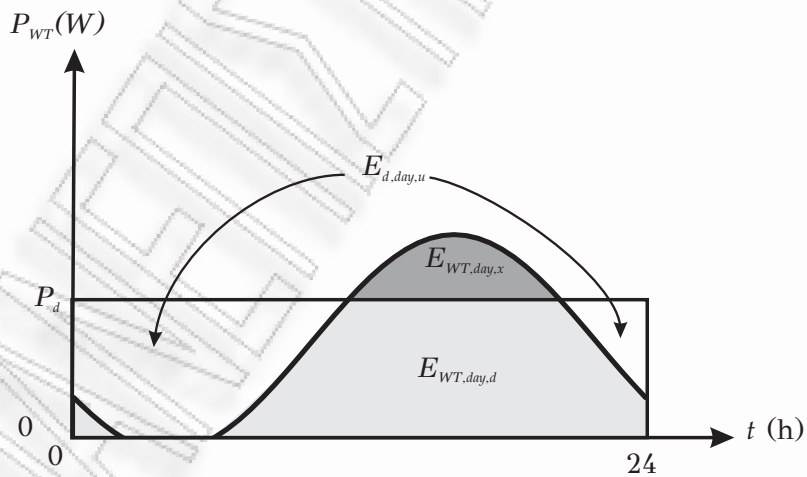
$$u(t) = \bar{u} \left(1 + \delta \cos \left(\frac{2\pi}{24}(t - \phi) \right) \right) \quad (6.22)$$

όπου \bar{u} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου, ϕ είναι η ώρα της ημέρας όπου εμφανίζεται η μέγιστη ταχύτητα ανέμου και δ είναι ο ημερήσιος συντελεστής εύρους ο οποίος καθορίζει το πλάτος της μεταβολής. Το προφίλ, με τα περιγραφόμενα μεγέθη, φαίνεται στην εικόνα 6.4

Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου μετασχηματίζεται σε προφίλ αιολικής ισχύος $P_{WT}(t)$ που παράγεται από το αιολικό σύστημα χρησιμοποιώντας την καμπύλη-εξίσωση ισχύος της ανεμογεννήτριας (Εικόνα 6.1). Το προφίλ της ισχύος παριστάνεται στην εικόνα 6.5. Η οριζόντια γραμμή στην εικόνα αναπαριστά τη διαρκεί ζήτηση της ισχύος (P_d).



Εικόνα 6.4: Μοντέλο για την ταχύτητα του ανέμου στη διάρκεια μια ημέρας



Εικόνα 6.5: Το προφίλ της παραγόμενης ισχύος από το αιολικό σύστημα

Και σε αυτό το γράφημα ορίζονται οι τρεις ενεργειακές ποσότητες που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4.1.4 σε γενική περιγραφική μορφή. Αυτές οι ποσότητες υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

- Περίσσια αιολικής ενέργειας:

$$E_{WT,day,x} = \int_0^{24} \|P_{WT}(t) - P_d, 0\| dt \quad (6.23)$$

όπου ο τελεστής $\|x, y\|$ επιστρέφει το μέγιστο ανάμεσα στο x και το y .

- Αιολική ενέργεια που δίνεται στη ζήτηση άμεσα:

$$E_{WT,day,d} = E_{WT,day} - E_{WT,day,x} \quad (6.24)$$

- Ενέργεια που δεν ικανοποιείται άμεσα:

$$E_{WT,day,u} = E_{d,day} - E_{WT,day,d} \quad (6.25)$$

- Η ζητούμενη ημερήσια $E_{d,day}$ ενέργεια δίνεται από την εξίσωση 6.21

6.5 Κατανομή Ισχύος Υβριδικού Συστήματος

Το ημερήσιο προφίλ της παραγόμενης ισχύος προκύπτει από την άθροιση των δύο προφίλ των κατανομών ισχύος για φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα όπως αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 6.3 και 6.5. Ένα γενικό προφίλ που μπορεί να προκύψει από μια άθροιση μαζί με τα χαρακτηριστικά ενεργειακά μεγέθη φαίνονται στην εικόνα 6.6. Οι χαρακτηριστικές περιοχές που περιγράφονται στο σχήμα έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 4.1.4 ενώ οι εξισώσεις περιγράφονται παρακάτω.

