



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

**Πλήρης αντικατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων  
ηλεκτροπαραγωγής της Αμοργού με εγκαταστάσεις  
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΔΥΛΗΣ**

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

Ανέστης Αναστασιάδης  
Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013





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

**Πλήρης αντικατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων  
ηλεκτροπαραγωγής της Αμοργού με εγκαταστάσεις  
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΔΥΛΗΣ**

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεωργιλάκης Παύλος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

.....  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΔΥΛΗΣ

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

Copyright © Γεώργιος Π. Κονδύλης 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

**Αφιερωμένο στον Παππού μου Δημήτριο  
(Μήτρο) Κοκκινιά και στον Πατέρα μου  
Παναγιώτη Κονδύλη, για όλη την αγάπη και την  
υποστήριξή τους**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012 - 2013 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι πλήρης αντικατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής της Αμοργού με εγκαταστάσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Ανέστη Αναστασιάδη, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΟΝΔΥΛΗΣ





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Όπως δείχνουν πολυάριθμες έρευνες, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα είναι ήδη πάρα πολύ υψηλές, και αναμένεται να αυξηθούν ακόμα περισσότερο τα επόμενα χρόνια. Έτσι, ο πλανήτης δεν μπορεί να απορροφήσει όλη αυτή τη ρύπανση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μέση θερμοκρασία, με όλες τις δυσμενείς επιπτώσεις που προκαλεί αυτό. Η ηλεκτροπαραγωγή έχει μεγάλο μερίδιο ευθύνης για την υπερβολική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Είναι, λοιπόν, αναγκαίο να προσπαθήσουμε να υποκαταστήσουμε τις ρυπογόνες μονάδες που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα με μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ώστε να μετριάσουμε την κλιματική αλλαγή. Ιδανικό μέρος για να δοκιμασθεί μία τέτοια μετάβαση είναι τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα των Ελληνικών νησιών. Η εργασία αυτή μελετά την πλήρη υποκατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Για να επιτευχθεί μία αξιόπιστη ενεργειακή μελέτη σε ένα σύστημα όπου η ηλεκτροπαραγωγή βασίζεται αποκλειστικά σε μονάδες ΑΠΕ, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ωριαίων χρονοσειρών για την ταχύτητα του ανέμου καθώς και για την ηλιακή ακτινοβολία στο νησί. Δυστυχώς, τέτοια δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα. Συνεπώς, είναι αναγκαία η παραγωγή συνθετικών ωριαίων χρονοσειρών, μέσω στοχαστικών μεθόδων, από τα λιγοστά δεδομένα που υπάρχουν για την Αμοργό.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία ενεργειακή μελέτη όπου αναλύονται τα χαρακτηριστικά του φορτίου του νησιού καθώς και η υπάρχουσα δομή της ηλεκτροπαραγωγής, όπου διαπιστώνεται πως σήμερα η ηλεκτρική ενέργεια στην Αμοργό είναι πολύ ακριβή και ρυπογόνος. Έπειτα, παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές για την πλήρη υποκατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων από μονάδες ΑΠΕ: Μία υβριδική περίπτωση φωτοβολταϊκών-αιολικών-αποθήκευσης χωρίς τη χρήση βιομάζας και μία άλλη υβριδική περίπτωση φωτοβολταϊκών-αιολικών-αποθήκευσης με χρήση βιομάζας. Οι δύο αυτές εναλλακτικές συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς το κόστος της ενέργειας και ως προς άλλες παραμέτρους και σχολιάζεται η συμμετοχή της βιομάζας στην ηλεκτροπαραγωγή.

Τέλος, πραγματοποιείται μια μελέτη πραγματοποίησης-εγκατάστασης ενός υβριδικού συστήματος αιολικού πάρκου-αποθήκευσης το οποίο αναλαμβάνει από μόνο του να τροφοδοτήσει το σύνολο του φορτίου της Αμοργού. Απαντώνται θεμελιώδεις ερωτήσεις που αφορούν τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας καθώς και την ποιότητα της ισχύος στο φορτίο. Εξηγείται αν είναι δυνατή η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σήμερα, καθώς και το πόσο κοντά είμαστε στην πλήρη ηλεκτροδότηση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

**ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), Διεσπαρμένη Παραγωγή (Δ.Π.), Ανεμογεννήτριες (Α/Γ), Φωτοβολταϊκά (ΦΒ), Βιομάζα, Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, Ηλεκτρονικά ισχύος, Ανακατασκευή χρονοσειρών, Homer, Έλεγχος τάσης και συχνότητας, Ποιότητα ισχύος, Matlab/Simulink



## ABSTRACT

---

As proved by numerous studies, greenhouse gas emissions are already dangerously high and are expected to rise even more in the next few years. Consequently, our planet would not be able to absorb this pollution, which is likely to worsen global warming, with all the negative implications that will follow. Unfortunately, electricity generation has the lion share in the excessive emission of air pollutants. Thus, it is necessary to try to substitute the units that depend on fossil fuels with units that operate with renewable energy sources. Ideal places for trying this transition are the autonomous island systems of the Aegean Islands. This study aims to the complete substitution of diesel generators in Amorgos island, with renewable energy sources.

In order to achieve a reliable energy study in a system where the electricity production depends only on renewable energy sources, it is necessary to obtain hourly time-series for wind speed and solar radiation. Unfortunately, such data are not available for Amorgos island. As a consequence, it is necessary to generate synthetic time series through stochastic methods from the poor data available for the island.

Then, a pre-feasibility energy study is conducted where load characteristics and current coverage are analyzed. Then, two alternatives for the complete substitution of diesel units from renewable energy sources are presented: One hybrid PV-Wind-Storage case without the use of biomass and one other hybrid PV-Wind-Storage case which includes biomass. The two alternatives are compared between them regarding the cost of energy and the participation of biomass in the electricity generation is commented. Then, the new, renewable, system is compared with the current one in the fields of energy cost and emissions.

Finally, a feasibility study of a hybrid wind-storage system which would cover the whole load by itself is conducted. Several fundamental questions are answered, regarding voltage and frequency control as well as load's power quality. Then, it is explained whether the installation of such a system today is feasible or how close we are regarding electricity generation only from renewable sources.

**KEY-WORDS:** Renewable Energy Sources (R.E.S.), Dispersed Generation (D.G.), Wind generators, Photovoltaics (PV), Biomass, Electricity storage, Power electronics, Time-series reconstruction, Homer, Voltage and Frequency control, Power quality, Matlab/Simulink



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	- 31 -
1.1 Η Αναγκαιότητα της στροφής προς τις ΑΠΕ .....	- 31 -
1.2 Χρήση των τεχνολογιών ΔΠ για την ανακούφιση από τα περιβαλλοντικά προβλήματα.....	- 33 -
1.3 Η μετάβαση προς τις ΑΠΕ μπορεί να είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι αναμενόταν.....	- 34 -
1.4 Μικροδίκτυα .....	- 35 -

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	- 37 -
2.1 Εισαγωγή .....	- 37 -
2.2 Χαρακτηριστικά του ανέμου .....	- 37 -
2.2.1 Ταχύτητα ανέμου .....	- 37 -
2.2.2 Τύρβη ανέμου .....	- 39 -
2.3 Προσομοίωση χρονοσειρών ανέμου .....	- 41 -
2.4 Α/Γ με πλήρη μετατροπέα .....	- 43 -
2.4.1 Περιγραφή συστήματος Α/Γ .....	- 43 -
2.4.2 Αεροδυναμικό μέρος .....	- 44 -
2.4.3 Ρυθμιστής γωνίας βήματος πτερυγίων (Pitch Control).....	- 46 -
2.4.4 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας Α/Γ .....	- 46 -
2.4.5 Ανορθωτής διόδων .....	- 46 -
2.4.6 Αναστροφέας PWM .....	- 46 -

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	- 47 -
3.1 Ο Ήλιος.....	- 47 -
3.2 Γεωμετρία ήλιου-γης .....	- 48 -
3.3 Η θέση του ήλιου ως προς ένα σημείο πάνω στη γη .....	- 49 -
3.3.1 Ηλιακή απόκλιση, $\delta$ .....	- 49 -
3.3.2 Η ηλιακή ώρα.....	- 50 -
3.3.3 Η ωριαία γωνία $\omega$ .....	- 52 -
3.3.4 Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου .....	- 53 -
3.4 Η ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας .....	- 54 -
3.5 Η επίδραση της ατμόσφαιρας .....	- 55 -
3.6 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.....	- 56 -
3.7 Το μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-Klein-Duffie .....	- 56 -
3.8 Υπολογισμός της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο .....	- 60 -
3.9 Η γωνία πρόσπτωσης σε κεκλιμένο επίπεδο .....	- 62 -
3.10 Μία μέθοδος για την παραγωγή συνθετικών ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας οπουδήποτε στον πλανήτη.....	- 63 -
3.10.1 Εισαγωγή .....	- 63 -

3.10.1.1 Παλαιότερες εργασίες .....	- 64 -
3.10.1.2 Διαφορετικά πιθανολογικά χαρακτηριστικά του ωριαίου δείκτη αιθριότητας .....	- 65 -
3.10.2 Επιμερισμός του $K_t$ : Μέση και τυχαία συνιστώσα .....	- 66 -
3.10.3 Κατασκευή μοντέλου για τη μέση συνιστώσα .....	- 67 -
3.10.3.1 Εκτίμηση παραμέτρων .....	- 68 -
3.10.4 Κατασκευή μοντέλου για την τυχαία συνιστώσα .....	- 69 -
3.10.4.1 Επίδραση του $K_t$ .....	- 70 -
3.10.4.2 Επίδραση της αέριας μάζας .....	- 73 -
3.10.4.3 Η μη συσχετιζόμενη τυχαία συνιστώσα .....	- 73 -
3.10.5 Σύνοψη: Παράγοντας συνθετική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία .....	- 77 -
3.10.6 Επίλογος .....	- 78 -
3.11 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια .....	- 78 -
3.11.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου .....	- 79 -
3.11.2 Η καμπύλη I-V .....	- 80 -
3.11.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου .....	- 81 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΒΙΟΜΑΖΑ .....	- 83 -
4.1 Εισαγωγή.....	- 83 -
4.2 Αναερόβια χώνευση .....	- 85 -
4.3 Βιοαέριο .....	- 87 -
4.4 Διαθεσιμότητα και είδη βιομάζας στο νησί της Αμοργού .....	- 88 -
4.5 Επεξεργασία των δεδομένων για είσοδο στο λογισμικό Homer .....	- 95 -
4.6 Κόστος μεταφοράς της βιομάζας .....	- 96 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	- 97 -
5.1 Εισαγωγή.....	- 97 -
5.2 Σφόνδυλοι .....	- 97 -
5.3 Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση (ΥΜΑ) .....	- 99 -
5.4 Αποθήκευση με Συμπιεσμένο Αέρα (ΑΣΑ) .....	- 99 -
5.5 Αντλησιοταμίευση .....	- 100 -
5.6 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (Battery Energy Storage Systems) .....	- 100 -
5.6.1 Τεχνολογία μολύβδου-οξέος (Lead Acid) .....	- 102 -
5.6.2 Τεχνολογία νικελίου-καδμίου (NiCd) .....	- 103 -
5.6.3 Τεχνολογία θειούχου νατρίου (NaS) .....	- 103 -
5.6.4 Τεχνολογία ιόντων λιθίου (Li ion) .....	- 104 -
5.6.5 Τεχνολογία λιθίου-πολυμερούς (Li-Polymer) .....	- 104 -
5.6.6 Τεχνολογία συσσωρευτών ροής (flow batteries) .....	- 105 -
5.7 Σύνοψη εφαρμογών και χαρακτηριστικών των αποθηκευτικών διατάξεων.....	- 107 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	- 109 -
6.1 Γενικά περί σύγχρονων μηχανών.....	- 109 -
6.2 Μετασχηματισμός Park .....	- 110 -
6.3 Ανά μονάδα σύστημα .....	- 114 -
6.4 Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς .....	- 115 -
6.5 Εξισώσεις σύγχρονης μηχανής .....	- 117 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ .....	- 119 -
7.1 Τριφασική ανόρθωση πλήρους γέφυρας .....	- 119 -
7.2 Αναστροφέας .....	- 121 -
7.2.1 Εισαγωγή .....	- 121 -
7.2.2 Τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών .....	- 125 -
7.2.3 Μονοφασικός αναστροφέας ελεγχόμενος με SPWM .....	- 126 -
7.2.4 Τριφασικός αναστροφέας ελεγχόμενος με SPWM .....	- 130 -
7.3 Φίλτρα εισόδου-εξόδου αναστροφέα τύπου LC .....	- 133 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΗΣ ΑΜΟΡΓΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΕ .....	- 137 -
8.1 Εισαγωγή .....	- 137 -
8.2 Αυτόνομος σταθμός παραγωγής .....	- 137 -
8.3 Δεδομένα για το φορτίο .....	- 138 -
8.4 Αιολικό δυναμικό .....	- 141 -
8.5 Ηλιακό δυναμικό .....	- 143 -
8.6 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας .....	- 144 -
8.7 Ο μετατροπέας AC-DC-AC .....	- 145 -
8.8 Προσομοίωση υπάρχοντος συστήματος .....	- 145 -
8.8.1 Εισαγωγή .....	- 145 -
8.8.2 Οικονομική ανάλυση .....	- 147 -
8.8.3 Ηλεκτρική ανάλυση .....	- 147 -
8.9 Σενάριο 1 : Αντικατάσταση όλων των πετρελαϊκών μονάδων με μονάδες ΑΠΕ (χωρίς βιομάζα).....	- 151 -
8.9.1 Εισαγωγή .....	- 151 -
8.9.2 Οικονομική ανάλυση .....	- 152 -
8.9.3 Ηλεκτρική ανάλυση .....	- 153 -
8.10 Σενάριο 2 : Αντικατάσταση όλων των πετρελαϊκών μονάδων με μονάδες ΑΠΕ (με βιομάζα).....	- 160 -
8.10.1 Εισαγωγή .....	- 160 -
8.10.2 Οικονομική ανάλυση .....	- 161 -
8.10.3 Ηλεκτρική ανάλυση .....	- 161 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΘΑ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΗΣΕΙ ΠΛΗΡΩΣ ΤΙΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΤΗΣ ΑΜΟΡΓΟΥ .....	- 171 -
9.1 Εισαγωγή .....	- 171 -
9.2 Τμήματα του μοντέλου .....	- 172 -
9.3 Λειτουργία του συστήματος .....	- 175 -

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	- 181 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	- 185 -



## ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

---

Σχήμα 1.1 Ιστορική και προβλεπόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση για καύσιμα .....	-31 -
Σχήμα 2.1 Τυπική μεταβολή των στιγμιαίων και μέσων τιμών ταχύτητας ανέμου	- 38 -
Σχήμα 2.2 Χρονοσειρά Ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec .....	- 40 -
Σχήμα 2.3 Τυπική μορφή μεταβολής της ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του ύψους .....	- 41 -
Σχήμα 2.4 Διάταξη της ανεμογεννήτριας .....	- 44 -
Σχήμα 2.5 Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος $C_p$ -ταχύτητας ακροπτερυγίου $\lambda$ για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος $\beta$ . .....	- 45 -
Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική ελέγχου της γωνίας βήματος.....	- 46 -
Σχήμα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της δομής και της ατμόσφαιρας του ήλιου .....	- 48 -
Σχήμα 3.2 Η εκλειπτική τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.....	- 49 -
Σχήμα 3.3 Το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων για παρατηρητή που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της γης και ατενίζει το νότο .....	- 50 -
Σχήμα 3.4 Η μεταβολή του ηλιακού ύψους ( $\beta$ ) και της αζιμουθιακής γωνίας ως προς το νότο κατά τη διάρκεια των ηλιοστασίων και ισημεριών στην περιοχή των Αθηνών .....	- 54 -
Σχήμα 3.5 Ετήσια απόκλιση της ακτινοβολίας στο διάστημα $G_{EXTRA\ TERRESTRIAL}$ πάνω από την ατμόσφαιρα της γης.....	- 55 -
Σχήμα 3.6 Η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της γης .....	- 56 -
Σχήμα 3.7 Η γωνία του ουρανού που φαίνεται από τη δεύτερη εξ αριστερών συστοιχία, η οποία «βλέπει» τη διάχυτη ακτινοβολία μόνο στη λευκή περιοχή.....	- 60 -
Σχήμα 3.8 Οι συνιστώσες της άμεσης ηλιακής δέσμης, $G_{BEAM}$ , για διαφορετικά επίπεδα πρόσπτωσης.....	- 61 -
Σχήμα 3.9 Ορισμός των γωνιών του συλλέκτη .....	- 63 -
Σχήμα 3.10 Προβλεπόμενη και πειραματική τυπική απόκλιση των ωριαίων $K_t$ για το μεταβαλλόμενο δείκτη αιθριότητας $K_t$ .....	- 71 -
Σχήμα 3.11 Προβλεπόμενη και πειραματική σειριακή συσχέτιση μεταξύ ωριαίου $k_t$ χωριζόμενου από μία ώρα σε σχέση με το $K_t$ .....	- 72 -

Σχήμα 3.12 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του $k_t$ μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \approx 0,22$ ) .....	- 74 -
Σχήμα 3.13 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του $k_t$ μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \approx 0,40$ ) .....	- 75 -
Σχήμα 3.14 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του $k_t$ μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \approx 0,74$ ) .....	- 75 -
Σχήμα 3.15 Το διάγραμμα δυναμικής ενέργειας ηλεκτρονίων-απόστασης για μία φωτιζόμενη δίοδο p-n στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.....	- 79 -
Σχήμα 3.16 Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης μη-ιδανικής διόδου p-n που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ..	- 80 -
Σχήμα 3.17 Στη μόνιμη κατάσταση ενός ΦΒ στοιχείου για δεδομένες συνθήκες φωτισμού, η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης παρέχει το σημείο λειτουργίας $I_{MAX}$ , $V_{MAX}$ στο οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται .....	- 80 -
Σχήμα 4.1 Πηγές βιομάζας .....	- 84 -
Σχήμα 4.2 Παραγωγή αερίου από αναερόβια χώνευση βιομάζας .....	- 85 -
Σχήμα 5.1 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε σφόνδυλο .....	- 97 -
Σχήμα 5.2 Δομή ενός συσσωρευτή μολύβδου οξέος.....	- 101 -
Σχήμα 5.3 Συσσωρευτής μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενος από βαλβίδα .....	- 102 -
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε συσσωρευτές ροής .....	- 105 -
Σχήμα 6.1 Παράσταση σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους.....	- 109 -
Σχήμα 6.2 Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής .....	- 110 -
Σχήμα 6.3 Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό Park.....	- 112 -
Σχήμα 6.4 Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης μηχανής .	- 116 -
Σχήμα 7.1 Τριφασική ανόρθωση γέφυρας.....	- 119 -
Σχήμα 7.2 Τυπική συνδεσμολογία τριφασικού αναστροφέα γέφυρας .....	- 121 -
Σχήμα 7.3 Τριφασικές κυματομορφές τάσης.....	- 122 -
Σχήμα 7.4 Ισοδύναμο μοντέλο ιδανικού τριφασικού αναστροφέα στον οποίο φαίνονται οι μετρούμενες τάσεις.....	- 123 -
Σχήμα 7.5 Αρχή διαμόρφωσης PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου .....	- 125 -
Σχήμα 7.6 Απεικόνιση της τεχνικής SPWM για $M_f=0,7$ και για $F_{nc}=7$ .....	- 127 -

Σχήμα 7.7 Μονοφασικός αναστροφέας πλήρους γέφυρας με το κύκλωμα οδήγησης στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM.....	- 128 -
Σχήμα 7.8 Τεχνική SPWM για τριφασικούς αναστροφείς .....	- 131 -
Σχήμα 7.9 Κυματομορφές στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης .....	- 132 -
Σχήμα 7.10 Χαρακτηριστική μεταφοράς SPWM υπερδιαμόρφωσης .....	- 133 -
Σχήμα 7.11 Βαθυπερατό φίλτρο .....	- 134 -
Σχήμα 7.12 Βαθυπερατό φίλτρο εξόδου LC.....	- 135 -
Σχήμα 7.13 Κανονικοποιημένη κυμάτωση της φασικής τάσης εξόδου εν συναρτήσει του λόγου συχνότητας φορές προς τη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου εξόδου, για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης.....	- 136 -
Σχήμα 8.1 Ο χάρτης του νησιού της Αμοργού .....	- 137 -
Σχήμα 8.2 Καμπύλη φορτίου της Αμοργού για το έτος 2006 .....	- 138 -
Σχήμα 8.3 Καμπύλη διάρκειας φορτίου της Αμοργού για το έτος 2006 .....	- 139 -
Σχήμα 8.4 Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές φορτίου ανά μήνα για το έτος αναφοράς.....	- 139 -
Σχήμα 8.5 Καμπύλη φορτίου από 10 έως 16 Ιανουαρίου.....	- 140 -
Σχήμα 8.6 Καμπύλη φορτίου από 10 έως 16 Ιουλίου.....	- 140 -
Σχήμα 8.7 Χάρτης Αιολικού Δυναμικού Αμοργού .....	- 141 -
Σχήμα 8.8 Μέση τιμή και μέγιστες τιμές ανέμου για κάθε μήνα του έτους.....	- 142 -
Σχήμα 8.9 Σ.Π.Π. της ταχύτητας του ανέμου .....	- 142 -
Σχήμα 8.10 Καμπύλη ισχύος Vestas V82.....	- 143 -
Σχήμα 8.11 Μέση τιμή ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε kWh/m <sup>2</sup> /ημέρα για κάθε μήνα του έτους.....	- 144 -
Σχήμα 8.12 Καμπύλη χωρητικότητας της μπαταρίας Horpecke 24 OPzS 3000 .	- 145 -
Σχήμα 8.13 Υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού.....	- 146 -
Σχήμα 8.14 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας υπάρχοντος συστήματος .....	- 147 -
Σχήμα 8.15 Παραγωγή Γεννήτριας 1 κάθε μήνα .....	- 148 -
Σχήμα 8.16 Παραγωγή Γεννήτριας 2 κάθε μήνα.....	- 149 -
Σχήμα 8.17 Παραγωγή Γεννήτριας 4 κάθε μήνα.....	- 150 -

Σχήμα 8.18 Το ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού που λειτουργεί 100% με ΑΠΕ (1).....	- 152 -
Σχήμα 8.19 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (1) .....	- 152 -
Σχήμα 8.20 Μέσες μηνιαίες τιμές περίσσειας ηλεκτρικής παραγωγής (1) .....	- 154 -
Σχήμα 8.21 Μέσες μηνιαίες τιμές οριζόντιας εξωατμοσφαιρικής ηλιακής ακτινοβολίας (1) .....	- 154 -
Σχήμα 8.22 Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα ΦΒ πλαίσια (1) .....	- 155 -
Σχήμα 8.23 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από ΦΒ (1).....	- 155 -
Σχήμα 8.24 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από τις Α/Γ (1).....	- 156 -
Σχήμα 8.25 Μέσες μηνιαίες τιμές της ενέργειας που εισήχθη στις , μπαταρίες (1) .....	- 157 -
Σχήμα 8.26 Ποσοστό φόρτισης μπαταριών (State of charge-SOC) (1).....	- 157 -
Σχήμα 8.27 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον αναστροφέα (1).....	- 158 -
Σχήμα 8.28 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον αναστροφέα (1) ..	- 158 -
Σχήμα 8.29 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον ανορθωτή (1).....	- 159 -
Σχήμα 8.30 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τιν ανορθωτή (1).....	- 159 -
Σχήμα 8.31 Το ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού που λειτουργεί 100% με ΑΠΕ (2) .....	- 160 -
Σχήμα 8.32 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (2) .....	- 161 -
Σχήμα 8.33 Μέσες μηνιαίες τιμές περίσσειας ηλεκτρικής παραγωγής (2) .....	- 162 -
Σχήμα 8.34 Μέσες μηνιαίες τιμές οριζόντιας εξωατμοσφαιρικής ηλιακής ακτινοβολίας (2).....	- 163 -
Σχήμα 8.35 Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα ΦΒ πλαίσια (2) .....	- 163 -
Σχήμα 8.36 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από ΦΒ (2).....	- 163 -
Σχήμα 8.37 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από τις Α/Γ (2).....	- 164 -
Σχήμα 8.38 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από βιομάζα (2) .....	- 165 -
Σχήμα 8.39 Μέσες μηνιαίες τιμές της ενέργειας που εισήχθη στις μπαταρίες (2) .....	- 166 -
Σχήμα 8.40 Ποσοστό φόρτισης μπαταριών (State of charge-SOC) (2).....	- 166 -

Σχήμα 8.41 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον αναστροφέα (2).....	- 167 -
Σχήμα 8.42 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον αναστροφέα (2) ..	- 167 -
Σχήμα 8.43 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον ανορθωτή (2).....	- 168 -
Σχήμα 8.44 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τιν ανορθωτή (2).....	- 168 -
Σχήμα 9.1 Υλοποίηση σε Matlab/Simulink του συστήματος της Αμοργού που λειτουργεί μόνο με ανεμογεννήτριες .....	- 171 -
Σχήμα 9.2 Η δομή της ανεμογεννήτριας στο Matlab/Simulink.....	- 172 -
Σχήμα 9.3 Καμπύλες για το σύστημα παραγωγής.....	- 177 -
Σχήμα 9.4 Αλλαγή στο SOC των μπαταριών λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου.....	- 177 -
Σχήμα 9.5 Καμπύλες για το σύστημα κατανάλωσης.....	- 178 -
Σχήμα 9.6 Ανάλυση FFT για την κυματομορφή του φορτίου.....	- 178 -



## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας 4-1 Συνήθης σύσταση του βιοαερίου .....	- 86 -
Πίνακας 4-2 Ενδεικτικός πίνακας απόδοσης σε βιοαέριο κατά την αναερόβια χώνευση βασικών οργανικών ουσιών.....	- 87 -
Πίνακας 4-3 Ενδεικτικός πίνακας αποδόσεων σε βιοαέριο τυπικών οργανικών υποστρωμάτων-αποβλήτων .....	- 87 -
Πίνακας 4-4 Διαθέσιμη Βιομάζα από Σιτάρι.....	- 88 -
Πίνακας 4-5 Διαθέσιμη Βιομάζα από Κριθάρι.....	- 88 -
Πίνακας 4-6 Διαθέσιμη Βιομάζα από Βρώμη .....	- 89 -
Πίνακας 4-7 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αροτραίες καλλιέργειες.....	- 89 -
Πίνακας 4-8 Διαθέσιμη Βιομάζα από Λεμονιές .....	- 89 -
Πίνακας 4-9 Διαθέσιμη Βιομάζα από Πορτοκαλιές.....	- 90 -
Πίνακας 4-10 Διαθέσιμη Βιομάζα από Μανταρινιές.....	- 90 -
Πίνακας 4-11 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αχλαδιές .....	- 91 -
Πίνακας 4-12 Διαθέσιμη Βιομάζα από Μηλιές .....	- 91 -
Πίνακας 4-13 Διαθέσιμη Βιομάζα από Βερικοκιές .....	- 92 -
Πίνακας 4-14 Διαθέσιμη Βιομάζα από Ροδακινιές.....	- 92 -
Πίνακας 4-15 Διαθέσιμη Βιομάζα από Συκιές .....	- 93 -
Πίνακας 4-16 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αμυγδαλιές.....	- 93 -
Πίνακας 4-17 Διαθέσιμη Βιομάζα από Καρυδιές.....	- 94 -
Πίνακας 4-18 Διαθέσιμη Βιομάζα από Ελαιόδενδρα .....	- 94 -
Πίνακας 4-19 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αμπέλια .....	- 95 -
Πίνακας 4-20 Διαθέσιμη Βιομάζα από Δενδρώδεις καλλιέργειες.....	- 95 -
Πίνακας 5-1 Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευών μολύβδου οξέος....	- 103 -
Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών ροής.....	- 106 -
Πίνακας 5-3 Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS) .....	- 106 -

Πίνακας 5-4 Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας .....	- 107 -
Πίνακας 7-1 RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε μονοφασικό αναστροφέα.....	- 130 -
Πίνακας 7-2 RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε τριφασικό αναστροφέα.....	- 131 -
Πίνακας 8-1 Δεδομένα για το θερμικό σταθμό παραγωγής της Αμοργού .....	- 138 -
Πίνακας 8-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Vestas V82 .....	- 143 -
Πίνακας 8-3 Βασικά χαρακτηριστικά μπαταρίας Horphecke 24 OPzS 3000.....	- 144 -
Πίνακας 8-4 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας υπάρχοντος συστήματος.....	- 147 -
Πίνακας 8-5 Παραγωγή όλων των γεννητριών σε kWh/έτος.....	- 147 -
Πίνακας 8-6 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο για το υπάρχον σύστημα ....	- 148 -
Πίνακας 8-7 Περίσσεια ηλεκτρισμού (λόγω τεχνικών ελαχίστων των γεννητριών) και μη εξυπηρετηθέν φορτίο .....	- 148 -
Πίνακας 8-8 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρια 1 .....	- 148 -
Πίνακας 8-9 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρια 2 .....	- 149 -
Πίνακας 8-10 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρια 4 .....	- 150 -
Πίνακας 8-11 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία του τοπικού σταθμού παραγωγής .....	- 150 -
Πίνακας 8-12 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (1) .....	- 153 -
Πίνακας 8-13 Παραγωγή όλων των ΑΠΕ σε kWh/έτος (1) .....	- 153 -
Πίνακας 8-14 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο (1) .....	- 153 -
Πίνακας 8-15 Περίσσεια ηλεκτρισμού και μη εξυπηρετηθέν φορτίο (1) .....	- 153 -
Πίνακας 8-16 Στοιχεία παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά (1) .....	- 154 -
Πίνακας 8-17 Στοιχεία παραγωγής για τις ανεμογεννήτριες (1) .....	- 155 -
Πίνακας 8-18 Στοιχεία για τις μπαταρίες (1).....	- 156 -
Πίνακας 8-19 Στοιχεία για το μετατροπέα (1).....	- 158 -
Πίνακας 8-20 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία των μονάδων ΑΠΕ (1) ....	- 159 -
Πίνακας 8-21 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (2) .....	- 161 -



Πίνακας 8-22 Παραγωγή όλων των γεννητριών σε kWh/έτος (2) .....	- 161 -
Πίνακας 8-23 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο (2) .....	- 161 -
Πίνακας 8-24 Περίσσεια ηλεκτρισμού και μη εξυπηρετηθέν φορτίο (2) .....	- 162 -
Πίνακας 8-25 Στοιχεία παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά (2) .....	- 162 -
Πίνακας 8-26 Στοιχεία παραγωγής για τις ανεμογεννήτριες (2) .....	- 164 -
Πίνακας 8-27 Στοιχεία παραγωγής για τις γεννήτριες βιομάζας .....	- 164 -
Πίνακας 8-28 Στοιχεία για τις μπαταρίες (2) .....	- 165 -
Πίνακας 8-29 Στοιχεία για το μετατροπέα (2) .....	- 167 -
Πίνακας 8-30 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία των μονάδων ΑΠΕ (2) ....	- 168 -



## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

---

Δ.Π.	Διασπαρμένη Παραγωγή
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
P	Ενεργός Ισχύς
Q	Άεργος Ισχύς
S	Φαινόμενη ισχύς
$\psi$	Πεπλεγμένη ροή
J	Ροπή αδράνειας
H	Σταθερά αδράνειας
T	Ροπή
A/Γ	Ανεμογεννήτρια
$u, V_w$	Ταχύτητα ανέμου
$v$	Τύρβη
$h(v)$	Σ.Π.Π. ανέμου
$\Gamma$	Συνάρτηση γάμμα
k	Παράμετρος μορφής κατανομής Weibull
c	Παράμετρος κλίμακας κατανομής Weibull
$P_m$	Μηχανική ισχύος στον άξονα της A/Γ
$\rho$	Πυκνότητα του αέρα
R	Ακτίνα δρομέα A/Γ
$C_p$	Αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος A/Γ
$\lambda$	Ταχύτητα ακροπτερυγίου A/Γ
$\beta$	Γωνία βήματος A/Γ
ΦΒ	Φωτοβολταϊκά
$\delta$	Ηλιακή απόκλιση

$T_{\text{SOLAR}}$	Ηλιακή ώρα
$\omega$	Ωριαία γωνία
$L_{\text{ST}}$	Μεσημβρινός αναφοράς
$E$	Διόρθωση εξίσωσης χρόνου
$B$	Γωνία ημέρας
$\beta$	Ύψος ήλιου
$Z$	Ηλιακή αζιμούθια γωνία
A.M.	Αέρια μάζα
$k_t$	Ωριαίος δείκτης αιθριότητας
$K_t$	Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας
$k_d$	Κλάσμα διάχυσης
$k_D$	Συντελεστής διάχυσης
$k_b$	Η άμεση διάδοση
$G_{\text{GLOBAL}}$	Η μέση ωριαία τιμή συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$G_{\text{BEAM}}$	Μέση ωριαία τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στη διεύθυνση της δέσμης στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$G_{\text{EXTRA\_TERRESTRIAL}}$	Μέση ωριαία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας στο Διάστημα (AM0) σε επιφάνεια παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους, για την καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )
$G_h$	Η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο επί του εδάφους
$G_{h,oa}$	Η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο παράλληλο προς το έδαφος έξω από την ατμόσφαιρα της γης στο Διάστημα
DoY	Η ημέρα του έτους
$E_o$	Ο παράγοντας εκκεντρότητας του ήλιου
$G_{\text{SC}}$	Η ηλιακή σταθερά. Σήμερα έχει υιοθετηθεί η τιμή $G_{\text{SC}} = 1367 \text{ W/m}^2$

$G_{\text{BEAM,h}}$	(h = horizontal) η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο
$G_{\text{BEAM,i}}$	(i = inclined) η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
$\alpha$	Η γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους
$G_{\text{DIFF,h}}$	(h = horizontal) η συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο
$G_{\text{DIFF,i}}$	(i = inclined) η συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
$G_{\text{GLOBAL,i}}$	(i = inclined) η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένας κεκλιμένος ηλιακός συλλέκτης επί εδάφους
$\theta$	Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ως προς το Νότο
$\gamma$	Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης δέσμης $G_{\text{BEAM}}$ σε κεκλιμένο ηλιακό συλλέκτη
FF	Συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
$I_{\text{MAX}}$	Ρεύμα μέγιστης ισχύος ΦΒ στοιχείου
$V_{\text{MAX}}$	Τάση μέγιστης ισχύος ΦΒ στοιχείου
$I_{\text{SC}}$	Ρεύμα βραχυκύκλωσης
$V_{\text{OC}}$	Τάση ανοικτοκύκλωσης
S.G.	Ειδική πυκνότητα βιομάζας
M.C.	Σχετική υγρασία βιομάζας σε %
Lead Acid	Μπαταρίες μολύβδου-οξέος
NiCd	Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου
NaS	Μπαταρίες θειούχου νατρίου
Li Ion	Μπαταρίες ιόντων λιθίου
Li-Polymer	Μπαταρίες λιθίου-πολυμερούς

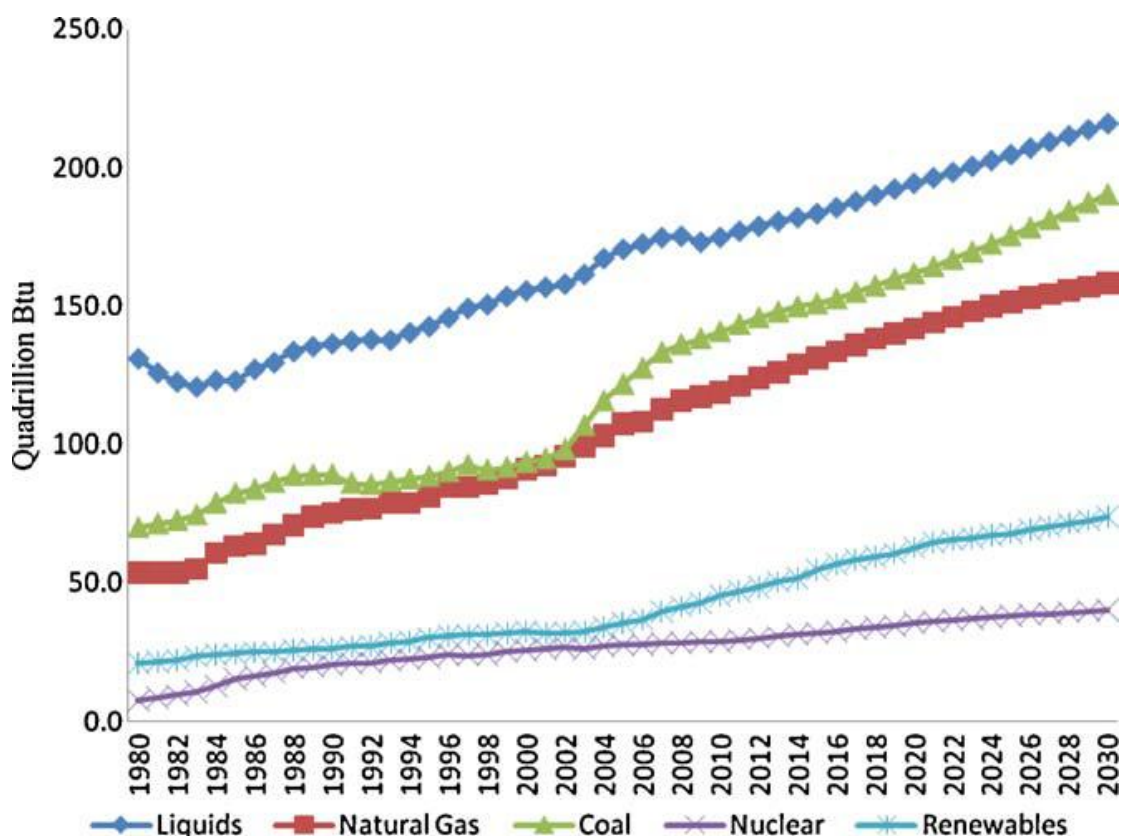
VRB	Μπαταρίες οξειδοαναγωγής βαναδίου
ZnBr	Βρωμιούχος ψευδάργυρος
PWM	Pulse Width Modulation-Διαμόρφωση εύρους παλμών
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
$M_f$	Συντελεστής Διαμόρφωσης PWM αναστροφέα
RMS	Root Mean Square
SOC	State of Charge-Επίπεδο φόρτισης
CO <sub>2</sub>	Διοξείδιο του άνθρακα
CHP	Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ)
LCOE	Levelized Cost of Energy-Κόστος ενέργειας
THD	Total Harmonic Distortion-Ολική αρμονική παραμόρφωση
DC	Direct Current
A/T	Αντλησιοσταμιευτήρας
FFT	Fast Fourier Transform

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Η Αναγκαιότητα της στροφής προς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Όπως προβλέπεται από την ενεργειακή αναφορά του International Energy Outlook 2009 (IEO2009) [1], η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί από 472 τετράκις εκατομμύρια Btu το 2006 σε 552 τετράκις εκατομμύρια Btu το 2015 και σε 678 τετράκις εκατομμύρια Btu το 2030, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1. Δηλαδή, η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί κατά 44% από το 2006 έως το 2030. Επιπλέον, η καθαρή παραγωγή ηλεκτρισμού παγκόσμια αναμένεται να ισούται με 31,8 τρισεκατομμύρια kWh το 2030, δηλαδή να είναι αυξημένη κατά 77% σε σχέση με το 2006. Η αρνητική διάσταση του ζητήματος αυτού είναι το γεγονός ότι η ηλεκτροπαραγωγή εξαρτάται πάρα πολύ από την καύση ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας και φυσικό αέριο) με αποτέλεσμα η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, επιβαρύνοντας ακόμη περισσότερο τη δυσχερή θέση στην οποία ήδη έχει περιέλθει ο πλανήτης μας.



Σχήμα 1.1 Ιστορική και προβλεπόμενη παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση για καύσιμα [5]

Εάν επαληθευτεί η πρόβλεψη ότι το 80% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής θα προέρχεται από ορυκτά καύσιμα το 2030, τότε τα αποτελέσματα του φαινομένου του θερμοκηπίου θα ενταθούν ακόμα περισσότερο καθιστώντας τον πλανήτη ένα μέρος επικίνδυνο για τη ζωή. Για να αποτραπεί η προοπτική αυτή, τα βιομηχανικά ανεπτυγμένα κράτη θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές του CO<sub>2</sub> από 50% έως 80% μέχρι το 2050, ώστε να αποτραπεί η υπερθέρμανση του πλανήτη [2]. Για το σκοπό αυτό έχει υιοθετηθεί το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο αναγκάζει τις κυβερνήσεις και τις ρυθμιστικές αρχές να ακολουθήσουν συγκεκριμένες πολιτικές για να υποστηρίξουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε πολλά επίπεδα, ως εναλλακτικές πηγές ενέργειας.

Το πρωτόκολλο του Κιότο έχει εισάγει τρεις ευέλικτους μηχανισμούς για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>:

- Το Μηχανισμό Καθαρής Ανάπτυξης (ΜΚΑ)
- Τη Διαπραγμάτευση Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΔΔΕ)
- Τα Προγράμματα από Κοινού (ΠΚ)

Οι κύριοι στόχοι του ΜΚΑ είναι:

1. Να βοηθήσει τις χώρες εντός παραρτήματος Ι να επιτύχουν τους στόχους μείωσης των εκπομπών τους εκπονώντας έργα σε αναπτυσσόμενες χώρες (εκτός παραρτήματος Ι), μιας και είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί μείωση εκπομπών απευθείας στις χώρες εντός παραρτήματος Ι.
2. Να βοηθήσει τις χώρες εκτός παραρτήματος Ι να αποκτήσουν τεχνογνωσία και να επιτύχουν βιώσιμη ανάπτυξη μέσα από τη συνεχή παροχή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ΜΚΑ προβλέπει την πραγματοποίηση έργων που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία εκπονούνται σε αναπτυσσόμενες χώρες (εκτός παραρτήματος Ι) αλλά χρηματοδοτούνται από ανεπτυγμένες χώρες (εντός παραρτήματος Ι). Η μείωση των εκπομπών πιστώνεται στην χώρα που χρηματοδοτεί το έργο (ανεπτυγμένη). Έτσι, η ανεπτυγμένη χώρα κερδίζει ως προς τη μείωση των εκπομπών της και κατά συνέπεια συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του πρωτοκόλλου του Κιότο. Η αναπτυσσόμενη χώρα κερδίζει από την αυξημένη ροή πόρων και τη βιώσιμη ανάπτυξη που προσφέρουν οι καθαρές μορφές ενέργειας, καθώς και από τη βελτίωση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι συνήθως ελλειπτική στις χώρες αυτές. Δυστυχώς, όμως, το πρωτόκολλο του Κιότο δεν έχει καταφέρει να πετύχει το σκοπό του, λόγω συγκεκριμένων παραγόντων [3].

Από την άλλη πλευρά, η χρήση τεχνολογιών Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) συμβάλλει τα μέγιστα στην παραγωγή καθαρής ενέργειας, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, μία Βρετανική ανάλυση εκτίμησε μείωση της τάξης του 41% των εκπομπών CO<sub>2</sub> το 1999 όταν υιοθετήθηκε μία μονάδα συμπαραγωγής που βασίστηκε στην τεχνολογία ΔΠ. Στο ίδιο πνεύμα, μία αναφορά για το Δανέζικο ηλεκτρικό σύστημα παρατήρησε μία μείωση 30% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το 1998 έως το 2001 με την ευρεία εφαρμογή τεχνολογιών ΔΠ [4], [5].



## 1.2 Χρήση των τεχνολογιών ΔΠ για την ανακούφιση από τα περιβαλλοντικά προβλήματα

Υπάρχουν πολλά περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προέλθουν από την υιοθέτηση μονάδων ΔΠ στα ενεργειακά συστήματα. Στη συνέχεια θα αναφερθούν μερικά από τα οφέλη αυτά:

### Η ΔΠ προωθεί μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα

Στη συμβατική ηλεκτροπαραγωγή, πάνω από τα 2/3 της ενέργειας των ορυκτών καυσίμων απορρίπτεται ως θερμότητα, και συνεπώς χάνεται. Οι περισσότερες τεχνολογίες ΔΠ (όπως η εγκαταστάσεις βιομάζας) δίνουν εύκολα τη δυνατότητα εγκατάστασης συστημάτων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση των χώρων και του νερού σε γειτονικές κατοικίες. Αυτό έχει τη δυναμική να αυξήσει τη συνολική απόδοση του συστήματος περίπου στο 90% στις καλύτερες εφαρμογές [6]. Επιπλέον, οι κατοικίες που τροφοδοτούνται από τα συστήματα ΣΗΘ δεν χρειάζεται να καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια ή ορυκτά καύσιμα για θέρμανση. Συνεπώς επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι 65 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> μπορούν να εξοικονομηθούν ετησίως στην Ευρώπη, με την εγκατάσταση 50 εκατομμυρίων μονάδων ΣΗΘ [7].

### Μείωση εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από την ηλεκτροπαραγωγή

Οι μονάδες ΔΠ χρησιμοποιούν καθαρές μορφές ενέργειας, εκτός των ορυκτών καυσίμων. Για παράδειγμα, η παραγωγή από φωτοβολταϊκά παράγει λιγότερο από το 15% των εκπομπών CO<sub>2</sub> που θα παρήγαγε μία παραδοσιακή μονάδα άνθρακα [8]. Μερικοί επιστήμονες και ειδικοί της βιομηχανίας έχουν εκτιμήσει ότι οι ΑΠΕ, όπως τα φωτοβολταϊκά, μπορούν να τροφοδοτήσουν μέχρι και το μισό των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών μέσα στα επόμενα 50 χρόνια, ακόμη και αν η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια συνεχίσει να αυξάνεται. Εστιάζοντας στις ενεργειακές αυτές πηγές και αξιοποιώντας τις, μπορούμε να εξαρτόμαστε λιγότερο από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρισμού, μειώνοντας έτσι τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [5].

### Ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στην υγεία

Οι τεχνολογίες ΔΠ μπορούν να μετριάσουν την κλιματική αλλαγή και συνεπώς να μειώσουν τις επιπτώσεις στην υγεία. Η ΔΠ μπορεί να επιτύχει το στόχο αυτό με δύο τρόπους. Πρώτον, η μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο επιτρέπει μειωμένες απώλειες ισχύος, και συνεπώς παράγεται λιγότερη ενέργεια από τους συμβατικούς σταθμούς. Δεύτερον, το φάσμα των εκπομπών από εξωτερικούς ή αερομεταφερόμενους ρυπαντές όπως τα NO<sub>x</sub>, το SO<sub>2</sub> και άλλοι που προέρχονται από τη ΔΠ, είναι λιγότερο επικίνδυνο από τις εκπομπές των συμβατικών μονάδων που αντικαθιστούν οι μονάδες ΔΠ. Λόγω των δύο αυτών παραγόντων, η ποιότητα του αέρα προστατεύεται από τους ανθρωπογενείς ρυπαντές, πράγμα που μειώνει τους κινδύνους για την υγεία. Επιπλέον, αφού θα μεταφέρεται λιγότερη ισχύς μέσω των γραμμών μεταφοράς όταν υιοθετηθεί πλήρως η ΔΠ, θα μειωθεί η ανησυχία του κοινού για τους κινδύνους στην υγεία όπως η λευχαιμία και ο καρκίνος του εγκεφάλου [9],[10] που προκαλείται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [5].

### Πλεονέκτημα του χώρου

Άλλο μεγάλο περιβαλλοντικό όφελος από τις τεχνολογίες ΔΠ είναι ότι χρησιμοποιούνται λιγότεροι φυσικοί πόροι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές μονάδες. Οι ερευνητές της ενεργειακής βιομηχανίας έχουν εκτιμήσει ότι η έκταση της γης που χρειάζονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ικανής για να καλύψει τις ανάγκες ολόκληρων των ΗΠΑ είναι κάτω από 60.000 km<sup>2</sup>. Τα ΦΒ πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν σε στέγες κτηρίων για την παραγωγή ηλεκτρισμού, μειώνοντας έτσι την επιπρόσθετη χρήση γης. Για παράδειγμα, τα 30.480 m<sup>2</sup> της οροφής ενός τυπικού πολυκαταστήματος μπορούν να παράγουν πάνω από 1 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αιολικής και ηλιακής παραγωγής χρειάζονται λιγότερο χώρο για να παράγουν 1 MW ηλεκτρισμού από ότι οι παραδοσιακές μονάδες άνθρακα αν συμπεριληφθεί και η έκταση της γης που χρησιμοποιείται από τα ορυχεία για την εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων. Η έκταση της γης που εξοικονομείται θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς [5].

### **1.3 Η μετάβαση προς τις ΑΠΕ μπορεί να είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι αναμενόταν**

Η δραστική μείωση της τιμής των φωτοβολταϊκών και το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα έχουν αλλάξει τη στάση της κοινής γνώμης ως προς τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας και τις διαφορές στο κόστος παραγωγής. Ο συνδυασμένος τους αντίκτυπος είναι η επιτάχυνση της παγκόσμιας μετάβασης στη διεσπαρμένη παραγωγή με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Εδώ και δεκαετίες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προωθούνταν σε ένα μικρό αριθμό χωρών μέσω χρηματοδοτούμενων ερευνητικών προγραμμάτων και μέσω επιδοτήσεων για την εγκατάστασή τους. Πλέον η τεχνολογική και η βιομηχανική δυναμική οδηγούν το μετασχηματισμό στον ενεργειακό τομέα. Η αλλαγή μπορεί να έλθει πολύ πιο γρήγορα από ότι αναμενόταν, με αποτέλεσμα να αλλάξει άρδην η λογική των ηλεκτρικών συστημάτων και των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Ήδη εκατομμύρια καταναλωτές αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρισμό για τις δικές τους ανάγκες με τη βοήθεια των νέων ειδών έξυπνων τεχνολογιών.