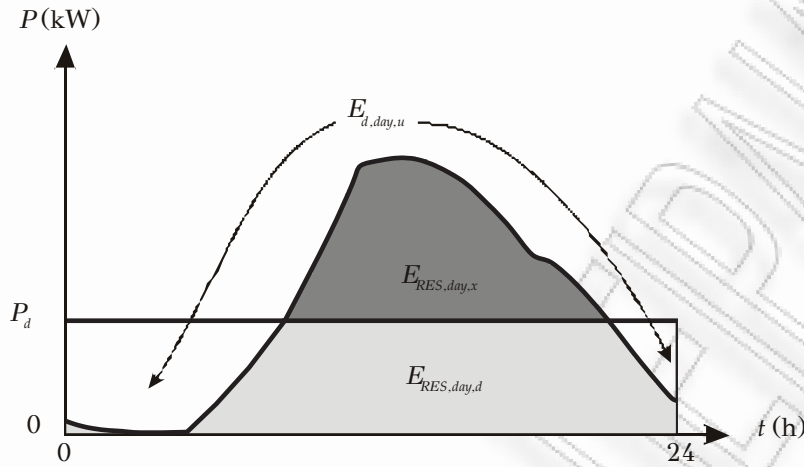
- Η συνολική ισχύς από ΑΠΕ κάθε στιγμή είναι:

$$P_{RES}(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) \quad (6.26)$$

- Η συνολική ημερήσια περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ είναι:

$$E_{RES,day,x} = \int_0^{24} \|P_{RES}(t) - P_d, 0\| dt \quad (6.27)$$

όπου ο τελεστής $\|x, y\|$ επιστρέφει το μέγιστο ανάμεσα στο x και το y .



Εικόνα 6.6: Το προφίλ της παραγόμενης ισχύος από το συνολικό σύστημα των μονάδων ΑΠΕ

- Η ενέργεια από ΑΠΕ που δίνεται στη ζήτηση άμεσα:

$$E_{RES,day,d} = E_{RES,day} - E_{RES,day,x} \quad (6.28)$$

- Ενέργεια που δεν ικανοποιείται άμεσα:

$$E_{RES,day,u} = E_{d,day} - E_{RES,day,d} \quad (6.29)$$

- Η ζητούμενη ημερήσια $E_{d,day}$ ενέργεια δίνεται από την εξίσωση 6.21

6.6 Σύστημα Μπαταρίας

Η ενέργεια που αποδίδει η μπαταρία E_{BS} σε κάθε αποφόρτιση της δίνεται από τον τύπο [17]:

$$E_{BS} = \frac{N_{BA} \eta_{BS} C_{BA} V_{BA} DoD_{allowed}}{1000} \quad (6.30)$$

όπου N_{BA} είναι ο αριθμός των συστοιχιών μπαταρίας συνδεδεμένες παράλληλα, η_{BS} είναι ο βαθμός απόδοσης αποφόρτισης (συμπεριλαμβανομένων απωλειών σε καλώδια, διόδους κτλ), C_{BA} είναι η χωρητικότητα μιας μπαταρίας (σε Ah) και τέλος $DoD_{allowed}$ είναι το επιτρεπόμενο βάθος αποφόρτισης της μπαταρίας.

Ο αριθμός των μπαταριών που χρειάζονται για τη συστοιχία έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες βρίσκεται από την εξίσωση:

$$N_{BA} = \left\lceil \frac{1000 \times E_{BS}}{\eta_{BS} C_{BA} V_{BA} DoD_{allowed}} \right\rceil \quad (6.31)$$

6.7 Συμβατικό Σύστημα Diesel

Η ετήσια κατανάλωση καυσίμου του συμβατικού συστήματος Diesel θα υπολογισθεί με βάση ένα τυπικό βαθμό απόδοσης η_{dsl} από τη σχέση:

$$FuelConsumption = \frac{ConvEnergy}{\eta_{dsl} * Hu} \quad (6.32)$$

όπου $EnergyConsumption$ είναι η ζήτηση ενέργειας από συμβατικά συστήματα όπως προέκυψε από τον αλγόριθμο υπολογισμού της εικόνας 4.6 και από την εξίσωση 4.6 ενώ Hu είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου. Αυτή η σχέση είναι μια απλοποίηση της γενικής καμπύλης απόδοσης της παραγράφου 3.1.3.