Όμως, η μετάβαση δεν θα είναι εύκολη υπόθεση. Παρόλο που ισχυρά επιχειρησιακά συμφέροντα πιέζουν για μία ταχύτερη μετάβαση στις ΑΠΕ, πράγμα που είναι θετικό για την κλιματική αλλαγή, εντούτοις ισχυρά κατεστημένα στην ενεργειακή βιομηχανία φοβούνται ότι θα χάσουν την επιρροή τους. Οι στρατηγικές τους να καθυστερήσουν την αλλαγή ή να πιέσουν για συγκεντρωμένη παραγωγή ΑΠΕ μπορεί να επηρεάσει τις εξελίξεις σε μεμονωμένες χώρες.

Στον αντίποδα, τα τελευταία 5 χρόνια, δύο χωρίς προηγούμενο γρήγορες αλλαγές στην αντίληψη μεταμόρφωσαν την ενεργειακή πολιτική. Το 2008/2009, οι ΑΠΕ έγιναν ξαφνικά ένα κορυφαίο θέμα στο οποίο εστιάστηκε η οικονομική και βιομηχανική πολιτική. Η Ευρωπαϊκή Ένωση ενέκρινε δεσμευτικούς στόχους για το μερίδιο των ΑΠΕ το 2020· η Παγκόσμια Οργάνωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (International Renewable Energy Agency, IRENA) ιδρύθηκε σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα· η Παγκόσμια Οργάνωση Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) ενίσχυσε τη δραστηριότητά της στις ΑΠΕ· και η Κίνα ξεκίνησε μία ταχύτατη ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Το Δεκέμβριο του 2009 στα πλαίσια του συνεδρίου για την κλιματική αλλαγή στην Κοπεγχάγη, διατυπώθηκε η άποψη ότι η παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας 100% μέσω ΑΠΕ, που είναι απαραίτητη για την κλιματική πολιτική, είναι τεχνολογικά και οικονομικά εφικτή στον ορίζοντα του 2050.

Τέλος, για να διαπιστώσουμε πόσο κοντά είμαστε σε μία μεγάλη ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή αξίζει να αναφέρουμε το παρακάτω γεγονός. Έως σήμερα, η ένταξη της φωτοβολταϊκής παραγωγής στο δίκτυο βασιζόταν σε κρατικές επιδοτήσεις (feed-in-tariffs). Όμως, πολύ νωρίτερα από ότι αναμενόταν, η ισοτιμία δικτύου για τα νοικοκυριά επιτεύχθηκε στη Γερμανία στην αρχή του 2012, μιας και η feed-in-tariff για τις μικρές εγκαταστάσεις οροφής είναι μικρότερη από τη μέση οικιακή τιμή ηλεκτρισμού. Βέβαια, λόγω της αναντιστοιχίας των ωρών ηλιοφάνειας και της οικιακής κατανάλωσης ηλεκτρισμού, όμως, τα νοικοκυριά δυσκολεύονται να χρησιμοποιήσουν πάνω από το 35% της παραγωγής ηλεκτρισμού από την οροφή τους για τις ανάγκες τους, αν δεν προχωρήσουν σε επιπρόσθετες επενδύσεις. Όμως η ισοτιμία δικτύου δεν παύει να είναι ένα πολύ ενθαρρυντικό γεγονός για την γρήγορη ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια [11].

## 1.4 Μικροδίκτυα

Η διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνεται παγκοσμίως και αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών. Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής με τη μεγαλύτερη δυναμική είναι οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, οι μικροτουρμπίνες, τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου κλπ [12]. Η παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής κοντά στη ζήτηση μπορεί να προσφέρει πολλά οικονομικά οφέλη καθώς και επιπρόσθετες βοηθητικές υπηρεσίες [13],[14].

Ο συντονισμένος έλεγχος της διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα μικροδίκτυο επιτρέπει την πλήρη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της. Τα μικροδίκτυα είναι δίκτυα χαμηλής ή μέσης τάσης που περιλαμβάνουν διεσπαρμένη παραγωγή, μονάδες αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία, με την συνολική εγκατεστημένη ικανότητα να κυμαίνεται από λίγα kW μέχρι μερικά MW. Το καλύτερο χαρακτηριστικό των μικροδικτύων είναι ότι το ανάντη δίκτυο βλέπει τη διεσπαρμένη παραγωγή σαν μία ενιαία και ελεγχόμενη οντότητα, δηλαδή σαν ένα φορτίο ή μία γεννήτρια. Επιπλέον, παρόλο που τα μικροδίκτυα λειτουργούν συνήθως διασυνδεδεμένα με το δίκτυο, μπορούν αυτόματα να νησιδοποιηθούν όταν συμβαίνουν σφάλματα στο ανάντη δίκτυο.

Η λειτουργία των μικροδικτύων προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα στον τελικό καταναλωτή και στην επιχείρηση ηλεκτρισμού. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι [15]:

- Η συνέχιση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου σε περιπτώσεις κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει στον καταναλωτή που ανήκει στο εκάστοτε μικροδίκτυο την αδιάλειπτη λειτουργία την ίδια ώρα όπου το ανάντη δίκτυο διανομής μπορεί να είναι σε ασταθή κατάσταση ή να έχει καταρρεύσει προσωρινά (black out).
- Η αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η ελαχιστοποίηση των απωλειών και η βελτίωση της ποιότητας ισχύος με την ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP), καθώς και με την εγκατάσταση αυτών κοντά στους καταναλωτές. Η τοπική κάλυψη του φορτίου συνεπάγεται ότι δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί

ενδιάμεσοι καταναλωτές που αλλοιώνουν με τη χωρητική (ή επαγωγική αν πρόκειται για φορτία) συμπεριφορά τους τον συντελεστή ισχύος.

- Η πιο αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές εντός αυτού, το οποίο είναι ύψιστης σημασίας ζήτημα ιδιαίτερα για τους καταναλωτές, όπως νοσοκομεία κτλ., για τους οποίους είναι σημαντική η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.
- Η μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό – εκτός της συμπαραγωγής CHP – ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση τοπικά παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας διαμορφώνει ευνοϊκότερους όρους για το περιβάλλον και την αειφόρο ανάπτυξη.
- Η βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες.
- Η μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.
- Η ενεργός διαχείριση των φορτίων (απόρριψη φορτίων), διαδικασία η οποία είναι σε θέση να βοηθά σημαντικά στην ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου από το Μικροδίκτυο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς επίσης και η μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση, είναι μερικά από αυτά.

Μεμονωμένες μικροπηγές που έχουν συνδεθεί στη χαμηλή ή στη μέση τάση είναι πολύ μικρές για να συμμετέχουν στις τρέχοντες αγορές, όμως, αν συντονιστούν με έναν αποτελεσματικό τρόπο μπορούν να σχηματίσουν μία μεγάλη οντότητα και να διαμορφώσουν ένα μέρος του χαρτοφυλακίου της ηλεκτρικής εταιρίας. Είναι φυσικά μη ρεαλιστικό να υποθέτουμε ότι οι ιδιοκτήτες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής θα υποβάλλουν προσφορές για τη μικροπαραγωγή τους με ένα συστηματικό τρόπο. «Διεσπαρμένη ευφυΐα» για τη συμμετοχή των μικροδικτύων στην αγορά χωρίς άμεση συμμετοχή των ιδιοκτητών διεσπαρμένης παραγωγής έχει προταθεί στα [16], [17], [18], με τη χρήση συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (multi-agent systems-MAS).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στηρίζεται, στις μέρες μας, στην αιολική παραγωγή. Ο άνεμος δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης στον αέρα, που θέτει σε κίνηση αέριες μάζες λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα της γης. Οι άνεμοι οφείλονται είτε στη διαφορετική απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους, οπότε είναι σχετικά σταθεροί, είτε στη διαφορετική φύση και επιφάνεια του εδάφους οπότε χαρακτηρίζονται από μεγάλες διακυμάνσεις και μικρή διάρκεια.

Στα Ελληνικά νησιά, όπου έχουν εγκατασταθεί μικρά και αυτόνομα συστήματα παραγωγής που βασίζονται αποκλειστικά σε γεννήτριες diesel η χρήση ανεμογεννητριών μπορεί να δώσει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα ως προς την αποδοτική κάλυψη της ζήτησης. Οι τελευταίες εξελίξεις στην αγορά του πετρελαίου σε συνδυασμό με την υψηλή φορολογία στη χώρα μας έχουν εκτινάξει στα ύψη το κόστος παραγωγής από μονάδες diesel κάνοντας τη χρήση ανεμογεννητριών πιο ελκυστική από ποτέ.

#### 2.2 Χαρακτηριστικά του ανέμου

##### 2.2.1 Ταχύτητα ανέμου [19]

Η ταχύτητα του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο τόπο είναι συνάρτηση των διαφορών πίεσης στην ατμόσφαιρα σε μεγάλη κλίμακα, αλλά εξαρτάται και από το ανάγλυφο της περιοχής και την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους. Το μέτρο και η κατεύθυνση του ανέμου εμφανίζουν συχνές μεταβολές. Υπάρχουν διακυμάνσεις της μέσης ημερήσιας ταχύτητας από μέρα σε μέρα και της μέσης ετήσιας ταχύτητας από έτος σε έτος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Όμως η άμεση σχέση του ανέμου και της περιοδικής εμφάνισης του ήλιου σε ένα τόπο, έχει ως αποτέλεσμα την εποχική και ετήσια περιοδικότητα της εμφάνισης της μέσης ταχύτητάς του. Συνεπώς για την μελέτη και τον υπολογισμό των κατάλληλων, σε κάθε περίπτωση, αιολικών συστημάτων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η γνώση της περιοδικής εμφάνισης της μέσης ταχύτητας του ανέμου, σε χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους π.χ. μέσα στο μήνα ή στο έτος. Η στιγμιαία ταχύτητα,  $u$ , μετρείται με τα ανεμόμετρα και η κατεύθυνση με ειδικό αισθητήρα (ανεμοδείκτη).

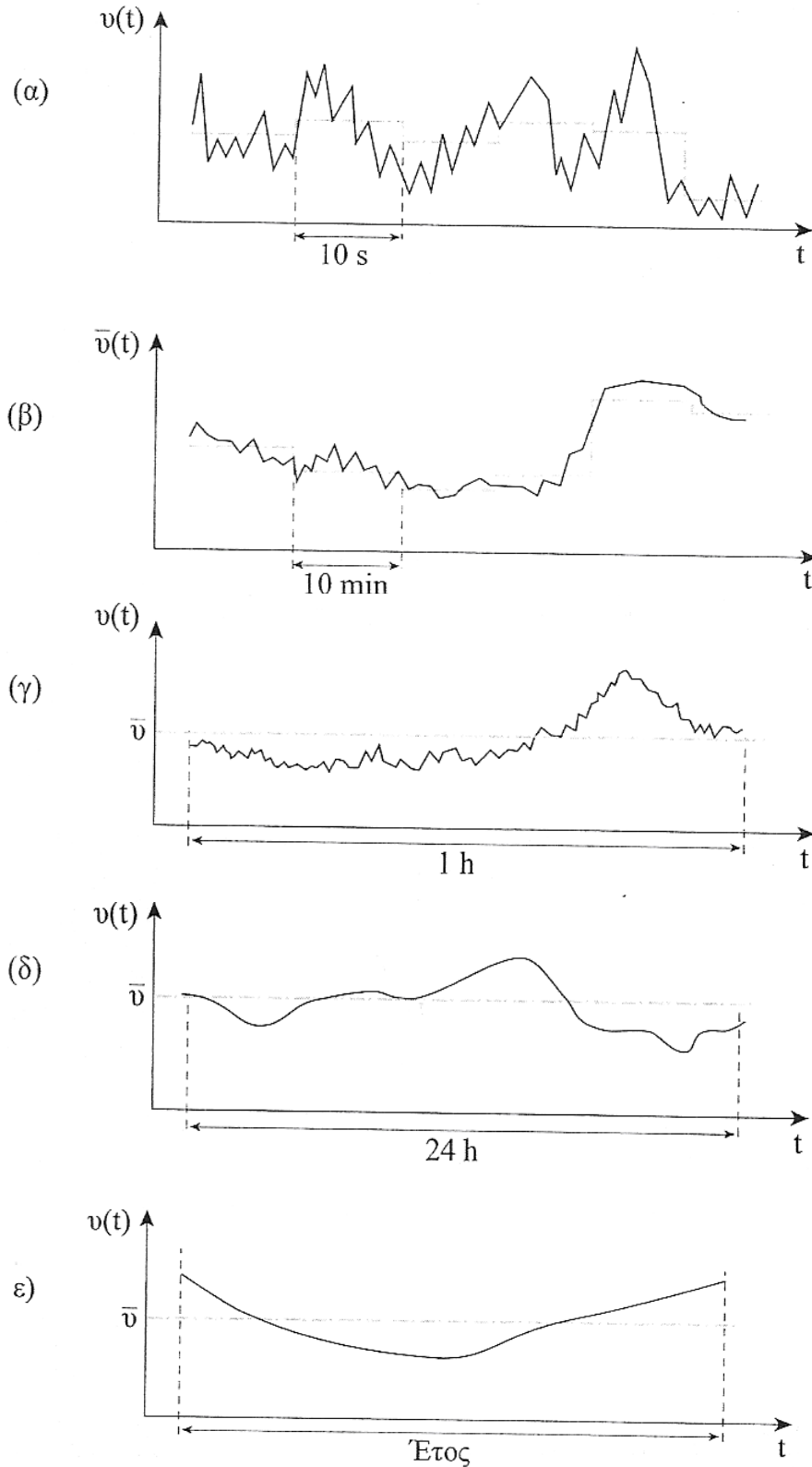
Η μέση τιμή του μέτρου της ταχύτητας μέσα σε χρονικό διάστημα  $T$ , δίνεται εξ ορισμού από την σχέση (2.1):

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (2.1)$$

Το αιολικό δυναμικό ενός τόπου χαρακτηρίζεται από τη μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου καθώς και από τις ριπές, οι οποίες μεταβάλλουν έντονα τη στιγμιαία τιμή του ανέμου. Συνήθως, για την ενεργειακή μελέτη, λαμβάνουμε μέσες τιμές δεκαλέπτου για την ταχύτητα του ανέμου ώστε να συσχετίσουμε στο διάστημα

αυτό την αποδιδόμενη μέση ηλεκτρική ισχύ με τη μέση ταχύτητα του διαστήματος αυτού.

Σημαντική πληροφορία για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών είναι τα διαγράμματα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου σε μία περιοχή.



Σχήμα 2.1 Τυπική μεταβολή των στιγμιαίων και μέσων τιμών ταχύτητας ανέμου

### 2.2.2 Τύρβη ανέμου

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε στη μελέτη της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (10 λεπτών). Στο σημείο αυτό θα μελετήσουμε σύντομα τις ταχείες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή (τύρβη).

Ο άνεμος είναι μέγεθος χωρικά και χρονικά συνεχές. Βραχυπρόθεσμα μπορεί να υποθεθεί ότι αποτελείται από μία σταθερή μέση τιμή και μία τυχαία μεταβαλλόμενη συνιστώσα (τύρβη). Η στιγμιαία ισοδύναμη ταχύτητα του ανέμου δίνεται από τη σχέση (2.2) [20]:

$$V_w(t) = \bar{V}_w + v(t) \quad (2.2)$$

όπου

$V_w(t)$	η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου
$\bar{V}_w$	η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ένα διάστημα
$v(t)$	η στιγμιαία τιμή της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου

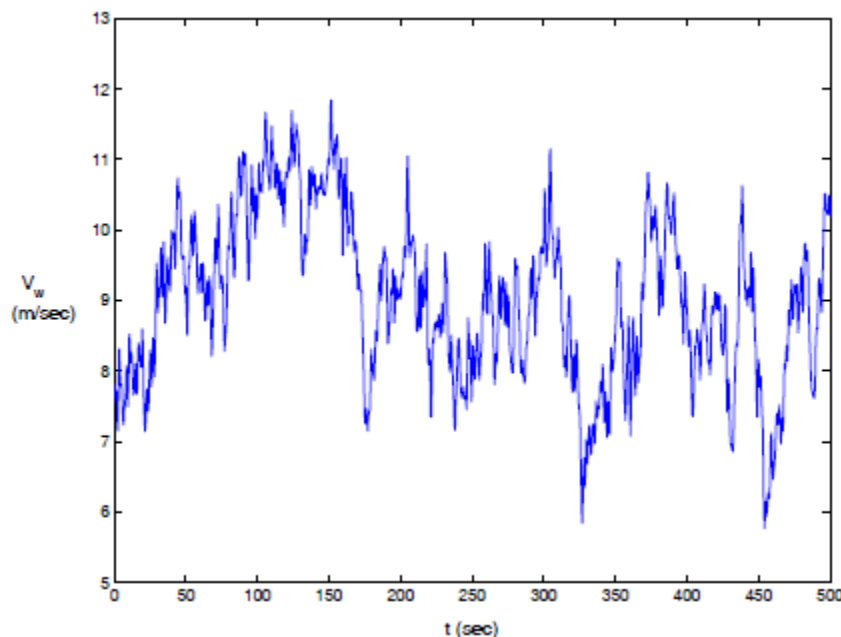
Για την περιγραφή της φασματικής πυκνότητας της τύρβης η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση είναι η Von Karman. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται πρωτογενώς από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το εκάστοτε ύψος της μέτρησης του ανέμου από αυτό.

Με δεδομένη τη συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας, οι χρονοσειρές της τυρβώδους συνιστώσας του ανέμου μπορούν να περιγραφούν με σύνθεση Fourier όπως φαίνεται στη σχέση (2.3) [21]

$$v(t) = \sqrt{2\Delta f} \sum_{i=1}^N (\sqrt{S_v(f_i)} * \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)) \quad (2.3)$$

όπου:

$S_v(f_i)$	η κατανομή του φασματικού περιεχομένου της τύρβης
$N$	ο αριθμός των εξεταζομένων συχνοτήτων
$f_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) * \Delta f$	η i-οστή συχνότητα του φασματικού περιεχομένου της τύρβης
$\Delta f$	η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών συχνοτήτων
$\varphi_i$	ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές φάσης ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα $[0, 2\pi]$ .



Σχήμα 2.2 Χρονοσειρά Ανέμου Μέσης τιμής 9 m/sec [22]

Κατά την αναπαραγωγή της χρονοσειράς του ανέμου πρέπει να επιλεγεί το εύρος των διαστημάτων της συχνότητας,  $\Delta f$ , καθώς και το πλήθος τους. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι η συγκεκριμένη διαδικασία ισχύει για ορισμένο χρονικό διάστημα προσομοίωσης, γεγονός που επιβάλλει τους αντίστοιχους περιορισμούς στις εξεταζόμενες συχνότητες. Γενικά ισχύει ότι η επιλογή των  $N$ ,  $\Delta f$  πρέπει να είναι τέτοια ώστε η περίοδος που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συχνότητα  $\Delta f/2$  να είναι μεγαλύτερη από το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης (θεώρημα Shannon) και η μέγιστη συχνότητα  $(N - 0,5)\Delta f$  να είναι τουλάχιστον διπλάσια της ταχύτητας περιστροφής της έλικας [20].

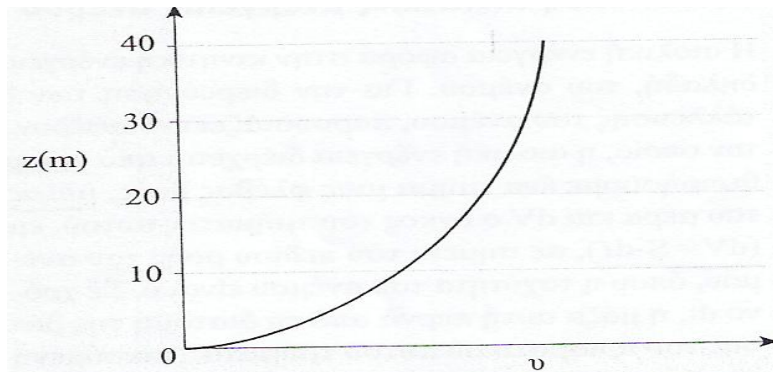
Στο σχήμα 2.2 φαίνεται μία χρονοσειρά ανέμου μέσης τιμής 9 m/sec.

Η ταχύτητα,  $u$ , του ανέμου σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος δίνεται από τη σχέση (2.4):

$$u = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (2.4)$$

όπου  $z_{ref}$ , το ύψος αναφοράς, που είναι το ύψος όπου γνωρίζουμε πειραματικά την ταχύτητα του ανέμου,  $u_{ref}$ . Το ύψος  $z_0$ , αφορά στο μέσο ύψος του διαταραγμένου στρώματος του αέρα, εξ' αιτίας των ανωμαλιών του εδάφους και ονομάζεται μήκος τραχύτητας. Στο Σχήμα 2.3 δίνεται η τυπική μορφή της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος [19].





Σχήμα 2.3 Τυπική μορφή μεταβολής της ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του ύψους [19]

### 2.3 Προσομοίωση χρονοσειρών ανέμου

Σε πολλές περιοχές της χώρας μας, το μόνο που είναι γνωστό για το αιολικό δυναμικό είναι η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου. Δεν υπάρχουν ούτε στιγμιαίες τιμές του ανέμου, ώστε να διαπιστωθεί η τύρβη στην περιοχή ούτε μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου ώστε να διαπιστωθεί η εποχιακή διακύμανση. Έτσι, είμαστε αναγκασμένοι να ανακατασκευάσουμε απλοϊκά μία ετήσια χρονοσειρά ανέμου, γνωρίζοντας μόνο τη μέση τιμή αυτού, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις προαναφερθέντες παραμέτρους.

Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Weibull. Συνεπώς η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Σ.Π.Π.) είναι η ακόλουθη:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \text{ για } 0 \leq v \leq \infty \quad (2.5)$$

όπου  $k$  είναι η παράμετρος μορφής και  $c$  η παράμετρος κλίμακας.

Τυπικές τιμές της παραμέτρου  $k$  είναι από 1,5 έως 2,5 ενώ για τον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές από 1,5 έως 2,0. Η παράμετρος  $c$  συνδέεται με την μέση ταχύτητα του ανέμου σύμφωνα με τη σχέση (2.6):

$$\bar{v} = c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.6)$$

Παρακάτω παρουσιάζουμε μία βήμα προς βήμα εξήγηση για τον υπολογισμό μιας συνάρτησης μετασχηματισμού που μετατρέπει μία τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφης (uniform) κατανομής σε κατανομή Weibull. Η συνάρτηση αυτή θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τυχαίων αριθμών που ακολουθούν κατανομή Weibull με τις επιθυμητές παραμέτρους:

Θέτοντας κατάλληλες σταθερές, η κατανομή Weibull μπορεί να γραφεί ως ακολούθως [23]:

$$h(x) = \alpha \beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^\beta} \quad (2.7)$$

Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι μεγαλύτεροι από το μηδέν. Για τιμές του  $x$  μικρότερες από το 0, η κατανομή ορίζεται ως μηδενική.

Η μέση τιμή, με τις νέες σταθερές είναι:

$$\mu = \alpha^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.8)$$

Η διακύμανση είναι:

$$\sigma^2 = \alpha^{-\frac{2}{\beta}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \quad (2.9)$$

Για να προσδιορίσουμε το μετασχηματισμό, αρχίζουμε με το θεμελιώδη νόμο μετασχηματισμού των πιθανοτήτων για δύο συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας  $f(y)$  και  $p(x)$ ,

$$|f(y)dy| = |p(x)dx|$$

ή

$$(2.10)$$

$$f(y) = p(x) \left| \frac{dx}{dy} \right|$$

Αυτό μας επιτρέπει να συσχετίσουμε μία τυχαία μεταβλητή  $x$  που έχει συνάρτηση κατανομής  $p(x)$  με μία τυχαία μεταβλητή  $y$  που έχει συνάρτηση κατανομής  $f(y)$ . Αν η  $x$  ακολουθεί ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0,1]$  τότε το  $p(x)$  είναι σταθερό οπότε έχουμε:

$$f(y) = \frac{dx}{dy} \quad (2.11)$$

Η λύση για αυτό το ορισμένο ολοκλήρωμα του  $f(y)$ , είναι:

$$x = F(y) = \int_0^y f(z) dz \quad (2.12)$$

Αυτή η σχέση μας δίνει την πηγαία τυχαία μεταβλητή, δεδομένης της τυχαίας μεταβλητής-στόχου. Οπότε πρέπει να μπορέσουμε να αντιστρέψουμε τη σχέση,

$$y = G(x) \quad (2.13)$$

Είναι η δυσκολία του προσδιορισμού του  $y = G(x)$  δεδομένου του  $x = F(y)$  που κάνει το πρόβλημα πιθανώς άλυτο.

Για την περίπτωση της κατανομής Weibull μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε το αντίστροφο.

Αρχίζοντας με,

$$x = F(y) = \int_0^y h(z) dz \quad (2.14)$$

Και μετά υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα λαμβάνουμε:

$$x = F(y) = 1 - e^{-ay^\beta} \quad (2.15)$$

Τώρα πρέπει να το αντιστρέψουμε αυτό για να γράψουμε τη σχέση  $y = G(x)$ ,

$$y = G(x) = \left[ -\frac{1}{a} \ln(1-x) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.16)$$

Τελειώνοντας, ο μετασχηματισμός είναι:

$$y = \left[ -\frac{1}{a} \ln(1-x) \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.17)$$

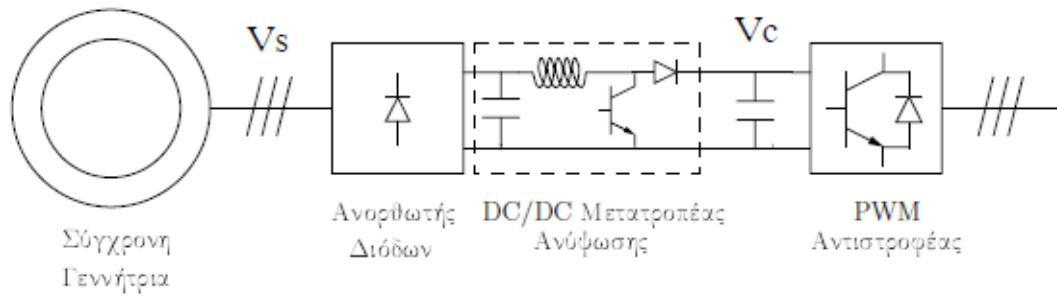
Αρχίζουμε με τον τυχαίο αριθμό  $x$ , ο οποίος προέρχεται από μία ομοιόμορφη κατανομή (στο διάστημα  $[0,1]$ ). Έπειτα εφαρμόζουμε το μετασχηματισμό (εξίσωση 2.17) και παίρνουμε ένα νέο ανεξάρτητο τυχαίο αριθμό που ακολουθεί κατανομή Weibull με μέση τιμή και διακύμανση που εξαρτάται από τα  $a$  και  $\beta$ .

Οπότε για να παράγουμε τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν κατανομή Weibull αρκεί να παράγουμε τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή (ή απλά τυχαίους αριθμούς). Οι τυχαίοι αυτοί αριθμοί μπορούν να προκύψουν είτε με φυσικό τρόπο (π.χ. ρίψη νομίσματος, θόρυβος μετάδοσης, θόρυβος από δίοδο Zener και γενικά από hardware) είτε από λογισμικό (αλγόριθμοι). Οι αλγόριθμοι αυτοί ονομάζονται Pseudo-Random number generators. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να παράγουν ακολουθίες αριθμών με ικανοποιητική τυχειότητα, αλλά εν τέλει κάποτε η ακολουθία θα αρχίσει να επαναλαμβάνεται (αλλιώς η απαίτηση μνήμης αυξάνει δίχως όριο). Συνεπώς πρέπει να είναι κάποιος πολύ προσεκτικός στη χρήση αυτών των αλγορίθμων και να τους ρυθμίσει κατάλληλα ώστε για το πλήθος των τυχαίων αριθμών που θα χρειασθεί να παραχθούν (π.χ. 8760 τιμές ταχύτητας ανέμου) να μην υπάρξει επανάληψη και οι αριθμοί να είναι όσο το δυνατόν πιο τυχαίοι (να μην έχουν συσχέτιση μεταξύ τους). Παραδείγματα τέτοιων αλγορίθμων είναι το linear congruential generator και το multiply-with-carry. Όλα τα σύγχρονα λειτουργικά συστήματα (π.χ. Windows) παρέχουν στο χρήστη πλατφόρμες παραγωγής τυχαίων αριθμών (με ομοιόμορφη) κατανομή, γι' αυτό η παραγωγή τους θεωρείται, στις μέρες μας, εύκολη υπόθεση. Για τα δεδομένα της συγκεκριμένης εργασίας θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση `wblrnd` του Matlab η οποία παράγει τυχαίους αριθμούς που ακολουθούν κατανομή Weibull με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφηκε στην ενότητα αυτή [24],[25],[26].

## 2.4 Α/Γ με πλήρη μετατροπέα

### 2.4.1 Περιγραφή συστήματος Α/Γ [22]

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αποτελείται από μία σύγχρονη μηχανή με τύλιγμα διέγερσης.



Σχήμα 2.4 Διάταξη της ανεμογεννήτριας

Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC ο οποίος αποτελείται από έναν ανορθωτή διόδων και έναν PWM αναστροφέα. Στην περίπτωση που η διέγερση της σύγχρονης γεννήτριας δεν μπορεί να αυξηθεί πάνω από ένα όριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας DC/DC μετατροπέας ανύψωσης για τον έλεγχο της τάσης εισόδου του PWM αναστροφέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4:

Το σύστημα διέγερσης της γεννήτριας χρησιμοποιείται για τη μέγιστη απολαβή ισχύος από τις μικρές ταχύτητες ανέμου, βελτιστοποιώντας την ταχύτητα της γεννήτριας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις μηχανικές καταπονήσεις στην ανεμογεννήτρια από τις ριπές του ανέμου. Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα DC-DC χρησιμοποιείται ώστε να διατηρηθεί η ταχύτητα στο 1 αμ. Ο PWM αναστροφέας χρησιμοποιείται είτε για να κρατάει σταθερή την τάση εισόδου του ελέγχοντας την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από την DC πλευρά προς το δίκτυο, είτε για να υλοποιεί μέγιστη απολαβή ισχύος. Επίσης ο PWM αναστροφέας ελέγχει την ανταλλαγή άεργου ισχύος με το δίκτυο, ελέγχοντας την τάση του ζυγού που συνδέεται η ανεμογεννήτρια μεταβάλλοντας την άεργο ισχύ που παρέχει στο δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο στη δική μας περίπτωση όπου η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο αγγίζει το 100%.

Τέλος, η A/Γ διαθέτει pitch control ώστε η ισχύς εξόδου να περιορίζεται στην ονομαστική της τιμή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική.

#### 2.4.2 Αεροδυναμικό μέρος [22]

Η βασική σχέση που περιγράφει τη λειτουργία μιας A/Γ εκφράζοντας την ισχύ του δρομέα των πτερυγίων της είναι:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) \pi R^2 V_w^3 \quad (2.18)$$

όπου:

$P_m$	η μηχανική ισχύος στον άξονα της A/Γ (W)
$\rho$	η πυκνότητα του αέρα (τυπικά 1,225 kg/m <sup>3</sup> )
$R$	η ακτίνα του δρομέα (m <sup>2</sup> )
$V_w$	η ταχύτητα του ανέμου (m/sec)
$C_p$	ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Τυπικές βέλτιστες τιμές του  $C_p$  είναι από 0,4 έως 0,5 ενώ το θεωρητικό μέγιστο όριο είναι 0,593 (όριο Betz)

Όπως φαίνεται από τη σχέση (2.18) ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  εξαρτάται από:

- Την ταχύτητα ακροπτερυγίου  $\lambda$  (tip speed ratio) που δίνεται από τη σχέση (2.19):

$$\lambda = \frac{R\omega_R}{V_w} \quad (2.19)$$

Όπου  $\omega_R$  η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της Α/Γ και  $R$  η ακτίνα του δρομέα της Α/Γ.

- Τη γωνία βήματος των πτερυγίων του δρομέα  $\beta$ .

Η αεροδυναμική ροπή που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική ισχύ προσδιορίζεται μέσω της σχέσης (2.20):

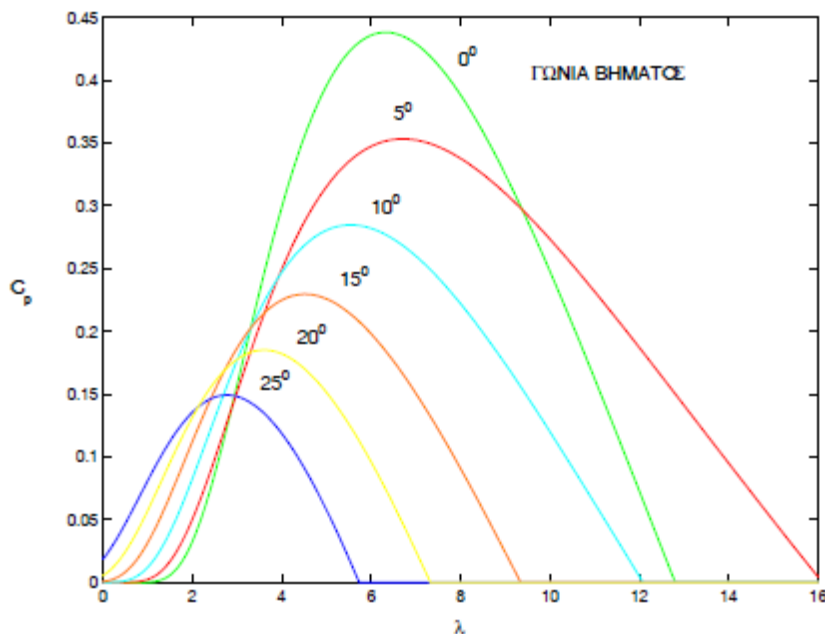
$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (2.20)$$

Η αναλυτική σχέση η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για τον υπολογισμό του  $C_p$  συναρτήσει των  $\lambda$  και  $\beta$  είναι η εξής:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.22)$$

Στο σχήμα 2.5 φαίνονται οι καμπύλες  $C_p - \lambda$  με παράμετρο τη γωνία βήματος  $\beta$ .

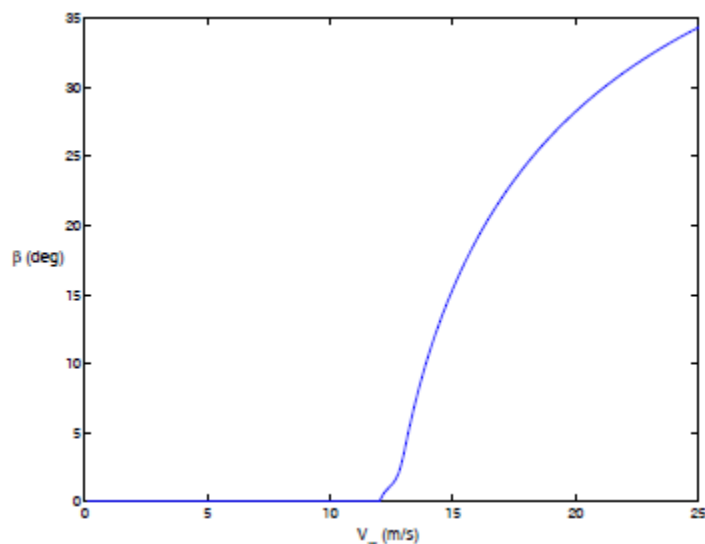


Σχήμα 2.5 Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος  $C_p$  - ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  για διάφορες τιμές της γωνίας βήματος  $\beta$ .

Από τις σχέσεις (2.21), (2.22) και για  $\beta = 0^\circ$  προκύπτει ότι ο βέλτιστος αεροδυναμικός συντελεστής είναι  $C_{p,opt} = 0,438$  και επιτυγχάνεται για  $\lambda_{opt} = 6,3$ .

### 2.4.3 Ρυθμιστής γωνίας βήματος πτερυγίων (Pitch Control) [22]

Για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου στην ονομαστική τιμή για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η Α/Γ διαθέτει πτερύγια με δυνατότητα ελέγχου της γωνίας βήματός τους (pitch control).



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική ελέγχου της γωνίας βήματος

Πιο συγκεκριμένα σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, η γωνία βήματος βρίσκεται στην ελάχιστη τιμή της ( $\beta = 0^\circ$ ). Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, η γωνία βήματος αυξάνεται έτσι ώστε ο συντελεστής  $C_p$  και κατά συνέπεια η μηχανική ροπή να μειωθούν με στόχο η ταχύτητα περιστροφής και η παραγόμενη ισχύς να παραμείνουν στην ονομαστική τους τιμή.

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η γωνία βήματος για διάφορες ταχύτητες του ανέμου στη μόνιμη κατάσταση. Η καμπύλη σχεδιάστηκε με βάση τις σχέσεις (2.19), (2.20) και με δεδομένο ότι η μηχανική ισχύς και η ταχύτητα της Α/Γ έχουν ονομαστική τιμή

### 2.4.4 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας Α/Γ

Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας που χρησιμοποιεί η Α/Γ παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6.

### 2.4.5 Ανορθωτής διόδων

Το μοντέλο του ανορθωτή διόδων που χρησιμοποιεί η Α/Γ παρουσιάζεται στην ενότητα 7.1.

### 2.4.6 Αναστροφείας PWM

Το μοντέλο του αναστροφέα PWM που χρησιμοποιεί η Α/Γ παρουσιάζεται στην ενότητα 7.2.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

#### 3.1 Ο Ήλιος

Ο Ήλιος αποτελεί τη μόνη πηγή θερμότητας και φωτός που δέχεται η επιφάνεια της Γης προκειμένου να διατηρείται η ζωή του πλανήτη. Η ακτίνα του Ήλιου είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από την ακτίνα της Γης, η μάζα του περίπου 300.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της γης, ενώ η θερμοκρασία του είναι τόσο υψηλή ώστε τα πλέον δύστηκτα υλικά της γης θα ατμοποιούνταν στην επιφάνεια του Ήλιου. Ο Ήλιος αποτελείται από θερμή αέρια ύλη η οποία υπόκειται σε διαρκή πυρηνική σύντηξη [27].

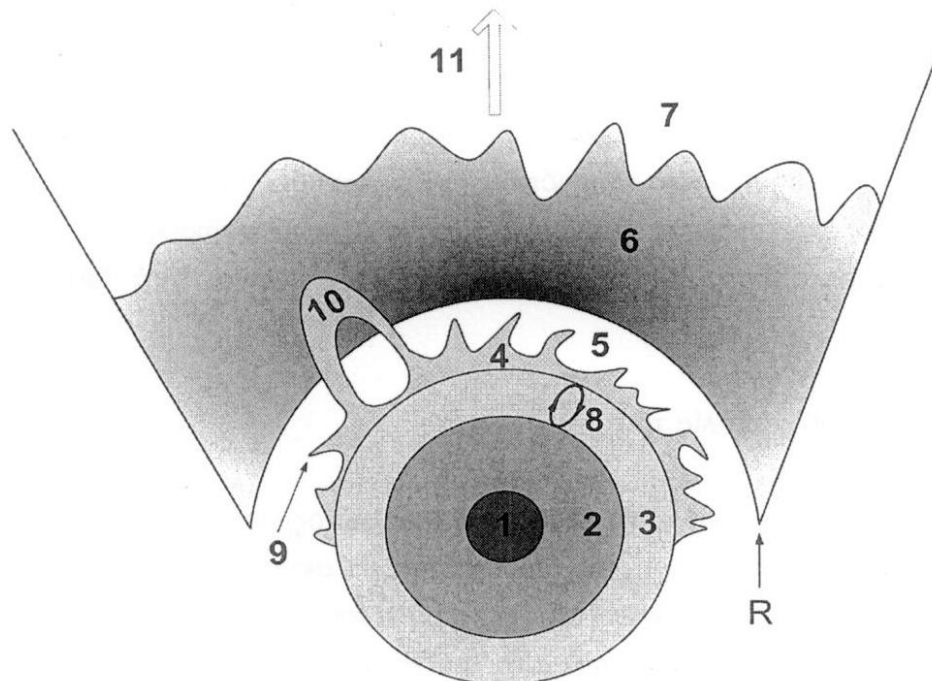
Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διατήρηση της ζωής στο ηλιακό μας σύστημα. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στη γη είναι μόλις το 1 προς 1 δισεκατομμύριο της συνολικής ενέργειας που παράγει ο ήλιος και ισούται κατά προσέγγιση με 420 τρισεκατομμύρια κιλοβατώρες. Είναι γεγονός ότι ο ήλιος είναι η πιο πλούσια και ανεξάντλητη –ανανεώσιμη- πηγή ενέργειας, το πλειοψηφικό ποσοστό της οποίας παραμένει ανεκμετάλλευτο. Με απτά αριθμητικά δεδομένα εκτιμάται ότι:

- Το ποσό ηλιακής ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της γης σε μια μέρα είναι 10.000 με 15.000 φορές περισσότερο από την συνολική παγκόσμια ημερήσια κατανάλωση.
- Μέσα σε μια ώρα η γη λαμβάνει αρκετή ηλιακή ενέργεια ώστε να καλύψει συνολικά τις ενεργειακές της ανάγκες για ένα περίπου έτος.
- Η ηλιακή ενέργεια που πέφτει πάνω σε ένα τετραγωνικό μέτρο κάθε χρόνο ισοδυναμεί ενεργειακά με ένα βαρέλι πετρέλαιο, που εν αντιθέσει με τον ήλιο αποτελεί ρυπογόνα και συμβατική πηγή ενέργειας με αποθέματα διαρκώς και ταχύτατα μειούμενα [28].

Ο Ήλιος έχει διάμετρο ίση με  $1,36 \cdot 10^6$  km κα περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του μία φορά κάθε τέσσερις εβδομάδες περίπου (όπως φαίνεται από τη Γη). Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης πυκνότητας του Ήλιου, ο ισημερινός του περιστρέφεται μία φορά κάθε 25 έως 27 ημέρες, ενώ οι πολικές του περιοχές ολοκληρώνουν μία πλήρη περιφορά κάθε 30 έως 35 ημέρες. Στο εσωτερικό της σφαίρας με ακτίνα 0,23R βρίσκεται ο πυρήνας, ο οποίος περιέχει το 40% της μάζας του Ήλιου και στον οποίο δημιουργείται το 99% της ενέργειάς του. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του Ήλιου φτάνει τα  $8-40 \cdot 10^6$  K και η πυκνότητα του πυρήνα ισούται με  $80-150 \text{ g/cm}^3$ , δηλαδή είναι 80-150 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού στη γη. [27].

Ο ήλιος συνίσταται σε ένα μίγμα αερίων με κύριο συστατικό του το Υδρογόνο ( $^1H$ ). Μέσα από μια πλειάδα αυτοσυντηρούμενων θερμοπυρηνικών αντιδράσεων μετατροπής του υδρογόνου σε ήλιο (He) στο εσωτερικό του ουράνιου αυτού σώματος, η μάζα μετατρέπεται σε ενέργεια και εκπέμπεται στο σύμπαν κυρίως μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αλλά και δευτερευόντως με σωματιδιακή μορφή. Το συγκεκριμένο ουράνιο σώμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένας αντιδραστήρας σύντηξης του οποίου τα τοιχώματα αποτελούνται από θερμά αέρια που συγκρατώνται

από βαρυτικές δυνάμεις. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο (He) εκλύεται ενέργεια ίση με  $U=1,67 \cdot 10^5$  kWh [28].

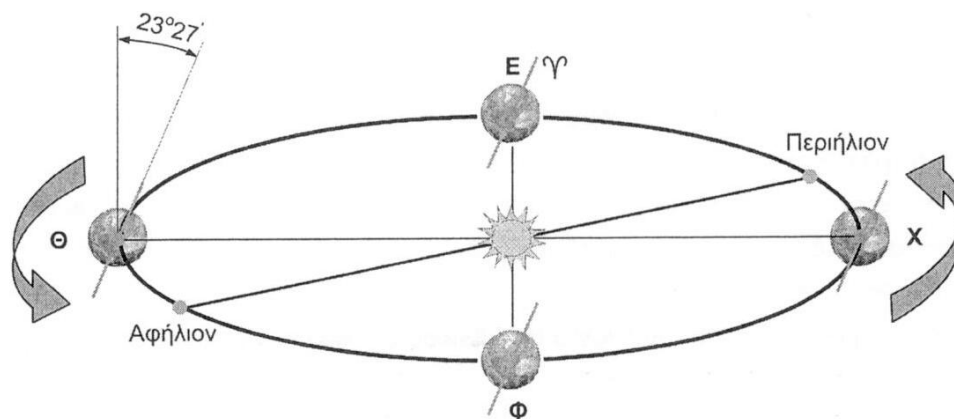


Σχήμα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα της δομής και της ατμόσφαιρας του ήλιου. Όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου. Όχι υπό κλίμακα. 1. Πυρήνας. 2. Ζώνη ακτινοβολίας 3. Ζώνη συναγωγής. Εσωτερικό (2+3) του ήλιου. 4. Φωτόσφαιρα. 5. Χρωμόσφαιρα. 6. Ηλιακό στέμμα. 7. Ηλιόσφαιρα. Σημειώνονται επίσης: 8. Κύκλοι συναγωγής. 9. Κηλίδες, κόκκοι και εκλάμψεις. 10. Ηλιακές προεξοχές. 11. Ηλιακός άνεμος [27].

### 3.2 Γεωμετρία ήλιου-γης

Η Γη κινείται σε μία ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο. Η τροχιά αυτή έχει μεγάλο άξονα μήκους  $a=149,6 \cdot 10^6$  km και εκκεντρότητα ίση με  $e=0,01673$ . Το επίπεδο που περιέχει αυτή την τροχιά ονομάζεται ελλειπτικό επίπεδο. Η Γη χρειάζεται ένα έτος (365 ημέρες) για να ολοκληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από τον Ήλιο. Ακόμη, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, τον πολικό άξονα, και ολοκληρώνει μία πλήρη ιδιοπεριστροφή σε 24 ώρες (1 ημέρα). Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο εκλειπτικό επίπεδο και τον πολικό άξονα της Γης διατηρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και ισούται με  $23,45^\circ$ . Η απόσταση που μεσολαβεί μεταξύ του κέντρου του ηλίου και του κέντρου της γης μεταβάλλεται κατά την περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο, στη διάρκεια του έτους. Η κοντινότερη απόσταση της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο σηματοδοτεί το περιήλιο (απόσταση ίση με  $147,1 \cdot 10^6$  km-1<sup>η</sup> Ιανουαρίου) ενώ η μακρινότερη απόσταση σηματοδοτεί το αφήλιο (απόσταση ίση με  $152,1 \cdot 10^6$  km-1<sup>η</sup> Ιουλίου). [27],[28].





Σχήμα 3.2 Η εκλειπτική τροχιά τη γης γύρω από τον ήλιο ολοκληρώνεται σε ένα αστρικό έτος (365 ημέρες) εισάγοντας τις τέσσερις εποχές. Οι εποχές δημιουργούνται από την αλλαγή της κλίσης του άξονα περιστροφής της γης ως προς την ακτίνα της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Στο σχήμα φαίνονται οι θέσεις των ηλιοστασίων για το θέρος και το χειμώνα, όπως επίσης και οι ισημερίες για το φθινόπωρο και την άνοιξη [27].

### 3.3 Η θέση του ήλιου ως προς ένα σημείο πάνω στη γη [27]

Μέχρι εδώ αναφερθήκαμε στην κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο. Εμείς όμως χρειαζόμαστε να υπολογίσουμε τη θέση του ήλιου από μία οποιαδήποτε τοποθεσία πάνω στη γη ώστε να προσδιορίσουμε την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το γνωστό σύστημα προσδιορισμού συντεταγμένων με βάση το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος.

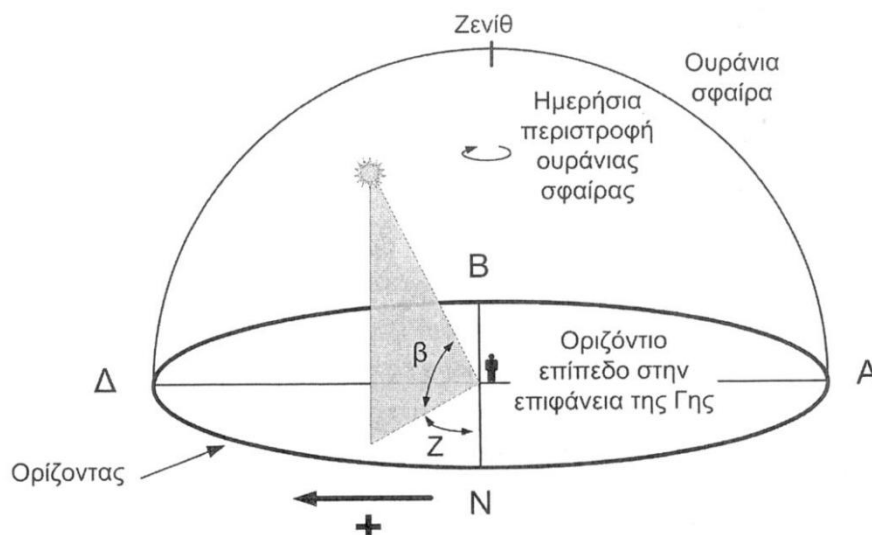
Στόχος είναι να καθορισθεί η θέση του Ήλιου με δύο γωνίες στο οριζόντιο σύστημα. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα να υπολογισθεί σχετικά απλά η διεύθυνση πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων επάνω σε ένα ηλιακό συλλέκτη που τοποθετείται σε συγκεκριμένη περιοχή στην επιφάνεια της γης.

#### 3.3.1 Ηλιακή απόκλιση, $\delta$

Η γωνία  $\delta$  που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού και της νοητής ευθείας που ενώνει τα κέντρα της γης και του ήλιου ονομάζεται ηλιακή απόκλιση. Η γωνία  $\delta$  μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια της παρακάτω απλής εξίσωσης:

$$\delta(^{\circ}) = 23,45^{\circ} \sin \left[ \frac{360^{\circ}}{365} (DoY + 284) \right] \quad (3.1)$$

όπου DoY είναι η ημέρα του ημερολογιακού έτους, η οποία μεταβάλλεται από 1 έως 365.



Σχήμα 3.3 Το οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων για παρατηρητή που βρίσκεται επάνω στην επιφάνεια της Γης και ατενίζει το νότο. Η θέση του ήλιου καθορίζεται από δύο γωνίες, το ύψος  $\beta$  και το αζιμούθιο  $Z$ . Η απόσταση ανάμεσα στην Γη και τον ήλιο δεν λαμβάνεται υπόψη. Σημειώνονται οι θετικές αξίες για το αζιμούθιο που είναι «προς δυσμάς του νότου» [27].

Ο όρος 284 στην (3.1) αποδίδει τον αριθμό των ημερών που απαιτούνται να παρέλθουν μετά την έναρξη του αστρονομικού έτους ώστε η θέση του ήλιου να αντιστοιχεί στην εαρινή ισημερία.

Μια εναλλακτική σχέση της (3.1) μπορεί επίσης να προκύψει από το γεγονός ότι η πρώτη ημέρα ενός ημερολογιακού έτους υπολείπεται κατά 81 ημέρες από την επερχόμενη εαρινή ισημερία, οπότε η σχέση υπολογισμού της ηλιακής απόκλισης γίνεται:

$$\delta(^{\circ}) = 23,45^{\circ} \sin \left[ \frac{360^{\circ}}{365} (DoY - 81) \right] \quad (3.1a)$$

Στη διάρκεια οποιασδήποτε ημερολογιακής ημέρας,  $DoY$ , οι σχέσεις (3.1) και (3.1a) παρέχουν ταυτόσημα αποτελέσματα ηλιακής απόκλισης ανεξαρτήτως ημισφαιρίου.

Η ηλιακή απόκλιση  $\delta$  είναι μηδέν και στις δύο ισημερίες, ενώ έχει τιμές  $23,45^{\circ}$  κατά το θερινό ηλιοστάσιο και  $-23,45^{\circ}$  κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο.

### 3.3.2 Η ηλιακή ώρα

Η ηλιακή ώρα έχει ως αναφορά τον Ήλιο και δεν ταυτίζεται με την τοπική ώρα. Προκειμένου να καθορισθεί σε έναν τόπο η ηλιακή ώρα  $T_{SOLAR}$  θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διορθώσεις που οφείλονται είτε στις διαφορετικές θέσεις επάνω στην επιφάνεια της γης είτε στις παρεκκλίσεις που προέρχονται από την ετήσια τροχιά της γης.

Για τον προσδιορισμό της ηλιακής ώρας εφαρμόζονται οι ακόλουθες δύο διορθώσεις:

- Η πρώτη διόρθωση αναφέρεται στη θέση του παρατηρητή επάνω στην επιφάνεια της γης. Προσδιορίζεται από τη διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στο

γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού του παρατηρητή  $L_{LOC}$  (π.χ. το γεωγραφικό μήκος του ΕΜΠ έχει την τιμή  $-23,73^\circ$ ) και το μεσημβρινός αναφοράς  $L_{ST}$  για τον καθορισμό της τοπικής ώρας (για την Ελλάδα αναλογεί ο μεσημβρινός  $L_{ST}=-30^\circ$  ο οποίος διέρχεται ανατολικά της Κωνσταντινουπόλεως). Για την κάθε τοποθεσία επάνω στη γη ο μεσημβρινός αναφοράς για τον καθορισμό της τοπικής ώρας  $L_{ST}$  μπορεί να προσδιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$L_{ST} = \frac{15^\circ}{h} \Delta T_{GMT} \quad (3.2)$$

όπου

$\Delta T_{GMT}$	η διαφορά μεταξύ της ώρας GMT (Greenwich Mean Time) και της τοπικής ώρας, που συνιστά ακέραιο αριθμό ωρών (π.χ. για την Ελλάδα =-2)
$L_{ST}$ 15°/h	ο μεσημβρινός αναφοράς για τον καθορισμό της τοπικής ώρας =360°/24 ώρες

- Η δεύτερη διόρθωση εισάγεται ανάλογα με την ημέρα του έτους, μέσω της λεγόμενης «εξίσωσης χρόνου»,  $E$ , και λαμβάνει υπόψη της τη μεταβολή της χρονικής διάρκειας (min) που απαιτεί ο ήλιος για να μεταφερθεί κατά μήκος της ηλιακής του τροχιάς στην ουράνια σφαίρα και να διανύσει τον ουρανό του παρατηρητή. Η διόρθωση που εισάγεται με την εξίσωση του χρόνου  $E$  αποδίδεται συνήθως από εμπειρικές σχέσεις της μορφής:

$$E = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (3.3)$$

όπου  $B$  η γωνία ημέρας που προσδιορίζεται με αναφορά την ημέρα κατά την οποία ο ήλιος θα εισέλθει στην εαρινή ισημερία και δίνεται από τη σχέση (3.4):

$$B = \frac{360^\circ}{364} (DoY - 81) \quad (3.4)$$

Από τα ανωτέρω μεγέθη υπολογίζεται η ηλιακή ώρα  $T_{SOLAR}$  σύμφωνα με την εξίσωση (3.5):

$$T_{SOLAR} = T_{LOCAL} + E + 4 \frac{min}{\circ} (L_{ST} - L_{LOCAL}) \quad (3.5)$$

όπου

$T_{SOLAR}$	η ηλιακή ώρα για δεδομένο τόπο, δεδομένη ημέρα, σε συγκεκριμένη ηλιακή θέση
$T_{LOCAL}$	η αντίστοιχη τοπική ώρα (χειμερινή)
$E$	η διόρθωση που εισάγεται από την εξίσωση χρόνου για την ημέρα υπολογισμού
$L_{ST}$	ο κεντρικός μεσημβρινός για την ώρα τοπικής ζώνης, $-30^\circ$ για την Ελλάδα
$L_{LOCAL}$	το γεωγραφικό μήκος της τοποθεσίας όπου προσδιορίζεται η ώρα.

### 3.3.3 Η ωριαία γωνία $\omega$

Στην αστρονομία η ωριαία γωνία συνιστά μία από τις συντεταγμένες του ισημερινού συστήματος συντεταγμένων, το οποίο χρησιμοποιείται προκειμένου να αποτυπώνονται οι θέσεις των αστερών επάνω στην ουράνια σφαίρα.

Η ωριαία γωνία ενός σημείου  $H$  είναι η γωνία  $\omega$  που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ημιεπιπέδων που ορίζονται από:

- Τον πολικό άξονα της γης και το ζενίθ της τοποθεσίας
- τον πολικό άξονα της γης και το σημείο που πρόκειται να περιγραφεί επάνω στην ουράνια σφαίρα

Η ωριαία γωνία  $\omega$  λαμβάνει αρνητικές τιμές ανατολικά του μεσημβρινού που εμπεριέχει το ζενίθ (πρωί) και θετικές τιμές δεξιά του (απόγευμα). Η γωνία ώρας σε πολλές εφαρμογές αντιστοιχίζεται με μονάδες χρόνου, καθώς οι 24 ώρες αντιστοιχούν σε  $360^\circ$ . Συνδυάζεται με την απόκλιση για την πλήρη περιγραφή μιας θέσης επάνω στην ουράνια σφαίρα.

Όταν η περιγραφόμενη θέση στην ουράνια σφαίρα ταυτίζεται με τη θέση του ήλιου, τότε ορίζεται η ηλιακή ωριαία γωνία. Συνεπώς, η ηλιακή γωνία ώρας,  $\omega$ , ορίζεται για ένα σημείο στην επιφάνεια της γης από τη γωνιακή μετατόπιση που πρέπει να ακολουθήσει η γη ως προς τον πολικό άξονά της προκειμένου ο τοπικός μεσημβρινός που διέρχεται από τη συγκεκριμένη περιοχή της γης, να βρεθεί ακριβώς κάτω από τον ήλιο. Για να συμβεί αυτό, ο ήλιος θα πρέπει να συμπέσει επάνω στο ημιέπιπεδο που ορίζεται από τον (πολικό) άξονα περιστροφής της γης και τη συγκεκριμένη περιοχή. Η γωνιακή μετατόπιση της γης ως προς τον άξονα περιστροφής της αναπαριστά χρόνο, με τη γωνία των  $15^\circ$  να αντιστοιχεί σε μία ώρα. Γενικά, για τη γωνία ώρας ισχύει ότι:

$$\omega = \frac{15^\circ}{h} (T_{SOLAR} - 12 h) \quad (3.6)$$

όπου:

$T_{SOLAR}$	η ηλιακή ώρα για το δεδομένο τόπο, τη δεδομένη ημέρα σε ώρες
$\omega$	η ηλιακή γωνία ώρας
12	η ώρα για την ηλιακή μεσημεμβρία (στο ζενίθ)
$15^\circ/h$	σταθερά αναλογίας ηλιακής γωνίας-ώρας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το πρωί αναλογούν αρνητικές αξίες, ενώ το απόγευμα αναλογούν θετικές αξίες της ηλιακής ωριαίας γωνίας  $\omega$ . Κατά τη στιγμή της ηλιακής μεσημεμβρίας ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ της περιοχής, οπότε από τη σχέση (3.6) προκύπτει ότι  $\omega = 0$ .

### 3.3.4 Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου

Γνωρίζοντας τη γωνία ώρας  $\omega$  είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το ύψος  $\beta$  στο οποίο βρίσκεται ο ήλιος ως εξής:

$$\sin\beta = \sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega = \cos\varphi_z \quad (3.7)$$

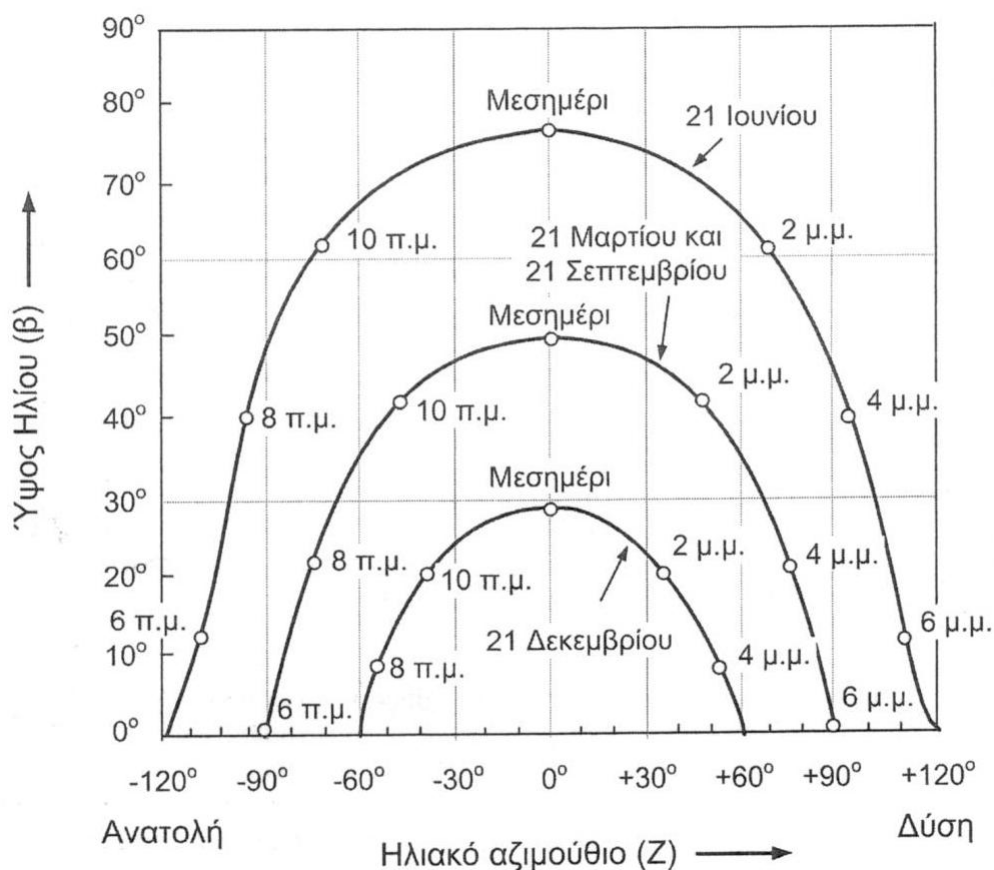
όπου

- $\beta$  (η γωνία για) το ύψος του ήλιου στη συγκεκριμένη περιοχή και ώρα,
- $\delta$  η ηλιακή απόκλιση της συγκεκριμένης ημερολογιακής ημέρας (DoY)
- $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος της συγκεκριμένης περιοχής
- $\omega$  η ηλιακή ωριαία γωνία που αναλογεί στην ώρα υπολογισμού της θέσης του ήλιου
- $\varphi_z$  η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης ως προς το τοπικό ζενίθ, συμπληρωματική της  $\beta$

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογισθεί η ηλιακή αζιμούθια γωνία,  $Z$ , ως εξής:

$$\cos Z = \frac{\sin\beta * \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\beta * \cos\varphi} \quad (3.8)$$

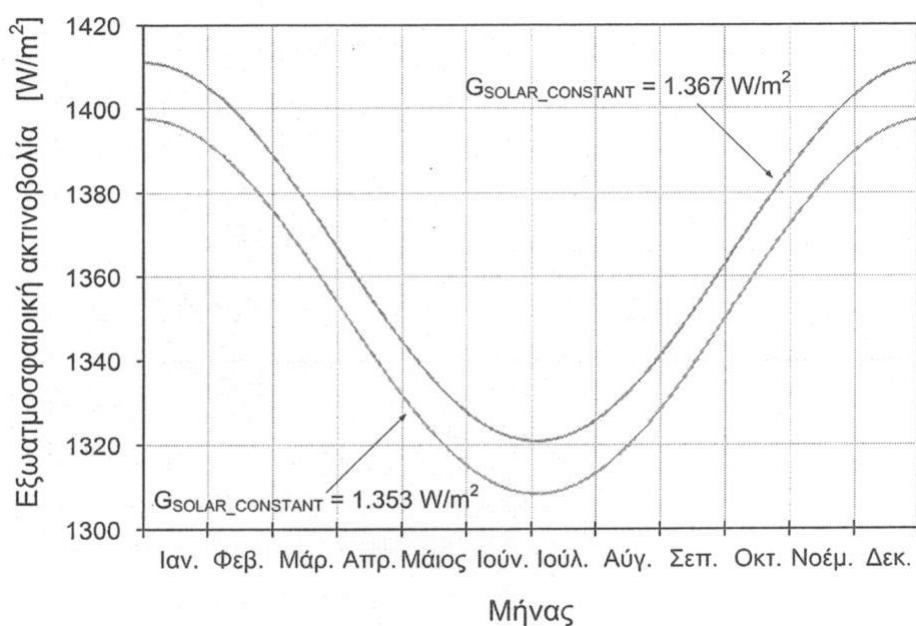
Διευκρινίζεται ότι όλες οι γωνίες στις σχέσεις (3.7) και (3.8) είναι σε μοίρες. Το επίπεδο αναφοράς είναι το οριζόντιο επίπεδο που εφάπτεται στο έδαφος στην επιφάνεια της γης. Στη θέση αυτή πρόκειται να εγκατασταθεί ο ηλιακός συλλέκτης.



Σχήμα 3.4 Η μεταβολή του ηλιακού ύψους ( $\beta$ ) και της αζιμουθιακής γωνίας ως προς το νότο κατά τη διάρκεια των ηλιοστασίων και ισημεριών στην περιοχή των Αθηνών. Οι αρνητικές αζιμουθιακές γωνίες αφορούν μεταμεσημβρινές ώρες.

### 3.4 Η ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας [27]

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται εκτός της ατμόσφαιρας της γης (στο διάστημα) είναι σχεδόν σταθερή καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. Μία μικρή διακύμανση που παρατηρείται ανάλογα με το μήνα του έτους οφείλεται κυρίως σε ασημαντες μεταβολές της απόστασης που χωρίζει τον ήλιο από τη γη. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 3.5:



Σχήμα 3.5 Ετήσια απόκλιση της ακτινοβολίας στο διάστημα  $G_{EXTRA\ TERRESTRIAL}$  πάνω από την ατμόσφαιρα της γης. Οι όποιες μικρές αποκλίσεις από την τιμή για την ηλιακή σταθερά,  $G_{SOLAR\ CONSTANT}$  οφείλονται στην εκκεντρότητα της τροχιάς της γης δηλαδή στη μεταβλητότητα της απόστασης μεταξύ ήλιου και γης. Συνεκτιμάται η επίδραση της τιμής για την ηλιακή σταθερά.

### 3.5 Η επίδραση της ατμόσφαιρας

Το φάσμα του ήλιου τροποποιείται ελαφρά πριν φτάσει στη γη. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διεισδύει στην ατμόσφαιρα και μεταφέρεται προς την επιφάνεια της γης, μέρος της απορροφάται ή υπόκειται σε σκέδαση από τα μόρια του αέρα, τους υδρατμούς η/και τους σωματιδιακούς ρύπους [27].

Η συγκεκριμένη επίδραση εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής που θα διανύσει το φως μέσα στην ατμόσφαιρα. Το μετρητικό μέγεθος εν προκειμένω είναι η ονομαζόμενη μάζα αέρα (air mass), που ισούται με το λόγο της διαδρομής του φωτός μέσα στην ατμόσφαιρα προς το πάχος της ατμόσφαιρας. Ως πρότυπο μήκος διαδρομής ορίζεται το μήκος της κάθετου διαδρομής μέσα στην ατμόσφαιρα που καταλήγει στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου ισχύει air mass=1 (AM1) ενώ το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται με τη συντεταγμένη έκφραση AM0 (Air Mass 0). Το μήκος διαδρομής (air mass) που ακολουθεί η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανάλογο προς την τέμνουσα της αζιμούθιας γωνίας. Καθορίζει ουσιαστικά την ελάττωση της έντασης του φωτός, που προκαλείται από το μεγαλύτερο δρόμο, σε σχέση με τον πρότυπο, που διανύουν σ' αυτή την περίπτωση, οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η γωνία πρόσπτωσης  $\gamma_s$  σχετίζεται με την αέρια μάζα AM σύμφωνα με την εξίσωση (3.10):

$$AM = \frac{1}{\cos(90 - \gamma_s)} \quad (3.10)$$

όπου

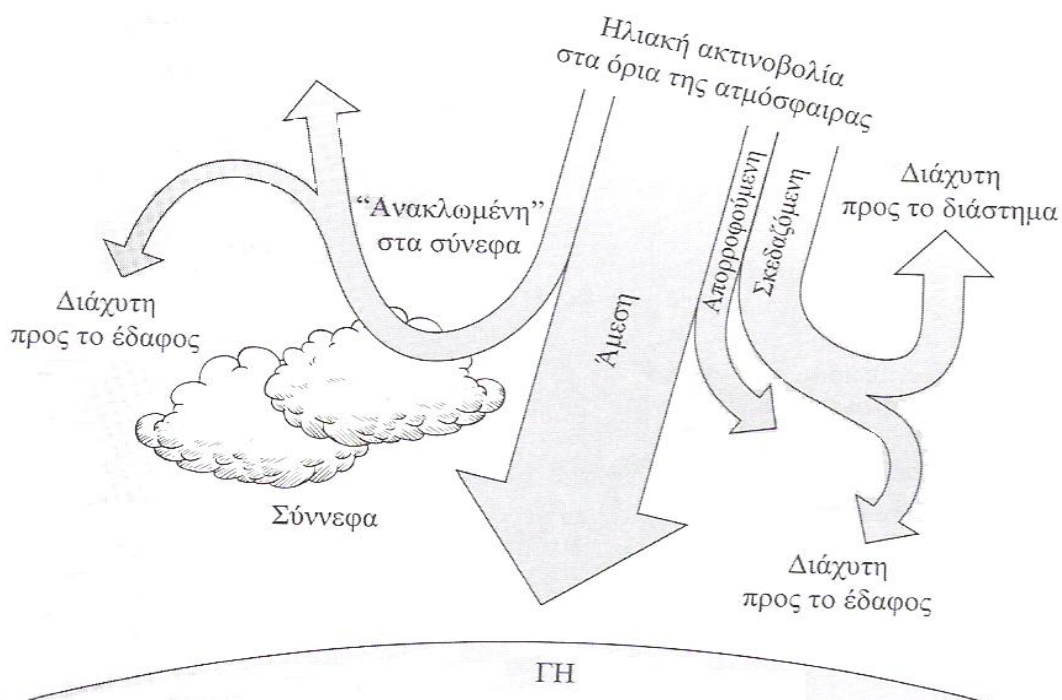
- AM μέγεθος που καθορίζει τη φασματική ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφει την πορεία της άμεσης δέσμης μέσα στην ατμόσφαιρα.
- $\gamma_s$  η γωνία πρόσπτωσης που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης δέσμης και του οριζόντιου επιπέδου. Για οριζόντιο επίπεδο συλλέκτη, η γωνία πρόσπτωσης  $\gamma_s$  ταυτίζεται με τη γωνία ύψους  $\beta$  της συγκεκριμένης περιοχής.

### 3.6 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα [28]

Σε κάθε τόπο στην επιφάνεια της γης προκύπτει η ηλιακή ακτινοβολία υπό τις παρακάτω πιθανές μορφές:

- **Άμεση ή ακτινοβολία δέσμης (direct or beam radiation-B)** είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης χωρίς να υφίσταται σκέδαση.
- **Διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation-D)** ονομάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που υφίσταται σκέδαση.
- **Ανακλώμενη ακτινοβολία (albedo)** ονομάζεται η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από την επιφάνεια της γης.

Το άθροισμα των τριών παραπάνω συνιστωσών ονομάζεται **ολική ακτινοβολία (global radiation-G)**.



Σχήμα 3.6 : Η ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο της γης

### 3.7 Το μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-Klein-Duffie [27]

Οι περισσότεροι σταθμοί παρατήρησης/καταγραφής της ηλιακής ακτινοβολίας παρέχουν τιμές που αφορούν στη συνολική ακτινοβολία μιας περιοχής επί οριζοντίου εδάφους. Τα μοντέλα κατάτμησης έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να μπορούν να υπολογίζουν τη διάχυτη συνιστώσα, και κατ' επέκταση τη συνιστώσα της



άμεσης ηλιακής δέσμης, όταν υπάρχουν οι ωριαίες τιμές μετρήσεων για τη συνολική ακτινοβολία επί του οριζοντίου εδάφους. Τα διάφορα μοντέλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν τους αδιάστατους συντελεστές,  $k_i$ , που χαρακτηρίζουν τη μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από την ατμόσφαιρα και ορίζονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$k_t = \frac{G_{GLOBAL}}{G_{EXTRA\_TERRESTRIAL}}, \quad k_d = \frac{G_{DIFF}}{G_{GLOBAL}}, \quad k_D = \frac{G_{DIFF}}{G_{EXTRA\_TERRESTRIAL}}, \quad k_b = \frac{G_{BEAM}}{G_{EXTRA\_TERRESTRIAL}} \quad (3.11)$$

όπου:

$k_t$	Ο δείκτης αιθριότητας (καθαρότητας) της ατμόσφαιρας (clearness index)
$k_d$	Το κλάσμα διάχυσης (diffuse fraction)
$k_D$	Ο συντελεστής διάχυσης (diffuse coefficient)
$k_b$	Η άμεση διάδοση
$G_{GLOBAL}$	Η μέση ωριαία τιμή συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
$G_{DIFF}$	Μέση ωριαία τιμή διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
$G_{BEAM}$	Μέση ωριαία τιμή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στη διεύθυνση της δέσμης στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )
$G_{EXTRA\_TERRESTRIAL}$	Μέση ωριαία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας στο Διάστημα (AM0) σε επιφάνεια παράλληλη προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους, για την καθορισμένη μέρα και ώρα ( $\text{MJ.m}^{-2}$ )

Οι τιμές των  $G_j$  προκύπτουν από χρονική ολοκλήρωση για το διάστημα της συγκεκριμένης ώρας. Γι' αυτές χρησιμοποιείται ο όρος «insolation». Βρέθηκε ότι το μοντέλο που δημοσιεύτηκε από τους Erbs, Klein και Duffie [80] αποδίδει καλύτερα στα γεωγραφικά πλάτη μεταξύ  $31^\circ$  και  $42^\circ$  (στα οποία εμπίπτει η χώρα μας) και για μεσαίου εύρους γωνίες του ηλιακού ζενίθ ( $50^\circ$ - $65^\circ$ ). Σε αυτό το μοντέλο, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $G_{BEAM}$  ορίζεται μέσα από την παρακάτω εξίσωση (3.12):

$$G_{BEAM} = G_{GLOBAL} \cdot \frac{1 - k_d}{\sin \beta} \quad (3.12)$$

όπου:

$k_d$	Το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας
$\beta$	Η γωνία ύψους του ήλιου τη στιγμή του υπολογισμού
$G_{GLOBAL}$	Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται οριζόντιο επίπεδο στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη ημέρα και ώρα
$G_{BEAM}$	Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στη διεύθυνση της δέσμης στο έδαφος, για τη συγκεκριμένη περιοχή, ημέρα και ώρα

Το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας,  $k_d$ , αποτελεί μία εμπειρική συνάρτηση που εξαρτάται: (i) από το δείκτη αιθριότητας της ατμόσφαιρας,  $k_t$ , ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί, και (ii) από την άμεση ακτινοβολία,  $G_{\text{BEAM}}$ .

Το κλάσμα διάχυσης,  $k_d$ , ορίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0,09 \cdot k_t & \text{για } k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 \cdot k_t + 4,388 \cdot k_t^2 - 16,638 \cdot k_t^3 + 12,336 \cdot k_t^4 & \text{για } 0,22 < k_t < 0,8 \\ 0,165 & \text{για } k_t \geq 0,8 \end{cases} \quad (3.13)$$

Οι παραπάνω περιοχές του δείκτη αιθριότητας θα μπορούσαν να περιγραφούν ως «ουρανός χωρίς σύννεφα» για την κατηγορία  $k_t \geq 0,8$ , συνεφιασμένος ουρανός για τη μεσαία περιοχή ( $0,22 < k_t < 0,8$ ) και «πολύ συνεφιασμένος ουρανός» για τη χαμηλή περιοχή ( $k_t \leq 0,22$ ).

Ο δείκτης αιθριότητας  $k_t$ , προσδιορίζεται με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$k_t = \frac{G_h}{G_{h,oa}} \quad (3.15)$$

όπου:

$G_h$  Η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο επί του εδάφους  
 $G_{h,oa}$  Η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο παράλληλο προς το έδαφος έξω από την ατμόσφαιρα της γης στο Διάστημα

Η εξίσωση αυτή είναι ισοδύναμη της εξίσωσης (3.12).

Η βασική διαφορά μεταξύ  $G_h$  και  $G_{h,oa}$  έγκειται στο ότι η συνολική ακτινοβολία στο έδαφος  $G_h$  περιλαμβάνει και την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα, ενώ στο διάστημα έξω από την ατμόσφαιρα της γης η συνολική ακτινοβολία  $G_{h,oa}$  περιλαμβάνει μόνο την άμεση δέσμη (αφού δεν υπάρχει ατμόσφαιρα για να προκληθεί διάχυση).

Η ακτινοβολία στο έδαφος ( $G_h$ ) δίνεται από τις μετεωρολογικές πληροφορίες (ΤΜΥ), ενώ η ακτινοβολία στο Διάστημα ( $G_{h,oa}$ ) πρέπει να υπολογιστεί. Για να γίνει αυτό, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η γωνία ημέρας,  $B$ , που ορίζεται ως εξής:

$$B = 360^\circ \cdot \frac{DoY - I}{365} \quad (3.16)$$

όπου:

$B$  Η γωνία ημέρας ( $^\circ$ )  
 $DoY$  Η ημέρα του έτους για την οποία υπολογίζεται η γωνία  $B$

Ο παράγοντας εκκεντρότητας  $E_o$  του Ήλιου λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην απόσταση μεταξύ Γης-Ήλιου στις διάφορες ημέρες του έτους και μπορεί να υπολογιστεί μέσα από τις σειρές Fourier του Spencer, με τον ακόλουθο τύπο:

$$E_o = 1,0001 + 0,034221 \cdot \cos B + 0,00128 \cdot \sin B + 0,000719 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sin 2B \quad (3.17)$$

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (AM0) που λαμβάνεται κάθετα στην ηλιακή δέσμη, σε θέση μόλις πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης, στο Διάστημα, δίνεται από το γινόμενο:

$$G_{EXTRA\_TERRESTRIAL} = E_o \cdot G_{SC} \quad (3.18)$$

όπου:

$G_{EXTRA\_TERRESTRIAL}$	Η ηλιακή ακτινοβολία (AM0) στο Διάστημα μόλις έξω από την ατμόσφαιρα της Γης. Στη θέση αυτή υπάρχει μόνο η άμεση δέσμη ( $G_{TOTAL} = G_{BEAM}$ ),
$E_o$	Ο παράγοντας εκκεντρότητας του Ήλιου
$G_{SC}$	Η ηλιακή σταθερά. Σήμερα έχει υιοθετηθεί η τιμή $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$

Διευκρινίζεται ότι η γραφική παράσταση της εξίσωσης (3.18) ουσιαστικά παρέχει τα δεδομένα του Σχήματος 3.5. Η πολύπλοκη σειρά Fourier του Spencer (3.17) παρέχει την εκκεντρότητα της εκλειπτικής τροχιάς (δηλαδή τη μεταβολή της απόστασης Γης-Ήλιου στη διάρκεια ενός έτους).

Η ακτινοβολία  $G_{h,oa}$  που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους όταν μετατοπιστεί παράλληλα προς το διάστημα, σε θέση μόλις πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης, παρέχεται από την κάθετη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Δοθείσης της γωνίας ύψους του Ήλιου στο έδαφος,  $\beta$ , για τη συγκεκριμένη ώρα και μέρα και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.18) λαμβάνουμε:

$$G_{h,oa} = E_o \cdot G_{SC} \cdot \sin \beta \quad (3.19)$$

όπου:

$G_{h,oa}$	Η κάθετη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας σε παράλληλο επίπεδο στο οριζόντιο έδαφος, αλλά στο διάστημα μόλις έξω από την ατμόσφαιρα της Γης
$E_o$	Ο παράγοντας εκκεντρότητας του Ήλιου όπως ορίστηκε στην εξίσωση (3.17)
$G_{SC}$	Η ηλιακή σταθερά, $G_{SC} = 1367 \text{ W/m}^2$
$\beta$	Το ύψος του Ήλιου για τη συγκεκριμένη μέρα και ώρα, όπως φαίνεται από την τοποθεσία που βρίσκεται ο συλλέκτης στη Γη

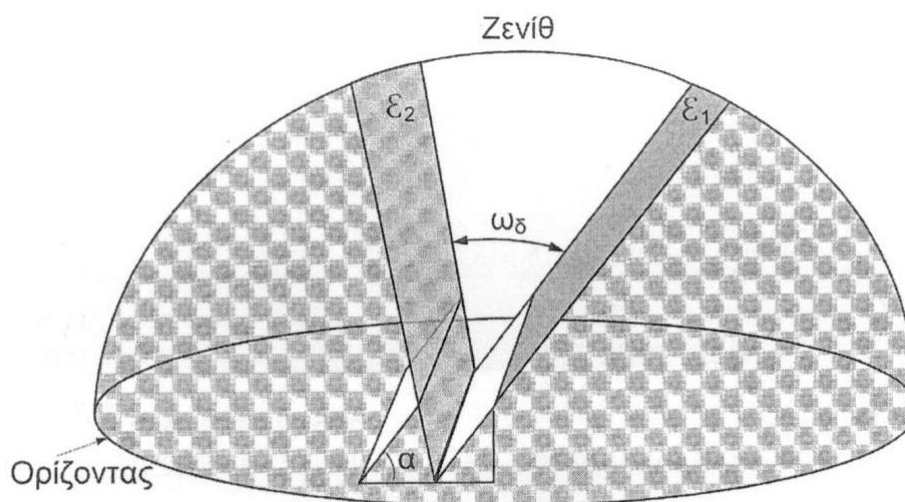
Η ακτινοβολία διάχυσης,  $G_{DIFF}$ , είναι απλώς η διαφορά ανάμεσα στη συνολική και την άμεση ακτινοβολία:

$$G_{DIFF} = G_{GLOBAL} - G_{BEAM} \quad (3.20)$$

### 3.8 Υπολογισμός της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο [27]

Η ακτινοβολία την οποία δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται συνήθως με τις αρχές και τις προσεγγίσεις του μοντέλου που δημοσίευσαν οι Lu και Jordan [81]. Ο λόγος γι' αυτό είναι η απλότητα και η σχετική ακρίβεια στον υπολογισμό της ακτινοβολίας.

Θεωρούμε ότι το επίπεδο πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στον κάθε συλλέκτη θα έχει μία ελεύθερη θέα κατά  $180^\circ$ , η οποία εκτείνεται από τον ορίζοντα έως το ζενίθ στον ουρανό και στη συνέχεια μέχρι το νοητό επίπεδο,  $E_1$ , που ορίζεται από τη γωνία κλίσης του συλλέκτη του Σχήματος 3.7. Το μοντέλο αυτό υπερεκτιμάει τη διάχυτη ακτινοβολία, αφού δε λαμβάνει υπόψη ότι μόνο ένα τμήμα της ουράνιας σφαίρας φαίνεται από τη δεύτερη (και κάθε επόμενη) συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών, όπως δείχνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.7. Επομένως, όταν δεν συνεκτιμάται η σημασία του επιπέδου  $E_2$  και της γωνίας  $\omega_\delta$  του Σχήματος 3.7, η υπολογιζόμενη προσπίπτουσα διάχυτη ακτινοβολία στις πίσω σειρές συλλεκτών θα προκύπτει υπερεκτιμημένη και οι επιδράσεις της άμεσης φωτοσκίασης θα έχουν υποεκτιμηθεί.



Σχήμα 3.7 Η γωνία του ουρανού που φαίνεται από τη δεύτερη εξ αριστερών συστοιχία, η οποία «βλέπει» τη διάχυτη ακτινοβολία μόνο στη λευκή περιοχή. Η ακτινοβολία διάχυσης από τις άλλες περιοχές του ουρανού δεν φθάνει στη δεύτερη συστοιχία.

Η μετατροπή της κάθε μίας συνιστώσας της ακτινοβολίας από την τιμή για το οριζόντιο προς αυτήν για το επικλινές επίπεδο του συλλέκτη θα πρέπει να γίνει χωριστά. Για την άμεση ακτινοβολία ο θεωρητικός προσδιορισμός της συνιστώσας που προσπίπτει στην επικλινή επιφάνεια του συλλέκτη πραγματοποιείται αφού συνεκτιμήσουμε την τιμή της γωνίας κλίσης του συλλέκτη,  $\alpha$ , και το ύψος,  $\beta$ , στο οποίο βρίσκεται ο Ήλιος.

Για τη συνιστώσα της άμεσης δέσμης χρησιμοποιούνται οι τριγωνομετρικές σχέσεις που προκύπτουν από τη γεωμετρία του Σχήματος 3.8:

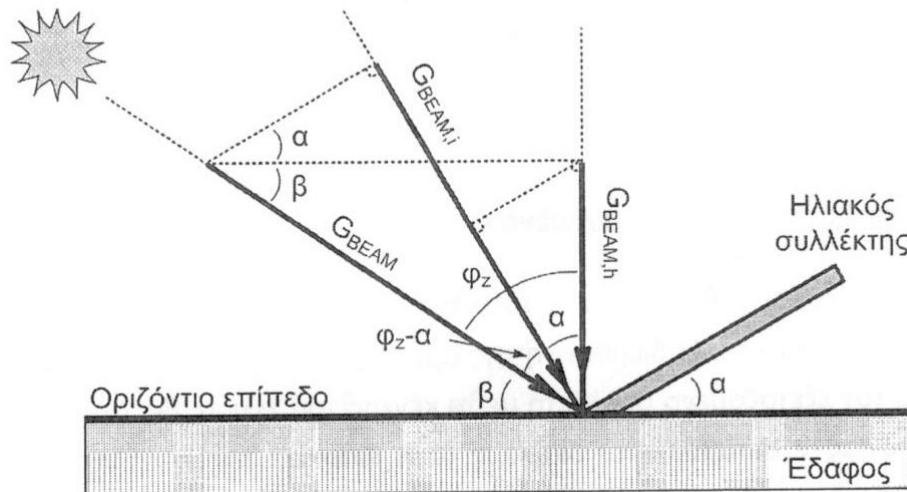
$$G_{BEAM, h} = G_{BEAM} \cdot \sin \beta \quad \text{και} \quad G_{BEAM, i} = G_{BEAM} \cdot \cos(\varphi_2 - \alpha) = G_{BEAM} \cdot \sin(\alpha + \beta) \quad (3.21)$$

Στη συνέχεια απαλείφοντας τον όρο  $G_{BEAM}$  λαμβάνουμε:

$$G_{BEAM,i} = G_{BEAM,h} \cdot \frac{\cos(\varphi_2 - \alpha)}{\sin \beta} = G_{BEAM,h} \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \beta} \quad (3.22)$$

όπου:

$G_{BEAM,h}$	(h = horizontal) η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο
$G_{BEAM,i}$	(i = inclined) η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
$\varphi_2$	Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης συνιστώσας ως προς το τοπικό ζενίθ, συμπληρωματική της γωνίας $\beta$
$\beta$	Η γωνία ύψους του ήλιου
$\alpha$	Η γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους



Σχήμα 3.8 Οι συνιστώσες της άμεσης ηλιακής δέσμης,  $G_{BEAM}$ , στο έδαφος, για διαφορετικά επίπεδα πρόσπτωσης: μεταφορά από το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους στον επικλινή ηλιακό συλλέκτη.

Για τη συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη,  $G_{DIFF,i}$ , μπορούμε να θεωρήσουμε ότι απαρτίζεται από δύο επιμέρους συνιστώσες: (i) τη μερική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από τη γωνία στον ουρανό που ορίζεται από τον ορίζοντα στο Νότο μέχρι το ζενίθ, ( $1/2 \cdot G_{DIFF,h}$ ), και (ii) τη μερική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας η οποία προέρχεται από το ζενίθ μέχρι το νοητό επίπεδο  $E_1$  (Σχήμα 3.7) που καθορίζεται από την επιφάνεια του συλλέκτη επεκτεινόμενη μέχρι τον ουρανό ( $1/2 \cdot G_{DIFF,h} \cdot \cos \alpha$ ). Η συνολική διάχυτη συνιστώσα στο επικλινές επίπεδο του συλλέκτη ορίζεται με επαλληλία:

$$G_{DIFF,i} = \frac{1}{2} \cdot G_{DIFF,h} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (3.23)$$

όπου:

$G_{DIFF,h}$	(h = horizontal) η συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο
$G_{DIFF,i}$	(i = inclined) η συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
$\alpha$	Η γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους

Η συνολική ακτινοβολία,  $G_{GLOBAL}$ , που προσπίπτει στη μη-σκιαζόμενη κεκλιμένη επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη θα αποτελείται από το άθροισμα της άμεσης δέσμης,  $G_{BEAM,i}$  και της διάχυτης ακτινοβολίας,  $G_{DIFF,i}$ , δηλαδή:

$$G_{GLOBAL,i} = G_{BEAM,i} + G_{DIFF,i} \quad (3.24)$$

όπου:

$G_{GLOBAL,i}$	(i = inclined) η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένας κεκλιμένος ηλιακός συλλέκτης επί εδάφους
$G_{BEAM,i}$	(i = inclined) η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής δέσμης στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
$G_{DIFF,i}$	(i = inclined) η συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, την οποία δέχεται το επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη

### 3.9 Η γωνία πρόσπτωσης σε κεκλιμένο επίπεδο [27]

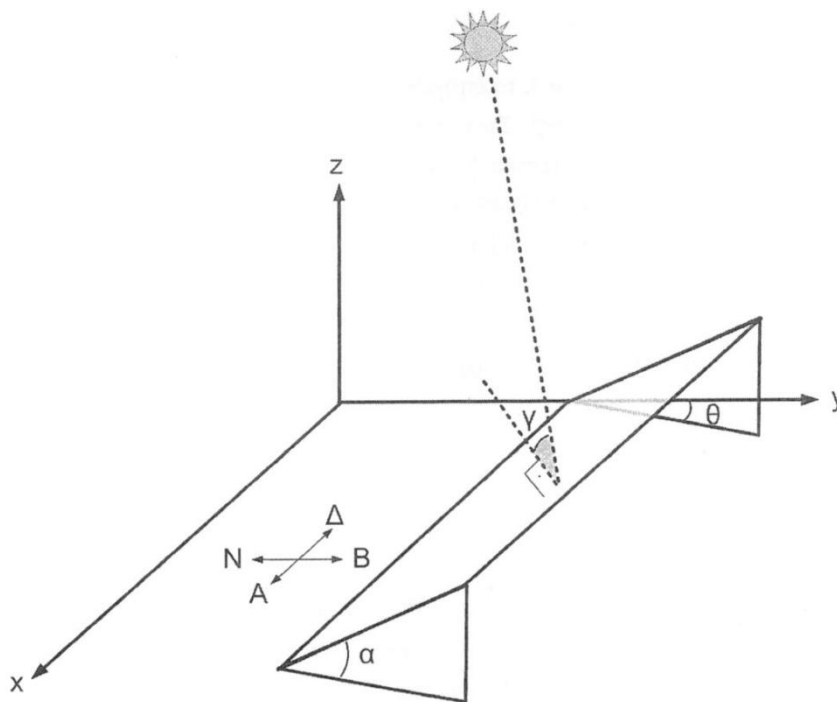
Η γωνία πρόσπτωσης,  $\gamma$ , ορίζεται μεταξύ της άμεσης δέσμης,  $G_{BEAM}$ , και της καθέτου στην επιφάνεια του συλλέκτη. Η διεύθυνση της άμεσης δέσμης καθορίζεται από τη νοητή ευθεία που ενώνει τον εξεταζόμενο συλλέκτη με το κέντρο του Ήλιου. Για ένα σταθερό συλλέκτη, η τομή της γωνίας  $\gamma$  μεταβάλλεται διαρκώς (στη διάρκεια της ημέρας). Η μέγιστη συλλογή ενέργειας από ένα συλλέκτη επιταχύνεται όταν ισχύει  $\gamma = 0$ .

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε κάθε στιγμή τη γωνία πρόσπτωσης  $\gamma$ , ανάμεσα στην εισερχόμενη άμεση ηλιακή ακτινοβολία και το συλλέκτη. Ο συλλέκτης συνήθως βλέπει προς την κατεύθυνση του Ισημερινού, παρ' όλα αυτά εφαρμόζεται κάποιες φορές μία μικρή έλλειψη ευθυγράμμισης,  $\theta$ , και έτσι μεγιστοποιείται η συλλεγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια μίας συγκεκριμένης περιόδου της ημέρας. Για παράδειγμα, όταν σε μία θέση εγκατάστασης το απόγευμα δημιουργούνται συνθήκες σκίασης, θα πρέπει να εξεταστεί η πιθανότητα εισαγωγής στους συλλέκτες αζιμούθιας γωνίας  $\theta$  (προς ανατολάς). Η κλίση του συλλέκτη καθορίζεται από τη γωνία  $\alpha$ . Αυτές οι γωνίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.9.

Στην περίπτωση του επικλινούς ηλιακού συλλέκτη, όπως αυτός του Σχήματος 3.9, η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην άμεση ηλιακή δέσμη,  $G_{BEAM}$ , και την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη ( $\gamma$ ) δίνεται από τη γενικευμένη εξίσωση:

$$\cos \gamma = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \theta \quad (3.25)$$

$\gamma$	Η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης δέσμης $G_{BEAM}$ σε κεκλιμένο ηλιακό συλλέκτη
$\delta$	Η γωνία ηλιακής απόκλισης
$\varphi$	Το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής του συλλέκτη
$\alpha$	Η γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο
$\theta$	Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ως προς το Νότο
$\omega$	Η ωριαία γωνία



Σχήμα 3.9 Ορισμός των γωνιών του συλλέκτη. Το σχήμα δείχνει τις γωνίες που συνδέουν τον κεκλιμένο ηλιακό συλλέκτη με το έδαφος, καθώς και την πηγή, δηλαδή τη γωνία  $\gamma$  που σχηματίζεται ανάμεσα στην άμεση ηλιακή δέσμη,  $G_{BEAM}$ , και την κάθετο στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη.

Η εξίσωση (3.25) συνδέει τις γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας με τις γωνίες του συλλέκτη και ενδεχομένως φαίνεται σύνθετη και πολύπλοκη, όμως είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τις περισσότερες από τις περιπτώσεις των ηλιακών εφαρμογών.

### 3.10 Μία μέθοδος για την παραγωγή συνθετικών ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας οπουδήποτε στον πλανήτη [29]

#### 3.10.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση και η σχεδίαση μετατροπέων ηλιακής ενέργειας με προσομοίωση από υπολογιστή γενικά απαιτεί μία χρονική ακολουθία ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας για την τοποθεσία, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδος στο

πρόγραμμα ηλιακής προσομοίωσης. Για πολλές τοποθεσίες παγκόσμια, όμως, ιστορικά δεδομένα με επαρκή λεπτομέρεια είτε δεν υπάρχουν είτε τα περιορισμένα δεδομένα που υπάρχουν είναι αμφισβητούμενης ποιότητας και έχουν έλλειψη αρκετών τιμών. (Η παροχή δεδομένων ποιότητας, χωρίς τιμές που λείπουν είναι πράγματι σπάνια.) Οπότε το εύρος της εφαρμογής αυτών των διαδεδομένων και πολύ χρήσιμων υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης περιορίζεται.

Όμως η διαδικασία της σχεδίασης μέσω προσομοίωσης δεν χρειάζεται απαραίτητα να περιορισθεί στη χρήση μετρημένων ιστορικών δεδομένων ως είσοδο. Πριν μερικά χρόνια, οι Graham et al. [30] πρότειναν την αντικατάσταση των ιστορικών δεδομένων με συνθετικά σετ τιμών ακτινοβολίας που παρήχθησαν με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων της διαδικασίας της ακτινοβολίας. Πρότειναν μία μεθοδολογία για την παραγωγή συνθετικών δεδομένων ακτινοβολίας, βασισμένη στη θεωρία των αυτοσυσχετιζόμενων χρονοσειρών [31]. Οι Agiar et al. [32] περιέγραψαν μία μεθοδολογία με παρόμοιες ικανότητες βασισμένοι στις «πιθανότητες μετάβασης» (transition probabilities).

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε από τους Graham et al. δεν ήταν πλήρης. Περιέγραψαν μία διαδικασία που ήταν ικανή να παράγει συνθετικά σετ των ημερησίων τιμών ακτινοβολίας. Για να καλύψει την ανάγκη των προγραμμάτων προσομοίωσης που χρειάζονται ωριαίες τιμές ακτινοβολίας, αυτή η ενότητα επεκτείνει το ημερήσιο μοντέλο ακτινοβολίας τους, παρέχοντας στοχαστικά μοντέλα για την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία με δεδομένες τις ημερήσιες τιμές.

#### 3.10.1.1 Παλαιότερες εργασίες

Προηγούμενοι ερευνητές είχαν επίσης προσπαθήσει να αναπτύξουν μοντέλα για την ωριαία ακτινοβολία. Οι Goh and Tan [33] χρησιμοποίησαν τις τεχνικές ARMA [31] για μία ετήσια ακολουθία ωριαίων δεδομένων ακτινοβολίας από τη Σιγκαπούρη. Ο Paassen [34] μοντελοποίησε τα δεδομένα της ακτινοβολίας από την Ολλανδία κάνοντας **detrending** ημερησίων σετ από ωριαία δεδομένα και ξαναπαρουσιάζοντας τα ωριαία υπόλοιπα ως ένα μη συσχετιζόμενο σύνολο. Οι Hittle and Pedersen [35] μελέτησαν μία αλυσιδωτή ακολουθία ωριαίας απευθείας ακτινοβολίας και χρησιμοποίησαν σειρές Fourier για να περιγράψουν ντετερμινιστικές τάσεις στο ετήσιο σύνολο, και την στοχαστική τεχνική ARMA για την τυχαία συνιστώσα. Οι Balouktsis and Tsaides [36] αφαίρεσαν την ημερήσια και την ετήσια περιοδικότητα από την ωριαία ακτινοβολία στην Ελλάδα, χρησιμοποιώντας ανάλυση Fourier, και μοντελοποίησαν μία αλυσιδωτή σειρά υπολοίπων ηλιακής ακτινοβολίας

Η σημαντικότερη αδυναμία αυτών των μελετών είναι ότι μελέτησαν την ίδια την τυχαία μεταβλητή της ακτινοβολίας. Η μεταβλητή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι συγκεκριμένη για μία δεδομένη τοποθεσία, και τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χωρίς σωστό λογαριασμό για το τοπικό γεωγραφικό πλάτος και τις αλλαγές στις τοπικές καταστάσεις τις ατμόσφαιρας είναι βέβαιο ότι θα είναι εφαρμόσιμες μόνο στις περιοχές που μελετήθηκαν. Επισημαίνουμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας της γης μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς για κάθε ώρα: είναι η ατμόσφαιρα εκείνη η οποία εισάγει τη στοχαστικότητα. Αυτά τα επιχειρήματα αναγνωρίστηκαν νωρίς από τους Liu and Jordan [37] οι οποίοι μελέτησαν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, χρησιμοποιώντας την ατμοσφαιρική διαπερατότητα ως την τυχαία μεταβλητή αντί για την ίδια την ακτινοβολία. (Η ατμοσφαιρική διαπερατότητα, που λέγεται επίσης και δείκτης αιθριότητας, συμβολίζεται με  $k_i$  για τα ωριαία γεγονότα και με  $K_i$  για τα ημερήσια



γεγονότα.) Οι Liu and Jordan ανέφεραν ότι τα πιθανολογικά χαρακτηριστικά αυτής της μεταβλητής συμπεριφέρονται με έναν οιονεί καθολικό τρόπο.