6.8 Μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης

Η μονάδα της αντίστροφης όσμωσης μοντελοποιείται ως ένα σταθερό φορτίο P_{ro} με τιμή:

$$P_{ro} = \dot{Q} \cdot Sp \quad (6.33)$$

όπου:

\dot{Q} είναι η παροχή του αφαλατωμένου νερού σε m^3/hr και

Sp είναι η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε kWh/m^3

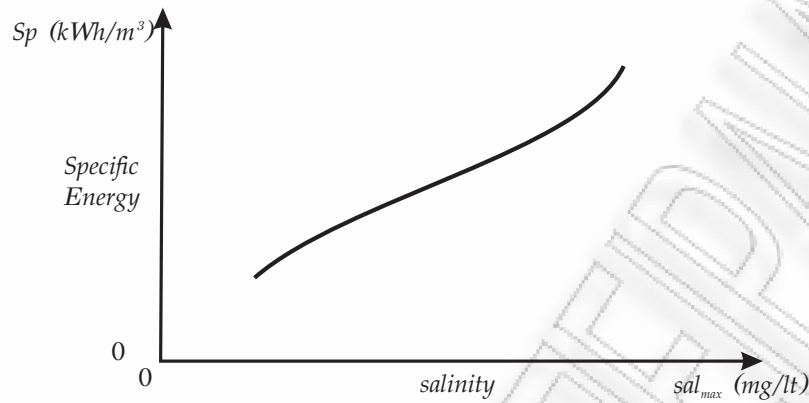
Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας Sp δίνεται από τους κατασκευαστές των μονάδων αφαλάτωσης, για μια υφιστάμενη μονάδα, σε μορφή καμπύλης που συσχετίζει την ειδική κατανάλωση με την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας και έχει την γενική μορφή της εικόνας 6.7. Η αλατότητα αναφέρεται στο σύνολο των συνολικά διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids). Η κατανάλωση ενέργειας στη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης αφορά αποκλειστικά τις αντλίες.

6.9 Οικονομικά Μοντέλα

Το κόστος του έργου, γενικά, μπορεί να επιμεριστεί σε κόστος για τη μονάδα αντίστροφης όσμωσης TC_{ro} νερού και για τη μονάδα παραγωγής ενέργειας TC_{en} . Για την κάθε συνιστώσα το συνολικό κόστος (για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου) είναι το κόστος εγκατάστασης (IC), το ετήσιο κόστος λειτουργίας (OC) και το κόστος των αναλωσίμων και ανταλλακτικών (MC).

6.9.1 Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας

Για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης της μονάδας παραγωγής ενέργειας (Εξίσωση 6.34), χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις που δίνουν



Εικόνα 6.7: Η κατανάλωση ενέργειας μονάδας αφαλάτωσης σε σχέση με την αλατότητα

το κόστος ως συνάρτηση του μεγέθους του κάθε συστήματος (εγκατεστημένη ισχύ ή μέγεθος μπαταρίας). Οι εξισώσεις αυτές έχουν προκύψει μετά από ανάλυση της αγοράς και είναι παρμένες από το παράρτημα Α του [27], από το [28] και από προσωπική έρευνα.

- **Κόστος Εγκατάστασης Ενεργειακής Μονάδας**

$$IC_{en} = IC_{WT} + IC_{PV} + IC_{dsl} + IC_{BT} \quad (6.34)$$

– Για ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος N_o (σε kW) το κόστος αγοράς IC_{WT} είναι:

$$IC_{WT} = 8347 N_o^{-0.314} \times N_o \quad (6.35)$$

– Για συστοιχίες φωτοβολταϊκών ονομαστικής ισχύος N_{PV} (σε kWp) το κόστος αγοράς IC_{PV} είναι:

$$IC_{PV} = N_{PV} 6.186 N_{PV}^{-0.314} \quad (6.36)$$

– Για συμβατικά συστήματα Diesel ονομαστικής ισχύος N_d (σε kW) το κόστος αγοράς IC_d είναι:

$$IC_{dsl} = \phi N_d \quad (6.37)$$

όπου $\phi = 150 - 200 \text{€}/kW$

– Για συστοιχίες μπαταριών τάσης $48V$ και ονομαστικής χωρητικότητας Q_{max} το κόστος αγοράς IC_{BT} είναι:

$$IC_{BT} = 2\xi Q_{max} \quad (6.38)$$

όπου:

$$\xi = 7.2 \text{€}/Ah$$

Στη προσέγγιση που γίνεται από αυτή την εργασία, μπορεί να θεωρηθεί ως ετήσιο κόστος λειτουργίας για τη μονάδα παραγωγής ενέργειας μόνο το ετήσιο κόστος του καυσίμου και ως κόστος αναλωσίμων και ανταλλακτικών το κόστος αντικατάστασης των μπαταριών.

- **Ετήσιο Κόστος Καυσίμου**

$$OC_{en} = FuelPrice \times FuelConsumption \quad (6.39)$$

όπου:

$FuelPrice$ είναι η τιμή του καυσίμου σε €/lt

$FuelConsumption$ είναι η ετήσια κατανάλωση του καυσίμου σε lt

- **Κόστος Αντικατάστασης Μπαταριών**

$$MC_{en} = IC_{BT} \times \left(\left[\frac{BatLife}{Duration} \right] - 1 \right) \quad (6.40)$$

όπου:

$BatLife$ είναι η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε έτη

$Duration$ είναι η διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

Άρα το συνολικό κόστος της ενεργειακής μονάδας στη διάρκεια ζωής του έργου είναι:

$$TC_{en} = IC_{en} + MC_{en} + OC_{en} \times Duration \quad (6.41)$$

6.9.2 Μονάδα Αντίστροφης Όσμωσης

Στα πλαίσια της εργασίας, το συνολικό κόστος της αφαλάτωσης στη διάρκεια ζωής του έργου δεν θα μελετηθεί εκτενώς αφού σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται η μονάδα αφαλάτωσης καθώς και η παραγωγή του νερού είναι η ίδια. Έτσι, με την ίδια λογική όπως με την ενεργειακή μονάδα:

- **Κόστος Εγκατάστασης Μονάδας Αφαλάτωσης**

$$IC_{ro} \quad (6.42)$$

Δίνεται από τον κατασκευαστή

Το κόστος λειτουργίας είναι το κόστος των χημικών για την προεπεξεργασία και μετεπεξεργασία του νερού ενώ ως κόστος συντήρησης και λειτουργίας λαμβάνεται το κόστος αντικατάστασης των μεμβρανών.

- **Ετήσιο Κόστος Επεξεργασίας Νερού**

$$OC_{ro} = Q_{year} \times Chem \quad (6.43)$$

όπου Q_{year} είναι η παραγόμενη ποσότητα νερού σε ένα έτος και $Chem$ το κόστος των χημικών σε €/m³ παραγόμενου νερού

- **Κόστος Μεμβρανών**

$$MC_{ro} = member \times IC_{ro} \quad (6.44)$$

όπου *member* είναι το ποσοστό του κόστους των μεμβρανών ως προς το κόστος εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη τιμή δίνεται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προκαταρκτικές εκτιμήσεις κόστους ([11], [29]).

Άρα το συνολικό κόστος της μονάδας αφαλάτωσης στη διάρκεια ζωής του έργου είναι:

$$TC_{ro} = IC_{ro} + MC_{ro} + OC_{ro} \times Duration \quad (6.45)$$

6.9.3 Συνολικό Κόστος Νερού

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση το συνολικό κόστος του έργου για όλη τη διάρκεια ζωής του είναι:

$$TC = TC_{ro} + TC_{en} \quad (6.46)$$

Στην παραπάνω εξίσωση δεν έχουν ληφθεί υπόψη επιτόκιο αποπληρωμής, η αξία του χρήματος καθώς και διακύμανση κόστους καυσίμων και αναλωσίμων στο πέρασμα του χρόνου. Ο ακριβής υπολογισμός του κόστους του έργου είναι εκτός των στόχων της εργασίας καθώς σε αυτή τη μελέτη ενδιαφέρει η σχετική επίδοση της μιας εναλλακτικής ως προς την άλλη. Έτσι το (σταθμισμένο) κόστος του νερού εκτιμάται από την επόμενη σχέση:

$$LWC = \frac{TC}{Q_{year} \times Duration} \quad (6.47)$$

Βιβλιογραφία

- [1] United Nations *The Millennium Development Goals Report*, 2010
- [2] Ζερβός Α. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, 2008
- [3] Καλδέλης, Ι.Κ. *Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας*, Σταμούλης, 1999
- [4] REN21 *Renewables Global Status Report*, 2009
- [5] Markvart T. *Solar Electricity*, Second Edition, John Wiley & Sons, 2000
- [6] Cipollina A., Micale G., Rizzuti L. *Seawater Desalination - Conventional and Renewable Energy Processes*, Springer, 2009
- [7] Wangnick K. *2000 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*, International Desalination Association, Report No. 16, May 2000
- [8] *Desalination Powered by Renewable Energy*, Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination. PRODES, 2010
- [9] Kucera J. *Reverse Osmosis - Industrial Applications and Processes*, Wiley - Scrivener, 2010
- [10] Moch I. *The case for and feasibility of very high recovery sea water reverse osmosis plants*, In Preprints of ADA Conference, Lake Tahoe, USA, 2000
- [11] H. Cooley, P. H. Gleick, Gary Wolff *Desalination, With A Salt of Grain - A California Perspective*, Pacific Institute, 2006
- [12] D. Assimacopoulos, *Water water everywhere... : Desalination powered by renewable energy sources*, Refocus Vol. 2, Issue 6, pp. 38-40, 2001
- [13] Rizzuti L., Ettouney H., Cipollina A. *Solar Desalination for the 21st Century - A Review of Modern Technologies and Researches on Desalination Coupled to Renewable Energies*, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Springer, 2006
- [14] Riso DTU National Laboratory *European Wind Atlas*

- [15] Lattemann S., Hopner T. *Environmental Impact and Impact Assessment of Seawater Desalination*, Desalination. Vol.220, pp.1-15, 2008
- [16] www.adira.gr
- [17] Patel M. *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999
- [18] Elhadidy M.A. and Shaahid S.M. *Optimal Sizing of battery storage for hybrid (wind+diesel) power systems*, Renewable Energy. Vol.18 pp.77-86, 1998
- [19] Elhadidy M.A. and Shaahid S.M. *Parametric study of hybrid (wind + solar + diesel) power generating systems*, Renewable Energy. Vol.21 pp.129-139, 2000
- [20] Celik A.N. *A simplified model for estimating yearly wind fraction in hybrid-wind energy systems*, Renewable Energy. Vol.31 pp.105-118, 2006
- [21] Kartalidis A., Arampatzis G., Assimacopoulos D. *Rapid Sizing of Renewable Energy Power Components in Hybrid Power Plants for Reverse Osmosis Desalination Process*, iEMSs 2008: International Congress on Environmental Modelling and Software, Main Proceedings, pp. 1264-1271
- [22] Elliott D.L., Holladay C.G., Barchet W.R., Foote H.P., Sandusky W.F. *Wind Energy Resource Atlas of the United States*, U.S. Department of Energy. October 1986
- [23] www.retscreen.net
- [24] www.meteonorm.com
- [25] Pallabazzer R. *Previsional estimation of the energy output of wind generators*, Renewable Energy. Vol.29 pp.413-420, 2004
- [26] Koroneos C., Dompros A., and Roubas R. *Renewable energy driven desalination systems modelling*, Journal of Cleaner Production. Vol.15 pp.449-464, 2007
- [27] Kaldellis J.K., Kavadias K.A. *Cost-benefit analysis of remote hybrid wind-diesel power stations: Case study Aegean Sea islands*, Energy Policy Vol.35 pp.1525-1538, 2007
- [28] Kaldellis J.K., Zafirakis D., Kondili E. *Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous small islands*, Electrical Power and Energy Systems Vol.32 pp.24-36, 2010
- [29] RosTek Associates, Inc. *Desalting Handbook for Planners*, Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 72., 2003

- [30] Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney *Fundamentals of Salt Water Desalination*, Elsevier, 2002
- [31] Ackermann T. *Wind Power in Power Systems*, Wiley, 2005