Ο DageIman [38] προσπάθησε να μοντελοποιήσει το ωριαίο γεγονός χρησιμοποιώντας το δείκτη αιθριότητας ως τυχαία μεταβλητή. Δημιούργησε ωριαία γεγονότα χρησιμοποιώντας τις καμπύλες κατανομών πιθανότητας και εκτίμησε τις ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας μέσω αυτών. Η έρευνά του, όμως, δεν βασίστηκε σε μία εγκεκριμένη στοχαστική μεθοδολογία· η συσχέτιση μεταξύ των ημερήσιων γεγονότων καθορίστηκε από τυχαία σκίτσα από μία κατανομή Gauss και τα στατιστικά και στοχαστικά χαρακτηριστικά μεταξύ των ωριαίων γεγονότων δεν εκτιμήθηκαν.

Ο Excell [39] μοντελοποίησε δεδομένα από την Ταϋλάνδη χρησιμοποιώντας το λόγο της ωριαίας ακτινοβολίας προς την ακτινοβολία του καθαρού ουρανού, που είναι κοντά στη μεταβλητή του δείκτη αιθριότητας. Αλλά δεν έλαβε υπόψη τις αυτοσυσχετίσεις στις τυχαίες συνιστώσες των μεταβλητών που μελέτησε. Οι Mustacchi et al. [40] χρησιμοποίησαν μοντελοποίηση ARMA για την ωριαία μεταβλητή του δείκτη αιθριότητας. Όμως το έκαναν συνδέοντας σε σειρά σύνολα από ωριαία γεγονότα από διαδοχικές μέρες ώστε να σχηματίσουν ετήσιες σειρές συνεχόμενων γεγονότων. Η σύνδεση σε σειρά ημερησίων συνόλων με ένα τέτοιο τρόπο, ενώνοντας ωριαία δεδομένα του δείκτη αιθριότητας ανατολής και δύσης του ηλίου για διαδοχικές ημέρες, θα αλλάξει την δομή συσχέτισης και οπότε θα παράγει μη αντιπροσωπευτικά δεδομένα. Η εφαρμογή μιας στοχαστικής διαδικασίας ARMA σε ακολουθίες που έχουν συνδεθεί σε σειρά επίσης υποθέτει (λανθασμένα) ότι οι στοχαστικές και στατιστικές ιδιότητες των ωριαίων γεγονότων είναι σταθερές σε όλα τα μέρη της συνεχόμενης ακολουθίας των γεγονότων. Η κατάλληλη αντιπροσώπευση της ωριαίας διαδικασίας απαιτεί ότι η κάθε μεταβλητότητα στην ακολουθία προσιδιάζει στην σωστή αντιπροσώπευση των διαφορετικών μερών της σειράς.

### 3.10.1.2 Διαφορετικά πιθανολογικά χαρακτηριστικά του ωριαίου δείκτη αιθριότητας

Η εξέλιξη των ωριαίων τιμών του  $k_t$  θα μπορούσε να περιγραφεί επαρκώς μόνο από μοντέλα για την συνάρτηση κατανομής τους αν αυτά τα ωριαία δεδομένα ήταν ανεξάρτητα. Αλλά για μη ανεξάρτητα γεγονότα, όπως είναι οι περιπτώσεις των  $k_t$  χρειάζονται επιπλέον πληροφορίες για τους παράγοντες που επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης. Χρησιμοποιείται η ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων για την ταυτοποίηση αυτών των παραγόντων και την ένταξή τους σε μαθηματικές εκφράσεις.

Η ανάπτυξη κλασικών στοχαστικών μοντέλων (π.χ. τεχνικές Box-Jen-kins [31]) χρησιμοποιεί συχνά την υπόθεση ότι η (οριακή και σειριακή) δομή πιθανότητας της διαδικασίας της τυχαίας μεταβλητής μεταβάλλεται με το χρόνο (δηλαδή η σειρά είναι στάσιμη)· ο μόνος παράγοντας (εκτός από την κατανομή της συχνότητας) που επηρεάζει την πιθανότητα της τυχαίας μεταβλητής είναι η σχέση της με γεγονότα στα προηγούμενα χρονικά διαστήματα. Η εξέλιξη του ίδιου το  $k_t$ , όμως, δεν μπορεί να περιγραφεί από μία τέτοια τυπική διαδικασία. Για αυτό είναι γνωστό ότι η πιθανότητα των ημερησίων γεγονότων αλλάζει σε μηνιαία βάση και επίσης υπάρχουν στοιχεία ότι η πιθανότητα μιας συγκεκριμένης τιμής  $k_t$  θα εξαρτάται από τον ημερήσιο δείκτη αιθριότητας  $K_t$  για την ημέρα για την οποία συνέβη. Για παράδειγμα, η πιθανότητα απόκτησης υψηλών τιμών  $k_t$  για μία καθαρή ημέρα είναι μεγαλύτερη από ότι για μία συννεφιασμένη ημέρα. Αυτό σημαίνει ότι τα μεμονωμένα ωριαία γεγονότα μέσα σε μία δεδομένη ημέρα δεν μπορούν να διαχωριστούν από το συνολικό ημερήσιο γεγονός. Οπότε ο δειγματικός χώρος για συγκεκριμένα μέρη της ακολουθίας  $k_t$  μπορεί να μην είναι η ίδια όπως για άλλα μέρη. (Η σειρά δεν είναι στάσιμη.) Επίσης,

ο δειγματικός χώρος μπορεί ακόμα και να αλλάξει για περιόδους μικρότερες από μία ημέρα· μπορεί να εξαρτάται από τη θέση του ήλιου στον ουρανό όταν συμβαίνει ένα συγκεκριμένο  $k_t$ . Επομένως τα μοντέλα που είναι κατασκευασμένα απλώς αντιπροσωπεύοντας μία διαδοχική σειρά από ωριαία γεγονότα από μία στάσιμη στοχαστική διαδικασία μάλλον θα αποτύχουν να αναπαράγουν τις πιθανολογικές ιδιότητες που υπάρχουν στο ιστορικό σύνολο.

Αυτή η ενότητα περιγράφει μία μελέτη που εστιάζει στην ανάπτυξη ενός μοντέλου χρονικών σειρών για την ακολουθία  $k_t$  το οποίο να είναι ευέλικτο στη φύση του και να περιλαμβάνει τη διακυμαίνουσα φύση των πιθανολογικών χαρακτηριστικών του. Για την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου, μελετήθηκαν ξεχωριστά οι επιδράσεις των ιστορικών διεργασιών, του ημερησίου δείκτη αιθριότητας και του ηλιακού ζενίθ στην εξέλιξη των ωριαίων γεγονότων. Σε αυτό το δρόμο εκτιμήθηκαν οι στατιστικές και στοχαστικές ιδιότητες που προσιδιάζουν σε διαφορετικές τοποθεσίες και διαφορετικά επίπεδα του συνολικού ημερησίου δείκτη αιθριότητας. Φυσικά τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν θα απαιτούν τιμές του  $K_t$  ως είσοδο, πριν μπορέσουν να φανούν χρήσιμα στην παραγωγή ωριαίων γεγονότων. Αυτοί οι ημερήσιοι δείκτες αιθριότητας μπορούν οι ίδιοι να παραχθούν με τη χρήση ξεχωριστού στοχαστικού μοντέλου, όπως αυτό που αναπτύχθηκε πριν [30]. Εναλλακτικά, μπορούν να αποκτηθούν μέσω εξαιρετικών ημερησίων ιστορικών δεδομένων, όπου υπάρχουν. Πλήρεις λεπτομέρειες του μοντέλου που αναπτύχθηκε δίνονται στην εργασία του Graham [41].

### 3.10.2 Επιμερισμός του $K_t$ : μέση και τυχαία συνιστώσα

Για κάθε μέρα υπάρχει ένα διατεταγμένο σύνολο  $\{k_t\}$  ωριαίων τιμών του δείκτη αιθριότητας  $k_t$ . Δοθέντος του συνόλου και του αντίστοιχου συνόλου των τιμών της διατεταγμένης εξωατμοσφαιρικής ακτινοβολίας τότε ο ημερησιος δείκτης αιθριότητας  $K_t$  λαμβάνει μόνο μία μοναδική τιμή. Οπότε, για μία δεδομένη τοποθεσία και ημερομηνία, για κάθε  $\{k_t\}$  υπάρχει μία μοναδική τιμή για το  $K_t$ . Ο σκοπός μας είναι να αποκτήσουμε μηχανισμούς για την πραγματοποίηση της αντίστροφης διαδικασίας: η απόκτηση του συνόλου  $\{k_t\}$  από τη γνώση του  $K_t$ . Αυτή η δουλειά περιλαμβάνει τον επιμερισμό (δηλαδή το διαμοιρασμό μιας μεταβλητής με σταθερή άθροιση στις ώρες της ημέρας), με τη χρήση στοχαστικών μεθόδων. Η ιδέα του στοχαστικού επιμερισμού δεν είναι καινούρια· έχει εφαρμοσθεί για παράδειγμα στην υδρολογία, για τον καταμερισμό των ετήσιων εκτιμήσεων απορροής σε πιθανές μηνιαίες εκτιμήσεις [42,43].

Έχουν αναφερθεί μοντέλα στη βιβλιογραφία [44,45,46] τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό του συνόλου  $\{k_t\}$  βασιζόμενοι στο γεγονός ότι η ημέρα έχει καθαρό ουρανό. Αυτά τα ντετερμινιστικά μοντέλα υποθέτουν ότι η τυχαίες διακυμάνσεις είναι μικρές και μπορούν να αγνοηθούν. Για μη καθαρό ουρανό, όμως, οι τυχαίες διακυμάνσεις στο  $k_t$  είναι πιο σημαντικές, και η επίδρασή τους στην προσομοιωμένη απόδοση της ηλιακής συσκευής μπορεί να είναι σημαντική [41].

Η διακύμανση στα γεγονότα του  $k_t$  αποτελείται από δύο συνιστώσες: μία συνιστώσα τάσης (ή μέση συνιστώσα) και μία τυχαία συνιστώσα:

$$k_t = k_{tm} + a \quad (3.26)$$

Η μέση συνιστώσα  $k_{tm}$  αντιπροσωπεύει το δείκτη αιθριότητας αν η παρουσία των εξασθενητών ακτινοβολίας ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στην ημέρα·

είναι το γενικό πλαίσιο που παρατηρείται σε ένα ίχνος από σύνολα  $\{k_t\}$ . Η τυχαία συνιστώσα  $\alpha$  ενσωματώνει την επίδραση των μη προβλεπόμενων διαταραχών στους εξασθενητές ακτινοβολίας που προέρχονται κυρίως από την τυχαία νέφωση. Για μία καθαρή ημέρα (λίγα ή καθόλου σύννεφα) η τυχαία συνιστώσα θα είναι μικρή, αλλά για συννεφιασμένες ημέρες, αυτή η συνιστώσα θα είναι κυρίαρχη.

Ο επιμερισμός θα απαιτήσει την ταυτοποίηση και τον χαρακτηρισμό των συνόλων  $\{k_{tm}\}$  και  $\{\alpha\}$ , για όλες τις πιθανές τιμές του  $K_t$ . Μοντέλα για  $\{k_{tm}\}$  και  $\{\alpha\}$  θα κατασκευασθούν μελετώντας τα ωριαία ιστορικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν δέκα χρόνια ιστορικών ωριαίων τιμών ακτινοβολίας που μετρήθηκαν σε τρεις καναδικές πόλεις που έχουν πολύ διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά: Το Βανκούβερ (ακτή), Το Swift Current (ηπειρωτικό) και το Τορόντο (μεικτό). Τα δεδομένα για αυτές τις τοποθεσίες πάρθηκαν από την υπηρεσία ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος του Καναδά. Απομονώνοντας τα σύνολα  $\{k_t\}$  που αφορούν μέρες με παρόμοιο  $K_t$ , εκτιμήθηκε η επίδραση της διακύμανσης της συνολικής ημερήσιας αιθριότητας.

### 3.10.3 Κατασκευή μοντέλου για τη μέση συνιστώσα

Η συνιστώσα  $k_{tm}$  μπορεί και εκείνη να χωριστεί σε δύο συνιστώσες: την άμεση μέση συνιστώσα  $k_{bm}$  και την διάχυτη μέση συνιστώσα  $k_{dm}$ . Συνεπώς  $k_{tm} = k_{bm} + k_{dm}$ . Ο Hottel [45] μελέτησε την άμεση μέση συνιστώσα για καθαρή ατμόσφαιρα. Μεταχειρίζοντας την καθαρή ατμόσφαιρα ως ένα φασματικό μείγμα μαύρου, γκρίζου και καθαρών μερών, απέκτησε μία απλή εκθετική εξίσωση για τη μοντελοποίηση της διαπερατότητας της άμεσης συνιστώσας σαν μία συνάρτηση της αέριας μάζας. Ακολουθώντας το παράδειγμα αυτό, εφαρμόζουμε μία παρόμοια εξίσωση για την άμεση μέση συνιστώσα, επεκτείνοντας τη χρήση της σε όλες τις καταστάσεις του ουρανού:  $k_{bm} = a_0 + a_1 \exp(-\kappa m)$ , όπου  $m$  είναι η αέρια μάζα, που λαμβάνεται στο κέντρο της ώρας. Περιλαμβάνουμε το γενικό χαρακτήρα του ουρανού φτιάχνοντας τις παραμέτρους  $a_0$ ,  $a_1$  και  $\kappa$  (μοναδική) συναρτήσεις του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας  $K_t$ .

Ο δείκτης διάχυσης  $k_d$  έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι εξαρτάται ισχυρά από την άμεση διάδοση  $k_b$ . Πολλοί ερευνητές (π.χ. Hollands [47], Orgill and Hollands [48] και Iqbal [49]) έχουν μελετήσει αυτή την εξάρτηση και έχουν εξάγει μαθηματικές εξισώσεις για την θεμελιώδη της μορφή  $k_d(k_b)$ . Αυτή η δουλειά προτείνει ότι το  $k_{dm}$  μπορεί να είναι μία όμοια συνάρτηση του  $k_{bm}$ . Όμως, μελετώντας τις τάσεις στο σύνολο  $\{k_t\}$  σε διαφορετικά επίπεδα του  $K_t$ , παρατηρήσαμε ότι μεταβολές στο  $k_{tm}$  μέσα σε μία δεδομένη ημέρα ήταν σχετικά μέτριες και ότι το  $k_{tm}$  διατήρησε τον φθίνοντα εκθετικό χαρακτήρα του  $k_{bm}$  με την αύξηση της αέριας μάζας. Συνεπώς, μέσα σε μία δεδομένη ημέρα, μία απλή γραμμική προσέγγιση εφαρμόστηκε για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ  $k_{dm}$  και  $k_{bm}$ , στην οποία οι σταθερές εξαρτώνται από το  $K_t$  για την ημέρα.

Προκύπτει από όλα αυτά ότι το  $K_{tm}$  θα πρέπει να έχει τη μορφή:

$$k_{tm}(t) = \lambda + \varepsilon * \exp(-\kappa m) \quad (3.27)$$

Στην οποία οι παράμετροι  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  είναι μοναδικές συναρτήσεις του δείκτη αιθριότητας  $K_t$  για την εξεταζόμενη μέρα.

### 3.10.3.1 Εκτίμηση παραμέτρων

Οι παράμετροι  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  μπορούν να εκτιμηθούν από τα μετρημένα δεδομένα ακτινοβολίας μέσω μη γραμμικής παλινδρομικής ανάλυσης του  $k_{tm}$  σε σχέση με το  $m$ , με τη χρήση της εξίσωσης (3.27) ως η εξίσωση του μοντέλου. Όμως, αυτή η παλινδρομική ανάλυση μπορεί εξίσου να χρησιμοποιήσει το  $k_t$  αντί για το  $k_{tm}$  ως την ανεξάρτητη μεταβλητή, αφού η μέση τιμή του  $\alpha$  είναι μηδέν. Πράγματι, η παλινδρομική ανάλυση έδειξε τις τιμές των  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  που ελαχιστοποιούσαν, για ένα μεγάλο σύνολο παρατηρήσεων, την rms τιμή του  $k_t - k_{tm}$ , όπου το  $k_{tm}$  δίνεται από την εξίσωση (3.27).

Στην παλινδρομική διαδικασία επιδιώξαμε να συσχετίσουμε τα  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  με το συνολικό  $K_t$ . Ένας τρόπος να γίνει αυτό θα ήταν να σχηματίσουμε σύνολα από ημέρες στις οποίες το  $K_t$  παίρνει συγκεκριμένες τιμές (ή, ακριβέστερα, στους οποίες το  $K_t$  παίρνει τιμές σε ένα στενό εύρος), μετά να εκτιμήσουμε τα  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  με μία παλινδρομική ανάλυση στο σύνολο αυτό και να επαναλάβουμε τη διαδικασία για διάφορες συγκεκριμένες τιμές του  $K_t$  και μετά να αναπτύξουμε εμπειρικές σχέσεις οι οποίες περιγράφουν πως οι παράμετροι εξαρτώνται από το  $K_t$ . Αλλά αυτή η προσέγγιση δεν θα αποδώσει απαραίτητα τις βέλτιστες εκτιμήσεις. Καλύτερες εκτιμήσεις είναι εφικτές αν οι εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν τα  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  με το  $K_t$  αποκτηθούν εκ των προτέρων, και μετά ενταχθούν στην παλινδρομική δουλειά. Συνεπώς η παλινδρομική ανάλυση δεν θα εκτιμήσει τα  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  απευθείας αλλά μάλλον τις άγνωστες σταθερές στις αντίστοιχες εμπειρικές εκφράσεις τους.

Για να αναπτύξουμε τέτοιες εμπειρικές σχέσεις για τα  $\lambda(K_t)$ ,  $\varepsilon(K_t)$  και  $\kappa(K_t)$  θεωρήσαμε τη φυσική της μεταφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της ατμόσφαιρας, με τη χρήση του μοντέλου μικτού αερίου του Hottles για την ατμόσφαιρα σαν βάση. Το μοντέλο  $k_{tm}$  που επιλέχθηκε παραπάνω απαιτεί (για κάθε δεδομένη ημέρα) το  $K_{tm}$  να έχει σταθερή (και ελάχιστη) συνιστώσα ( $\lambda$ ) ανεξάρτητα από το ηλιακό ζενίθ, ακόμα και σε άπειρη αέρια μάζα. Αυτή η συνιστώσα αναπαριστά το διαφανές φασματικό παράθυρο το οποίο μοντελοποιεί τη μεταφορά της ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας. Το μέγεθος αυτού του παραθύρου θα εξαρτάται από την αιθριότητα της ημέρας. Καθώς το  $K_t$  πλησιάζει τη μονάδα, η ατμόσφαιρα θα γίνεται σχεδόν διαφανής, όλη η ακτινοβολία υποτίθεται ότι περνά μέσα από το παράθυρο· συνεπώς το  $\lambda$  θα πρέπει να προσεγγίζει το  $K_t$ , ενώ τα  $\kappa$  και  $\varepsilon$  θα προσεγγίζουν το μηδέν. Καθώς το  $K_t$  πλησιάζει το μηδέν, αντιθέτως, η ατμόσφαιρα γίνεται σχεδόν αδιαφανής (η μαύρη συνιστώσα του μοντέλου αερίου κυριαρχεί), καθώς η εξαφάνιση της ακτινοβολίας γίνεται μεγάλη και το παράθυρο υποτίθεται ότι κλείνει· οπότε το  $\lambda$  πρέπει να προσεγγίζει το  $K_t$  ενώ το  $\kappa$  πρέπει να προσεγγίζει το άπειρο (το  $\varepsilon$  είναι πεπερασμένο, αλλά το  $\varepsilon * \exp(-\kappa m)$  θα πηγαίνει επίσης στο μηδέν). Ακολουθώντας μία σειρά μελετών προκαταρκτικών μοντέλων διάκρισης και οδηγούμενοι από αυτά τα επιχειρήματα επιλέξαμε τις ακόλουθες εμπειρικές εκφράσεις:  $\lambda(K_t) = K_1 + b_0 K_t^3 (1 - K_t)$ ,  $\varepsilon(K_t) = b_1 (1 - K_t)$  και  $\kappa(K_t) = b_2 (1 - K_t) / K_t$ .

Οι σταθερές  $b_0$ ,  $b_1$  και  $b_2$  στο  $k_{tm}$  είχαν εκτιμηθεί με τη χρήση δεδομένων ακτινοβολίας από τις τρεις канаδικές πόλεις. Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν έδειξαν ότι το μοντέλο του  $k_{tm}$  είναι πολύ σημαντικό· για παράδειγμα, οι εκτιμήσεις  $b_0$ ,  $b_1$ , και  $b_2$  ήταν επίσης στατιστικά πολύ σημαντικές, ήταν πολλές φορές το τυπικό σφάλμα που σχετίζεται με τις εκτιμήσεις. (Αυτές οι εκτιμήσεις είχε παρατηρηθεί ότι ήταν πολύ συσχετισμένες μεταξύ τους· συνεπώς μέτριες αλλαγές σε ένα, που παράγει μία ισόβαθμη αλλαγή στο άλλο, με καμία επίπτωση στους συνολικές μεταβολές που εξηγήθηκαν από το μοντέλο.)

Όταν η διαδικασία της εκτίμησης των παραμέτρων επαναλήφθηκε, με τη χρήση ενός συγχωνευμένου συνόλου δεδομένων από τις τρεις πόλεις, παρατηρήσαμε ότι οι διακυμάνσεις που εξηγήθηκαν σε κάθε πόλη από το αναπτυχθέν μοντέλο δεν ήταν στατιστικώς διαφορετικά από εκείνες που εξηγήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου που αναπτύχθηκε ειδικά για τη συγκεκριμένη πόλη. Έτσι στις εκτιμήσεις μπορούν να δωθούν σταθερές τιμές που είναι ανεξάρτητες από τις πόλεις που μελετήθηκαν. Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης, με τις εκτιμήσεις των παραμέτρων, που αποκτήθηκαν με τη χρήση των συγχωνευμένων δεδομένων φαίνονται στον πίνακα 1. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το επιλεγθέν μοντέλο για το  $k_{tm}$  είναι εξαιρετικά σημαντικό, εξηγώντας περίπου το 96% του αθροίσματος των τετραγώνων στα δεδομένα  $K_t$ . Συνοπτικά, ο μέσος δείκτης  $k_{tm}$  αντιπροσωπεύεται επομένως από την εξίσωση (3.27) με:

$$\begin{aligned}\lambda(K_t) &= K_t - 1,167K_t^3(1 - K_t) \\ \varepsilon(K_t) &= 0,979(1 - K_t) \\ \kappa(K_t) &= \frac{1,141(1 - K_t)}{K_t}\end{aligned}\quad (3.28)$$

Πίνακας 3.1 Συνοπτικά αποτελέσματα της εκτίμησης των παραμέτρων με τη μη γραμμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων

Σταθερά	Εκτίμηση	Τυπική απόκλιση
$b_0$	-1.167	0.066
$b_1$	0.979	0.049
$b_2$	1.141	0.038

(Για υπολογισμούς ηλιακής ακτινοβολίας στους οποίους η επίδραση των τυχαίων διακυμάνσεων στα ωριαία γεγονότα δεν είναι σημαντική π.χ. παθητική θέρμανση κτηρίων [50], χρειάζεται μόνο να εκτιμηθούν οι τάσεις (μέσοι δείκτες) της ωριαίας ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μεμονωμένων ημερών. Παρόλο που οι εργάτες έχουν σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήσει συσχετίσεις που προτείνονται στα [51] και [52] για την εκτίμηση του μακροπρόθεσμου μέσου μηνιαίου ωριαίου δείκτη αιθριότητας  $\bar{k}_t$  από μακροπρόθεσμο μέσο δείκτη αιθριότητας  $\bar{K}_t$ , μέχρι τώρα, δεν έχει βρεθεί εξίσωση για την εξαγωγή των στιγμιαίων  $K_{tm}$  για μία συγκεκριμένη ημέρα γνωστού  $K_t$  (ένα διαφορετικό πρόβλημα). Οι εξισώσεις (2) και (3) για το  $k_{tm}$  πρέπει να ικανοποιούν την ανάγκη αυτή. Αυτές οι εξισώσεις μπορεί επίσης να είναι χρήσιμες σε αυτό το πρόβλημα της εκτίμησης του  $\bar{k}_t$  για ένα δεδομένο  $\bar{K}_t$ . Σημειώνουμε ότι η προσδοκία του  $K_t$  για μία ώρα είναι η ίδια με την προσδοκία του  $K_{tm}$  για την ίδια ώρα (αφού η προσδοκία του  $\alpha$  είναι μηδέν) και ότι η προσδοκία του  $k_{tm}$ , για μία σταθερή περίοδο εξαρτάται μόνο από την τυχαία μεταβλητή  $K_t$ . Συνεπώς, η χρήση τυπικών πιθανοτικών μεθόδων, και ενός πιθανοτικού μοντέλου για τη μηνιαία κατανομή του  $K_t$  [52,53], μπορεί να εκτιμηθεί η μακροπρόθεσμη προσδοκία του  $k_t$ .

#### 3.10.4. Κατασκευή μοντέλου για την τυχαία συνιστώσα

Στον τεράστιο αριθμό της δουλειάς στην ηλιακή μηχανική οι τυχαίες διακυμάνσεις δε μπορούν να αγνοηθούν. Η έρευνα του Graham [41] έδειξε ότι αυτές οι διακυμάνσεις επηρεάζουν τη θερμική απόδοση ενός αριθμού ηλιακών ενεργειακών συσκευών (ειδικά εκείνων στις οποίες η θερμική έξοδος απαιτεί ότι η ωριαία ακτινοβολία υπερβαίνει κάποια τιμή κατωφλίου). Η απόδοση σε μία συγκεκριμένη

ώρα ενός ηλιακού συστήματος μετατροπής με αποθήκευση ενέργειας εξαρτάται από το πόση ηλιακή ενέργεια ήταν διαθέσιμη τις προηγούμενες ώρες. Η επίδραση των διακυμάνσεων των προηγούμενων ωρών (δηλαδή του  $\alpha$ ) σε ένα ωριαίο ωριαίο γεγονός πρέπει να περιγραφεί για τη μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων. Η στοχαστική μοντελοποίηση του  $\alpha$  θα το κάνει αυτό.

#### 3.10.4.1 Επίδραση του $K_t$

Για να χτισθεί ένα ευέλικτο στοχαστικό μοντέλο για το  $\alpha$ , ερευνήσαμε την επίδραση της ιστορίας, της αέριας μάζας και του δείκτη αιθριότητας. Έχοντας εγκαθιδρύσει τον  $k_{tm}$  είναι δυνατόν να βρούμε το  $\alpha$  για κάθε ωριαίο γεγονός από  $\alpha = k_t - k_{tm}$ . Ωριαία σύνολα  $\{\alpha\}$  ιστορικών δεδομένων είχαν σχεδιασθεί από μέρες με σχεδόν ίδιο δείκτη αιθριότητας  $K_t$  και ομαδοποιήθηκαν. Δεκαέξι τέτοιες ομάδες, που συμβολίζονται με  $(\{\alpha\}: K_t)$ , είχαν σχηματισθεί από μέρες όπου το  $K_t$  είχε μέση τιμή 0,1 και 0,175, 0,225, 0,257, ... 0,875 (π.χ. το 3<sup>ο</sup> γκρουπ είχε  $0,20 < K_t \leq 0,25$ ). Αναπτύχθηκαν μοντέλα μελετώντας τα στατιστικά και στοχαστικά χαρακτηριστικά κάθε  $(\{\alpha\}: K_t)$  γκρουπ ξεχωριστά. Περιγράφουμε πρώτα τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από τη χαλάρωση της υπόθεσης της επίδρασης της αέριας μάζας. Έτσι, για τα αποτελέσματα αυτά οι ιδιότητες της πιθανότητας (στατιστικές και στοχαστικές) μέσα στο  $(\{\alpha\}: K_t)$  υποτίθεται ότι εξαρτώνται μόνο από την οριακή κατανομή και τη σειριακή σχέση μεταξύ των γεγονότων και όχι από την ώρα της ημέρας όπου συμβαίνει το γεγονός. Οι βασικές στατιστικές των διακυμάνσεων στο  $\alpha$  ερευνήθηκαν μελετώντας τη μέση τιμή του (μηδέν) και την τυπική του απόκλιση.

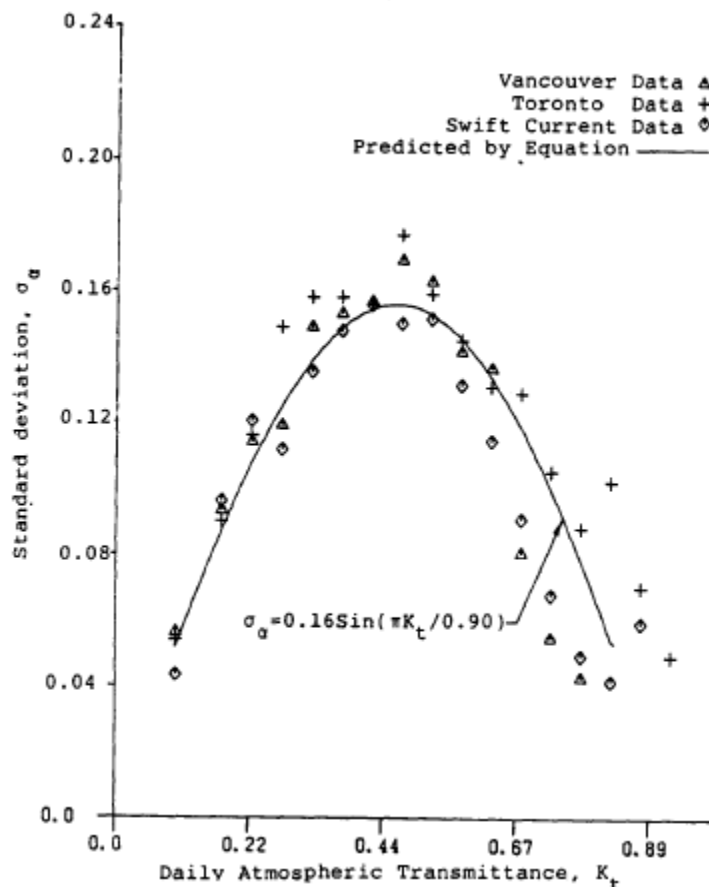
Βρέθηκε ότι η τυπική απόκλιση  $\sigma_\alpha$  του  $\alpha$  κυμαινόταν από ομάδα σε ομάδα: η  $\sigma_\alpha$  εξαρτάται πολύ από το  $K_t$ . Η εξάρτηση φάνηκε ότι είναι σχεδόν ημιτονική (σχήμα 3.10): η  $\sigma_\alpha$  ήταν στο ελάχιστό της (περίπου 0,05), όταν το  $K_t$  ήταν 0,1 (πολύ συννεφιασμένες μέρες) και όταν το  $K_t$  ήταν μεγαλύτερο από 0,85 (πολύ καθαρές μέρες). Όμως καθώς το  $K_t$  αυξανόταν πάνω από 0,1, η  $\sigma_\alpha$  αυξήθηκε φτάνοντας ένα μέγιστο της τάξης του 0,16 όταν το  $K_t$  ήταν περίπου 0,45. Έπειτα μειώθηκε ξανά καθώς το  $K_t$  αυξήθηκε από 0,45 σε 0,85. Η παλινδρομική ανάλυση του συνόλου δεδομένων  $\{\sigma_\alpha, K_t\}$  έδειξε ότι οι διακυμάνσεις στο  $\sigma_\alpha$  θα μπορούσαν να περιγραφούν πολύ καλά από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sigma_\alpha = 0,16 \sin\left(\frac{\pi K_t}{0,90}\right) \quad (3.29)$$

Αυτό το μοντέλο εξήγησε επαρκώς περισσότερο από το 97% του συνολικού αθροίσματος των τετραγώνων του  $\alpha$ , θεωρώντας όλα τα δεδομένα. Ένα γράφημα αυτής του παλινδρομικού μοντέλου μαζί με τα δεδομένα από τις διαφορετικές πόλεις φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η ίδια στατιστική ανάλυση επίσης σιγούρευε ότι η μέση τιμή του  $\alpha$  ήταν όντως στατιστικά μηδέν, σε όλη τη γκάμα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. (Η τεχνική της παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη απαιτούσε το  $k_{tm}$  ότι ένα κατάλληλο μοντέλο παράγει μηδενική μέση τιμή για το  $\alpha$ .)

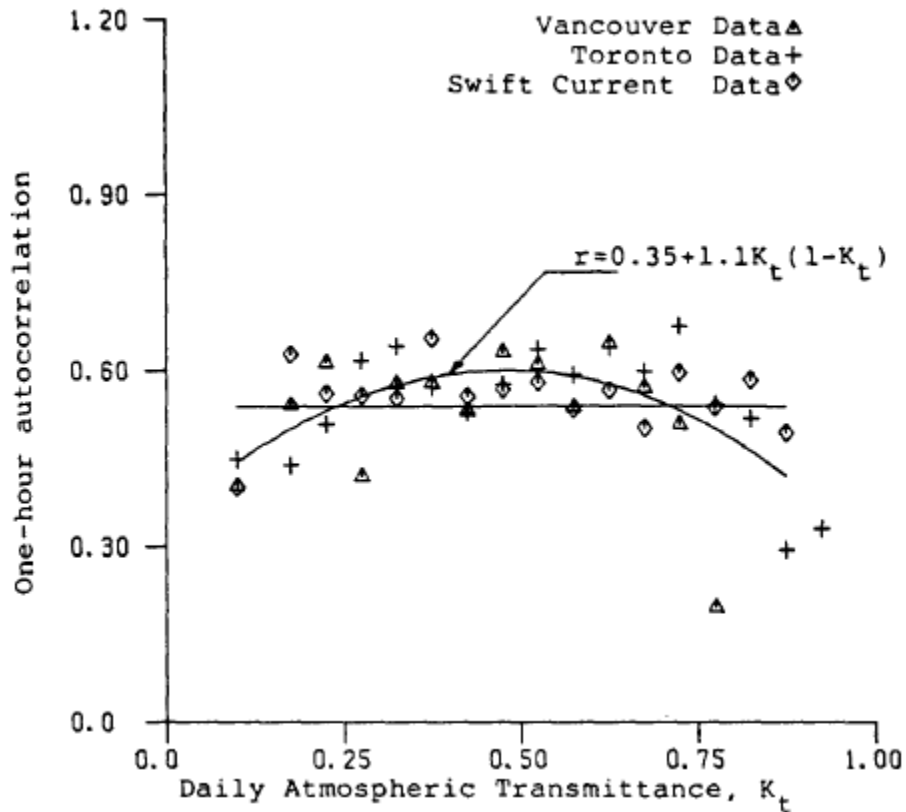
Η επίδραση των παρελθοντικών τιμών για το  $\alpha$  στην παρούσα τιμή μελετήθηκε κατασκευάζοντας στοχαστικά μοντέλα. Αυτά τα μοντέλα κατασκευάστηκαν για κάθε γκρουπ, επιτρέποντας έτσι την έρευνα της επίδρασης της ημερήσιας αιθριότητας στη στοχαστική συμπεριφορά. Ως ένα πρώτο βήμα, ο γραμμικός συντελεστής αυτοσυσχέτισης  $r$  μεταξύ των τιμών διαχωρισμένος ανά ώρα εκτιμήθηκε για κάθε γκρουπ. Καθώς η μηδενική εκτίμηση για το  $r$  υπονοεί ότι οι

παρελθοντικές τιμές δεν επηρεάζουν τις τρέχουσες τιμές, ενώ μια μη μηδενική εκτίμηση προτείνει το αντίθετο. Για κάθε γκρουπ, ζευγάρια της μορφής  $(\alpha(t), \alpha(t - 1))$ , μέσα σε μία δεδομένη ημέρα, σχηματίστηκαν και ο δείκτης  $t$  αφορά την ώρα. Φροντίσαμε ώστε να μην παρθούν ζευγάρια από διαφορετικές ημέρες: έτσι μία τιμή από την ανατολή δεν θα ζευγαρωθεί με μία τιμή από τη δύση της προηγούμενης ημέρας. Συγχωνεύοντας όλα τα αποδεκτά ζευγάρια από  $\alpha(t)$  και  $\alpha(t - 1)$ , μέσα σε κάθε γκρουπ, η τιμή  $r$  εκτιμήθηκε για κάθε γκρουπ.



Σχήμα 3.10 Προβλεπόμενη και πειραματική τυπική απόκλιση των ωριαίων  $K_t$  για το μεταβαλλόμενο δείκτη αθιρότητας  $K_t$

Οι εκτιμήσεις για το  $r$  βρέθηκαν να είναι μη μηδενικές για όλα τα δεκαέξι γκρουπ, και σχετικά ανεξάρτητα του γκρουπ δηλαδή από την τιμή του  $K_t$ . Η μέση τιμή των εκτιμήσεων όλων των γκρουπ ήταν 0,54 και θεωρώντας μία σταθερή τιμή του  $r$  ίση με 0,54 εξήγησε το 97% του συνολικού αθροίσματος των τετραγώνων των διακυμάνσεων αφήνοντας ανεξήγητο μόνο το 3%. Το σχήμα 3.11 δείχνει ένα γράφημα των εκτιμώμενων τιμών του  $r$  σε σχέση με το  $K_t$  για διάφορες πόλεις. Η μορφή της εξάρτησης από το  $K_t$  προτείνει μία εξίσωση μοντελοποίησης της μορφής  $r = c_1 + c_2 K_t (1 - K_t)$ , όπου  $c_1$  και  $c_2$  είναι σταθερές και η παλινδρομική ανάλυση έδωσε  $c_1 = 0,35$  και  $c_2 = 1,1$ . Η παλινδρομική εξίσωση που φαίνεται στο σχήμα 3.11 εξήγησε το 62% του υπόλοιπου 3% αθροίσματος των τετραγώνων των μεταβολών στα δεδομένα του  $r$ .



Σχήμα 3.11 Προβλεπόμενη και πειραματική σειριακή συσχέτιση μεταξύ ωριαίου  $k_t$  χωριζόμενου από μία ώρα σε σχέση με το  $K_t$

Θεωρητικά στατιστικά μοντέλα για την επίδραση των παρελθοντικών τιμών αντιπροσωπεύονται συχνά εκφράζοντας την τρέχουσα τιμή ως γραμμικό άθροισμα των σταθμισμένων παρελθοντικών τιμών, συν μία τυχαία τιμή ( $v$ ) η οποία σχεδιάζεται από ένα μη συσχετισμένο τυχαίο σύνολο, το οποίο είναι  $a(t) = \varphi_1 a(t-1) + \varphi_2 a(t-2) + \varphi_3 a(t-3) + \dots + v(t)$ . Οι συντελεστές  $\varphi_i$  γενικά θα φθίνουν καθώς αυξάνεται το  $i$ . Βασιζόμενοι στην εμπειρία του παρελθόντος, με πρόβλεψη στις εφαρμογές της μηχανικής, αισθανθήκαμε ότι δεν ήταν απαραίτητο να αντιπροσωπευθεί το  $a(t)$  με τη χρήση ενός μοντέλου το οποίο απαιτεί περισσότερα του ενός  $a(t-1)$ , δηλαδή την τιμή της αμέσως προηγούμενης ώρας. Συνεπώς προτείνουμε το απλούστερο τέτοιο μοντέλο:

$$a(t) = \varphi a(t-1) + v(t) \quad (3.30)$$

Στην πραγματικότητα το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει την επίδραση των  $a(t-2)$ ,  $a(t-3)$ , και των τιμών πιο μακρινών γεγονότων αφού το ίδιο το  $a(t-1)$  σχετίζεται με την προηγούμενη ώρα από τη σχέση  $a(t-1) = \varphi a(t-2) + v(t-1)$ . Η θεωρία δείχνει ότι η καλύτερη εκτίμηση του  $\varphi$  είναι ίση με το συντελεστή αυτοσυσχέτισης  $r$ . Αφού η τυπική απόκλιση  $\sigma_a$  αλλάζει με το  $K_t$  (εξίσωση 3.29) η τυπική απόκλιση  $\sigma_v$  που αφορά την κατανομή  $v(t)$  πρέπει επίσης να αλλάξει με το  $K_t$ . Η θεωρητικά προερχόμενη σχέση δίνεται από:

$$\sigma_v = \sigma_a(1 - \varphi^2)^{1/2} \quad (3.31)$$



### 3.10.4.2 Επίδραση της αέριας μάζας

Η προηγούμενη ανάλυση υπέθεσε ότι η πιθανότητα του  $\alpha$  δεν εξαρτάται από την αέρια μάζα,  $m$  (ή την ώρα της ημέρας). Σε αυτή την ενότητα θεωρούμε την υπόθεση αυτή εξετάζοντας τις στοχαστικές παραμέτρους  $\sigma_\alpha$  και  $\varphi$ , για διαφορετικές τιμές της αέριας μάζας. Ακολουθώντας μία παρόμοια διαδικασία με αυτή που περιγράφηκε σε προηγούμενες ενότητες, οι ωριαίες τιμές του  $\alpha$  μέσα στα γκρουπ του  $K_t$  χωρίστηκαν περαιτέρω σε υπό-ομάδες, που ορίστηκαν σύμφωνα με την αέρια μάζα, ή πιο συγκεκριμένα με την αζιμούθια γωνία  $\theta_z = \sec^{-1} m$ . Η αζιμούθια γωνία μεταξύ  $0^\circ$  και  $90^\circ$  χωρίστηκε σε 10 διαστήματα και ζευγάρια τιμών  $\alpha$  σε αντιστοιχία με διαδοχικά γεγονότα που ανήκει στα γειτονικά  $\theta_z$  διαστήματα που σχηματίστηκαν. (Ειδική φροντίδα πάρθηκε ώστε να μην χαθεί η σειρά πραγματοποίησης αυτών των ωριαίων γεγονότων· αν δύο διαδοχικά γεγονότα δεν μπορούν να καταχωρηθούν σε γειτονικά διαστήματα αζιμούθιας γωνίας, δεν χρησιμοποιήθηκαν). Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης  $r$  και η τυπική απόκλιση του  $\alpha$  για τα γκρουπ των διαστημάτων της γειτονικής αζιμούθιας γωνίας υπολογίστηκαν με τη χρήση αυτών των ζευγαριών.

Τα αποτελέσματα έδειξαν μία ήπια αλλά σταθερή αύξηση του  $\sigma_\alpha$  με την αύξηση της αζιμούθιας γωνίας, αλλά το  $r$  παρατηρήθηκε ότι ήταν γενικά ανεξάρτητο από την αζιμούθια γωνία, καθώς δεν παρατηρήθηκε κάποιο σταθερό πρότυπο. Η μέση διακύμανση του  $\sigma_\alpha$  μέσα σε μία ημέρα ήταν της τάξης του 25% του μέσου  $\sigma_\alpha$  με αυτό το πρότυπο να παρατηρείται σε όλα τα γκρουπ  $K_t$ . Αυτή η πληροφορία προτείνει μία μικρή επίδραση της αζιμούθιας γωνίας στην πιθανοτική συμπεριφορά των ατμοσφαιρικών διαπερατοτήτων, αλλά η σημασία αυτής της επίδρασης στη μηχανική των προβλέψεων μέσω προσομοίωσης είναι αμφισβητούμενη.

### 3.10.4.3 Η μη συσχετιζόμενη τυχαία συνιστώσα

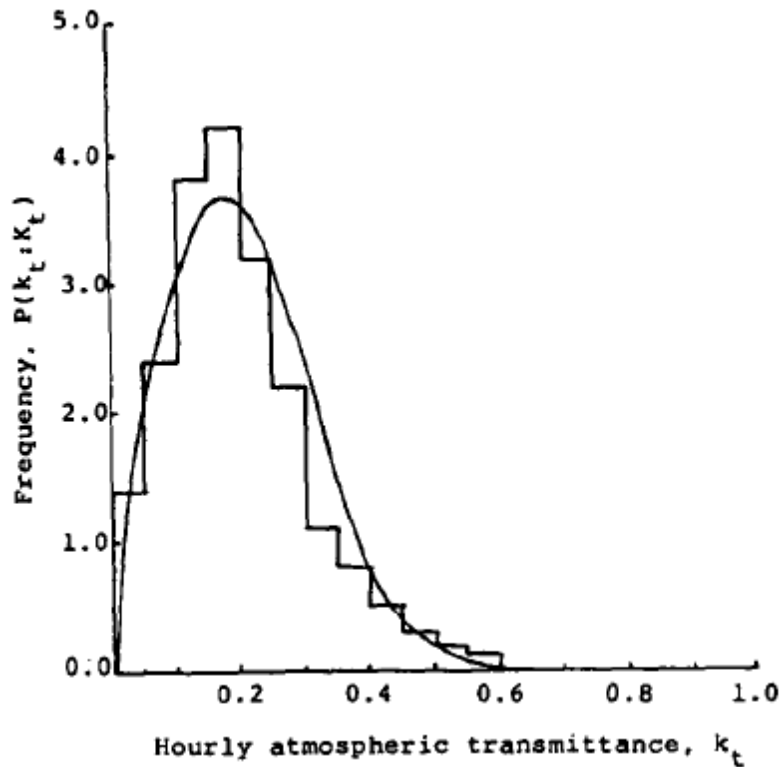
Για να παραχθούν τα ημερήσια σύνολα  $\alpha$ , η μόνη επιπλέον απαίτηση είναι ο ορισμός της (οριακής) πιθανοτικής κατανομής. Αυτό είναι φτιαγμένο από την κατανομή του  $v$ , το σύνολο των μη συσχετιζόμενων τυχαίων τιμών χρησιμοποιείται για να παραχθούν  $\alpha$  από την εξίσωση (3.30). Η τυπική απόκλιση  $\sigma_v$  του  $v$  λαμβάνεται από την εξίσωση (3.31) με δοσμένο το  $\sigma_\alpha$  από την εξίσωση (3.29).

Είναι δημοφιλές στη στοχαστική μοντελοποίηση να χρησιμοποιείται η κανονική κατανομή για την αναπαράσταση της τυχαίας μεταβλητής  $v$ . Αυτή θα παράγει (με μαθηματικά επιχειρήματα) μία κανονική κατανομή για το  $\alpha$  (οπότε και για το  $K_t$ ). Ερευνήσαμε την κατανομή της συχνότητας του  $\alpha$  μελετώντας το ιστόγραμμα συχνότητων του για διαφορετικές συνθήκες και βρέθηκε ότι είναι μη-κανονική. Οπότε είναι απαραίτητο να κατασκευασθεί ένα μοντέλο για την συνάρτηση κατανομής του  $\alpha$ .

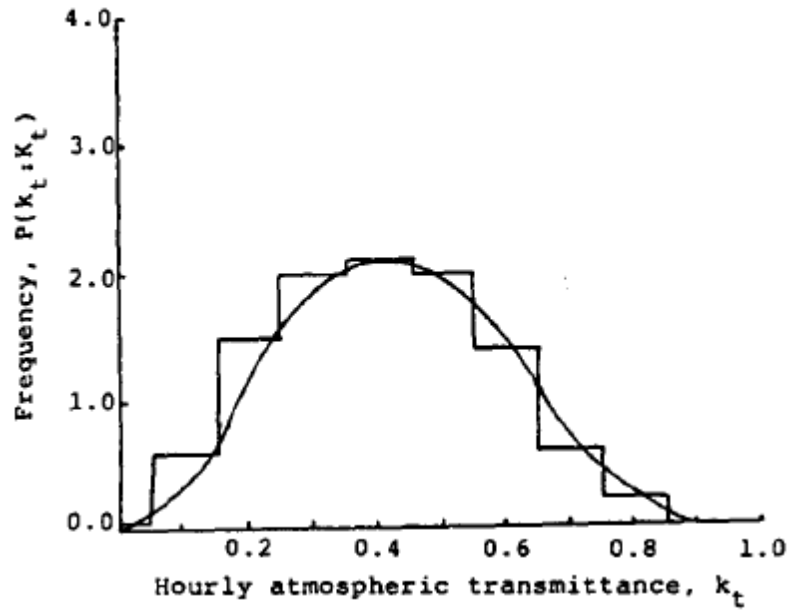
Εκτός από μία σταθερά, η συχνότητα του  $\alpha$  είναι ταυτόσημη με τη συχνότητα του αντίστοιχου  $k_t$ . Για ευκολία, απευθυνόμαστε στις πιθανολογικές ιδιότητες του  $k_t$  και εφαρμόζουμε τα συμπεράσματά μας για το  $\alpha$ . Μία προκαταρκτική έρευνα στην οριακή πιθανοτική κατανομή των ωριαίων τιμών του  $k_t$  πραγματοποιήθηκε μελετώντας τα ιστογράμματα συχνότητων τους μέσα στα γκρουπ των σταθερών  $K_t$ . Αυτά τα ιστογράμματα (σχήματα 3.12, 3.13, 3.14) δείχνουν ότι η κατανομή είναι μονότροπη και συμμετρική γύρω από τη μέση τιμή της, όταν το  $K_t$  είναι περίπου ίσο με 0,45· για  $K_t$  μικρότερο από 0,45 ήταν λοξή προς τα δεξιά ενώ για μεγαλύτερες τιμές του  $K_t$  ήταν λοξή προς τα αριστερά. Η αιχμηρότητα (η 4<sup>η</sup> κεντρική στιγμή) αυξάνεται καθώς η κατανομή γίνεται όλο και πιο μη συμμετρική (δηλαδή καθώς το

$K_t$  μετακινείται από περίπου 0,45 και πλησιάζει στο ανώτερο ή κατώτερο όριο του). Συνεπώς η κατανομή αλλάζει ανάλογα με την αιθριότητα της ημέρας.

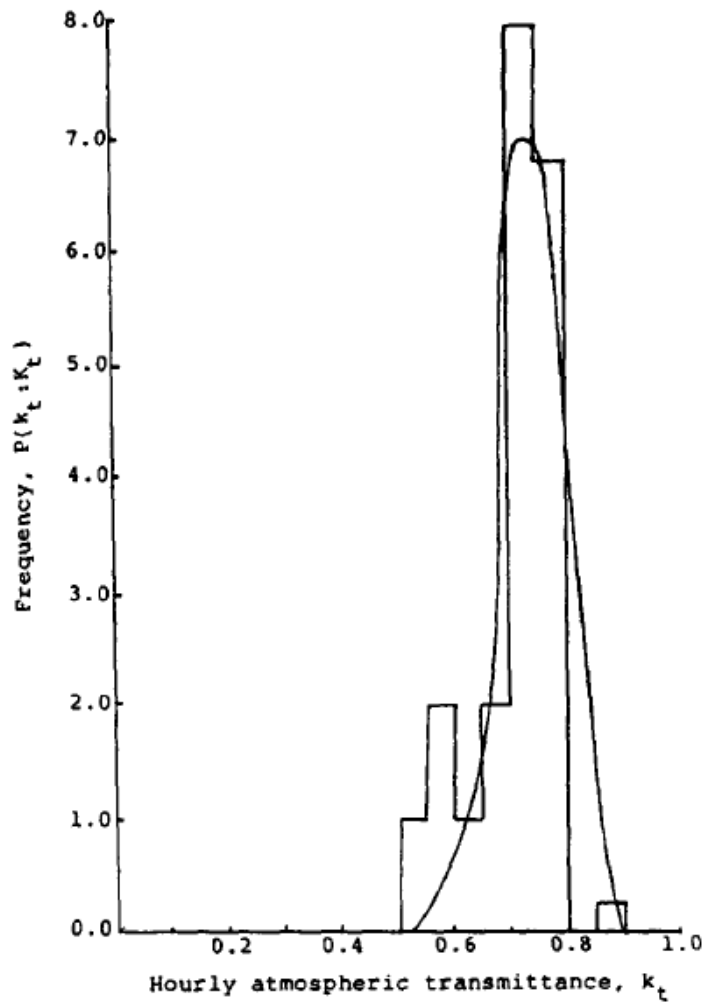
Η τυχαία μεταβλητή  $k_t$  (σε αντίθεση με αυτές που ακολουθούν κανονική κατανομή) είναι φραγμένη: αυτό σημαίνει πως οι τιμές του  $k_t$  εμφανίζονται μεταξύ ενός άνω ορίου  $k_{tu}$  και ενός κάτω ορίου  $k_{tl}$ . Αυτό το χαρακτηριστικό, μαζί με παρόμοια πρότυπα στη λοξότητα (ασυμμετρία) και στην αιχμηρότητα είναι επίσης χαρακτηριστικό της κλασσικής κατανομής Βήτα. Συνεπώς, τεστάρουμε την εφαρμοσιμότητα αυτού του μοντέλου για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της συχνότητας που παρατηρήθηκαν στα δεδομένα μας.



Σχήμα 3.12 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του  $k_t$  μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \cong 0,22$ )



Σχήμα 3.13 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του  $k_t$  μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \cong 0,40$ )



Σχήμα 3.14 Παρατηρούμενη και προβλεπόμενη κατανομή συχνότητας του  $k_t$  μέσα σε μεμονωμένες ημέρες ( $k_{tm} \cong 0,74$ )

Η μεταβλητή  $k_t$  αρχικά κανονικοποιήθηκε σε μία τυχαία μεταβλητή ( $u$ ) μέσα στο εύρος (0,1) για όλες τις τιμές του  $k_t$ :

$$u = \frac{k_t - k_{tl}}{k_{tu} - k_{tl}} \quad (3.32)$$

και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του  $u$  αντιπροσωπεύεται από την κατανομή Βήτα:  $P(u) = cu^{p-1}(1-u)^{q-1}$ , όπου  $c = \Gamma(p+q)/\Gamma(p)\Gamma(q)$  και  $\Gamma(\cdot)$  είναι η συνάρτηση γάμμα. Η κατανομή του  $k_t$  σχετίζεται με την κατανομή του  $u$ , μέσω της  $u(k_t)$  εξίσωσης κανονικοποίησης (3.32): εξισώνοντας τις στοιχειώδεις πιθανότητες έχουμε  $P(k_t:K_t)|dk_t| = P(u:K_t)|du|$ , οπότε  $P(k_t:K_t) = P(u:K_t)/(k_{tu} - k_{tl})$ . Η μέση τιμή του  $u$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma_u$  της κατανομής Βήτα είναι οι ακόλουθοι:  $\bar{u} = p/(p+q)$ ,  $\sigma_u^2 = pq/[(p+q)^2(p+q+1)]$ : οι παράμετροι  $p$  και  $q$  εκτιμώνται εξισώνοντας τις εκτιμήσεις δεδομένων της μέσης τιμής και της διακύμανσης του  $u$  με αυτές τις υπολογισμένες. Εκτιμήσεις δεδομένων της μέσης τιμής και της διακύμανσης του  $u$  είναι εκφρασμένες σε όρους των  $k_{tm}$  και  $\sigma_\alpha$ :

$$\bar{u} = \frac{k_{tm} - k_{tl}}{k_{tu} - k_{tl}} \text{ και } \sigma_t = \frac{\sigma_\alpha}{k_{tu} - k_{tm}} \quad (3.33)$$

Επίσης:

$$p = \frac{\bar{u}^2(1-\bar{u})}{\sigma_u^2} - \bar{u} \text{ και } q = \frac{p(1-\bar{u})}{\bar{u}} \quad (3.34)$$

Το πιθανοτικό μοντέλο για την περιγραφή της κατανομής συχνότητας του  $\alpha$  δίνεται από:

$$P(\alpha:K_t) = P(k_t:K_t) = \frac{\Gamma(p+q)u^{p-1}(1-u)^{q-1}}{\Gamma(p)\Gamma(q)(k_{tu} - k_{tl})} \quad (3.35)$$

Τα σχήματα 3.12, 3.13 και 3.14 δείχνουν γραφήματα αυτού του θεωρητικού πιθανοτικού μοντέλου για το  $k_t$  μαζί με πειραματικά ιστογράμματα πυκνότητας, για ειδικά επιλεγμένα  $k_{tu}$  και  $k_{tl}$ . Η καμπύλη υπέρθεσης γενικά δείχνει καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Η ακρίβεια επηρεάζεται από την επιλογή των  $k_{tl}$  και  $k_{tu}$ . Τα πειραματικά μας δεδομένα δείχνουν ότι αυτές τις ακραίες τιμές μεταβάλλονται, ανάλογα με την αιθριότητα της ημέρας. Για παράδειγμα, για το σχήμα 3.12 τα  $k_{tl}$  και  $k_{tu}$  ήταν περίπου 0,0 και 0,6· για το σχήμα 3.13 αυτές οι τιμές ήταν περίπου 0,0 και 0,9· και για το σχήμα 3.14 0,5 και 0,9 αντίστοιχα. Γενικά, η εμφάνιση μιας ακραίας τιμής είναι ένα σπάνιο γεγονός η πιθανότητα του οποίου είναι εξαιρετικά μικρή. Για παράδειγμα, με μία κανονική κατανομή, η πιθανότητα απόκτησης ενός γεγονότος που αποκλίνει από τη μέση τιμή κατά περισσότερο από τρεις τυπικές αποκλίσεις είναι κάτω από 0,12% και περισσότερο από τέσσερις τυπικές αποκλίσεις κάτω από 0,004%. Συνεπώς ένας ασφαλής κανόνας θα είναι η χρήση της τυπικής απόκλισης ως ένας οδηγός για τον ορισμό αυτών των σπάνιων γεγονότων: χρησιμοποιήσαμε μία απόκλιση  $4\sigma_\alpha$  από τη μέση τιμή. Υπάρχουν, όμως, καταστάσεις όπου μία απόκλιση αυτού του μεγέθους δεν είναι εφικτή (δηλαδή παράγει μία τιμή έξω από τα επιτρεπτά όρια) και τα  $k_{tl}$  και/ή  $k_{tu}$  πρέπει να

προσαρμοσθούν τη συνοριακή τιμή. Με αυτό ως οδηγό, κατάλληλες τιμές για τα  $k_{tl}$  και  $k_{tu}$  αποκτώνται ως εξής:

$$k_{tl} = \max(0, 0, k_m - 4\sigma_\alpha) \text{ και } k_{tu} = \min(0, 9, k_m + 4\sigma_\alpha) \quad (3.36)$$

Επειδή οι τιμές του  $\alpha$  περιγράφονται με ένα μη κανονικό τρόπο, η χρήση του στοχαστικού μοντέλου  $\alpha(t) = \varphi\alpha(t-1) + v(t)$  πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να παραχθούν συνθετικά δεδομένα: απλώς σχεδιάζοντας την  $v(t)$  από μία κατανομή Βήτα δεν είναι αρκετό. Τα μαθηματικά που απαιτούνται για το χειρισμό μη κανονικών τυχαίων μεταβλητών είναι πολύ πιο πολύπλοκα σε σχέση με τις κανονικές μεταβλητές. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, μία  $\alpha$  τυχαία μεταβλητή αντιστοιχίζεται με μία άλλη τυχαία μεταβλητή  $\beta$  (μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία απόκλιση), που είναι κανονική. Αυτή η αντιστοίχιση μπορεί να γίνει με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο η μη κανονική  $K_t$  αντιστοιχίστηκε με μία κανονική μεταβλητή στη δουλειά της παραγωγής συνθετικών  $K_t$  [30]. Η έρευνα από τον Graham (κεφάλαιο 5 της εργασίας [41]) έδειξε ότι οι εκτιμήσεις αυτοσυσχέτισης για αυτές τις κανονικές μεταβλητές δεν ήταν διαφορετικές από τις ίδιες εκτιμήσεις για τις μη κανονικές μεταβλητές. Η εξίσωση που συσχετίζει το  $\alpha$  με το  $\beta$  είναι  $\beta = \sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}[2F(\alpha; K_t) - 1]$ , όπου  $F(\alpha; K_t)$  είναι συνάρτηση κατανομής πιθανότητας του  $\alpha$ , που υπολογίζεται με την ενσωμάτωση της εξίσωσης (3.35). Αφού η  $\beta$  είναι κανονική (γκουσιανή), η σειριακή σχέση μεταξύ των ωριαίων γεγονότων ενσωματώνεται πιο εύκολα στο τυχαίο σύνολό της:

$$\beta(t) = \varphi\beta(t-1) + b(t) \quad (3.37)$$

όπου  $b(t)$  εξάγεται από το μη συσχετισμένο σύνολο των γκαουσιανών τυχαίων αριθμών με μέση τιμή 0 και διακύμανση  $(1 - \varphi^2)$ . Αυτά τα αυτοσυσχετιζόμενα γεγονότα  $\beta$  μετά αντιστοιχίζονται από τον τομέα τους στον τομέα της κατανομής  $\alpha$ , με τη χρήση της εξίσωσης αντιστοίχισης. Συνεπώς, σύνολα από τιμές  $\alpha(t)$  παράγονται με τη σωστή κατανομή συχνότητων και την ωριαία σειριακή σχέση. Η τιμή του  $\varphi$  είναι η ίδια όπως και για το  $\alpha$ . Συνεπώς μία λογική προσέγγιση είναι  $\varphi = 0,54$ .

### 3.10.5. Σύνοψη: Παράγοντας συνθετική ωριαία ηλιακή ακτινοβολία

Συνθετική ωριαίες τιμές ηλιακής ενέργειας (σε μία οριζόντια επιφάνεια) μπορούν να παραχθούν παράγοντας τους ωριαίους δείκτες αιθριότητας και πολλαπλασιάζοντας με την υπολογισμένη αντίστοιχη εξωατμοσφαιρική ακτινοβολία.

Για να παραχθούν τιμές  $k_t$ , η ωριαία τάση  $k_{tm}$  του  $k_t$  υπολογίζεται με τη χρήση του  $K_t$  για εκείνη την ημέρα και της αέριας μάζας για την εξεταζόμενη ώρα (εξισώσεις (3.27) και (3.28)). Η τυπική απόκλιση  $\sigma_\alpha$  της τυχαίας συνιστώσας υπολογίζεται από την εξίσωση (3.29). Τιμές του  $\beta$  παράγονται από τη χρήση της εξίσωσης (3.37) με  $\varphi = 0,54$ . Αυτές οι τιμές αντιστοιχίζονται με τις τιμές του  $\alpha$  χρησιμοποιώντας την κατανομή (εξίσωση (3.35) μαζί με τις τιμές των  $p$  και  $q$  που αποκτήθηκαν από τις εξισώσεις (3.33), (3.34) και (3.36). Μετά το  $k_t$  λαμβάνεται από την εξίσωση (3.26).

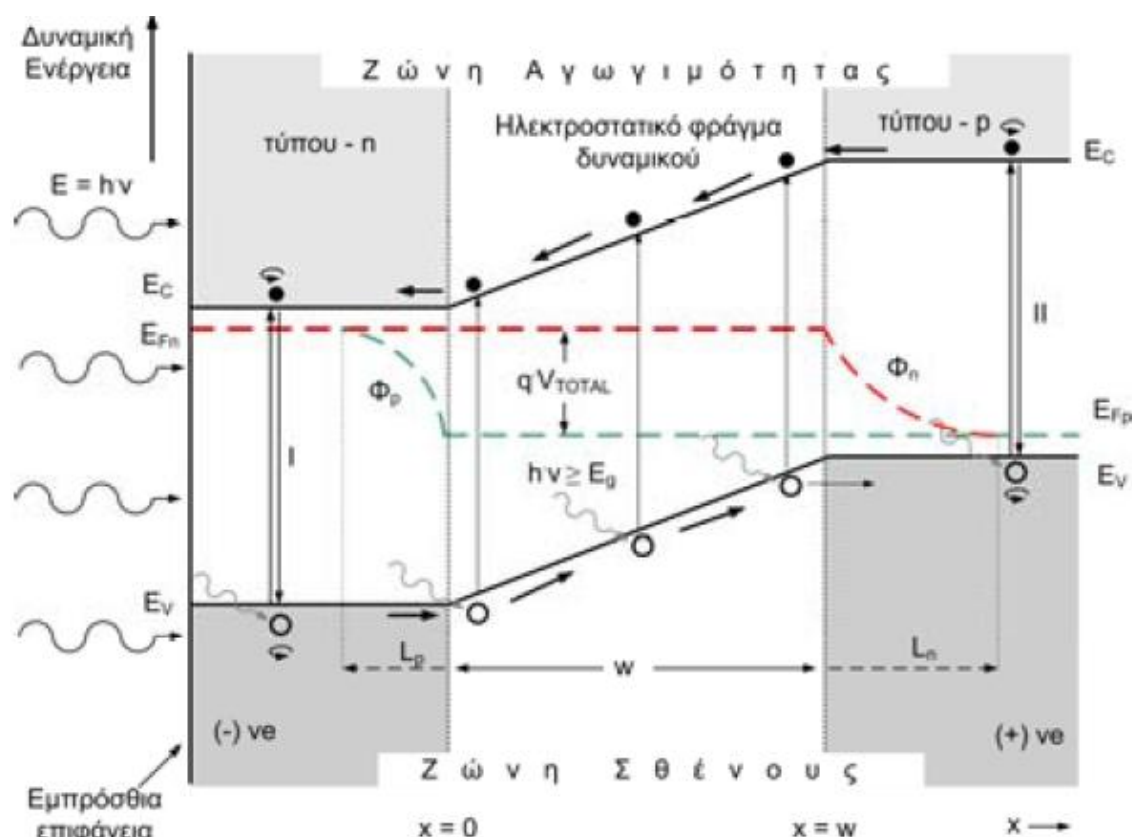
### 3.10.6. Επίλογος

Η πρόβλεψη των γεγονότων ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας είναι μία σύνθετη και αρκετά μη στάσιμη διαδικασία με πιθανοτικό μηχανισμό που αλλάζει μηνιαία, ημερήσια ακόμα και ωριαία. Για την κατασκευή ευέλικτων μαθηματικών μοντέλων ικανών να μιμούνται τέτοια πιθανολογικά χαρακτηριστικά των ιστορικών αρχείων, μελετήσαμε την οριακή και σειριακή (στοχαστική) πιθανοτική συμπεριφορά των συνόλων των ωριαίων δεικτών αιθριότητας  $\{k_t\}$  από μέρες με γνωστή αιθριότητα  $K_t$ . Τα αποτελέσματα δείχνουν την οριακή πιθανότητα και τα στοχαστικά χαρακτηριστικά των συνόλων  $\{k_t\}$  τα οποία μεταβάλλονται με ένα τρόπο που εξαρτάται κυρίως από την συνολική αιθριότητα της ημέρας από την οποία εξάχθηκαν.

Έχουν αναπτυχθεί μοντέλα για την πρόβλεψη των τάσεων σε ένα ημερήσιο σύνολο  $\{k_t\}$  και για την εκτίμηση των πιθανών μεγεθών των τυχαίων διακυμάνσεων του  $k_t$  γύρω από την μέση τιμή (τάση). Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι πολύ καλές προβλέψεις ήταν εφικτές από τη γνώση συσχετιζόμενων  $K_t$ . Οι παράμετροι στα μοντέλα αυτά παρατηρήθηκε επίσης ότι μπορούσαν να «καρφωθούν» σε τιμές οι οποίες ήταν ανεξάρτητες από τα κλίματα τα οποία μελετήθηκαν, χωρίς καμία απώλεια στην ακρίβειά τους. Μία έρευνα για να διαπιστωθεί εάν τα πιθανολογικά χαρακτηριστικά της τυχαίας συνιστώσας  $k_t$  εξαρτώνται από την αέρια μάζα  $m$  επίσης πραγματοποιήθηκε, και μόνο μία μέτρια αλλαγή στη διακύμανση με την αέρια μάζα παρατηρήθηκε. Η πυκνότητα πιθανότητας των τυχαίων διακυμάνσεων στο  $k_t$  βρέθηκε ότι είναι μη κανονική, αλλά περιγραφόταν καλά από την κατανομή Βήτα. Τα χαρακτηριστικά αυτής της κατανομής σε όρους της εξάρτησης των παραμέτρων του  $K_t$  και της αέριας μάζας, ταυτοποιήθηκαν. Τέλος, περιγράφηκαν μέθοδοι για την παραγωγή συνθετικών τιμών του  $k_t$  δεδομένων των  $K_t$  και του  $m$ .

## 3.11 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Η φωτοαγωγιμότητα που χαρακτηρίζει έναν ημιαγωγό δεν είναι από μόνη της αρκετή για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια, αφού όταν προσπίπτει φως σε έναν ημιαγωγό να μην δημιουργούνται προσωρινά ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών αλλά σύντομα ο ρυθμός της επανασύνδεσης γίνεται ίσος με το ρυθμό δημιουργίας, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο διαχωρισμός ηλεκτρονίων-οπών. Η λύση που εφαρμόζεται στο πρόβλημα αυτό είναι η χρήση μίας διόδου  $n - p$  από πυρίτιο, όπου στην επαφή  $n - p$  εμφανίζεται φράγμα δυναμικού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.15 το φράγμα φτιάχνει ανηφόρες και διαχωρίζει τους ηλεκτρικούς φορείς απομακρύνοντάς τους χωροταξικά.



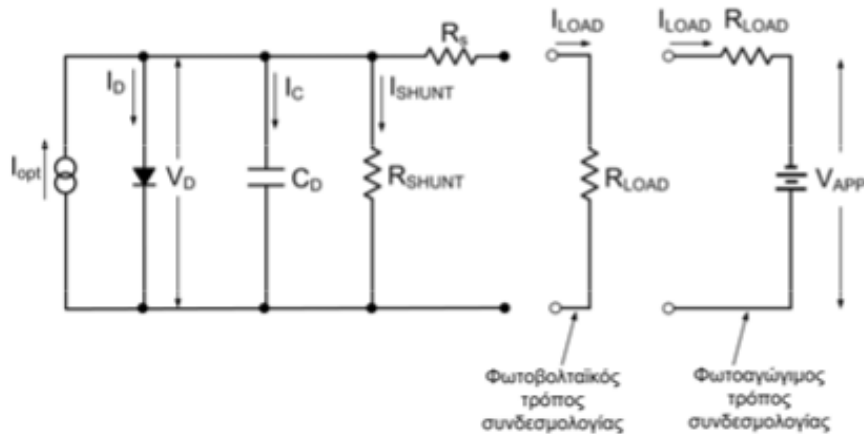
Σχήμα 3.15 Το διάγραμμα δυναμικής ενέργειας ηλεκτρονίων-απόστασης για μία φωτιζόμενη δίοδο p-n, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ο φωτισμός προσπίπτει από την πλευρά τύπου-n [54].

Όταν προσπίπτει φως σε κατάλληλη περιοχή της διάταξης (π.χ. στην περιοχή του εύρους  $w$  και κοντά σε αυτό) τα δημιουργούμενα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων ωθούνται από το ηλεκτροστατικό πεδίο στους χώρους όπου υπερτερούν οι όμοιοί τους ηλεκτρικοί φορείς (δηλαδή οι οπή πηγαίνει στην περιοχή  $p$  και το ηλεκτρόνιο στην περιοχή  $n$ ). Έτσι, στην περιοχή  $n$  διατηρείται υψηλή η συγκέντρωση των ιοντισμένων ατόμων δότη ( $N_D^+$ ) και στην περιοχή  $p$  διατηρείται υψηλή η συγκέντρωση των ιοντισμένων ατόμων αποδέκτη ( $N_A^-$ ), όταν το στοιχείο φωτίζεται. Έτσι η διάταξη αποκτά χαρακτηριστικά ηλεκτρικής πηγής.

Το δημιουργούμενο φωτόρευμα είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος  $E$  ( $W/m^2$ ) της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη διάταξη.

### 3.11.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου

Το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου φαίνεται στο σχήμα 3.16.

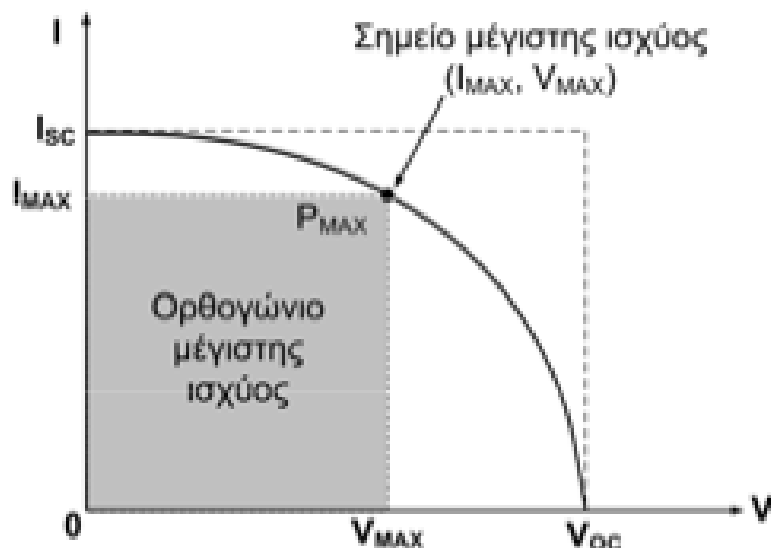


Σχήμα 3.16 Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης μη-ιδανικής διόδου p-n που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία στο 4<sup>ο</sup> τεταρτημόριο) [54].

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από μία πηγή σταθερού ρεύματος που προσομοιώνει το φωτόρρευμα, σε συνδυασμό με μία ιδανική δίοδο. Ο πυκνωτής αμελείται στη μόνιμη κατάσταση, αφού το ΦΒ στοιχείο παράγει DC ρεύμα. Η αντίσταση  $R_s$  είναι η ωμική αντίσταση από όλα τα στοιχεία που αποτελούν το φωτοβολταϊκό. Η τιμή της εξαρτάται λίγο από το φως. Σε ιδανικό ΦΒ είναι  $R_s = 0$ . Η αντίσταση  $R_{SHUNT}$  εκφράζει την απώλεια δημιουργούμενων ηλεκτρικών φορέων (επαναδύνδωση). Η τιμή της βρίσκεται με την ανάστροφη πόλωση της διόδου. Η τιμή της εξαρτάται πολύ από το φως και σε ένα ιδανικό ΦΒ στοιχείο έχει άπειρη τιμή.

### 3.11.2 Η καμπύλη I-V

Η καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17:



Σχήμα 3.17 Στην μόνιμη κατάσταση ενός ΦΒ στοιχείου για δεδομένες συνθήκες φωτισμού η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης παρέχει το σημείο λειτουργίας  $I_{MAX}$ ,  $V_{MAX}$  για το οποίο η παρεχόμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Η επιφάνεια του εγγεγραμμένου ορθογωνίου στο σημείο αυτό εκφράζει τη μέγιστη ισχύ  $P_{MAX}$  [54].



Είναι προφανές ότι θέλουμε να λειτουργούμε πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος, ώστε να έχουμε την βέλτιστη απόδοση. Η θέση του σημείου μέγιστης ισχύος εξαρτάται από την ένταση του φωτός (αφού αν αλλάξει η ένταση της ακτινοβολίας θα αλλάξει η καμπύλη άρα και η θέση της  $P_{MAX}$ ) και από την τιμή της αντίστασης του φορτίου. Δηλαδή, για δεδομένες συνθήκες φωτισμού, η αντίσταση του φορτίου πρέπει να είναι συγκεκριμένη (υπολογίζεται εύκολα) ώστε να έχουμε τη μέγιστη απολαβή ισχύος. Επειδή όμως σε μία πραγματική εγκατάσταση και οι δύο αυτές παράμετροι αλλάζουν συνεχώς, υπάρχουν ειδικές συσκευές με εγκατεστημένους αλγόριθμους εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Trackers-MPPTs). Αυτοί φροντίζουν ώστε η αντίσταση που «βλέπει» το ΦΒ να είναι η κατάλληλη ώστε να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος ανεξάρτητα από την ένταση της ακτινοβολίας και την πραγματική αντίσταση του φορτίου (μέσα σε κάποια όρια βέβαια).

### 3.11.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ΦΒ στοιχείου είναι η ενεργειακή απόδοση  $\eta$ , ο παράγων πλήρωσης  $FF$ , το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$  και η τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{OC}$ .

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθορίζεται, αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμείξεων και τη θερμοκρασία, και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αρχικά αυξάνει, καθώς αυξάνει και η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας, παραμένοντας, στη συνέχεια, για μεγαλύτερες τιμές της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας, σχεδόν ανεξάρτητη αυτής. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ , του Φ/Β στοιχείου είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος,  $E$ , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα.

Ο συντελεστής πλήρωσης ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$FF = \frac{I_{MAX}V_{MAX}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (3.38)$$

όπου:

$FF$	ο συντελεστής πλήρωσης του ΦΒ στοιχείου
$I_{MAX}$	το ρεύμα μέγιστης ισχύος
$V_{MAX}$	η τάση μέγιστης ισχύος
$I_{SC}$	το ρεύμα βραχυκύκλωσης
$V_{OC}$	η τάση ανοικτοκύκλωσης

Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο συντελεστής πλήρωσης τόσο το ΦΒ πλησιάζει τη συμπεριφορά ιδανικής πηγής ρεύματος.

Ο συντελεστής απόδοσης ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

(3.39)

$$\eta = \frac{P_{\text{ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ}}}{P_{\text{ΟΠΤΙΚΗ}}} = \frac{P_{\text{MAX}}}{H * A} = \frac{I_{\text{MAX}} V_{\text{MAX}}}{HA} = \frac{FF * I_{\text{SC}} * V_{\text{OC}}}{H * A}$$

Ο βαθμός απόδοσης ενός ΦΒ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

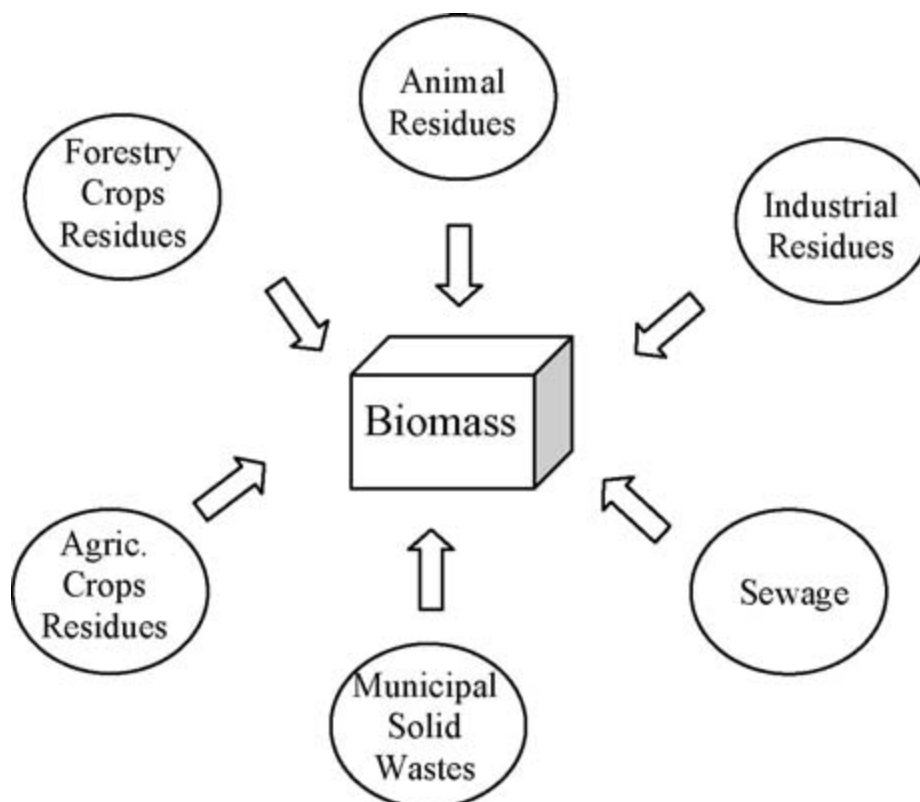
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΒΙΟΜΑΖΑ

#### 4.1 Εισαγωγή

Γενικά, ως βιομάζα ορίζεται η ύλη που έχει βιολογική (οργανική) προέλευση [56]. Πρακτικά, στον όρο βιομάζα εμπεριέχεται οποιοδήποτε υλικό που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό κόσμο. Σ' αυτήν περιλαμβάνονται οι φυτικές ύλες που προέρχονται είτε από φυσικά οικοσυστήματα, όπως π.χ. τα αυτοφυή φυτά και δάση είτε από ενεργειακές καλλιέργειες (έτσι ονομάζονται τα φυτά που καλλιεργούνται ειδικά με σκοπό την παραγωγή βιομάζας για παραγωγή ενέργειας) γεωργικών και δασικών ειδών, όπως π.χ. το σόργο το σακχαρούχο, το καλάμι, ο ευκάλυπτος κ.α., τα υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, όπως π.χ. τα άχυρα, στελέχη αραβοσίτου, στελέχη βαμβακιάς, κλαδοδέματα, κλαδιά δένδρων, φύκη, κτηνοτροφικά απόβλητα, οι κληματίδες κ.α., τα υποπροϊόντα που προέρχονται από τη μεταποίηση ή επεξεργασία των υλικών αυτών, όπως π.χ. τα ελαιοπυρηνόξυλα, υπολείμματα εκκοκκισμού βαμβακιού, το πριονίδι κ.α., καθώς και το βιολογικής προέλευσης μέρος των αστικών λυμάτων και σκουπιδιών [55].

Η βιομάζα θεωρείται ως μία από τις πιο σημαντικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για το προσεχές διάστημα. Η βιομάζα είναι οργανικό υλικό που προέρχεται από φυτά και ζώα. Είναι μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας διότι περισσότερες καλλιέργειες και δέντρα μπορούν πάντα να καλλιεργηθούν, και «απόβλητα» από αυτά πάντα θα υπάρχουν. Η σύγχρονη ενέργεια από βιομάζα συνίσταται από την ανακύκλωση οργανικών αποβλήτων από τη δασοκομία και την αγροτική παραγωγή όπως είναι τα κοτσάνια του καλαμποκιού, ο φλοιός του ρυζιού, τα απόβλητα από την ξυλεία και το πεπιεσμένο ζαχαροκάλαμο ή χρησιμοποιεί ειδικές, γρήγορα αναπτυσσόμενες, ενεργειακές καλλιέργειες όπως είναι η ιτιά και το switchgrass (*panicum virgatum*) ως καύσιμο. Σύμφωνα με την υπηρεσία ενεργειακών πληροφοριών των ΗΠΑ, το 11% της παγκόσμιας ενέργειας, τόσο για ηλεκτρική ενέργεια όσο και για θερμότητα, προέρχεται από τη βιομάζα, με το ποσοστό να αυξάνεται στο 90% για τις φτωχότερες χώρες, αν και σήμερα συμμετέχει σε ποσοστό 45% στη χρήση ΑΠΕ στις ΗΠΑ. Μερικά παραδείγματα καυσίμων βιομάζας είναι το ξύλο, οι καλλιέργειες σπαρτών, η κοπριά, και μερικά σκουπίδια όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 [5].



Σχήμα 4.1 Πηγές βιομάζας [5]

Η δυνατότητα της βιομάζας να βοηθήσει στην κάλυψη της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης είναι ευρέως αναγνωρισμένη. Όταν καίγεται, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη βιομάζα απελευθερώνεται σαν θερμότητα, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ο οποίος είτε οδηγείται σε μία τουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρισμού, είτε παρέχει θερμότητα σε βιομηχανίες και κατοικίες. Η καύση της βιομάζας περιλαμβάνει την καύση της μαζί με αέρα με ρυθμό ροής 4-5 kg αέρα για κάθε kg βιομάζας. Σε μικρή κλίμακα, αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται μόνο για θερμικές χρήσεις, ενώ η μεγάλης κλίμακας καύση με κύκλο ατμού είναι απαραίτητη για την παραγωγή ηλεκτρισμού [57]. Η βιομάζα μπορεί επίσης να παράγει καύσιμα για αυτοκίνητα, τα οποία είναι πολύ πιο καθαρά από το πετρέλαιο [5].

#### Πλεονεκτήματα

- Πρόκειται για μία θεωρητικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας
- Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος είναι ελάχιστος όταν χρησιμοποιείται ζύμωση ή πυρόλυση κλπ για την παραγωγή ενέργειας αντί για την παραδοσιακή καύση της φυτικής μάζας
- Οι αλκοόλες και τα άλλα καύσιμα που παράγονται από τη βιομάζα έχουν αποτελεσματική, βιώσιμη και σχετικά καθαρή καύση
- Είναι διαθέσιμη σε όλο τον κόσμο
- Η χρήση βιοκαυσίμων στα αυτοκίνητα θα μειώσει την μόλυνση από αέρια του θερμοκηπίου σε σχέση με την βενζίνη

Μειονεκτήματα

- Μπορεί να συμβάλλει τα μέγιστα στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην μόλυνση αν καεί απευθείας
- Είναι ακόμη ακριβή πηγή ενέργειας, τόσο ως προς την παραγωγή της βιομάζας όσο και ως προς τη μετατροπή σε αιθανόλη
- Σε μικρή κλίμακα είναι πολύ πιθανή μία καθαρή απώλεια ενέργειας-πρέπει να χρησιμοποιηθεί ενέργεια για την καλλιέργεια της φυτικής μάζας

**4.2 Αναερόβια χώνευση [55]**

Η αναερόβια χώνευση είναι μια χημική διαδικασία η οποία πραγματοποιείται με την απουσία οξυγόνου. Η διαδικασία μπορεί να είναι θερμοφιλή χώνευση, στην οποία η λάσπη βρίσκεται υπό ζύμωση μέσα σε δεξαμενές σε θερμοκρασία 55° C. Ονομάζεται θερμοφιλή εξαιτίας των μικροοργανισμών που παίρνουν μέρος στην διαδικασία, οι οποίοι περιέχουν ένζυμα τα οποία λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα ένζυμα έχουν μεγάλη σημασία σε πολλές εφαρμογές της βιοτεχνολογίας. Επίσης, η διαδικασία μπορεί να είναι και μεσόφιλη δηλαδή σε θερμοκρασία 36° C.



Σχήμα 4.2: Παραγωγή αερίου από αναερόβια χώνευση βιομάζας

Κατά την αναερόβια χώνευση παράγεται βιοαέριο, το οποίο είναι ένα καύσιμο αέριο μίγμα αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο( $\text{CH}_4$ ) και διοξείδιο άνθρακα( $\text{CO}_2$ ). Η ακριβής του σύσταση εξαρτάται από το είδος της οργανικής ουσίας που αποσυντίθεται. Το μεθάνιο, μαζί με όσο υδρογόνο προκύπτει από την χώνευση, αποτελούν το καύσιμο μέρος του βιοαερίου. Το μεθάνιο είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, με σημείο βρασμού τους  $-162^\circ \text{C}$ , ενώ καίγεται παράγοντας κυανόχρωμη φλόγα. Σε κανονική πίεση και θερμοκρασία ( $p=1 \text{ atm}$  και  $\theta=20^\circ \text{C}$ ) το μεθάνιο έχει πυκνότητα περίπου  $0,75 \text{ kg/m}^3$ . Εξαιτίας του γεγονότος ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι βαρύτερο, η πυκνότητα του βιοαερίου σε κανονικές συνθήκες είναι  $1,15 \text{ kg/m}^3$ . Το μεθάνιο παρουσιάζει θερμογόνο δύναμη ίση με  $11,06 \text{ Kwh/m}^3$ . Δεδομένου ότι το βιοαέριο περιέχει μεθάνιο σε ποσοστό μεταξύ 55 και 70%, εμφανίζει θερμογόνο δύναμη που κυμαίνεται μεταξύ 6 και  $7,5 \text{ Kwh/m}^3$ . Τα όρια αναφλεξιμότητας του στον αέρα είναι μεταξύ 6 και 12%, ενώ η θερμοκρασία ανάφλεξης του κυμαίνεται μεταξύ  $650-750^\circ \text{C}$ . Το πλεονέκτημα της αναερόβιας σε σχέση με την αερόβια χώνευση, έχει να κάνει με τον όγκο των αποβλήτων, αφού ως διαδικασία παράγει σημαντικά

μικρότερη ποσότητα αποβλήτων. Το πλεονέκτημα της αερόβιας έχει να κάνει με την ταχύτητα, αφού είναι σημαντικά ταχύτερη. Παρόλα ταύτα, η μεγάλη ποσότητα αποβλήτων της αερόβιας χώνευσης, συνιστά καλύτερη λύση για την παραγωγή βιομάζας την αναερόβια.

Πίνακας 4-1 Συνήθης σύσταση του βιοαερίου (Οι τελικές τιμές εξαρτώνται από το είδος του υλικού που αποσυντίθεται)

Αέριο	Περιεκτικότητα(%)
Μεθάνιο(CH <sub>4</sub> )	55-70
Διοξείδιο άνθρακα(CO <sub>2</sub> )	30-45
Υδρόθειο(H <sub>2</sub> S)	ίχνη
Υδρογόνο(H <sub>2</sub> )	1-2
Αμμωνία(NH <sub>3</sub> )	ίχνη
Μονοξείδιο άνθρακα(CO)	ίχνη
Αζωτο(N <sub>2</sub> )	ίχνη

Η πλήρης βιολογική αποδόμηση της οργανικής ύλης προς βιοαέριο σε αναερόβιες συνθήκες αποτελεί μια σύνθετη διεργασία και συνίσταται από την αλληλεπίδραση των διαφόρων ομάδων μικροοργανισμών. Κάθε μια από αυτές τις ομάδες ευθύνεται για την πραγματοποίηση διαφορετικού μέρους της συνολικής διεργασίας. Έτσι το υλικό που μπορεί να αποτελεί απόβλητο για μια ομάδα μικροοργανισμών, μπορεί να αποτελέσει υπόστρωμα για κάποια άλλη ομάδα. Η διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης διακρίνεται σε τρία ξεχωριστά στάδια, στο κάθε ένα από τα οποία δραστηριοποιούνται διαφορετικά είδη μικροοργανισμών. Τα τρία αυτά στάδια είναι η υδρόλυση, η οξυγένεση και τέλος η μεθανογένεση.

Κατά το στάδιο της υδρόλυσης, οι οργανικές ενώσεις μακράς μοριακής αλυσίδας (πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λίπη) διασπώνται σε ενώσεις μικρότερης μοριακής αλυσίδας. Διαφορετικής προέλευσης μικροοργανισμοί παράγουν ειδικά ένζυμα που δρουν καταλυτικά ως προς την διάσπαση των μακρομορίων, καθιστώντας την εφικτή σε λογικό χρονικό διάστημα. Σε μια ισορροπημένη διεργασία αναερόβιας χώνευσης περίπου το 50% των οργανικών ενώσεων διασπώνται σε οξικό οξύ (CH<sub>3</sub>COOH). Σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο μετατρέπεται το 20%, ενώ το απομένον 30% διασπάται σε μικρής μοριακής αλυσίδας λιπαρά οξέα (VFAs). Η διατήρηση μιας σταθερής ταχύτητας αποδόμησης των λαπαρών αυτών οξέων είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποτελεσματικότητα της αναερόβιας χώνευσης, αφού αν διαταραχτεί η ισορροπία και αυξηθεί η συγκέντρωσή τους, η όλη διαδικασία επιβραδύνεται, λόγω του γεγονότος ότι οι μικροοργανισμοί που διασπών τα λιπαρά οξέα έχουν μικρό ρυθμό ανάπτυξης.

Το τελευταίο στάδιο της αναερόβιας διαδικασίας αφορά την μεθανογένεση και πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Η δράση των βακτηρίων αυτών αφορά αφενός στην αποδόμηση του οξικού οξέως που προέκυψε από το στάδιο της οξυγένεσης σε μεθάνιο και αφετέρου στην παραγωγή μεθανίου από το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο που προέκυψαν. Σε ομαλές συνθήκες χώνευσης, περίπου το 70% του μεθανίου προέρχεται από διάσπαση οξικού οξέος και το υπόλοιπο 30% από την αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με το υδρογόνο. Τα μεθανογενή βακτήρια παρουσιάζουν τον βραδύτερο ρυθμό ανάπτυξης από όλους τους άλλους τύπους και για αυτό η δράση τους κρίνεται αποφασιστικής σημασίας για την ταχύτητα και την απόδοση ολόκληρης της διεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί για τα δυο τελευταία στάδια της χώνευσης ότι αναστολή του ενός οδηγεί και σε αναστολή του άλλου, εφόσον είναι απόλυτα προσαρμοσμένα.

Εφόσον η στοιχειακή σύσταση του υλικού τροφοδοσίας είναι γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί το θεωρητικό ποσό του παραγόμενου βιοαερίου και η σύστασή του βάσει της εξίσωσης του **Buswell**:



$$x=1/8(4c+h+2o+3n-2s)$$

$$y=1/4(4c-h-2o+3n+2s)$$

Πίνακας 4-2 Ενδεικτικός πίνακας απόδοσης σε βιοαέριο κατά την αναερόβια χώνευση βασικών οργανικών ουσιών

Οργανική ουσία	lt βιοαερίου /kg ουσίας	Περιεκτικότητα σε CH <sub>4</sub>
Κυτταρίνη	830	50
Πρωτεΐνη	793	64
Λίπη	1444	70

Πίνακας 4-3 Ενδεικτικός πίνακας αποδόσεων σε βιοαέριο τυπικών οργανικών υποστρωμάτων-αποβλήτων

Υπόστρωμα	Ολικά στερεά TS(%)	Πτητικά στερεά VS(%)	Απόδοση σε βιοαέριο (m <sup>3</sup> / kg VS)
Κοπριά χοίρων	3-10	75-80	0.3-0.8
Κοπριά βοοειδών	6-11	68-85	0.2-0.8
Κοπριά πουλερικών	10-29	67-77	0.3-0.8
Κοπριά προβάτων	18-25	80-85	0.3-0.4
Οστεο-κρεατάλευρα	25-45	75-90	0.8-1.2
Ενσίρωμα καλαμποκιού	20-40	90-95	0.6-0.7
Ενσίρωμα μηδικής	20-40	76-90	0.6-0.7
Τυρόγαλα	4-6	80-95	0.5-0.9
Υπολείμματα άρτου (ξηρά)	65-90	90-98	0.8-1.2
Ακατέργαστη γλυκερίνη	98	90	1.0-1.1
Περιεχόμενο στομάχου σφαγίων	12-15	80-84	0.3-0.4

### 4.3 Βιοαέριο

Σημαντικές ανάγκες μπορούν επίσης να καλυφθούν με τη χρήση του βιοαερίου ως καυσίμου σε μηχανές εσωτερικής καύσης, για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Αυτό αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και παράγεται από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών κυρίως αποβλήτων, όπως είναι τα λύμματα των χοιροστασιών, πτηνοτροφίων, βουστασιών, καθώς και βιομηχανικών και αστικών οργανικών απορριμμάτων. Στην περίπτωση των κτηνοτροφικών αποβλήτων, η παραγωγή του βιοαερίου γίνεται σε ειδικές εγκαταστάσεις, απλούστερες ή συνθετότερες, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Σ' αυτές, εκτός από το βιοαέριο, παράγεται και πολύ καλής ποιότητας οργανικό λίπασμα, του οποίου η διάθεση στην αγορά μπορεί να συμβάλλει στην οικονομική βιωσιμότητα μίας εφαρμογής αυτού του είδους. Στη δική μας εφαρμογή, θα

θεωρήσουμε ότι το βιοαέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε μία γεννήτρια για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

#### 4.4 Διαθεσιμότητα και είδη βιομάζας στο νησί της Αμοργού [58]

- Αροτραίες Καλλιέργειες
  - Σιτάρι

Πίνακας 4-4 Διαθέσιμη Βιομάζα από Σιτάρι

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,60	10,65	0,30	5,33	700
Αμοργού	--	--	--	--	--
Αρκεσίνης	0,01	0,15	0,00	0,08	10
Βρούτση	0,17	3,04	0,08	1,52	200
Θολαρίων	1,28	22,83	0,64	11,41	1500
Καταπόλων	0,26	4,57	0,13	2,28	300
Σύνολο	2,30	41,24	1,15	20,62	2710

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =1,0

Υγρασία=15%

Διαθεσιμότητα=50%

Θερμιδική αξία=0,017903

- Κριθάρι

Πίνακας 4-5 Διαθέσιμη Βιομάζα από Κριθάρι

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,69	12,33	0,34	6,16	1000
Αμοργού	--	--	--	--	--
Αρκεσίνης	--	--	--	--	--
Βρούτση	0,69	12,33	0,34	6,16	1000
Θολαρίων	3,79	67,79	1,89	33,90	5500
Καταπόλων	0,41	7,40	0,21	3,70	600
Σύνολο	5,58	99,84	2,79	49,92	8100

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,81

Υγρασία=15%

Διαθεσιμότητα=50%

Θερμιδική αξία=0,017903



- Βρώμη

Πίνακας 4-6 Διαθέσιμη Βιομάζα από Βρώμη

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	2,69	46,82	1,34	23,41	4000
Αμοργού	--	--	--	--	--
Αρκεσίνης	--	--	--	--	--
Βρούτση	1,01	17,56	0,50	8,78	1500
Θολαρίων	--	--	--	--	--
Καταπόλων	0,13	2,34	0,07	1,17	200
Σύνολο	3,83	60,71	1,91	33,36	5700

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,79

Υγρασία=15%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,01743

- Συνολικά από Αροτραίες καλλιέργειες

Πίνακας 4-7 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αροτραίες καλλιέργειες

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	3,97	69,80	1,98	64,90	5700
Αμοργού	0,89	15,71	0,44	7,86	1300
Αρκεσίνης	0,01	0,15	0,00	0,08	10
Βρούτση	1,87	32,93	0,93	16,46	2700
Θολαρίων	5,06	90,62	2,53	45,31	7000
Καταπόλων	0,80	14,30	0,40	7,15	1100
Σύνολο	12,59	223,51	6,30	111,75	17810

- Δενδρώδεις καλλιέργειες

- Λεμονιές

Πίνακας 4-8 Διαθέσιμη Βιομάζα από Λεμονιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,27	4,46	0,22	3,56	1000
Αμοργού	0,19	3,12	0,15	2,49	700
Αρκεσίνης	0,27	4,46	0,22	3,56	1000
Βρούτση	0,08	1,34	0,06	1,07	300
Θολαρίων	0,27	4,46	0,22	3,56	1000
Καταπόλων	0,94	15,59	0,76	12,47	3500
Σύνολο	2,02	33,41	1,62	26,73	7500

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,45

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0165

- Πορτοκαλιές

Πίνακας 4-9 Διαθέσιμη Βιομάζα από Πορτοκαλιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,06	1,01	0,05	0,81	300
Αμοργού	0,02	0,30	0,01	0,24	90
Αρκεσίνης	0,00	0,03	0,00	0,03	10
Βρούτση	0,01	0,20	0,01	0,16	60
Θολαρίων	0,10	1,38	0,08	1,35	500
Καταπόλων	1,53	25,24	1,22	20,20	7500
Σύνολο	1,73	28,48	1,38	22,78	8460

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,34

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0165

- Μανταρινιές

Πίνακας 4-10 Διαθέσιμη Βιομάζα από Μανταρινιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,20	3,26	0,16	2,61	500
Αμοργού	0,03	0,46	0,02	0,36	70
Αρκεσίνης	0,00	0,07	0,00	0,05	10
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,20	3,26	0,16	2,61	500
Καταπόλων	0,20	3,26	0,16	2,61	500
Σύνολο	0,62	10,29	0,49	8,23	1580

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,65

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0167

## ○ Αχλαδιές

Πίνακας 4-11 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αχλαδιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,33	5,57	0,27	4,46	700
Αμοργού	0,24	3,98	0,19	3,19	500
Αρκεσίνης	0,19	3,19	0,15	2,55	400
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,95	15,93	0,76	12,74	2000
Καταπόλων	0,05	0,80	0,04	0,64	100
Σύνολο	1,75	29,46	1,40	23,57	3700

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,79

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0168

## ○ Μηλιές

Πίνακας 4-12 Διαθέσιμη Βιομάζα από Μηλιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,25	4,18	0,20	3,35	500
Αμοργού	0,25	4,18	0,20	3,35	500
Αρκεσίνης	0,05	0,84	0,04	0,67	100
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,50	8,37	0,40	6,69	1000
Καταπόλων	--	--	--	--	--
Σύνολο	1,05	17,57	0,84	14,06	2100

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,83

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0168

## ○ Βερικοκιές

Πίνακας 4-13 Διαθέσιμη Βιομάζα από Βερικοκιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,21	3,36	0,17	2,69	1000
Αμοργού	0,02	0,34	0,02	0,27	100
Αρκεσίνης	0,02	0,34	0,02	0,27	100
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,38	6,05	0,30	4,84	1800
Καταπόλων	--	--	--	--	--
Σύνολο	0,63	10,08	0,50	8,06	3000

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,35

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,016

## ○ Ροδακινιές

Πίνακας 4-14 Διαθέσιμη Βιομάζα από Ροδακινιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,24	3,84	0,19	3,07	1000
Αμοργού	0,05	0,77	0,04	0,61	200
Αρκεσίνης	--	--	--	--	--
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,05	0,77	0,04	0,61	200
Καταπόλων	--	--	--	--	--
Σύνολο	0,34	5,38	0,27	4,30	1400

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,4

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,016

## ○ Συκιές

Πίνακας 4-15 Διαθέσιμη Βιομάζα από Συκιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,63	10,58	0,50	8,47	5000
Αμοργού	0,15	2,54	0,12	2,03	1200
Αρκεσίνης	0,01	0,23	0,01	0,19	110
Βρούτση	0,01	0,11	0,01	0,08	50
Θολαρίων	0,18	2,93	0,14	2,37	1400
Καταπόλων	0,02	0,30	0,01	0,24	140
Σύνολο	1,00	16,72	0,80	13,38	7900

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,21

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0168

## ○ Αμυγδαλιές

Πίνακας 4-16 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αμυγδαλιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	6,39	107,35	5,11	85,88	3000
Αμοργού	1,06	17,89	0,85	14,31	500
Αρκεσίνης	1,28	21,47	1,02	17,18	600
Βρούτση	0,11	1,79	0,09	1,43	50
Θολαρίων	0,21	3,58	0,17	2,86	100
Καταπόλων	0,85	14,31	0,68	11,45	400
Σύνολο	9,90	166,40	7,92	133,12	4650

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =3,55

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0168

## ○ Καρυδιές

Πίνακας 4-17 Διαθέσιμη Βιομάζα από Καρυδιές

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	0,57	9,58	0,46	7,66	500
Αμοργού	0,01	0,19	0,01	0,15	10
Αρκεσίνης	--	--	--	--	--
Βρούτση	--	--	--	--	--
Θολαρίων	0,06	0,96	0,05	0,77	50
Καταπόλων	--	--	--	--	--
Σύνολο	0,64	10,73	0,51	8,58	560

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =1,90

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,0168

## ○ Ελαιόδεντρα

Πίνακας 4-18 Διαθέσιμη Βιομάζα από Ελαιόδεντρα

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	18,36	330,30	11,02	198,18	30000
Αμοργού	4,90	88,08	2,94	52,85	8000
Αρκεσίνης	2,45	44,04	1,47	26,42	4000
Βρούτση	1,22	22,02	0,73	13,21	2000
Θολαρίων	18,36	330,30	11,02	198,18	30000
Καταπόλων	37,49	674,53	22,50	404,72	61266
Σύνολο	82,78	1489,26	49,67	893,56	135266

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =1,02

Υγρασία=40%

Διαθεσιμότητα=60%

Θερμιδική αξία=0,01799

## ○ Άμπελοι

Πίνακας 4-19 Διαθέσιμη Βιομάζα από Αμπέλια

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	2,49	47,19	1,99	37,75	6000
Αμοργού	1,66	31,46	1,33	25,17	4000
Αρκεσίνης	0,83	15,73	0,66	12,58	2000
Βρούτση	0,21	3,93	0,17	3,15	500
Θολαρίων	3,57	67,63	2,86	54,11	8600
Καταπόλων	0,52	9,83	0,42	7,86	1250
Σύνολο	9,28	175,77	7,42	140,61	22350

Υγρό υπόλειμμα/Υγρό προϊόν =0,83

Υγρασία=50%

Διαθεσιμότητα=80%

Θερμιδική αξία=0,01895

## ○ Συνολικά από Δενδρώδεις καλλιέργειες

Πίνακας 4-20 Διαθέσιμη Βιομάζα από Δενδρώδεις καλλιέργειες

Κοινότητα	Θεωρητική (tn)	Θεωρητική (GJ)	Διαθέσιμη (tn)	Διαθέσιμη (GJ)	Παραγωγή (kg)
Αιγιάλης	27,51	483,49	18,33	320,73	43500
Αμοργού	6,91	121,85	4,55	79,86	11870
Αρκεσίνης	4,28	74,65	2,93	50,92	6330
Βρούτση	1,43	25,53	0,90	16,02	2470
Θολαρίων	21,25	378,30	13,32	236,58	38550
Καταπόλων	41,10	734,35	25,38	452,57	73496
Σύνολο	102,48	1818,17	65,43	1156,68	176216

#### 4.5 Επεξεργασία των δεδομένων για είσοδο στο λογισμικό Homer

Οπότε οι συνολική διαθέσιμη βιομάζα ανά έτος για ηλεκτροπαραγωγή στο νησί είναι:

6,30 tn (από αροτραίες καλλιέργειες) + 65,43 tn (από δενδρώδεις καλλιέργειες) = 71,73 tn

Δηλαδή ανά ημέρα είναι διαθέσιμα:

$$\frac{71,73 \text{ tn/έτος}}{365 \text{ ημέρες/έτος}} \cong 0,20 \text{ tn/ημέρα}$$

Σημείωση: Το ποσό στρογγυλοποιήθηκε προς τα πάνω γιατί θεωρήθηκε ότι μπορεί να προέλθει έστω και λίγη βιομάζα από περιττώματα ζώων.

#### 4.6 Κόστος μεταφοράς της βιομάζας

Το κόστος μεταφοράς της βιομάζας δίνεται από τη σχέση [55]:

$$Biomass\ Cost = \frac{220}{4 * 30 * S.G. * \frac{100 - M.C.\%}{100}} \left[ \frac{\text{€}}{\text{dry } m^3} \right]$$

όπου:

*S. G.* η ειδική πυκνότητα της μεταφερόμενης μάζας  
*M. C.* η σχετική υγρασία σε %

Η πυκνότητα *S. G.* της μεταφερόμενης μάζας αλλάζει ανάλογα με τη σμίλευση των αρχικών πηγών στο χωράφι, οπότε δεν έχει σταθερή τιμή. Εμείς ενδεικτικά θα θεωρήσουμε μία τιμή  $100 \frac{kg}{m^3}$  για όλες τις πηγές βιομάζας, καθώς δεν μπορούμε να διαθέτουμε στοιχεία για την ένταση της σμίλευσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

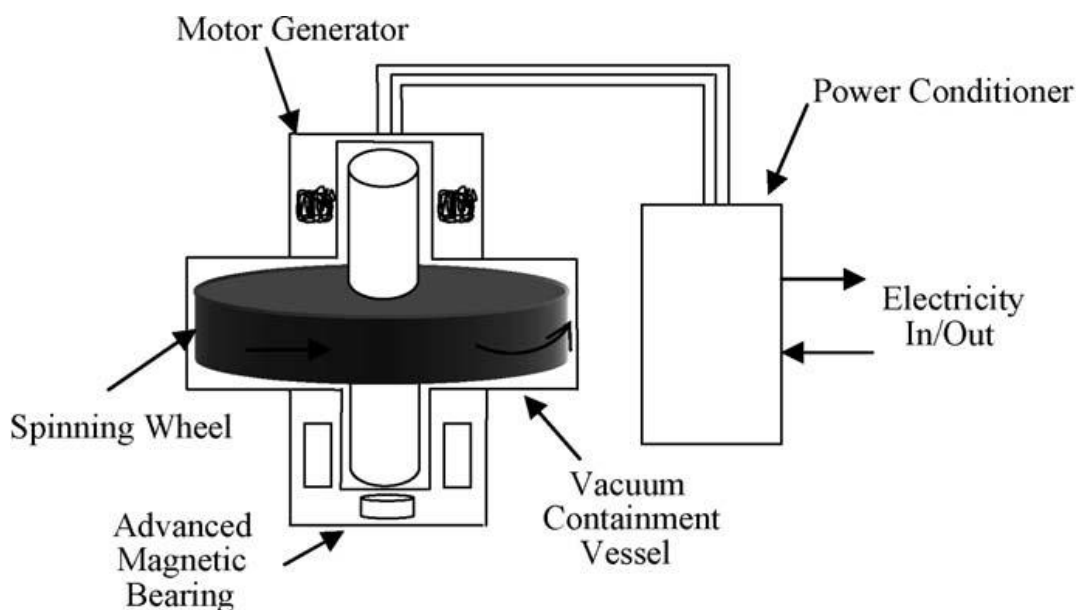
# ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί τη μετατροπή ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Όμως, η διαδικασία της μετατροπής ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδραυλική βασίζονται σε μη σταθερή παροχή πρωτογενούς ενέργειας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το ενεργειακό σύστημα πρέπει να έχει κάποια δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να ξεπεράσει τις διακυμάνσεις αυτές. Σε άλλες περιπτώσεις, η αποθήκευση ενέργειας παρέχει ένα τρόπο για την εκμετάλλευση της περίσσειας της παραγωγής ενέργειας, π.χ. παραγωγή περίσσειας ενέργειας τη νύχτα. Η αποθήκευση ενέργειας συνήθως προκύπτει μέσω μίας διαδικασίας μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία άλλη μορφή ενέργειας. Επιλογές για αποθήκευση σε μεγάλη κλίμακα είναι η αποθήκευση σε μπαταρίες (battery energy storage, BES), οι σφόνδυλοι (flywheels), η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση (superconducting magnetic energy storage, SMES), η αποθήκευση με συμπιεσμένο αέρα (compressed air energy storage, CAES) και η αντλησιοταμίευση (pumped storage).

### 5.2 Σφόνδυλοι [5]

Ο σφόνδυλος είναι ένα σύστημα ηλεκτρομηχανικής αποθήκευσης ενέργειας στο οποίο η ενέργεια αποθηκεύεται ως κινητική ενέργεια μιας περιστρεφόμενης μάζας. Έχει απόδοση της τάξης του 80%. Ο σφόνδυλος χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της ενέργειας σε μηχανές καύσης και καθιστά τη ροή της ενέργειας ομοιόμορφη. Το σχήμα 5.1 παρουσιάζει ένα σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου.



Σχήμα 5.1 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε σφόνδυλο

Ο σφόνδυλος χρησιμοποιεί την περιστροφική ενέργεια για να τροφοδοτήσει μία ηλεκτρική γεννήτρια μέχρις ότου η τριβή τη μηδενίσει. Η αποθηκευμένη ενέργεια ισούται με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας των επιμέρους μαζών που συνθέτουν το σφόνδυλο. Η κινητική ενέργεια ενός σφονδύλου σε  $N \cdot m$  (J) δίνεται από την εξίσωση

$$E_f = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (5.1)$$

όπου  $I$  είναι η ροπή αδράνειας ( $Kg \cdot m^2$ ) και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα (rad/s). Η ροπή αδράνειας ορίζεται ως

$$I = kMR^2 \quad (5.2)$$

όπου  $M$  είναι η μάζα,  $R$  η ακτίνα και  $k$  η σταθερά αδράνειας που εξαρτάται από το σχήμα του αντικειμένου.

Ο δρομέας περιέχει ένα κινητήρα/γεννήτρια που μετατρέπει ενέργεια από ηλεκτρική σε μηχανική και αντίστροφα. Στο σύστημα ο δρομέας λειτουργεί εν κενώ και περιστρέφεται σε έναν ειδικό τριβέα (bearing) ώστε να μειωθεί η τριβή και να αυξηθεί η απόδοση. Τα συστήματα ατσάλινου δρομέα βασίζονται κυρίως στη μάζα του δρομέα για να αποθηκεύσουν ενέργεια ενώ η σύνθετοι σφόνδυλοι βασίζονται κυρίως στην ταχύτητα. Κατά τη φόρτιση, ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσω του κινητήρα αυξάνοντας την ταχύτητα του σφονδύλου, αλλά η γεννήτρια παράγει ροή ρεύματος έξω από το σύστημα επιβραδύνοντας το σφόνδυλο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Για τη βελτιστοποίηση του λόγου ενέργεια προς μάζα ο σφόνδυλος πρέπει να περιστρέφεται στη μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Για αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας απαιτούνται μεγάλοι χρόνοι ακινητοποίησης. Χρησιμοποιώντας bearings χωρίς τριβή και ένα κενό για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης του αέρα μπορεί να οδηγήσουν σε χρόνους ακινητοποίησης περίπου 6 μηνών. Τα μεγέθη των σφονδύλων κυμαίνονται από 40 kW έως 1,6 MW για 5-120 s.

Οι σφόνδυλοι χρησιμοποιούνται ως συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος ώστε να παρέχουν προστασία για κρίσιμες λειτουργίες [59]. Μία αναπτυσσόμενη χρήση της τεχνολογίας του σφονδύλου περιλαμβάνει έλεγχο συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν ενσωματωθούν σε ασθενώς διασυνδεδεμένα και αυτόνομα συστήματα που τροφοδοτούνται από Α/Γ και/ή άλλες ΑΠΕ οι σφόνδυλοι μπορούν να παρέχουν μία αποτελεσματική μικρής διάρκειας αποθήκευση για το φιλτράρισμα των διακυμάνσεων της αιολικής ισχύος λόγω της τύρβης του ανέμου και της μη προβλεπόμενης διακύμανσης του φορτίου.

### Πλεονεκτήματα

- Οι σφόνδυλοι μπορούν να αποθηκεύουν και να ελευθερώνουν μεγάλες ποσότητες ισχύος πολύ γρήγορα και αποτελεσματικά σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες.
- Η διάρκεια ζωής και συντήρησης ενός σφονδύλου είναι γύρω στα 20-30 χρόνια και μερικοί μπορούν να λειτουργούν χωρίς συντήρηση στο χρόνο αυτό.
- Οι σφόνδυλοι δεν υποφέρουν από φαινόμενο μνήμης το οποίο εμφανίζεται σε μερικούς τύπους μπαταριών.
- Μπορούν να λειτουργούν κάτω από υψηλές θερμοκρασίες και κάτω από μεγαλύτερο εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών.

- Οι σφόνδυλοι δεν επηρεάζονται από μεταβολές στη θερμοκρασία όπως οι χημικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.
- Είναι επίσης λιγότερο επιβλαβείς προς το περιβάλλον.
- Με μία απλή μέτρηση της ταχύτητας της περιστροφής μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή ποσότητα ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο σφόνδυλο.

#### Προκλήσεις

- Η χρήση συσσωρευτών σφονδύλων προς το παρόν παρεμποδίζεται από τον κίνδυνο της εκρηκτικής θραύσης της μάζας λόγω υπερφόρτισης.
- Ένας από τους κύριους περιορισμούς της σχεδίασης των σφονδύλων είναι η δύναμη εφελκυσμού των υλικών που χρησιμοποιούνται για το δρομέα.

### **5.3 Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση (YMA) [5]**

Άλλος τύπος αποθήκευσης ενέργειας είναι η Υπεραγώγιμη Μαγνητική Αποθήκευση (YMA). Η YMA είναι μία γρήγορη, ελεγχόμενη συσκευή η οποία μπορεί είτε να απορροφά είτε να παρέχει ενεργό ή άεργο ισχύ. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει τη μετατροπή του εκτός αιχμής DC ρεύματος και την τροφοδοσία του σε ένα πηνίο σχήματος doughnut αποτελούμενο από υπεραγώγιμο καλώδιο. Το πηνίο είναι εγκατεστημένο σε μία σχισμή και κρατείται σε υπεραγώγιμη θερμοκρασία μέσω ενός συστήματος ψύξης. Με αυτή τη διαδικασία η μονάδα μπορεί να αποθηκεύσει και να εξάγει ενέργεια με απόδοση άνω του 90% και να φορτίζει σε λιγότερο από 25 ms [60]. Όμως, το σύστημα αυτό είναι πολύ ακριβό και πρέπει να επιλυθούν μερικά προβλήματα που σχετίζονται με τους υπεραγωγούς. Επιπλέον, η YMA έχει άγνωστες μέχρι στιγμής επιπτώσεις στη υγεία λόγω του υψηλού μαγνητικού πεδίου.

Πολλοί λόγοι είναι υπεύθυνοι για την προτίμηση της YMA σε σχέση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της YMA είναι ότι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ φόρτισης και αποφόρτισης είναι μικρή. Κατά συνέπεια, η ισχύς είναι διαθέσιμη σχεδόν άμεσα και πολύ υψηλή ισχύς μπορεί να αποδοθεί για μία μικρή χρονική περίοδο. Άλλες μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας όπως η αντλιοσταμείωση ή ο συμπιεσμένος αέρας έχουν σημαντική χρονική καθυστέρηση σχετικά με τη μετατροπή της ενέργειας από αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια πίσω σε ηλεκτρισμό. Οπότε η YMA είναι η πιο βιώσιμη επιλογή αν η ζήτηση ενός πελάτη πρέπει να καλυφθεί άμεσα. Άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι απώλειες ισχύος είναι μικρότερες σε σχέση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης μιας και τα ηλεκτρικά ρεύματα στο σύστημα συναντούν σχεδόν μηδενική αντίσταση. Τέλος, η YMA μπορεί να εγγραφεί μεγάλη αξιοπιστία αφού στα κύρια εξαρτήματά της απουσιάζουν κινούμενα μέρη.

### **5.4 Αποθήκευση με Συμπιεσμένο Αέρα (ΑΣΑ) [5]**

Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι η μέγιστη, οι μονάδες ΑΣΑ συμπιέζουν αέρα σε μία υπόγεια δεξαμενή, γνωστή ως κοιλότητα. Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μεγιστοποιείται, ο αέρας αποσύρεται, θερμαίνεται με φυσικό αέριο ή πετρέλαιο και διέρχεται μέσω τουρμπινών διαστολής για να οδηγήσει μία γεννήτρια. Αυτές οι μονάδες καίνε σχεδόν το ένα τρίτο του καυσίμου μιας συμβατικής τουρμπίνας καύσης, οπότε παράγουν το ένα τρίτο των επικίνδυνων μολυντών. Αφού η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα για

την παραγωγή ηλεκτρισμού, τα μηχανήματα είναι εμπορικά διαθέσιμα. Μία επιφανής εφαρμογή της ΑΣΑ είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω Α/Γ λόγω της στοχαστικότητας της αιολικής ενέργειας.

Διαβατικές και αδιαβατικές κλάσεις της ΑΣΑ είναι διαθέσιμες. Στη διαβατική ΑΣΑ, ο αέρας ψύχεται πριν εισαχθεί στην κοιλότητα και προθερμαίνεται πριν την απόσυρσή του με μία διαδικασία που χρησιμοποιεί αεριοστρόβιλο. Η πρώτη τέτοια μονάδα κατασκευάστηκε το 1978 στη Γερμανία, με μία ικανότητα ίση με 290 MW [61]. Στην άλλη περίπτωση, η θερμική ενέργεια του αέρα αποθηκεύεται ξεχωριστά και ανακτάται πριν ο συμπιεσμένος αέρας επεκταθεί στην τουρμπίνα αέρα σε μία αδιαβατική ΑΣΑ. Τέτοιες μονάδες είναι σήμερα υπό κατασκευή και υπόσχονται μεγαλύτερη απόδοση και μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> [62].

## 5.5 Αντλησιοταμίευση [5]

Όπως στην ΑΣΑ, οι εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια όταν η ζήτηση δεν είναι μέγιστη, για να αντλήσουν νερό από μία δεξαμενή μικρότερου σε μία δεξαμενή μεγαλύτερου ύψους. Όταν το νερό που είναι αποθηκευμένο στην άνω δεξαμενή απελευθερωθεί, περνά μέσα από υδραυλικές τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την άντληση του νερού στην άνω δεξαμενή (όταν η ζήτηση δεν είναι μέγιστη) μπορεί να αποθηκευτεί επ' αόριστον στην άνω δεξαμενή. Συνεπώς, ο συνδυασμός των δύο δεξαμενών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας σε υψηλές ποσότητες και για μεγάλες χρονικές περιόδους. Η αντλησιοταμίευση είναι η μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα που υπάρχει σήμερα. Η αντλησιοταμίευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομάλυνση της ζήτησης όταν χρησιμοποιούνται υδροηλεκτρικές μονάδες ως μονάδες βάσης, αφού η συχνή ένταξη-απένταξη των μεγάλων σταθμών παραγωγής είναι ένας μη αποτελεσματικός τρόπος λειτουργίας τους. Βασικά πλεονεκτήματα της αντλησιοταμίευσης είναι η χαμηλή τιμή της ισχύος, η ρύθμιση συχνότητας στο δίκτυο, και η ικανότητα εφεδρείας. Τα πλεονεκτήματα αυτά εμφανίζονται όταν το νερό απελευθερώνεται μέσω μίας τουρμπίνας, όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέγιστη.

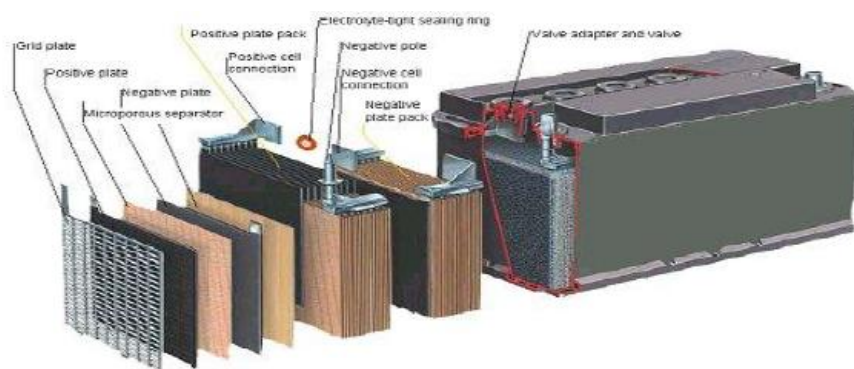
## 5.6 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (Battery Energy Storage Systems)

Η βασική λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης σε μπαταρίες είναι η παροχή στρεφόμενης εφεδρείας σε περίπτωση όπου η μονάδα παραγωγής ενέργειας ή η γραμμή μεταφοράς υποστεί κάποια βλάβη. Για τα συστήματα αυτά, χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες για την αποθήκευση ηλεκτρισμού στη μορφή χημικής ενέργειας. Για να καλύψουν τις ανάγκες αποθήκευσης, η μπαταρίες πρέπει να έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλή ισχύ, υψηλή απόδοση φόρτισης, καλό κύκλο λειτουργίας, μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρό αρχικό κόστος. Οι περισσότερες μπαταρίες αποθήκευσης είναι φτιαγμένες από πολλά στοιχεία μολύβδου-οξέως και χρησιμοποιούν τεχνολογία παρόμοια με αυτή των μπαταριών των αυτοκινήτων [5].

Εκτός από αυτό, οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές, σχετιζόμενες με τα ενεργειακά συστήματα, όπως εξομάλυνση σε φορτίου καθώς και σε έλεγχο τάσης, άεργου ισχύος και συχνότητας. Οι μπαταρίες έχουν γρήγορη απόκριση· ο χρόνος απόκρισής τους σε αλλαγές του φορτίου είναι περίπου 20 ms.

Είναι επίσης αθόρυβες και δεν μολύνουν, πράγμα που τις καθιστά ιδανικές για εγκατάσταση σε ημιαστικές περιοχές, κοντά στο κέντρο του φορτίου. Οι ακόλουθες τεχνολογίες έχουν χρησιμοποιηθεί ή/και προταθεί για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας [63]: μπαταρίες μολύβδου-οξέως (lead-acid batteries), μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride batteries, NiMH batteries), μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium ion batteries) και μπαταρίες πολυμερών λιθίου (lithium polymer batteries) [5].

Ο παλαιότερος και πιο καθιερωμένος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι στη μορφή χημικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές αποτελούνται από συσσωρευμένα κύτταρα (συσσωρευτές) και κάθε κύτταρο αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη σε υγρή, ρευστή ή στερεή μορφή, μαζί με ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο. Κατά την εκφόρτιση, γίνονται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στα δύο ηλεκτρόδια, παράγοντας ροή ηλεκτρονίων μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αντιστρεπτές, επιτρέποντας στην μπαταρία να φορτισθεί εφαρμόζοντας μια εξωτερική τάση στα δύο ηλεκτρόδια. Η δομή ενός συσσωρευτή φαίνεται στο σχήμα 5.2 [64]:



Σχήμα 5.2 Δομή ενός συσσωρευτή μολύβδου οξέως

Οι συσσωρευτές συνήθως διακρίνονται με βάση τη χωρητικότητά τους ως προς την ενέργεια και ως προς την ισχύ. Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια στοιχεία αξιολόγησης των συσσωρευτών, τα οποία σχετίζονται άμεσα με το κόστος.

- Απόδοση συσσωρευτή (%): Είναι το ποσοστό εκείνο που δείχνει το ποσό της ισχύος ή της ενέργειας που εκφορτίζεται ως προς την ικανότητα της μπαταρίας, με το υπόλοιπο να είναι συνήθως απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον.
- Ικανότητα μέγιστης ισχύος (W): Είναι το ανώτερο όριο ισχύος το οποίο μπορεί να μεταφερθεί από και προς τη μπαταρία (σε kW ή MW).
- Ειδική ενέργεια (Wh/kg): Είναι η αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας σε ενέργεια (Wh) ως προς τη μάζα της (kg).
- Ειδική ισχύς (W/kg): Είναι η αποθηκευτική ικανότητα της μπαταρίας σε ισχύ (W) ως προς τη μάζα της (kg).
- Πυκνότητα ισχύος (C): Η πυκνότητα ισχύος της μπαταρίας συσχετίζει την ισχύ (kW) που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία για δεδομένο μέγεθος (Wh). Μία μπαταρία μεγάλης πυκνότητας ισχύος θα μπορεί να παρέχει την ίδια ισχύ αδιάλειπτα, σε σχέση με μία μπαταρία χαμηλότερης πυκνότητας ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος μετράται σε βαθμό κατά C ο οποίος είναι πολ/στής που εκφράζει την ικανότητα της μπαταρίας σε A σε σχέση με τα Ah της. Με αυτόν τον τρόπο η πυκνότητα ισχύος είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία 45 Ah πυκνότητας ισχύος 5C είναι

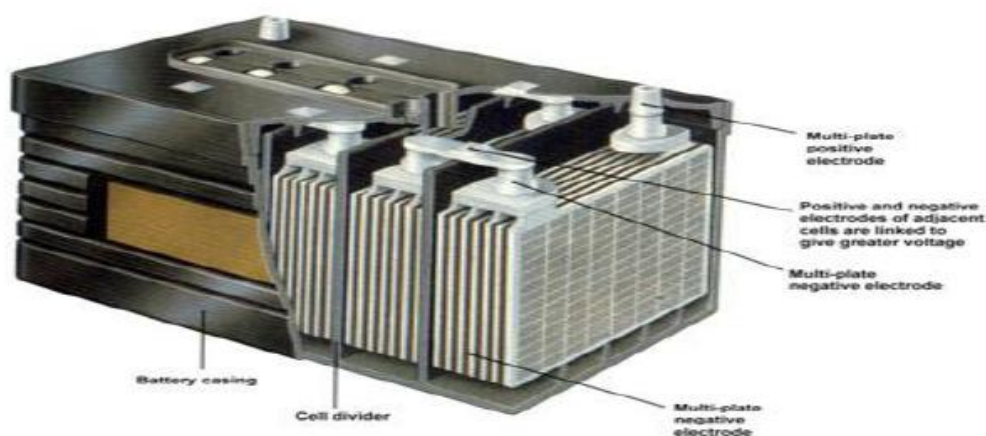
ικανή να δώσει 5·45 A συνεχόμενα. Έτσι μια μπαταρία 12V 60Ah (720 Wh) και ικανότητας 5C αποδίδει ισχύ 3,6 kW ενώ η ίδια μπαταρία 12V/60 Ah (720 Wh) και ικανότητας 20C αποδίδει ισχύ 14,4 kW.

- Διάρκεια ζωής (κύκλους): Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετράται σε κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης.
- Αυτοεκφόρτιση (self discharge) %: Όλοι οι συσσωρευτές είτε λόγω εσωτερικών απωλειών είτε λόγω κάποιας μικρής διαρροής έχουν ένα ποσοστό αυτοεκφόρτισης.
- Βάθος εκφόρτισης %: Είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία ανά μονάδα στην περίπτωση που δίνεται εντολή εκφόρτισης. Δηλαδή με την εκφόρτιση προσφέρεται μόνο ένα ποσοστό της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για το υπόλοιπο δεν επιδιώκεται η ανάκτηση, ώστε να αποφευχθεί η πλήρης καταστροφή του συσσωρευτή.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές αποτελούνται κυρίως από τη διάταξη των συσσωρευτών, το σύστημα ελέγχου, το σύστημα ισχύος και το σύστημα προστασίας των συσσωρευτών. Στα συστήματα BESS, ραγδαία ανάπτυξη έχουν κυρίως τα δύο πρώτα. Παρακάτω θα αναλύσουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά και τις τεχνολογίες των διαφόρων τύπων συσσωρευτών. Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικοί πίνακες τόσο ως προς τα χαρακτηριστικά όσο και ως προς τις δυνατότητες εφαρμογής των διάφορων τεχνολογιών [64].

### 5.6.1 Τεχνολογία μολύβδου-οξέος (Lead Acid) [64]

Οι συσσωρευτές μολύβδου οξέος (lead acid) είναι ο παλαιότερος τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας αφού χρησιμοποιείται για παραπάνω από 130 χρόνια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων συσσωρευτών όπως η κλασική τοπολογία ρυθμιζόμενη από βαλβίδα και η τοπολογία που χρησιμοποιεί gel ως ηλεκτρολύτη παρά υγρό. Κάθε κύτταρο αποτελείται από ένα θετικό ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου και από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο σπογγοειδούς μολύβδου, τα οποία διαχωρίζονται από ένα πορώδες υλικό εμβαπτισμένο σε διάλυμα ηλεκτρολύτη θεικού οξέος που περικλείεται από ένα πλαστικό περίβλημα. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3 Συσσωρευτής μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενος από βαλβίδα

Παρά τη χαμηλή τιμή πυκνότητας ενέργειας κατά βάρος λόγω της υψηλής πυκνότητας του μολύβδου, οι συσσωρευτές αυτοί έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα. Μαζί με το χαμηλό κόστος, καθίστανται ελκυστικοί για χρήση σε μηχανοκίνητα οχήματα για να παρέχουν την ισχύ που απαιτείται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγεται το γεγονός ότι ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος και διαβρωτικός και επομένως επιβλαβής για το περιβάλλον. Επιπλέον σε περίπτωση εφαρμογής μεγαλύτερης τάσης, παράγονται από την ηλεκτρόλυση του ύδατος εκρηκτικά αέρια, οπότε θα πρέπει να χειρίζονται με προσοχή. Σε επίπεδο εταιριών υπάρχουν σημαντικές σε μέγεθος εγκαταστάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 5-1. [65]

Πίνακας 5-1: Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών μολύβδου οξέος

Τοποθεσία Χαρακτηριστικά	Μέγεθος	Εφαρμογή/Τύπος κατασκευής
Southern California Edison Chino, CA ΗΠΑ	10 MW/40 MWh	Εξομάλυνση φορτίου (Load leveling) /(Open/vented)
Puerto Rico El. Power Authority San Juan, Πουέρτο Ρίκο	20 MW/ MWh	Ρύθμιση συχνότητας/(Open stirred electrolyte)
GNB Industrial Power Metlakatla Αλάσκα, ΗΠΑ	1 MW/1,4 MWh	Παροχή φορτίου/ (Sealed, Valve Regulated)

### 5.6.2 Τεχνολογία νικελίου-καδμίου (NiCd) [64]

Οι συσσωρευτές νικελίου καδμίου (NiCd) είναι παρόμοιοι τεχνολογικά με τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος σε σχέση με την ωριμότητα χρήσης του αλλά παρουσιάζουν διαφορετική χρησιμότητα στις εφαρμογές. Όπως ο μολύβδος, έτσι και το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό υλικό που κρύβει μεγάλους περιβαλλοντολογικούς κινδύνους αν δε χειριστεί σωστά.

Οι συσσωρευτές αυτοί συχνά προτιμούνται σε σχέση με τους αντίστοιχους μολύβδου οξέος σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία όπως: φωτισμός εκτάκτου ανάγκης, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, τηλεπικοινωνίες, εκκίνηση γεννητριών. Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν μικρό κόστος συντήρησης, γεγονός που τους δίνει πλεονέκτημα έναντι των συσσωρευτών μολύβδου οξέος. Στα μειονεκτήματά τους ανήκει η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη. Η πιο χαρακτηριστική εγκατάσταση αυτού του είδους συσσωρευτών είναι στην Αλάσκα και μπορεί να παρέχει 27 MW για 15 λεπτά [66],[67].

### 5.6.3 Τεχνολογία θειούχου νατρίου (NaS) [64]

Οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου αποτελούνται από τηγμένο θείο στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο και τηγμένο νάτριο στο αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, ενώ τα δύο αυτά ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από ένα στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη φτιαγμένο από αλουμίνα. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα θετικά φορτισμένα ιόντα του νατρίου να τον διαπεράσουν και να ενωθούν με το θείο ώστε να σχηματίσουν ενώσεις πολυθειικού νατρίου. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, θετικά ιόντα νατρίου περνούν από τον ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόνια ρέουν στο εσωτερικό

κύκλωμα της μπαταρίας παράγοντας τάση 2V. Η μπαταρία διατηρείται στους 300 °C περίπου ώστε να επιτρέψει αυτή τη διαδικασία.

Οι συσσωρευτές NaS έχουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, 4,2 φορές κατ' όγκο και 5,8 φορές κατά βάρος, από τους συσσωρευτές μολύβδου οξέος με μικρότερες ανάγκες συντήρησης. Επιπλέον έχουν πολύ μεγάλη απόδοση, κοντά στο 90%, ενώ δεν παρουσιάζουν καθόλου διαρροές. Μειονέκτημα των συσσωρευτών αυτών είναι ότι χρειάζονται πηγή θερμότητας για να επιτύχουν τέτοια θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες. Η πιο σημαντική εφαρμογή τους αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης άεργου ισχύος σε υποσταθμούς παρέχοντας όμως και τη δυνατότητα κυκλικής λειτουργίας στην Ιαπωνία και στις ΗΠΑ [68].

#### 5.6.4 Τεχνολογία ιόντων λιθίου (Li ion) [64]

Η κάθοδος σε αυτούς τους συσσωρευτές είναι ένα μεταλλικό οξείδιο του λιθίου και η άνοδος είναι κατασκευασμένη από γραφιτικό άνθρακα σε στρώματα. Ο ηλεκτρολύτης είναι κατασκευασμένος από άλατα λιθίου διαλυμένα σε οργανικό διαλύτη. Όταν η μπαταρία φορτίζεται, τα άτομα Li στην κάθοδο γίνονται ιόντα και διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη προς την άνοδο από άνθρακα όπου συνδυάζονται με εξωτερικά ηλεκτρόνια και εναποτίθενται μεταξύ των στρωμάτων του άνθρακα ως άτομα λιθίου. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται κατά την εκφόρτιση.

Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300-400 kWh/m<sup>3</sup> λιθίου), υψηλότερη απόδοση μετατροπής και μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 3000 κύκλοι για βάθος εκφόρτισης 80%). Επειδή το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο, οι συσσωρευτές που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι κατά πολύ ελαφρύτεροι από τους συνηθισμένους. Γι' αυτό το λόγο και λόγω της μεγάλης απόδοσής τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές. Πρόσφατα έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης χρήσης συσσωρευτών Li-Ion και σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η ικανότητα αυτών των συσσωρευτών μπορεί να φτάσει σε επίπεδα λίγων δεκάδων kW. Μία πρώτη εγκατάσταση στη χώρα μας είναι η πειραματική εγκατάσταση συμπαραγωγής του Ε.Μ.Π. και της Ε.Π.Α. Αττικής [69].

#### 5.6.5 Τεχνολογία λιθίου-πολυμερούς (Li-Polymer) [64]

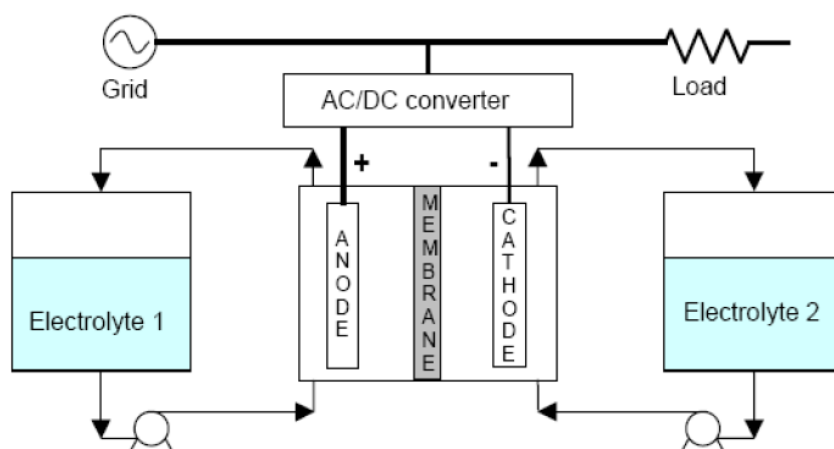
Σήμερα τα πλέον επαναφορτιζόμενα στοιχεία λιθίου είναι τα επονομαζόμενα λιθίου-πολυμερούς. Αυτά στην πραγματικότητα είναι στοιχεία «Λιθίου Ιόντων Πολυμερούς», αλλά έτσι έχει επικρατήσει να λέγονται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το στοιχείο του λιθίου ιόντος πολυμερούς, δηλαδή το πορώδες διαχωριστικό φύλλο, έχει αντικατασταθεί από ένα φύλλο συμπαγούς πολυμερούς υλικού που να μην είναι μη αγώγιμο στον ηλεκτρισμό, αλλά επιτρέπει να περάσουν τα ιόντα. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι λίθιο στην κάθοδο και γραφίτης (άνθρακας) στην άνοδο. Τα στοιχεία Li-Po έχουν ονομαστική τάση 3,7 V. Η πρακτική περιοχή τάσης είναι από 4,2 V όταν είναι φορτισμένα έως 3 V όταν εκφορτιστούν. Η εξωτερική διαφορά από τα στοιχεία Li-Ion είναι ότι περικλείονται σε μαλακό περίβλημα που λέγεται φάκελος. Αυτό το γεγονός τα κάνει να είναι πολύ ελαφριά συγκριτικά με όλα τα άλλα στοιχεία και αποκλείει τον κίνδυνο έκρηξης, αφού δεν μπορεί να αναπτυχθεί μεγάλη πίεση στο εσωτερικό του στοιχείου, όχι όμως και τον κίνδυνο ανάφλεξης. Η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας τα καθιστά εξαιρετική λύση για ηλεκτρική κίνηση. Η λύση όμως δεν είναι ακόμα ικανοποιητική στο οικονομικό μέρος.



### 5.6.6 Τεχνολογία συσσωρευτών ροής (flow batteries) [64]

Αυτός ο τύπος μπαταρίας αποτελείται από δύο ηλεκτρολυτικούς ταμιευτήρες στους οποίους οι ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν (μέσω αντλιών) μέσα από ένα ηλεκτροχημικό κύτταρο που περιλαμβάνει μια άνοδο, μία κάθοδο και μία μεμβράνη που τις διαχωρίζει. Η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό στο ηλεκτροχημικό κύτταρο όταν οι δύο ηλεκτρολύτες το διαπερνούν. Και οι δύο ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι χωριστά σε δεξαμενές έξω από το ηλεκτροχημικό κύτταρο. Το μέγεθος των δεξαμενών και η ποσότητα των ηλεκτρολυτών καθορίζει την πυκνότητα ενέργειας σε αυτούς τους συσσωρευτές. Παρ' όλα αυτά, η πυκνότητα ισχύος εξαρτάται από τις αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και στην κάθοδο. Η δομή των συσσωρευτών ροής φαίνεται στο σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε συσσωρευτές ροής

Οι συσσωρευτές ροής ονομάζονται συχνά και συσσωρευτές οξειδοαναγωγής (redox flow) εξαιτίας των αντιδράσεων μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών.

Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών αυτών είναι: η υψηλή ισχύς, η μεγάλη διάρκεια, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος, η εύκολη αντικατάσταση των ηλεκτρολυτών, η γρήγορη μετάβαση από εκφόρτιση σε φόρτιση, αλλά και η μικρή απόδοση λόγω των απωλειών στις χημικές αντιδράσεις. Επιπλέον, δεν παρουσιάζεται καθόλου αυτοεκφόρτιση, εφόσον οι ηλεκτρολύτες αποθηκεύονται χωριστά. Οι κύριες κατηγορίες συσσωρευτών ροής είναι οι εξής:

- Οξειδοαναγωγής βαναδίου (Vanadium redox-VRB): Σε κάθε κύτταρο μιας μπαταρίας VRB, τα ζεύγη αποθηκεύονται σε ήπιο διάλυμα θειικού οξέος (ηλεκτρολύτες). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης/εκφόρτισης,  $H^+$  ιόντα ανταλλάσσονται μεταξύ των δύο δεξαμενών μέσω της μεμβράνης από πολυμερές, ώστε να παράγουν μία τάση 1,4-1,6 V.
- Βρωμιούχου ψευδαργύρου (Zinc-Bromine-ZnBr): Σε κάθε κύτταρο μιας μπαταρίας ZnBr, δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν μέσω πλαστικού ηλεκτροδίου σε δύο διαφορετικά διαμερίσματα, χωριζόμενα από μια μικροπορώδη μεμβράνη. Κατά την εκφόρτιση, Zn και Br ενώνονται και σχηματίζουν ZnBr, παράγοντας 1,8 V σε κάθε κύτταρο. Κατά τη φόρτιση, μεταλλικός ψευδάργυρος εναποτίθεται ως ένα λεπτό φιλμ στη μεριά του ηλεκτροδίου [28,29].

Οι συσσωρευτές αυτοί έχουν βρει εφαρμογές από ερευνητικά κέντρα και εταιρίες από το 1980. Οι δύο κυριότερες εταιρίες είναι οι “Sumitomo Industries” και η “ZBB Energy Corporation”, των οποίων οι εφαρμογές συνοψίζονται στον πίνακα 5-2:

Πίνακας 5-2 Χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις συσσωρευτών ροής

Πελάτης	Μέγεθος	Εφαρμογή	Ημερομηνία έναρξης
Institute of Applied Energy	AC 170kW*6h	Σταθεροποίηση εξόδου τουρμπίνας αιολικής ενέργειας	Μάρτιος 2001
Tottori Sanyo Electric	AC 1,5MW*1h	Αποκοπή αιχμών	Απρίλιος 2001
Obayashi Corporation	DC 30kW*8h	Υβριδικό με φ/β κύτταρα	Νοέμβριος 2001
Kwansei Gakuin University	AC 500kW*10h	Αποκοπή αιχμών	Δεκέμβριος 2002
Detroit Edison	AC 400kWh	Αποκοπή αιχμών & σταθεροποίηση φορτίου	Ιούνιος 2001
United Energy Melbourne	AC 200kWh	Επίδειξη αποθήκευσης σε δίκτυο	Απρίλιος 2001
Australian Inland Energy	DC 40kW*8h	Υβριδικό με φ/β κύτταρα	Νοέμβριος 2002
Powerlight Corporation	DC 100kWh	Υβριδικό με φ/β κύτταρα	Απρίλιος 2003
Pacific Gas and Electric Company	2MWh	Μέγιστη χωρητικότητα ισχύος	Οκτώβριος 2005

Στη συνέχεια στον πίνακα 5-3 συνοψίζουμε τα βασικότερα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα [70].

Πίνακας 5-3 Σύνοψη των τεχνολογιών και των χαρακτηριστικών των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (BESS)

Τύπος μπαταρίας	Μεγαλύτερη Χωρητικότητα (Εμπορική μονάδα)	Περιοχή & Εφαρμογή	Απόδοση (%)	Κόστος €/kWh	Διάρκεια ζωής (κύκλοι)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Θερμοκρασία Λειτουργίας	Ειδική ή Ενέργεια (Wh/kg)	Αυτοεκφόρτιση (%)/μήνα	Σχόλια
Μολύβδου οξέος (flooded type)	10MW/40MWh	California-Chino/Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	1000-1200	70	(-5 με 40)	25	2 με 5	Συνεχής συντήρηση για πλήρωση νερού, μεγάλο βάρος, τοξικός ηλεκτρολύτης
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	300kW/580kWh	Turn Key System/Εξομάλυνση φορτίου	72-78	50-150	200-300	80	(-5 με 40)	30-50	2 με 5	Λιγότερο στιβαρή, αμελητέα συντήρηση, πιο φορητή, ασφαλής
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	27MW/6,75 MWh	GVEA Alaska Control power supply/Αντιστάθμιση ισχύος	72-78	200-600	3000	100	(-40 με 50)	45-80	5 με 20	Μεγάλος ρυθμός αυτό-εκφόρτισης, τα κύτταρα NiCd είναι δηλητηριώδη και βαριά
Θειούχου νατρίου (NaS)	9,6MW/64MWh	Tokyo Japan/Εξομάλ	89	200-300	2500	100	325	100	OXI	Καθόλου αυτό-εκφόρτιση,

		υψηλή φορτίου								χρειάζεται εξωτερική πηγή θερμότητας, για 30s 6 φορές μεγαλύτερη ισχύ
Ιόντων λιθίου (Li-Ion)	ΠΕΡΑΜΑΤΙ ΚΗ	ΠΕΡΑΜΑΤΙ ΚΗ	100	700-1000	3000	80	(-30 με 60)	90-190	1	Μεγάλο κόστος εξαιτίας ειδικού πακεταρίσματος και εσωτερικής προστασίας από υπέρταση
Ροής VRB	1,5MW/1,5M Wh	Japan Voltage Sag/Αποκοπή φορτίου αιχμής	85	360-1000	10000	75	0-40	30-50	ΟΧΙ	Αμελητέα αυτό-εκφόρτιση
Ροής ZnBr	1MW/4MWh	Kyushuu EPC	75	360-1000	10000	70	0-40	70	ΟΧΙ	Αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, μικρή ισχύς, ογκώδης, επικίνδυνα υλικά
Μετάλλου αέρα (Metal air)	Μικρή		50	50-200	100	50	(-20 με 40)	450-650	ΟΧΙ	Αμελητέα αυτό-εκφόρτιση, η επαναφόρτιση είναι πολύ δύσκολη και όχι αποδοτική, συμπαγής

## 5.7 Σύνοψη εφαρμογών και χαρακτηριστικών των αποθηκευτικών διατάξεων [64]

Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παραθέτουμε το συγκεντρωτικό πίνακα 5-4, όπου συνοψίζονται οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα αξιολογείται και η ικανότητά τους σε εφαρμογές ενέργειας και ισχύος.

Πίνακας 5-4 Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτημάτων-μειονεκτημάτων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές ισχύος	Εφαρμογές ενέργειας	Συνήθης εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRB, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος και ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου οξέος (ρυθμιζόμενη από βαλβίδα)	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση	+++	-	Εξομάλυνση αιχμών
Νικελίου Καδμίου (NiCd)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση	Επικίνδυνα υλικά	+++	++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Θειούχου Νατρίου (NaS)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)	+++	+++	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Ιόντων Λιθίου (Li-Ion)	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, υψηλή	Υψηλό κόστος παραγωγής (λόγω σχεδιασμού), απαιτεί ειδικό κύκλωμα	+++	-	Κινητή τηλεφωνία, Υποσταθμοί ενέργειας

	απόδοση	φόρτισης			
Σφόνδυλοι (flywheels)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	-	Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής	+++	--	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C Capacitors (Υπερπυκνωτές)	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	+++	++	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλα χρονικά διαστήματα
Αποθήκευση Συμπιεσμένου Αέρα	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες	--	+++	Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλα χρονικά διαστήματα

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

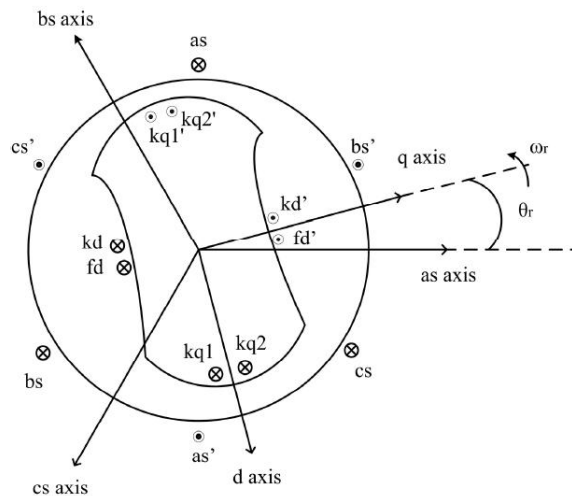
#### 6.1 Γενικά περί σύγχρονων μηχανών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν μία συμμετρική τριφασική σύγχρονη γεννήτρια.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων της σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές [71],[72]:

- Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή κατά μήκος του διακένου
- Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και των αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα
- Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται
- Η συνεισφορά του μαγνητικού κορεσμού αμελείται

Μια 2-πολική, 3-φασική σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους και τα τυλίγματα του στάτη συνδεδεμένα κατά αστέρα φαίνεται στο σχήμα 6.1:



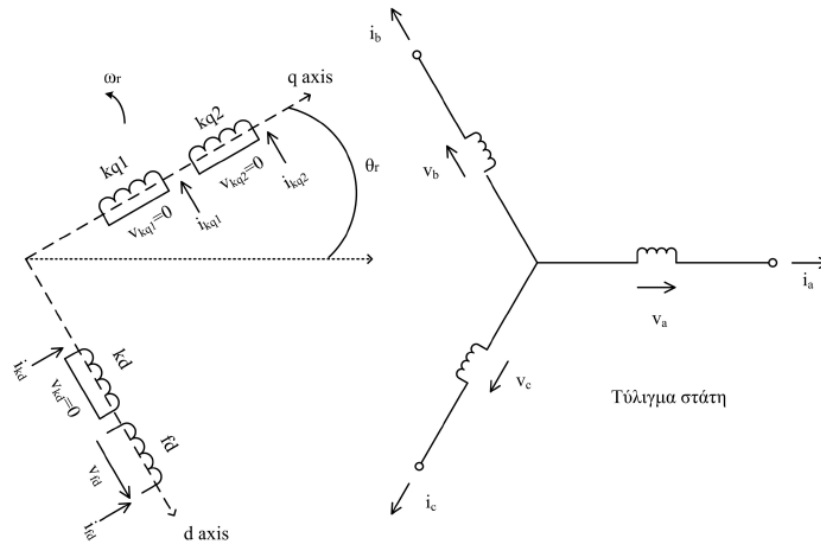
Σχήμα 6.1 Παράσταση σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι όμοια μεταξύ τους και ημιτονοειδώς διανεμημένα. Το κάθε ένα έχει  $N_s$  ισοδύναμα ελίσματα και ωμική αντίσταση  $r_s$ . Ο δρομέας διαθέτει τύλιγμα πεδίου, με  $N_{fd}$  ισοδύναμα ελίσματα και ωμική αντίσταση  $r_{fd}$ , καθώς και τρία βραχυκυκλωμένα τυλίγματα αποσβέσεως τα οποία έχουν ισοδύναμα ελίσματα  $N_{kq1}$ ,  $N_{kq2}$ ,  $N_{kd}$  και αντιστάσεις  $r_{kq1}$ ,  $r_{kq2}$ ,  $r_{kd}$  αντίστοιχα [73].

Στο σχήμα 6.2 σημειώνονται οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων του στάτη. Επίσης, εισάγονται ο εγκάρσιος άξονας (άξονας q-quadrature) και ο ευθύς άξονας (άξονας d-direct). Ο άξονας q είναι ο άξονας των τυλιγμάτων αποσβέσεως  $kq_1$  και  $kq_2$  ενώ ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του τυλιγματος διέγερσης και του τυλιγματος αποσβέσεως  $kd$ . Ο άξονας q, για θετική φορά περιστροφής, λαμβάνεται να

προηγείται κατά  $90^\circ$  του άξονα d. Η γωνία του δρομέα  $\theta_r$  μετράται ως προς τον άξονα του πηνίου as.

Οι εντάσεις του στάτη θεωρούνται συμβατικά εξερχόμενες από τους ακροδέκτες της μηχανής, δηλαδή ακολουθείται η γνωστή σύμβαση γεννήτριας για τη γραφή των εξισώσεων. Συνεπώς, με τη δεδομένη θετική φορά των μαγνητικών αξόνων, αρνητικές πεπλεγμένες ροές προκύπτουν από θετικά ρεύματα στο στάτη.



Σχήμα 6.2 Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής

## 6.2 Μετασχηματισμός Park [22]

Με δεδομένο ότι οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας δρομέα  $\theta_r$  και, επομένως, της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_r$ , οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων είναι μη γραμμικές και οι συντελεστές των μεταβλητών είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Επιπλέον, η ταχύτητα του δρομέα είναι συνάρτηση της ηλεκτρομαγνητικής ροής, η οποία προκύπτει από γινόμενα εντάσεων. Προφανώς, η επίλυση των εξισώσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο μετασχηματισμός του Park αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο για την ανάλυση των σύγχρονων μηχανών. Ο μετασχηματισμός αυτός συνίσταται στην αντικατάσταση των τριών τυλιγμάτων a, b, c του στάτη από τρία υποθετικά (ισοδύναμα) τυλίγματα d, q, 0. Με τον τρόπο αυτό ο μετασχηματισμός του Park συμβάλλει στην απλοποίηση των εξισώσεων, μετατρέποντας τους χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε χρονικά αμετάβλητους. Τα τυλίγματα d, q του στάτη περιστρέφονται μαζί με το δρομέα της μηχανής και βρίσκονται στους ίδιους άξονες με τα αντίστοιχα τυλίγματα του δρομέα (τύλιγμα διεγέρσεως και τυλίγματα αποσβέσεως). Το τρίτο τύλιγμα 0 δεν είναι μαγνητικά συζευγμένο με τα άλλα δύο νέα τυλίγματα του στάτη και παίζει ρόλο μόνο σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης της μηχανής. Επειδή στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε μόνο με συμμετρικές συνθήκες φόρτισης, το τύλιγμα 0 παραλείπεται [71]. Η σχηματική παράσταση των τυλιγμάτων μιας σύγχρονης μηχανής μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού Park φαίνεται στο σχήμα 6.3.

Στη γενικότερη περίπτωση, η αλλαγή των μεταβλητών, που συνιστά έναν μετασχηματισμό των τριφασικών μεταβλητών ενός στατικού κυκλώματος (abcs) σε μεταβλητές ενός στρεφόμενου συστήματος αναφοράς (qd0s), γράφεται:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (6.1)$$

Όπου

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (6.2)$$

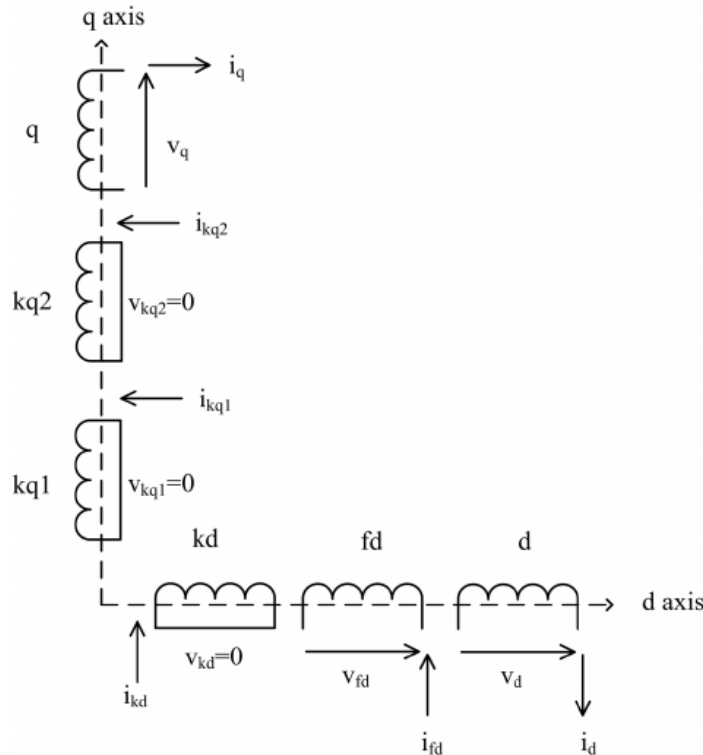
$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (6.3)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (6.4)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός  $f_{abcs} = K_s^{-1} f_{qd0s}$  κάνει χρήση του πίνακα:

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$



Σχήμα 6.3 Τυλίγματα σύγχρονης μηχανής μετά το μετασχηματισμό Park

Στις εξισώσεις αυτές, το σύμβολο  $f$  συμβολίζει τάση, ένταση, ή πεπλεγμένη ροή. Ο εκθέτης  $T$  συμβολίζει τον ανάστροφο ενός πίνακα. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των αξόνων είναι αυθαίρετη, και μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση του χρόνου, αρκεί η γωνία  $\theta$  να είναι συνεχής.

Ο μετασχηματισμός Park αποτελεί μία ειδική περίπτωση του μετασχηματισμού  $abc \rightarrow qd0$ , όπου η γωνιακή ταχύτητα του στρεφόμενου πλαισίου λαμβάνεται ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Ο άξονας d ταυτίζεται με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος διέγερσης.

Αφού εφαρμοσθεί ο μετασχηματισμός, οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα d, q του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα είναι [73]:

$$v_{ds} = -r_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs} \tag{6.6}$$

$$v_{qs} = -r_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds} \tag{6.7}$$

όπου

- $v_{ds}, v_{qs}$  οι τάσεις των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα
- $i_{ds}, i_{qs}$  τα ρεύματα των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα
- $\psi_{ds}, \psi_{qs}$  οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων d, q του στάτη αντίστοιχα
- $\omega_b$  η βασική ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα (σε ηλεκτρικά rad/s) του



$r_s$                     συστήματος  
η ωμική αντίσταση του στάτη

Οι εξισώσεις του Park για τα τυλίγματα του δρομέα είναι [34]:

$$v_{fd} = r_{fd}i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (6.8)$$

$$v_{kd} = 0 = r_{kd}i_{kd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (6.9)$$

$$v_{kq1} = 0 = r_{kq1}i_{kq1} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq1}}{dt} \quad (6.10)$$

$$v_{kq2} = 0 = r_{kq2}i_{kq2} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq2}}{dt} \quad (6.11)$$

όπου:

$v_{fd}, v_{kd}, v_{kq1}, v_{kq2}$	οι τάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα.
$i_{fd}, i_{kd}, i_{kq1}, i_{kq2}$	τα ρεύματα του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα
$\psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kq1}, \psi_{kq2}$	οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα
$r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}$	οι ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις [73]:

$$\psi_{ds} = -X_{ls}i_{ds} + X_{md}(-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd}) \quad (6.12)$$

$$\psi_{qs} = -X_{ls}i_{qs} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (6.13)$$

$$\psi_{fd} = X_{lfd}i_{fd} + X_{md}(-i_{ds} + i_{fd} + i_{kd}) \quad (6.14)$$

$$\psi_{kd} = X_{lkd}i_{kd} + X_{md}(-i_{ds} + i_{kd} + i_{fd}) \quad (6.15)$$

$$\psi_{kq1} = X_{lkq1}i_{kq1} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (6.16)$$

$$\psi_{kq2} = X_{lkq2}i_{kq2} + X_{mq}(-i_{qs} + i_{kq1} + i_{kq2}) \quad (6.17)$$

όπου

$X_{ls}, X_{lfd}, X_{lkd}, X_{lkq1}, X_{lkq2}$	οι αυτεπαγωγές του στάτη, του τυλίγματος διέγερσης και των τυλιγμάτων απόσβεσης αντίστοιχα
$X_{md}, X_{mq}$	οι αμοιβαίες επαγωγικές αντιδράσεις στον άξονα d και q αντίστοιχα

### 6.3 Ανά μονάδα σύστημα

Η ηλεκτρομαγνητική ροή συναρτήσσει των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο και των ρευμάτων δίνεται σε φυσικές τιμές από τη σχέση:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega_b}\right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (6.18)$$

όπου  $p$  ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

Η βασική ισχύς μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$S_B = 3V_{B(abc)} I_{B(abc)} \quad (6.19)$$

ή ισοδύναμα :

$$S_B = \frac{3}{2} V_{B(qd0)} I_{B(qd0)} \quad (6.20)$$

Θεωρώντας ως βασική ροπή

$$T_B = \frac{p S_B}{2 \omega_b} \quad (6.21)$$

η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε α.μ. τιμές ισούται με:

$$T_e = \psi_{ds} i_{ds} - \psi_{qs} i_{qs} \quad (6.22)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (6.23)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \quad (6.24)$$

Σε α.μ. τιμές τα παραπάνω μεγέθη ισούνται με :

$$P = v_d i_d + v_q i_q \quad (6.25)$$

$$Q = v_q i_d - v_d i_q \quad (6.26)$$

Η εξίσωση κίνησης του μηχανικού μέρους της μηχανής γράφεται:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \left(\frac{2}{p}\right) \frac{d\omega_e}{dt} \quad (6.27)$$

όπου

$\omega_m$  η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

$\omega_e$  η αντίστοιχη ηλεκτρική ταχύτητα (σε rad/s)

$J$  η ροπή αδράνειας (σε  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ) του στρεφόμενου μηχανικού μέρους της διάταξης

Η ανηγμένη σταθερά αδρανείας σε sec ορίζεται ως:

$$H = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2}{p}\right)^2 \frac{J\omega_b^2}{S_B} = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{2}{p}\right) \frac{J\omega_b}{T_B} \quad (6.28)$$

Συνεπώς, λύνοντας ως προς  $J$  έχουμε:

$$J = \frac{H * S_b}{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{p}\right)^2 \omega_b^2} = \frac{2H}{\left(\frac{2}{p}\right) \omega_b} \left[ \frac{S_b}{\left(\frac{2}{p}\right) \omega_b} \right] = \frac{2H}{\left(\frac{2}{p}\right) \omega_b} T_b \quad (6.29)$$

Και η εξίσωση κίνησης γράφεται:

$$T_m - T_e = \frac{2H}{\left(\frac{2}{p}\right) \omega_b} T_b \left(\frac{2}{p}\right) \frac{d\omega_e}{dt} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{T_b} = 2H \frac{d\left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)}{dt} \quad (6.30)$$

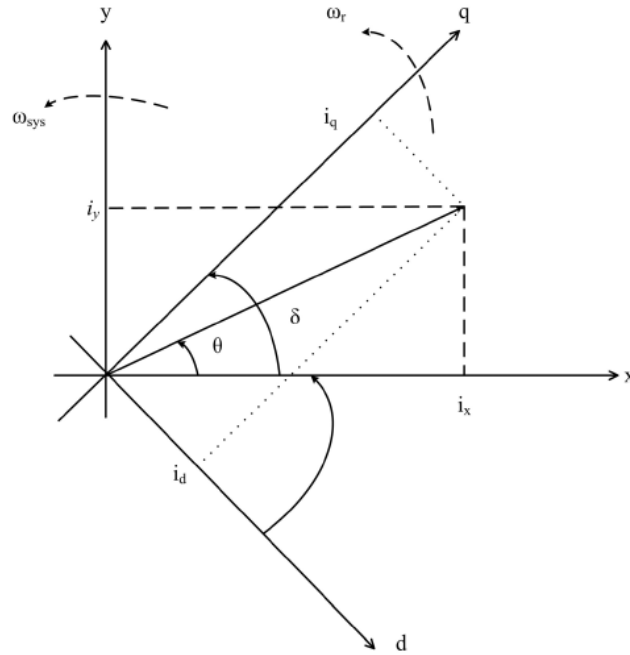
Επομένως η εξίσωση κίνησης στο ανά μονάδα σύστημα είναι:

$$T_m - T_e = 2H \frac{d(\omega_e)}{dt} \quad (6.31)$$

## 6.4 Σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

Σε ένα σύστημα με πολλές μηχανές είναι αναγκαίο να ορισθεί ένα κοινό ορθογώνιο πλαίσιο αναφοράς, το οποίο θα περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του συστήματος  $\omega_{sys}$ . Το κοινό αυτό πλαίσιο αναφοράς αναφέρεται σαν σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς.

Στο σχήμα 6.4 φαίνονται το σύγχρονο xy πλαίσιο αναφοράς του συστήματος, καθώς επίσης και το dq πλαίσιο αναφοράς του δρομέα μιας σύγχρονης γεννήτριας, του οποίου ο άξονας x θεωρείται ότι αποτελεί τον άξονα αναφοράς όλων των γωνιών, ενώ ο άξονας y προπορεύεται κατά  $90^\circ$  [73].



Σχήμα 6.4 Ορθογώνια πλαίσια αναφοράς συστήματος και σύγχρονης μηχανής

Η δυναμική απόκριση της γωνίας  $\delta$  μίας σύγχρονης μηχανής περιγράφεται από τη διαφορική σχέση (6.32).

$$\dot{\delta} = \omega_r - \omega_{sys} \quad (6.32)$$

Στο σύγχρονο  $xy$  πλαίσιο αναφοράς, κάθε εναλλασσόμενο μέγεθος παριστάνεται σαν μιγαδικός αριθμός, όπως για παράδειγμα, το ρεύμα στάτη  $\hat{I}_s$  :

$$\hat{I}_s = i_x + j i_y \quad (6.33)$$

ή η τερματική τάση  $\hat{V}_t$  της σύγχρονης γεννήτριας:

$$\hat{V}_t = v_x + j v_y \quad (6.34)$$

Ο μετασχηματισμός του ρεύματος στάτη  $\hat{I}_s$  από το  $dq$  πλαίσιο της σύγχρονης γεννήτριας στο σύγχρονο  $xy$  πλαίσιο αναφοράς, παριστάνεται από την ακόλουθη μητρική σχέση [34]:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}}_{T(\delta)} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

όπου ο πίνακας  $T$  ονομάζεται πίνακας μετασχηματισμού. Αντίστοιχη μητρική σχέση ισχύει και για τις προβολές ( $u_x, u_y, u_d$  και  $u_q$ ) της τάσης του στάτη.

Η ανά μονάδα φαινόμενη ισχύς  $S_G$  που παράγεται από τη σύγχρονη μηχανή είναι:

$$S_G = P_G + j Q_G = \hat{V}_t \hat{I}_s^* \quad (6.36)$$

Αντικαθιστώντας τα μεγέθη του στάτη με την παράστασή τους στο σύγχρονο  $xy$  πλαίσιο αναφοράς του συστήματος προκύπτει:

$$S_G = (v_x + ju_y)(i_x + ji_y)^* = (v_x i_x + v_y i_y) + j(v_y i_x - v_x i_y) \quad (6.37)$$

Δηλαδή ισοδύναμα

$$P_G = v_x i_x + v_y i_y \quad (6.38)$$

$$Q_G = v_y i_x - v_x i_y \quad (6.39)$$

## 6.5 Εξισώσεις σύγχρονης μηχανής [22]

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής που χρησιμοποιείται στα μοντέλα των Α/Γ και στο μοντέλο του σύγχρονου πυκνωτή.

Αμελώντας τα μεταβατικά του στάτη, οι διαφορικές εξισώσεις (6.6) και (6.7) των τυλίγμάτων του στάτη μετατρέπονται στις παρακάτω αλγεβρικές (στο α.μ. σύστημα):

$$v_d = -r_s i_d - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q \quad (6.40)$$

$$v_q = -r_s i_q + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d \quad (6.41)$$

Στο δρομέα παριστάνονται δύο τυλίγματα, το τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα απόσβεσης στον  $q$  άξονα. Οι διαφορικές εξισώσεις που ισχύουν για τα τυλίγματα του δρομέα είναι:

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (6.42)$$

$$v_{kd} = 0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (6.43)$$

Οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο δίνονται από τις σχέσεις:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{md} i_{fd} \quad (6.44)$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{mq} i_{kq} \quad (6.45)$$

$$\psi_{fd} = X_{fd} i_{fd} - X_{md} i_d \quad (6.46)$$

$$\psi_{kq} = X_{kq} i_{kq} - X_{mq} i_q \quad (6.47)$$

Οι επαγωγικές αντιδράσεις  $X_d$ ,  $X_q$  στον άξονα  $d$  και  $q$  αντίστοιχα, προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (6.48)$$

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (6.49)$$

Οι επαγωγικές αντιδράσεις  $X_{fd}$ ,  $X_{kq}$  του τυλίγματος διέγερσης και του τυλίγματος απόσβεσης αντίστοιχα προκύπτουν από τις σχέσεις :

$$X_{fd} = X_{lfd} + X_{md} \quad (6.50)$$

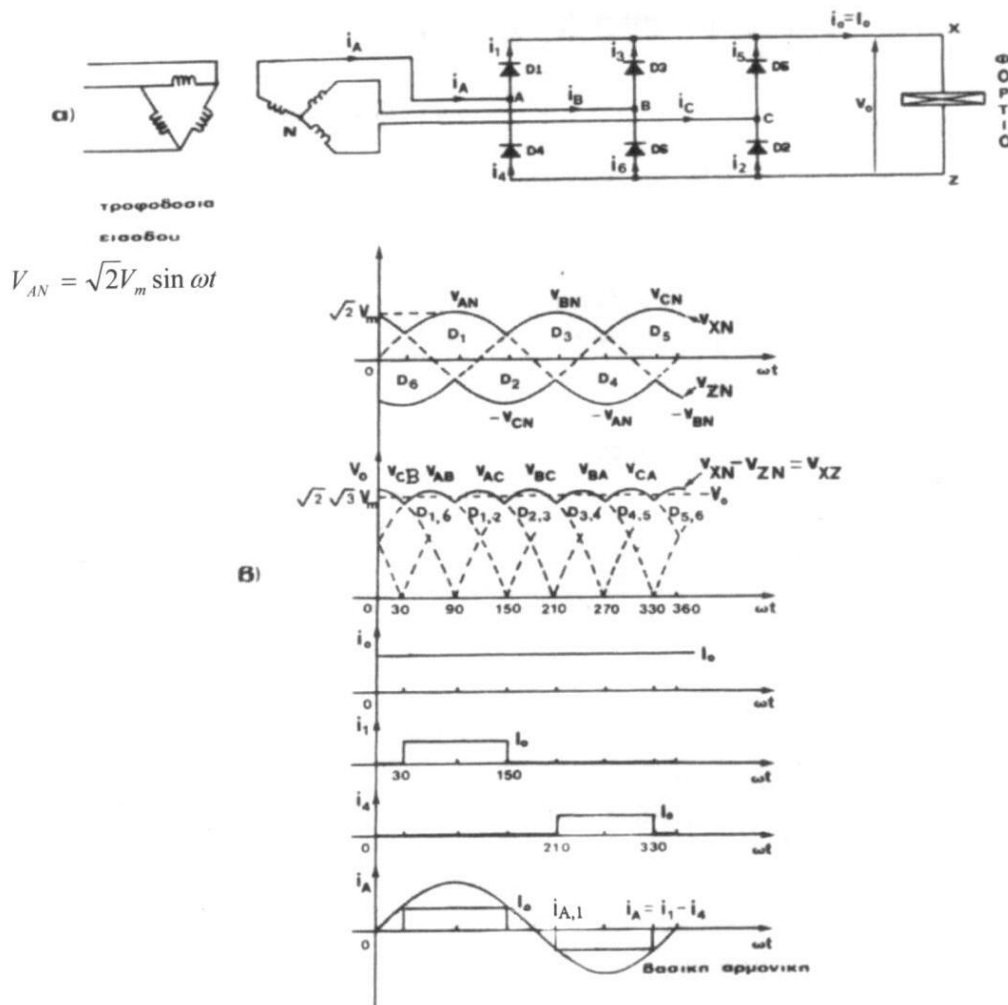
$$X_{kq} = X_{lkq} + X_{mq} \quad (6.51)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

#### 7.1 Τριφασική ανόρθωση πλήρους γέφυρας [74],[75],[64]

Στο σχήμα 7.1(α) παρουσιάζεται μία ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας. Είναι μία από τις πιο σπουδαίες και απλούστερες ανορθώσεις για εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές ισχείς εξόδου. Το κυριότερο πλεονέκτημά της είναι ότι χρησιμοποιεί ένα απλό σε κατασκευή μετασχηματιστή και επίσης μπορεί να υλοποιηθεί και χωρίς το μετασχηματιστή. Οι δίοδοι του κυκλώματος έχουν αριθμηθεί σύμφωνα με τη σειρά της αγωγής τους. Οι δίοδοι  $D_1$ ,  $D_3$  και  $D_5$  χρησιμοποιούνται για την ανόρθωση του θετικού μέρους των πηγών εισόδου της ανόρθωσης ( $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ ,  $V_{CN}$ ) και οι δίοδοι  $D_4$ ,  $D_6$  και  $D_2$  για την ανόρθωση του αρνητικού μέρους. Οι διάφορες κυματομορφές της ανόρθωσης αυτής για ωμικο-επαγωγικό φορτίο και σταθερό ρεύμα εξόδου (δηλ.  $\omega L \gg R$ ) παρουσιάζονται στο σχήμα 7.1(β):



Σχήμα 7.1 Τριφασική ανόρθωση γέφυρας

α) Κύκλωμα

β) Κυματομορφές (Το ρεύμα εξόδου είναι σταθερό δηλ.  $\omega L \gg R$ )

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η τάση εξόδου (σχήμα 7.1(β)) έχει έξι παλμούς για κάθε κύκλο λειτουργίας. Επίσης από το σχήμα 7.1(β) η μέση τιμή της τάσης εξόδου της ανόρθωσης καθώς και τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned}\bar{V}_o &= \frac{1}{\pi} \int_{-30^\circ}^{30^\circ} \sqrt{2}\sqrt{3}V_m \cos\omega t \, d\omega t = \left[ \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_m}{\pi} \sin\omega t \right]_{-30^\circ}^{30^\circ} \\ &= \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_m}{\pi} = 2,34V_m\end{aligned}\quad (7.1(\alpha))$$

$$\hat{V}_{o,n} = \frac{6\sqrt{6}V_m}{\pi(n^2 - 1)} = \frac{6\sqrt{2}V_{\text{πολική}}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6,12,18, \dots \quad (7.1(\beta))$$

όπου  $V_m$  η ενεργός τιμή της φασικής τάσης εισόδου της ανόρθωσης.

Όπως διαπιστώνεται από τις κυματομορφές του σχήματος 7.1(β) η γωνία αγωγής κάθε διόδου είναι  $120^\circ$  και έτσι κάθε διάδος τροφοδοτεί το  $1/3$  του ρεύματος φορτίου. Επομένως, η μέση τιμή και η ενεργός τιμή του ρεύματος των διόδων δίνεται από τις σχέσεις:

$$\bar{I}_D = \frac{\bar{I}_o}{3} \quad (7.2)$$

$$\tilde{I}_D = \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{30^\circ}^{150^\circ} \bar{I}_o^2 \, d\omega t \right]^{1/2} = \frac{\bar{I}_o}{\sqrt{3}} \quad (7.3)$$

όπου  $\bar{I}_o$  η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου

Επίσης η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου  $i_A$  (σχήμα 7.1(β)) είναι:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_A &= \left[ \frac{1}{2\pi} \left( \int_{30^\circ}^{150^\circ} \bar{I}_o^2 \, d\omega t + \int_{210^\circ}^{330^\circ} (-\bar{I}_o^2) \, d\omega t \right) \right]^{1/2} \\ &= \left[ \frac{1}{2\pi} \left( 2\bar{I}_o^2 \frac{2\pi}{3} \right) \right]^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{I}_o\end{aligned}\quad (7.4)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς εισόδου δίνονται αντίστοιχα από τις ακόλουθες σχέσεις

$$P = 3P_{\text{φάσης}} = 3V_m \tilde{I}_{A,1} \cos \varphi_1 \quad (7.5)$$



$$Q = 3Q_{\varphi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma} = 3V_m \tilde{I}_{A,1} \sin \varphi_1 \quad (7.6)$$

όπου

$\tilde{I}_{A,1}$  ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος εισόδου  
 $\varphi_1$  διαφορά φάσης μεταξύ φασικής τάσης εισόδου της ανόρθωσης και της θεμελιώδους του ρεύματος

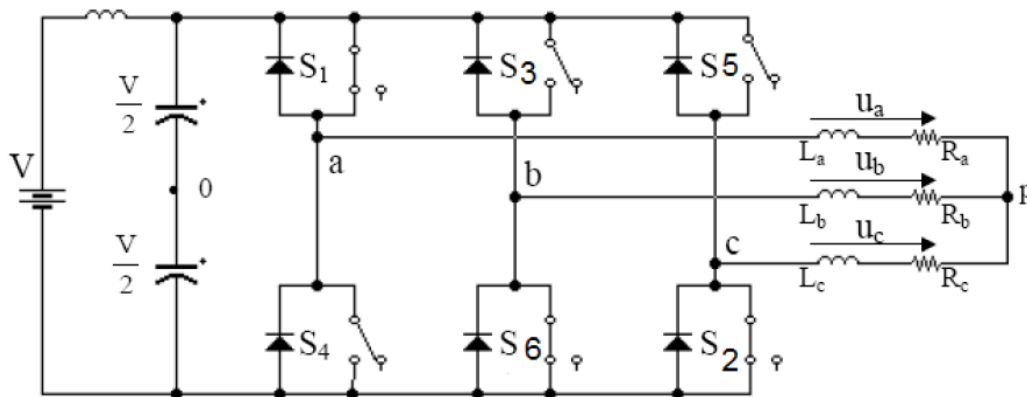
Τέλος η φαινόμενη ισχύς του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση:

$$S_{\delta\epsilon\upsilon\tau} = 3\tilde{V}_{\delta\epsilon\upsilon\tau}\tilde{I}_{\delta\epsilon\upsilon\tau} = 3\left(\frac{\bar{V}_o}{2,34}\right)\left(\sqrt{\frac{2}{3}}\bar{I}_o\right) = 1,047\bar{V}_o\bar{I}_o \quad (7.7)$$

## 7.2 Αναστροφείας [74],[75],[64]

### 7.2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν αναστροφείς ο οποίοι μετατρέπουν το DC ρεύμα μιας μπαταρίας σε AC ρεύμα συγκεκριμένης τάσης και συχνότητας. Το κύκλωμα του βασικού τριφασικού αναστροφέα με τροφοδοσία συνεχούς τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2:



Σχήμα 7.2 Τυπική συνδεσμολογία τριφασικού αναστροφέα γέφυρας

Το κύκλωμα ισχύος του αναστροφέα μπορεί να υλοποιηθεί με MOSFET ισχύος ή με τρανζίστορ ισχύος ή με GTOs ή με IGBTs ή με θυρίστορ ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου του αναστροφέα. Ο αναστροφέας αυτός αποτελείται από τρεις αναστροφείς ημιγέφυρας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και έχουν την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου σε σχέση με το ουδέτερο υποθετικό σημείο 0 με μια μετατόπιση  $120^\circ$  μεταξύ τους. Επομένως για τον αναστροφέα αυτόν ισχύουν οι σχέσεις:

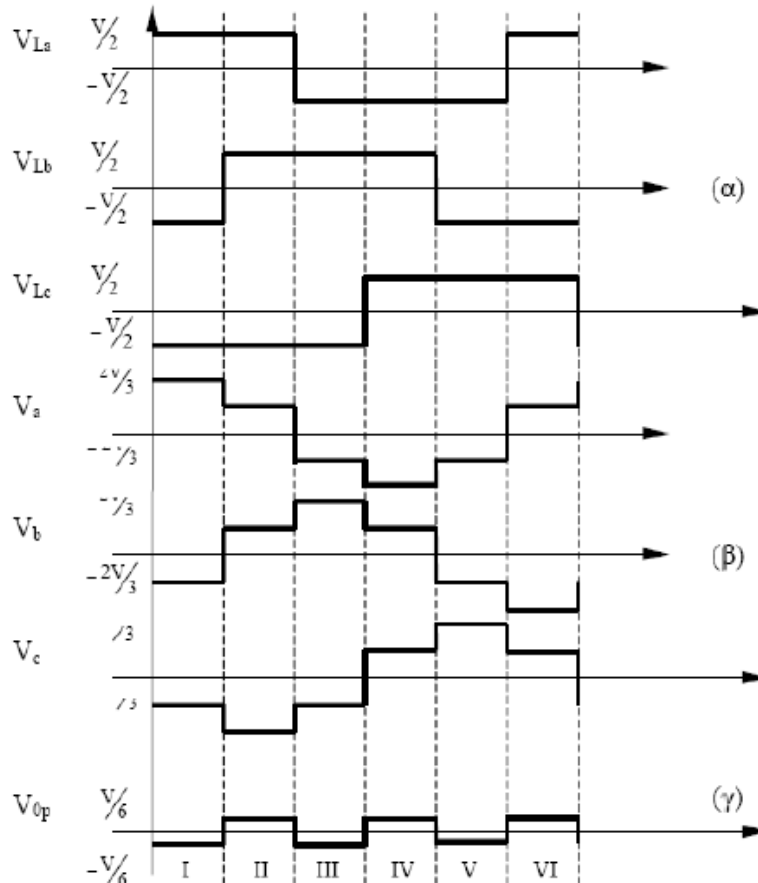
$$v_{ao}(\omega t) = v_{bo}(\omega t - 120^\circ) = v_{co}(\omega t - 240^\circ) \quad (7.8)$$

$$v_{ab}(\omega t) = v_{ao}(\omega t) - v_{bo}(\omega t) \quad (7.9)$$

$$v_{bc}(\omega t) = v_{bo}(\omega t) - v_{co}(\omega t) \quad (7.10)$$

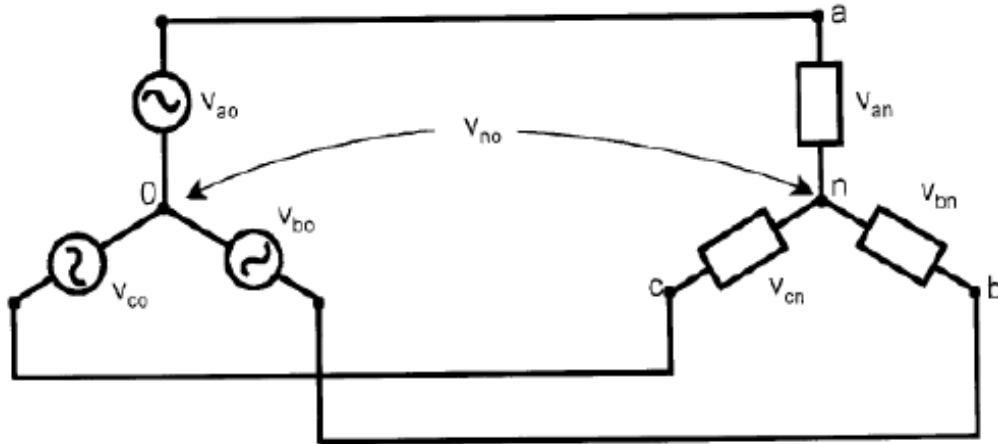
$$v_{ca}(\omega t) = v_{co}(\omega t) - v_{ao}(\omega t) \quad (7.11)$$

Ο τριφασικός αυτός αναστροφέας τροφοδοτεί ένα τριφασικό ωμικοεπαγωγικό φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Οι προκύπτουσες κυματομορφές παρουσιάζονται στο σχήμα 7.3:



Σχήμα 7.3 Τριφασικές κυματομορφές τάσης  
 (α) Δυναμικά τάσεων ακροδεκτών εξόδου  
 (β) Φασικές τάσεις φορτίου  
 (γ) Δυναμικό κοινού σημείου του φορτίου

Οι κυματομορφές αυτές αναφέρονται στη διακοπτική ακολουθία 6 βημάτων κατά την οποία μία πλήρης περίοδος της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου χωρίζεται σε 6 ίσα διαστήματα από τις χρονικές στιγμές μετάβασης των διακοπών της ημιγέφυρας. Το κοινό σημείο (ουδέτερος) του φορτίου βρίσκεται σε θετικό δυναμικό όταν λειτουργούν περισσότεροι του ενός διακόπτες στην πάνω ομάδα ( $S_1, S_3, S_5$ ) και σε αρνητικό δυναμικό όταν λειτουργούν περισσότεροι του ενός διακόπτες από την κάτω ομάδα ( $S_2, S_4, S_6$ ). Οι κυματομορφές του σχήματος 7.3 αναφέρονται σε συμμετρικό φορτίο όπως σημειώνεται στο σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4 Ισοδύναμο μοντέλο ιδανικού τριφασικού αναστροφέα στο οποίο φαίνονται οι μετρούμενες τάσεις

Από το σχήμα 7.4 συμπεραίνουμε τα εξής: Η τιμή της τάσης σε κάθε μία από τις φάσεις εξόδου του αναστροφέα (a,b,c) αναφέρονται στον κόμβο αναφοράς (0), ο οποίος δεν έχει το ίδιο δυναμικό με τον κοινό κόμβο του αστερά του φορτίου (n). Έτσι από το νόμο τάσεων Kirchoff η τάση στα άκρα του φορτίου θα είναι:

$$v_{ao} = v_{an} + v_{no} \quad (7.12)$$

$$v_{bo} = v_{bn} + v_{no} \quad (7.13)$$

$$v_{co} = v_{cn} + v_{no} \quad (7.14)$$

Από την πρόσθεση των παραπάνω και γνωρίζοντας ότι ισχύει  $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$  λαμβάνουμε ότι:

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = 3v_n \Rightarrow v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (7.15)$$

Επομένως αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στις τρεις προηγούμενες προκύπτει ότι η τάση του φορτίου θα είναι:

$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \quad (7.16)$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 7.3 η λειτουργία του αναστροφέα για ένα κύκλο τάσης εξόδου μπορεί να διαιρεθεί σε έξι διαστήματα. Στα διαστήματα αυτά, για να επιτευχθούν οι τάσεις εξόδου του σχήματος 7.3 πρέπει οι διακόπτες να άγουν με την εξής σειρά:

<u>Χρονικό Διάστημα</u>	<u>Διακόπτες σε αγωγή</u>
I	1,5,6
II	1,2,6
III	1,2,3
IV	2,4,3
V	5,4,3
VI	5,4,6

Η τάση εξόδου του αναστροφέα του σχήματος 7.3 με χρήση σειρών Fourier είναι:

$$v_{ao} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \hat{V}_{ao,n} * \sin(n\omega t) \quad (7.17)$$

όπου

ο  $\hat{V}_{ao,n}$  το ουδέτερο σημείο και το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης  $v_{ao}$

$$\hat{V}_{ao,n} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V}{2} \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{V}{2} \sin(n\omega t) dt = \frac{2V}{4n\pi} \quad (7.18)$$

Άρα:

$$v_{ao} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (7.19)$$

$$v_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin(n\omega t - 120^\circ) \quad (7.20)$$

$$v_{co} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin(n\omega t - 240^\circ) \quad (7.21)$$

Επομένως οι πολικές τάσεις θα είναι:

$$v_{ab} = \sum_{n=1,5,7,11,\dots}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n(\omega t + 30^\circ)) \quad (7.22)$$

$$v_{bc} = \sum_{n=1,5,7,11,\dots}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n(\omega t + 30^\circ - 120^\circ)) \quad (7.23)$$

$$v_{ca} = \sum_{n=1,5,7,11,\dots}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n(\omega t + 30^\circ - 240^\circ)) \quad (7.24)$$

Άρα οι φασικές τάσεις θα είναι:

$$v_{ao} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) * \sin(n(\omega t)) \quad (7.25)$$

$$v_{bo} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) * \sin(n(\omega t - 120^\circ)) \quad (7.26)$$

$$v_{co} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) * \sin(n(\omega t - 240^\circ)) \quad (7.27)$$

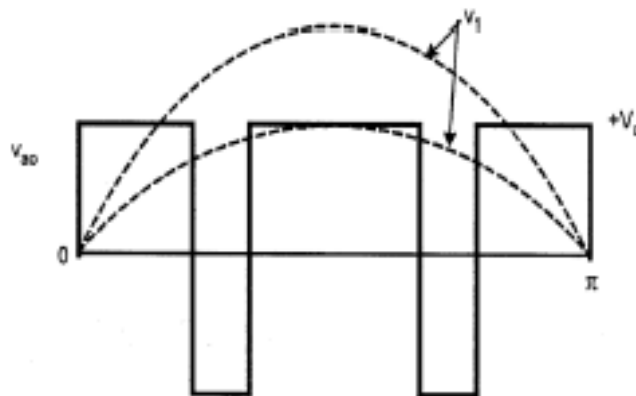
όπου V η τάση εξόδου του αναστροφέα.

Η λειτουργία του αναστροφέα με τετραγωνικό παλμό τάσης είναι ιδιαίτερα απλή, επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο του και παρουσιάζει πολύ μικρές διακοπτικές απώλειες καθώς γίνονται μόνο έξι μεταγωγές των ημιαγωγικών στοιχείων ανά περίοδο. Η λειτουργία αυτή, όμως, στην πράξη δε χρησιμοποιείται καθώς παρουσιάζει ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα και κυρίως μεγάλες αρμονικές συνιστώσες στο ρεύμα και την τάση, χαμηλών γενικά συχνοτήτων (μικρής τάξης). Συνεπώς προκαλεί μεγάλη αρμονική παραμόρφωση στην τάση και το ρεύμα, η οποία για να μειωθεί απαιτεί τη χρήση ογκοδέστατων και ακριβών βαθυπερατών φίλτρων. Στην πράξη έχει επικρατήσει η λειτουργία του αναστροφέα με την τεχνική διαμόρφωσης των παλμών (Pulse Width Modulation-PWM) που αναλύεται σε επόμενη παράγραφο.

### 7.2.2 Τεχνικές διαμόρφωσης του εύρους των παλμών

Η τάση εξόδου του αναστροφέα πλήρους γέφυρας μπορεί να είναι ένας τετραγωνικός παλμός, ο οποίος αναλύεται κατά Fourier στη θεμελιώδη συνιστώσα και στις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Οι αρμονικές συνιστώσες σ' ένα σύστημα είναι ανεπιθύμητες και πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση ή την εξάλειψή τους, ώστε ο συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion-THD) της τάσης να είναι μικρότερος του 5%. Αυτό βέβαια μπορεί να γίνει τοποθετώντας ένα φίλτρο στην έξοδο του αναστροφέα. Το μέγεθος, το κόστος και το βάρος του φίλτρου, εξαρτώνται από το πλάτος και τη συχνότητα της πρώτης ανώτερης αρμονικής (κυριαρχούσα αρμονική) σε σχέση με τη θεμελιώδη συνιστώσα. Με την περίπτωση του τετραγωνικού παλμού εξόδου, η κυριαρχούσα αρμονική βρίσκεται πιο κοντά στη θεμελιώδη συνιστώσα και επομένως προκύπτει ογκώδες και αντιοικονομικό φίλτρο.

Η βασική αρχή της διαμόρφωσης PWM φαίνεται στο σχήμα 7.5:



Σχήμα 7.5 Αρχή διαμόρφωσης PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδου

Η μέγιστη τιμή της βασικής συνιστώσας του τετραγωνικού παλμού της τάσης είναι  $\frac{4V_d}{2\pi}$ , αλλά με τη δημιουργία δύο εγκοπών στα άκρα του παλμού επιτυγχάνεται μείωση της βασικής συνιστώσας και συγχρόνως μετατόπιση σε μεγαλύτερη τιμή της συχνότητας της πρώτης ανώτερης αρμονικής. Με την αύξηση του πλάτους της εγκοπής μειώνεται περαιτέρω η βασική συνιστώσα.

Η έξοδος ενός αναστροφέα με τεχνική PWM παρουσιάζει υψηλότερη τιμή THD, αλλά οι αρμονικές είναι μετατοπισμένες και σε υψηλότερες συχνότητες απ' ότι στον τετραγωνικό παλμό, επιτρέποντας έτσι την κατασκευή φίλτρου μικρότερων διαστάσεων. Επιπλέον, είναι δυνατή η ρύθμιση της τιμής της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας μεταβάλλοντας το εύρος της κυματομορφής αναφοράς. Η ιδιότητα αυτή παρέχει τη δυνατότητα σταθεροποίησης της τάσης εξόδου, όταν η πηγή της τάσης τροφοδότησης του αναστροφέα υφίσταται μικρές διακυμάνσεις.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τις βασικές τεχνικές PWM που χρησιμοποιούνται σήμερα για τον έλεγχο της βασικής συχνότητας, του πλάτους της βασικής συχνότητας και τη μείωση των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών.

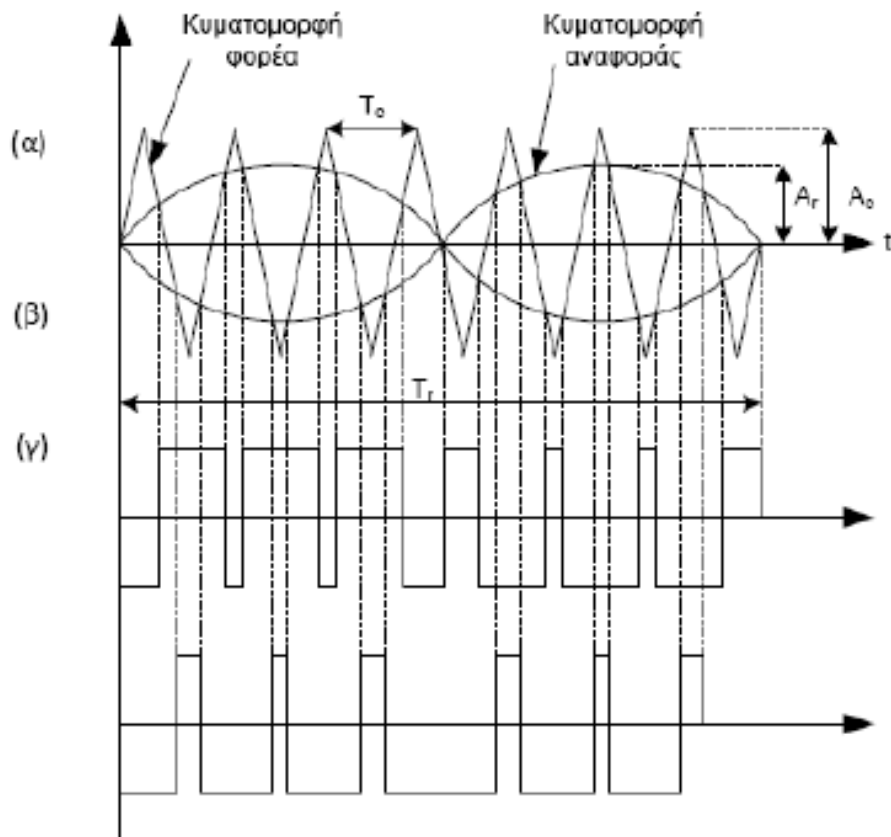
### 7.2.3 Μονοφασικός αναστροφέας ελεγχόμενος με SPWM

Η τεχνική SPWM βασίζεται σε ένα σύστημα συγκρίσεων μιας τριγωνικής κυματομορφής (φορέας) και μιας ημιτονικής κυματομορφής (αναφορά), της οποίας τη μορφή θέλουμε να αναπαράγουμε στην έξοδο του αναστροφέα.

Η τεχνική SPWM για μονοφασικό αναστροφέα παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 7.6. Υπάρχουν 2 κυματομορφές αναφοράς με διαφορά φάσης  $180^\circ$  · μία για κάθε ημιγέφυρα του μονοφασικού αναστροφέα και μία τριγωνική κυματομορφή φορέα. Οι κυματομορφές αυτές είναι συγχρονισμένες και παράγονται από γεννήτριες κυματομορφών στο κύκλωμα ελέγχου του αναστροφέα.

Μία από τις δύο κυματομορφές αναφοράς και η τριγωνική κυματομορφή εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή (σχήμα 7.7), στην έξοδο του οποίου παράγεται η κυματομορφή  $E_1(\omega t)$  του σχήματος 7.6(β). Από τη σύγκριση της δεύτερης κυματομορφής με τον ίδιο φορέα, σε ένα δεύτερο συγκριτή, παράγεται η κυματομορφή  $E_2(\omega t)$  του σχήματος 7.6(γ).

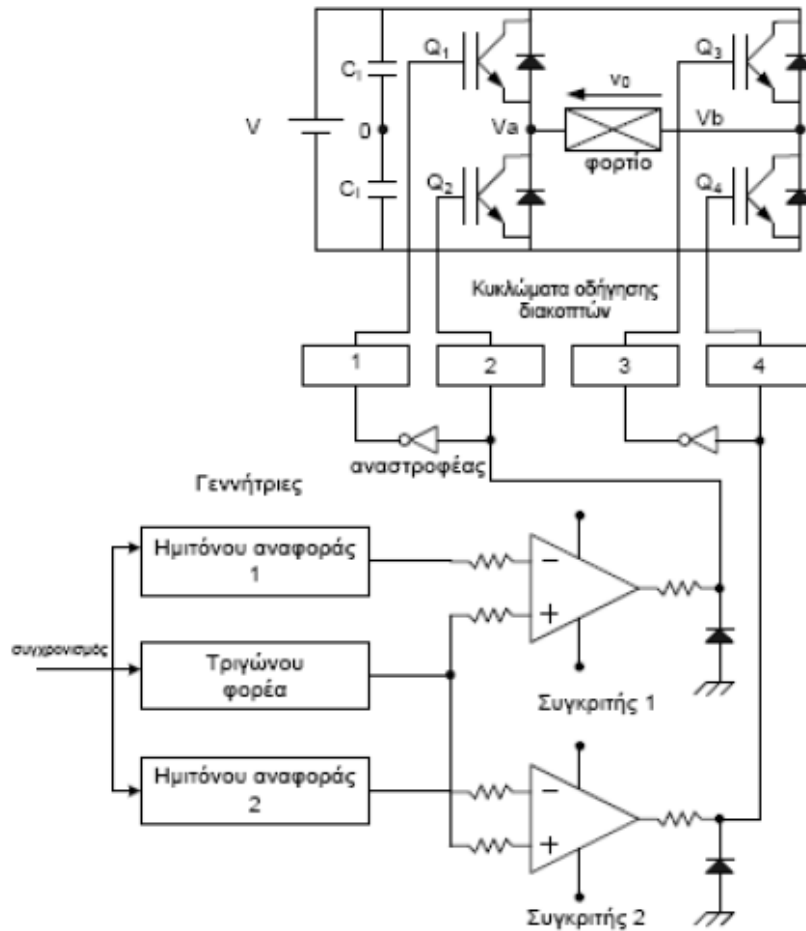
Το θετικό μέρος της κυματομορφής  $E_1(\omega t)$  ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη  $Q_1$  και το συμπληρωματικό του ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη  $Q_2$ . Το θετικό μέρος της κυματομορφής  $E_2(\omega t)$  ορίζει τους παλμούς έναυσης του διακόπτη  $Q_4$  και το συμπληρωματικό του ορίζει τους παλμούς έναυσης του ημιαγωγικού διακόπτη  $Q_3$ .



Σχήμα 7.6 Απεικόνιση της τεχνικής SPWM για  $M_f=0,7$  και για  $F_{nc}=7$   
 (α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα  
 (β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 1,  $E_1$   
 (γ) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή 2,  $E_2$

Στο σχήμα 7.7 παρουσιάζεται το κύκλωμα παραγωγής και σύνδεσης των παλμών έναυσης του αναστροφέα γέφυρας, στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM. Στο κύκλωμα αυτό δεν περιέχεται η συνδεσμολογία για τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι παλμοί παραμένουν ίδιοι ανεξάρτητα από τη χρήση IGBT, MOSFET ή άλλου διακοπτικού στοιχείου. Για τους συμβολισμούς ισχύουν:

- $A_r$ =πλάτος κυματομορφής αναφοράς
- $A_c$ =πλάτος κυματομορφής φορέα
- $T_c$ =περίοδος της κυματομορφής φορέα= $1/F_c$
- $M_f=A_r/A_c$ =συντελεστής διαμόρφωσης που μεταβάλλεται από 0 έως 1.
- $T_r=1/F_r$ =περίοδος της κυματομορφής φορέα
- $F_{nc}=f_c/f_r$ =ανηγμένη συχνότητα φορέα



Σχήμα 7.7 Μονοφασικός αναστροφέας πλήρους γέφυρας με το κύκλωμα οδήγησης στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM

Ο δείκτης διαμόρφωσης (modulation factor) είναι ένα σημαντικό μέγεθος που ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τιμής της κυματομορφής αναφοράς (πλάτους) προς τη μέγιστη τιμή  $V_T$  της τριγωνικής κυματομορφής του τριγωνικού φορέα και δίνεται από τη σχέση

$$M_f = \frac{\hat{V}_{aN}^*}{V_T} \quad (7.28)$$

ενώ η ίδια σχέση ισχύει για όλες τις φάσεις. Γενικά ο δείκτης διαμόρφωσης μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1 δίνοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της κυματομορφής αναφοράς και της κυματομορφής της τάσης εξόδου. Στην περιοχή αυτής της γραμμικής λειτουργίας, ο αναστροφέας μπορεί να θεωρηθεί ως γραμμικός ενισχυτής τάσης. Για  $M_f = 1$ , η μέγιστη τιμή (πλάτος) της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αναστροφέα μεταξύ μιας φάσης και του κόμβου αναφοράς N είναι  $0,5 \cdot V_d$  που είναι ίση με το 78,55% του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της αντίστοιχης τάσης για λειτουργία τετραγωνικού παλμού ( $4V_d/2\pi$ ). Στην πράξη, η μέγιστη τιμή εξόδου στη γραμμική περιοχή μπορεί να ανέλθει στο 90,7% της μέγιστης τάσης για λειτουργία τετραγωνικού παλμού με κατάλληλη υπέρθεση τρίτης αρμονικής. Για  $M_f = 0$ , η τάση εξόδου του αναστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνικό



παλμό με συντελεστή χρησιμοποίησης 0,5 και συχνότητα ίση με τη συχνότητα του τριγωνικού φορέα.

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στο μέγεθος που ονομάζεται ανηγμένη συχνότητα φορέα και δίνεται από τη σχέση

$$F_{nc} = \frac{f_c}{f_r} = \frac{\omega_c}{\omega} \quad (7.29)$$

όπου ο δείκτης c αναφέρεται στον φορέα και στον παρονομαστή βρίσκεται η θεμελιώδης συχνότητα. Με χρήση του ορισμού αυτού βλέπουμε ότι οι ανώτερες αρμονικές βρίσκονται σε συχνότητες  $\omega \cdot (M \cdot F_{nc} \pm N)$ . Επίσης μπορεί να δειχτεί ότι το πλάτος των ανώτερων αρμονικών είναι ανεξάρτητο της ανηγμένης συχνότητας και μειώνεται για μεγαλύτερες τιμές των M και N.

Με τη βοήθεια των παλμών έναυσης των διακοπών Q<sub>1</sub>-Q<sub>4</sub> σχεδιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων εξόδου. Η μία κυματομορφή αναφοράς παράγει την τάση V<sub>ao</sub>(ωt) και η άλλη κυματομορφή την τάση V<sub>bo</sub>(ωt), για τις οποίες ισχύει: V<sub>bo,1</sub>(ωt) = -V<sub>ao,1</sub>(ωt) και άρα V<sub>o,1</sub>(ωt) = V<sub>ao,1</sub>(ωt) - V<sub>bo,1</sub>(ωt) = 2V<sub>ao,1</sub>(ωt). Επειδή είναι:

$$\hat{V}_{ao,1} = \frac{V}{2} M_f \quad (7.30)$$

τότε το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αναστροφέα θα είναι:

$$\hat{V}_{o,1} = 2\hat{V}_{ao,1} = VM_f \quad (7.31)$$

Επομένως χρησιμοποιώντας την τεχνική SPWM και μεταβάλλοντας τη συντελεστή διαμόρφωσης M<sub>f</sub> μπορούμε να ελέγξουμε την τάση εξόδου. Η ανάλυση της τάσης εξόδου κατά Fourier είναι κάπως πολύπλοκη και έχει τη μορφή:

$$v_o = v_{ab} = \frac{1}{2} M_f V \sin(\omega t + \varphi) + \text{Όροι υψηλής συχνότητας } (M\omega \pm N\omega) \quad (7.32)$$

όπου M,N: ακέραιοι αριθμοί που το άθροισμά τους πρέπει να είναι περιττός αριθμός.

Είναι δυνατόν, με τη βοήθεια προγράμματος H/Y, να υπολογιστούν τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα για διάφορες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης M<sub>f</sub> και της ανηγμένης συχνότητας φορέα F<sub>nc</sub>. Ακολούθως, έχοντας τις τιμές των σημείων τομής με ανάλυση κατά Fourier μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου του αναστροφέα V<sub>o</sub>(ωt). Αναλύοντας τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης V<sub>o</sub> για διάφορες τιμές των M<sub>f</sub>, F<sub>nc</sub> προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας, όπου δίνονται οι RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της SPWM τάσης εξόδου. Οι τιμές αυτές είναι ανηγμένες ως προς την τάση εισόδου V και φαίνονται στον πίνακα 7-1:

Πίνακας 7-1 RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε μονοφασικό αναστροφέα

$M_f$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Αρμονική συνιστώσα	Ανηγγεμένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου				
Βασική	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$2F_{nc} \pm 1$	0,190	0,326	0,370	0,314	0,181
$2F_{nc} \pm 3$	--	0,024	0,071	0,139	0,212
$2F_{nc} \pm 5$	--	--	--	0,013	0,033

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 7-1 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- i) Η βασική αρμονική συνιστώσα παρουσιάζει μέγιστη τιμή όταν  $M_f = 1$  και είναι:  $\hat{V}_{o,1(max)} = V$
- ii) Η ανηγμένη τιμή της συχνότητας του φορέα  $F_{nc}$  πρέπει να είναι ζυγός αριθμός έτσι ώστε να μηδενισθούν οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της τάσης εξόδου  $V_o$  οι οποίες βρίσκονται στη συχνότητα  $F_{nc}$ .

Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα  $d$  της οποίας οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους χρειάζονται για την κατασκευή του φίλτρου εξόδου δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$d = 2F_{nc} - 1 \quad (7.33)$$

$$\hat{V}_{o,d(max)} = 0,370 V \quad (7.34)$$

όπου

$F_{nc}$  ανηγμένη συχνότητα του φορέα  
 $\hat{V}_{o,d(max)}$  μέγιστο πλάτος της κυριαρχούσας αρμονικής συνιστώσας για  $M_f = 0,6$ .

#### 7.2.4 Τριφασικός αναστροφέας ελεγχόμενος με SPWM

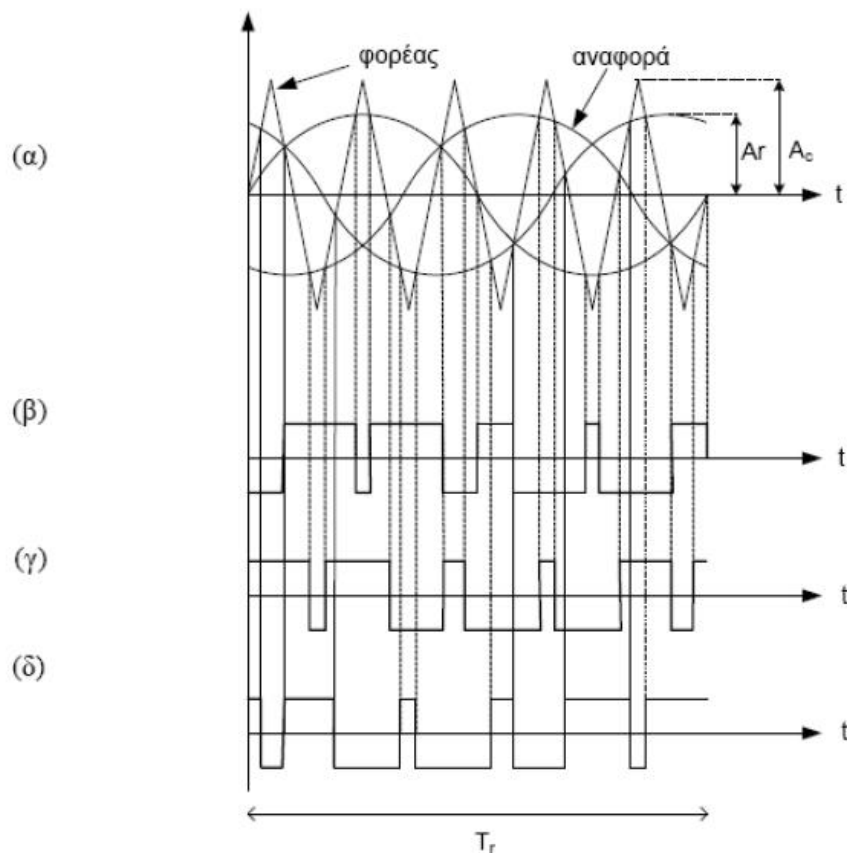
Για τον τριφασικό αναστροφέα χρησιμοποιούνται 3 ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) με διαφορά φάσης  $120^\circ$  και μία τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς  $A_f$  είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα  $A_c$ , το οποίο παραμένει σταθερό. Οι συντελεστές διαμόρφωσης  $M_f$  και ανηγμένης συχνότητας φορέα  $F_{nc}$  ορίζονται όπως πριν. Όπως και στην τεχνική SPWM του μονοφασικού αναστροφέα, έτσι και στον τριφασικό, τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα προσδιορίζουν τις κυματομορφές των παλμών έναυσης των διακοπών  $Q_1-Q_6$  του αναστροφέα καθώς και τις τάσεις εξόδου σε σχέση με το σημείο 0. Αυτά φαίνονται στο σχήμα 7.8.

Είναι δυνατόν, με τα βοήθεια προγράμματος H/Y, να υπολογισθούν τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και του φορέα για διάφορες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης  $M_f$  και της ανηγμένης συχνότητας φορέα  $F_{nc}$ . Ακολούθως, έχοντας τις τιμές των σημείων τομής με ανάλυση κατά Fourier μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου του αναστροφέα  $V_o(\omega t)$ . Αναλύοντας τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης  $V_o$  για διάφορες τιμές των  $M_f$ ,  $F_{nc}$  προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας, όπου δίνονται οι RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της

SPWM τάσης εξόδου. Οι τιμές αυτές είναι ανηγμένες ως προς την τάση εισόδου  $V$  και φαίνονται στον πίνακα 7-2.

Πίνακας 7-2 RMS τιμές αρμονικών συνιστωσών SPWM σε τριφασικό αναστροφέα

$M_f$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Αρμονική συνιστώσα	Ανηγμένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου				
Βασική	0,122	0,245	0,367	0,490	0,612
$F_{nc}$	0,010	0,037	0,080	0,135	0,195
$F_{nc\pm 2}$	--	--	--	0,005	0,011
$F_{nc\pm 4}$	--	--	--	--	--



Σχήμα 7.8 Τεχνική SPWM για τριφασικούς αναστροφείς  
 (α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα  
 (β,γ,δ) Παλμοί οδήγησης των διακοπών και 3 κλάδων

Τότε το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αναστροφέα θα είναι:

$$\hat{V}_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} VM_f \quad (7.35)$$

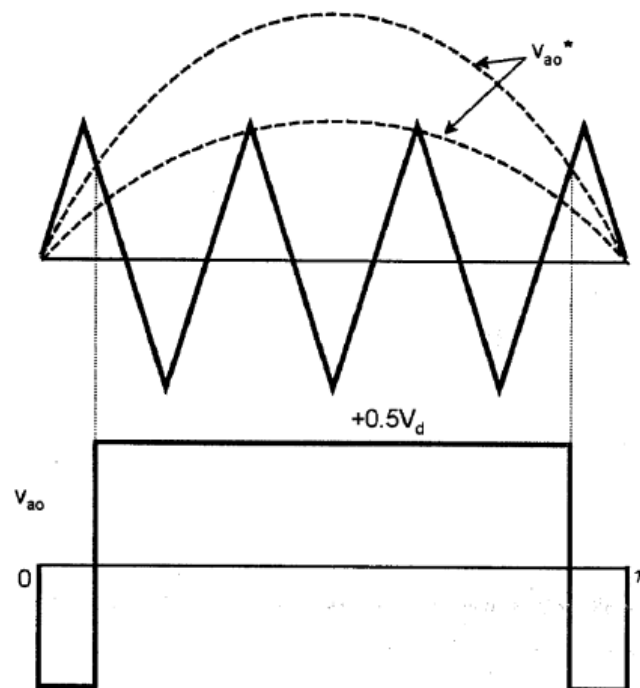
Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα  $d$  της οποίας οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους χρειάζονται για την κατασκευή του φίλτρου εξόδου δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$d = F_{nc} - 2 \quad (7.36)$$

$$\hat{V}_{ab,d(max)} = 0,27 V, \text{ για } M_f = 1 \quad (7.37)$$

Η ανηγμένη τιμή του φορέα  $F_{nc}$  επιλέγεται να είναι περιττός αριθμός πολλαπλάσιος του 3 ώστε να μην περιέχει η τάση εξόδου ζυγές αρμονικές συνιστώσες. Επιπλέον, αρμονικές συνιστώσες σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3, είναι ίδιες σε μέγεθος και φάση και στις τρεις φάσεις. Όπως διαπιστώνεται από τον πίνακα 7-2, το πλάτος της βασικής αρμονικής μεταβάλλεται σε σχέση με το συντελεστή διαμόρφωσης, παρέχοντας τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.

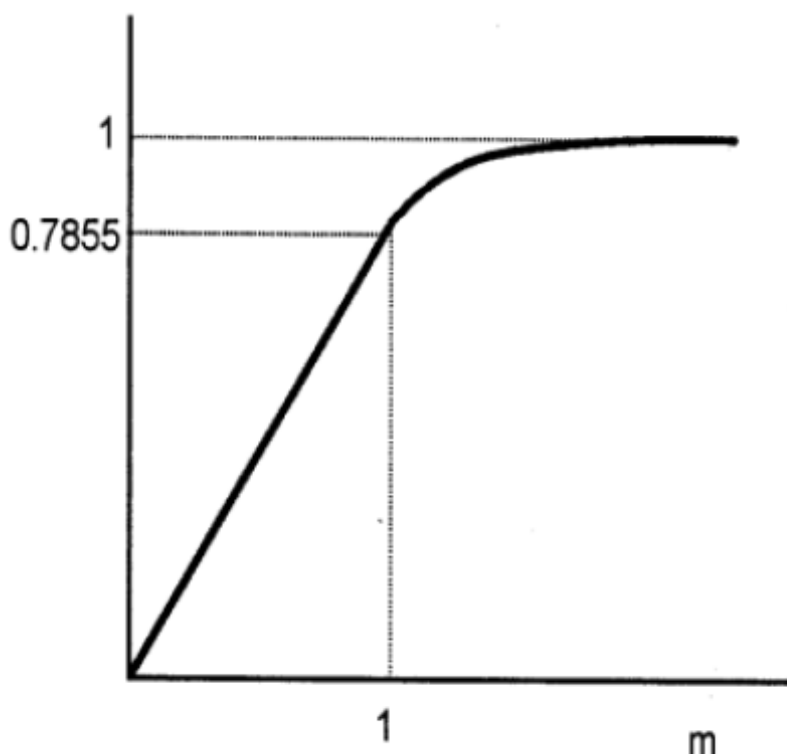
Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης  $M_f$  βρίσκεται κοντά στη μονάδα, τότε το πλάτος των παλμών και των εγκοπών πλησίον του κέντρου της θετικής και αρνητικής ημιπεριόδου γίνεται πολύ μικρό, σχεδόν μηδενίζεται. Όμως για να εξασφαλισθεί η διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων, πρέπει να υφίσταται ένα ελάχιστο πάχος εγκοπών και παλμών. Υπό συνθήκες ελέγχου πάχους εγκοπών και παλμών, υφίσταται κατά τη μετάβαση μία απότομη μεταβολή του ρεύματος φορτίου, η οποία για μεν τους διακόπτες IGBT μπορεί να είναι μικρή, όμως για τους διακόπτες GTO χαμηλής διακοπτικής συχνότητας είναι ουσιαστική. Στο σχήμα 7.9 παρουσιάζεται η επίδραση της υπερδιαμόρφωσης στην κυματομορφή της φασικής τάσης  $V_{ao}$ .



Σχήμα 7.9 Κυματομορφές στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης

Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι  $M_f > 1$ , τότε υπάρχει υπερδιαμόρφωση και οι εγκοπές και οι παλμοί στο κέντρο της ημιπεριόδου έχουν εκλείψει. Μόνο στην αρχή και στο τέλος της ημιπεριόδου υπάρχουν εγκοπές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περίπου τετραγωνικού παλμού και αύξηση της βασικής αρμονικής συνιστώσας στην τιμή  $\frac{4V_d}{2\pi}$ . Για την τιμή  $M_f = 1$ , η μέγιστη τιμή του εύρους της βασικής αρμονικής συνιστώσας είναι  $0,5 \cdot V_d$ , η οποία όπως δείξαμε

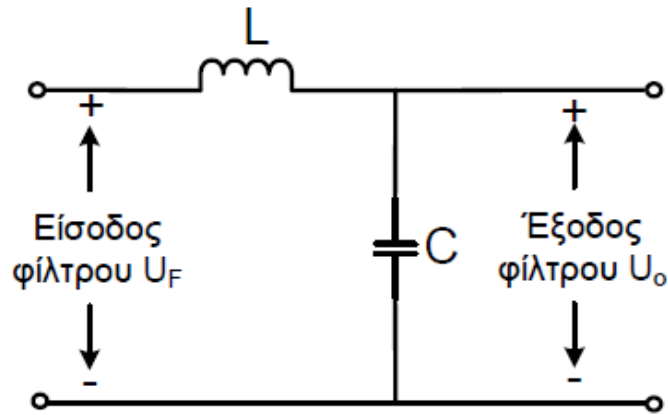
παραπάνω είναι το 78,55 % της τιμής  $\frac{4V_d}{2\pi}$ . Στην περιοχή της υπερδιαμόρφωσης, η χαρακτηριστική μεταφοράς είναι μη γραμμική (σχήμα 7.10) με αποτέλεσμα την επανεμφάνιση αρμονικών 5<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup> κ.λ.π. τάξης.



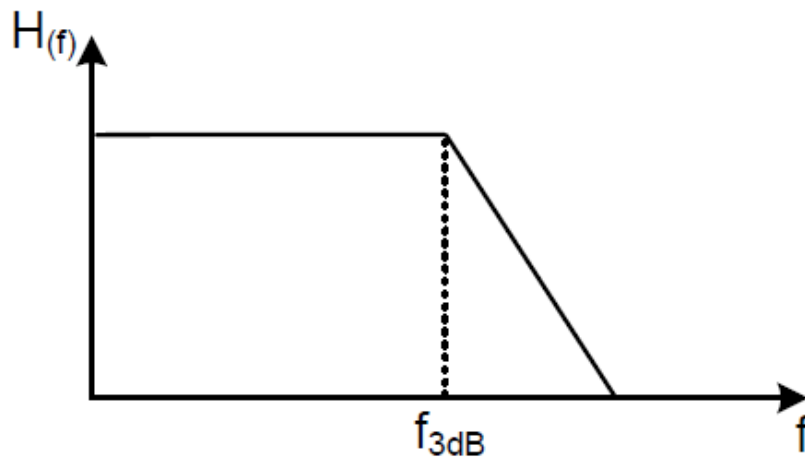
Σχήμα 7.10 Χαρακτηριστική μεταφοράς SPWM υπερδιαμόρφωσης

### 7.3 Φίλτρα εισόδου-εξόδου αναστροφέα τύπου LC [64],[76],[77]

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιασθούν ορισμένα στοιχεία για τη σχεδίαση φίλτρων εισόδου και εξόδου ενός αναστροφέα. Βασική απαίτηση στο σχεδιασμό φίλτρων είναι οι κυματομορφές στην έξοδο του φίλτρου να παρουσιάζουν THD μικρότερο του 5%. Υπάρχουν πολλά είδη φίλτρων (παθητικά, ενεργά) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις περιστάσεις. Ο πιο απλός και συνηθισμένος τύπος φίλτρου, που χρησιμοποιείται στην είσοδο και έξοδο του αναστροφέα είναι το βαθυπερατό φίλτρο ή φίλτρο LC. Η τοπολογία ενός βαθυπερατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 7.11(α). Πρόκειται για μία απλή τοπολογία που περιλαμβάνει μία αυτεπαγωγή  $L$  και μία χωρητικότητα  $C$ . Η λειτουργία του βαθυπερατού φίλτρου στηρίζεται στο γεγονός ότι επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλών συχνοτήτων και αποτρέπει τη διέλευση των υψηλών συχνοτήτων (σχήμα 7.11(β)). Σε επίπεδο τάσης, αυτό σημαίνει ότι το φίλτρο LC επιτρέπει τη διέλευση της βασικής αρμονικής συνιστώσας και ένα μικρό μέρος των ανώτερων αρμονικών, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής THD.



(α)



(β)

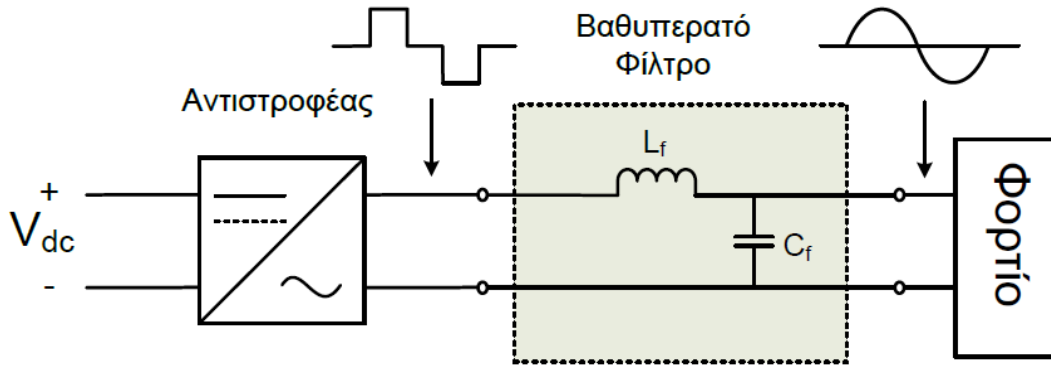
Σχήμα 7.11 Βαθυπερατό φίλτρο

(α) Τοπολογία βαθυπερατού φίλτρου

(β) Διάγραμμα συνάρτησης μεταφοράς

Στο σχήμα 7.12 παρουσιάζεται ένα βαθυπερατό φίλτρο εξόδου αναστροφεία. Ας υποθέσουμε ότι η σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει το φορτίο είναι  $Z_L$ . Εφαρμόζοντας το Νόμο Τάσεων Kirchoff για την έξοδο του αναστροφεία, θα πάρουμε την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{U_o}{U_f} = \frac{1}{1 + j\omega_f \left( \frac{1}{Z_L} + j\omega_f \right)} \Leftrightarrow \frac{U_o}{U_f} = \frac{1}{1 - \omega^2 L_f C_f + j\omega \frac{L_f}{Z_L}} \quad (7.38)$$



Σχήμα 7.12 Βαθυπερατό φίλτρο εξόδου LC

Από τη σχέση 7.38 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για τη  $n$ -οστή αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\hat{U}_{o,n}}{\hat{U}_{f,n}} = \frac{1}{1 - n^2 \omega^2 L_f C_f + \frac{j n \omega L_f}{Z_{L,n}}} \quad (7.39)$$

Κρατώντας αμετάβλητες τις τιμές της χωρητικότητας και της αυτεπαγωγής στη σχέση 7.39 για  $Z_{L,n} \rightarrow \infty$  (δηλαδή για λειτουργία χωρίς φορτίο, εν κενώ) ο λόγος  $\frac{\hat{U}_{o,n}}{\hat{U}_{f,n}}$  παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή του και κατά συνέπεια έχουμε τη χειρότερη περίπτωση ανώτερων αρμονικών στο φορτίο. Επομένως, θέτοντας  $1/Z_{L,n} = 0$ , η σχέση 7.39 παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\hat{U}_{o,n}}{\hat{U}_{f,n}} = \frac{1}{1 - n^2 \omega^2 L_f C_f} \quad (7.40)$$

Αποδεικνύεται ότι εάν η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου του αναστροφέα μειωθεί στο 3% της βασικής αρμονικής συνιστώσας από το φίλτρο εξόδου, τότε επιτυγχάνεται συντελεστής THD μικρότερος του 5% για λειτουργία εν κενώ που αποτελεί και τη χειρότερη περίπτωση λειτουργίας.

Αν θελήσουμε να μελετήσουμε τα φίλτρα εξόδου των τριφασικών αναστροφέων με μία διαφορετική προσέγγιση, ιδιαίτερο βάρος έχει η παρατήρηση ότι η έξοδος στο πεδίο της συχνότητας αποτελείται από:

- Ανώτερες αρμονικές που βρίσκονται σε συχνότητες πολλαπλάσιες της συχνότητας φορέα, περιττής τάσης.
- Πλευρικές αρμονικές γύρω από το κάθε πολλαπλάσιο της φέρουσας συχνότητας, με απόσταση πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας.

Συνεπώς, η θέση κάθε αρμονικής στον άξονα των συχνοτήτων,  $f_h$ , δίνεται από τη σχέση:

$$f_h = n f_c \pm m f_r, \text{ όπου } n, m \in Z \quad (7.41)$$

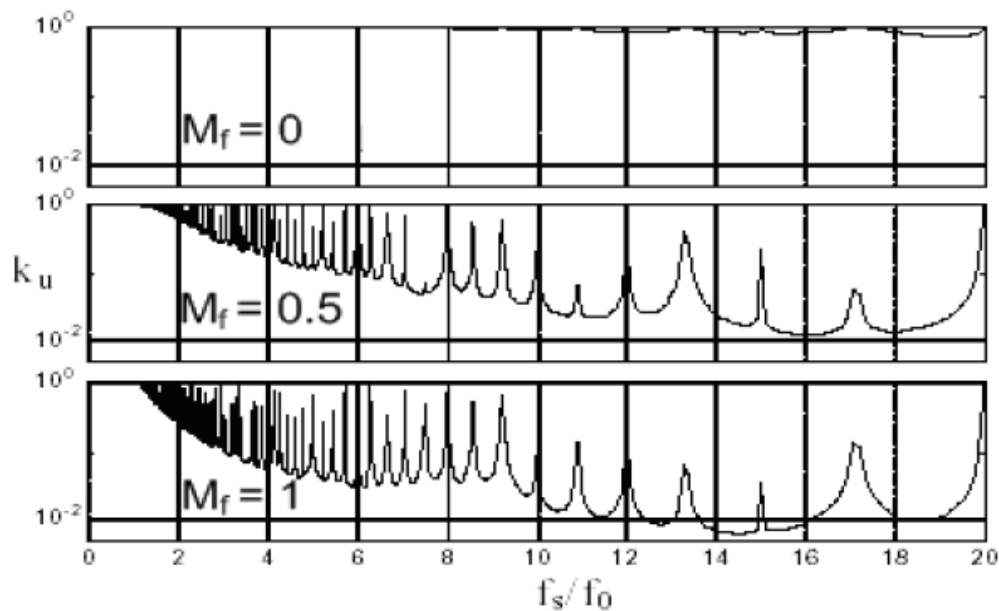
Οι κυριαρχούσες αρμονικές παρατηρούνται στη συχνότητα φορέα  $f_c$  και στις πλευρικές συχνότητες  $f_h = f_c \pm 2f_r$ . Ως εκ τούτου, απαιτείται φίλτρο εξόδου που να έχει συχνότητα συντονισμού  $f_o$ ,  $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , η οποία να ικανοποιεί τον περιορισμό:

$$f_r < f_o < f_s - 2f_r \quad (7.42)$$

Βασικό κριτήριο για την απόδοση του φίλτρου είναι η ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Η κυμάτωση δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$k_R = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{\infty} (\hat{V}_{R,n}^2 - \hat{V}_{R,1}^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} V_{R,n}^2}} \quad \text{και} \quad \hat{V}_{R,1}^2 = M \frac{V_{DC}}{2} \quad (7.43)$$

Στο σχήμα 7.13 παρουσιάζεται η κυμάτωση συναρτήσει του λόγου συχνοτήτων  $f_s/f_o$ . Με δεδομένο ότι επιδιώκουμε συνήθως υψηλό συντελεστή διαμόρφωσης (συνεπώς  $M \rightarrow 1$ ), διαπιστώνουμε από το σχήμα 7.13 ότι η χαμηλότερη κυμάτωση ( $k_R < 5\%$ ) παρατηρείται για  $f_s/f_o \approx 14,5$ . Επομένως, αν για παράδειγμα ένα σύστημα αναστροφέα έχει διακοπτική συχνότητα 6 kHz, τότε το φίλτρο εξόδου θα έχει συχνότητα συντονισμού περίπου 413,8 Hz.



Σχήμα 7.13 Κανονικοποιημένη κυμάτωση της φασικής τάσης εξόδου εν συναρτήσει του λόγου συχνότητας φορέα προς τη συχνότητα συντονισμού του φίλτρου εξόδου, για διάφορες τιμές του δείκτη διαμόρφωσης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

# ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΗΣ ΑΜΟΡΓΟΥ ΜΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΕ

### 8.1 Εισαγωγή

Η Αμοργός είναι ένα μικρό νησί που βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο των Κυκλάδων σε απόσταση 136 ναυτικών μιλίων από τον Πειραιά. Η επιφάνειά της εκτιμάται στα 121 τ. χλμ. Η Αμοργός είχε πληθυσμό 1.859 άτομα κατά την απογραφή του 2001. Το νησί ηλεκτροδοτείται από ένα μη διασυνδεδεμένο (αυτόνομο) ηλεκτρικό σύστημα που βασίζεται στις παραδοσιακές μονάδες diesel. Ένας χάρτης του νησιού παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8.1 Ο χάρτης του νησιού της Αμοργού [81]

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί μία προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη για την αντικατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ. Η μελέτη θα γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού Homer.

### 8.2 Αυτόνομος σταθμός παραγωγής

Ο αυτόνομος σταθμός παραγωγής της Αμοργού έχει εγκατεστημένες 6 μονάδες diesel οι οποίες έχουν συνολική εγκατεστημένη ικανότητα 5.286 MW. Αναλυτικά, οι μονάδες του σταθμού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [78]:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

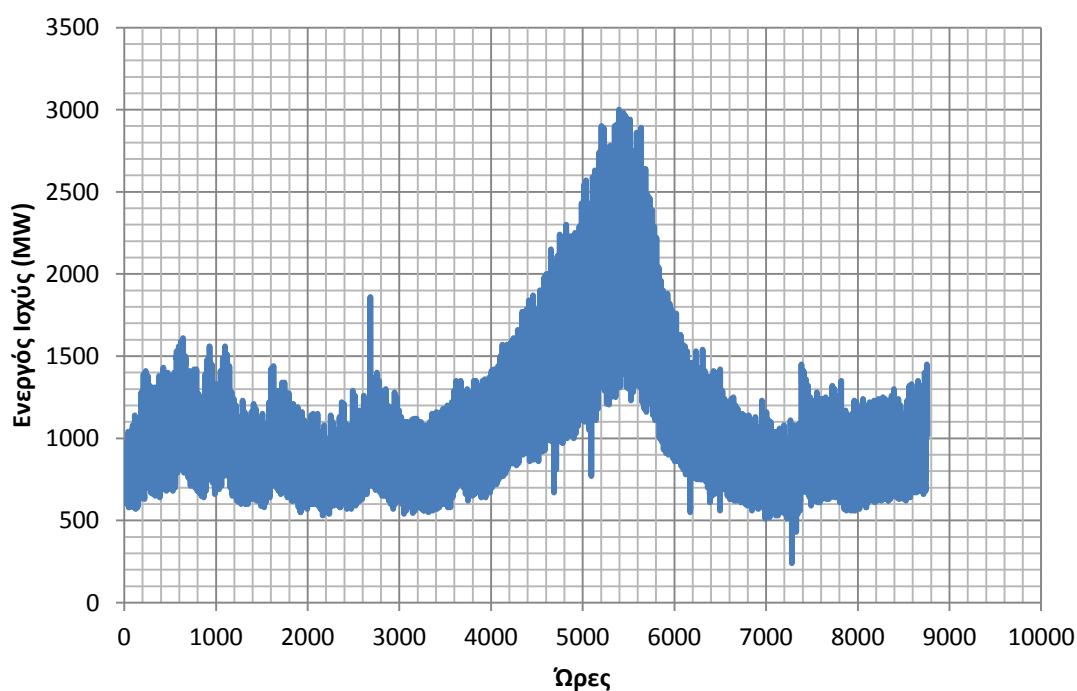
Πίνακας 8-1 Δεδομένα για το θερμικό σταθμό παραγωγής της Αμοργού

Αύξων αριθμός μηχανής	Προκαθορισμένη Σειρά για την ένταξη μονάδας	Τύπος μηχανής	Καύσιμο	Ελάχιστη ενεργός ισχύς (MW)	Μέγιστη Ενεργός ισχύς (MW)	Επίπεδο τάσης
1	1A	MITSUBISHI S16R-PTA	Diesel	0,600	1,122	6600
2	1B	MITSUBISHI S16R-PTA	Diesel	0,600	1,122	400
3	2	CKD (SACM)	Diesel	0,640	1,000	400
4	1C	MITSUBISHI S16R-PTA	Diesel	0,600	1,122	400
5	3A	CEGIELSKI 6AL20/24	Diesel	0,275	0,460	400
6	3B	CEGIELSKI 6AL20/24	Diesel	0,275	0,460	400
Σύνολο				2,990	5,286	

Το νησί έχει τρεις γραμμές διανομής MT στο επίπεδο των 6,6 kW. Δεν έχει δίκτυο μεταφοράς, ούτε σύστημα SCADA εγκατεστημένο στο θερμικό σταθμό παραγωγής. Δυστυχώς μόνο αυτά τα δεδομένα είναι γνωστά από τον ΔΕΔΔΗΕ για το σύστημα της Αμοργού. Πάντως στην εργασία αυτή δεν θα μοντελοποιηθεί ούτε θα ληφθεί υπόψη το σύστημα διανομής, διότι είναι τόσο μικρό που μας επιτρέπεται να αγνοήσουμε τις απώλειές του.

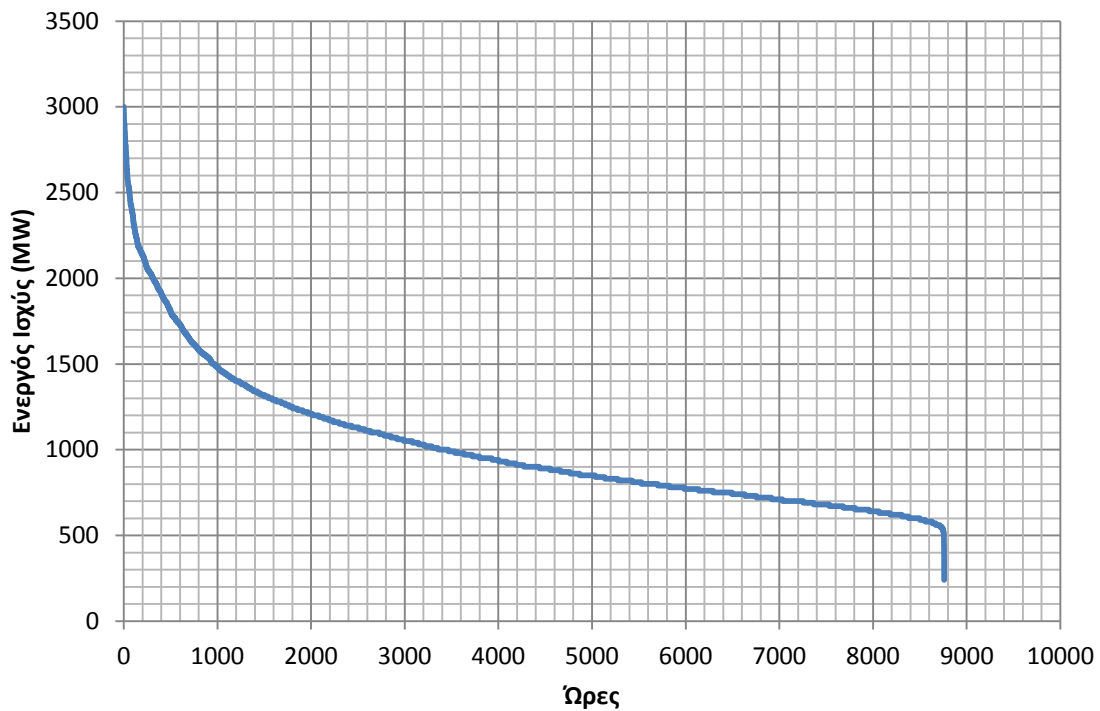
### 8.3 Δεδομένα για το φορτίο

Η καμπύλη φορτίου του νησιού φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και αφορά το έτος αναφοράς 2006 [78]:



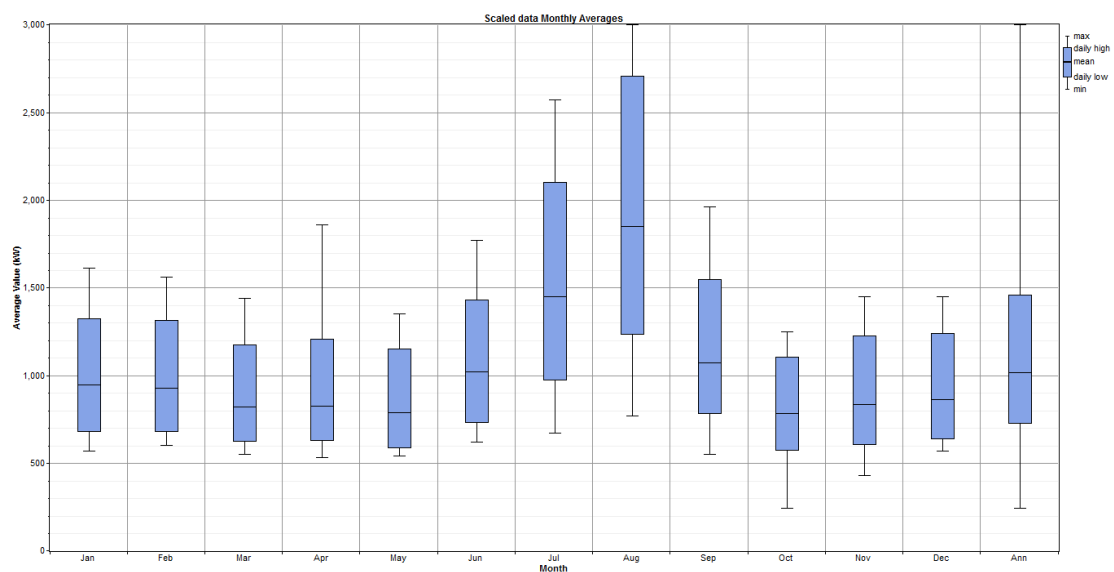
Σχήμα 8.2 Καμπύλη φορτίου της Αμοργού για το έτος 2006

Η καμπύλη διάρκειας φορτίου για το ίδιο έτος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [78]:



Σχήμα 8.3 Καμπύλη διάρκειας φορτίου της Αμοργού για το έτος 2006

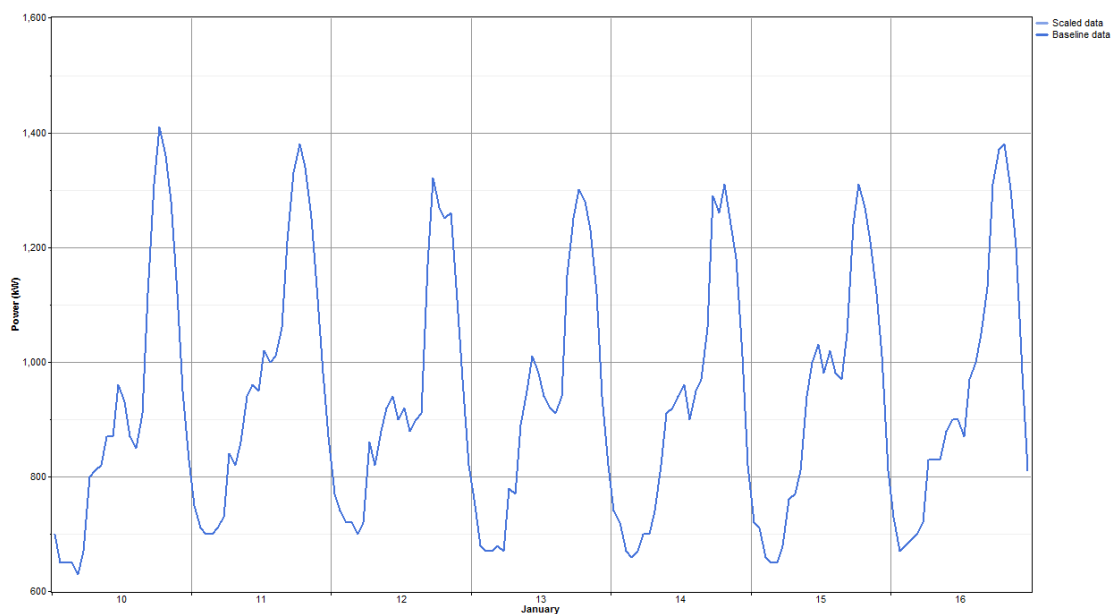
Το ελάχιστο φορτίο είναι  $P_{min} = 240 \text{ kW}$  και το μέγιστο φορτίο (αιχμή) είναι  $P_{max} = 3000 \text{ kW}$ . Ο συντελεστής φορτίου του νησιού είναι 33,9% κάτι που σημαίνει πως το μέσο φορτίο είναι  $P_{mean} = 1017 \text{ kW}$ . Η μέση ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε  $E_{mean} = 24.383 \text{ kWh/ημέρα}$ . Το φορτίο του νησιού χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη εποχικότητα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



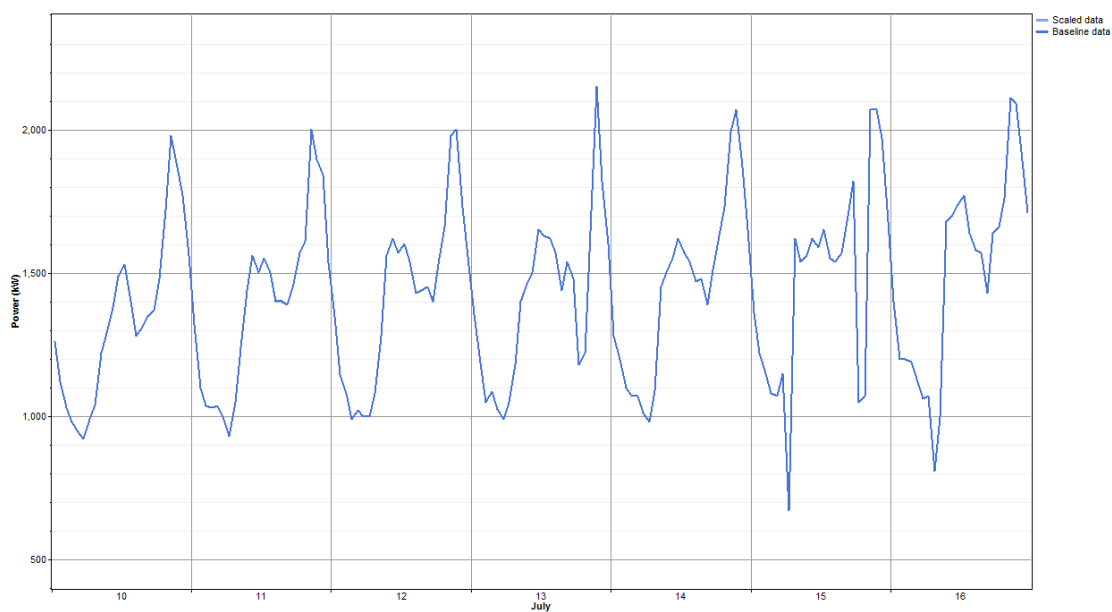
Σχήμα 8.4 Μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές φορτίου ανά μήνα για το έτος αναφοράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Για να γίνει ακόμα πιο κατανοητή η εποχικότητα, παρουσιάζουμε παρακάτω τις καμπύλες φορτίου για μερικές μέρες του καλοκαιριού και μερικές μέρες του χειμώνα.



Σχήμα 8.5 Καμπύλη φορτίου από 10 έως 16 Ιανουαρίου

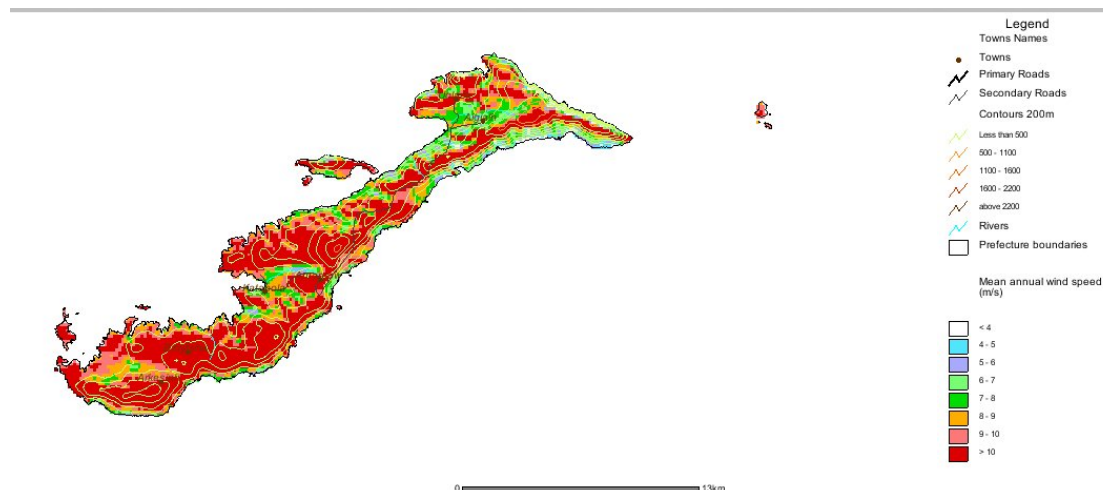


Σχήμα 8.6 Καμπύλη φορτίου από 10 έως 16 Ιουλίου

Παρατηρούμε ότι εφόσον η αιχμή του φορτίου είναι 3 MW, μόνο οι μονάδες με α/α 1, 2 και 4 λειτουργούν κατά τη διάρκεια του έτους. Οι υπόλοιπες μονάδες παραμένουν εκτός λειτουργίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

## 8.4 Αιολικό δυναμικό

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται ο χάρτης αιολικού δυναμικού για το νησί της Αμοργού [79]:



Σχήμα 8.7 Χάρτης Αιολικού Δυναμικού Αμοργού

Στο χάρτη αυτό παρουσιάζεται η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου για κάθε περιοχή του νησιού, με διαφορετικά χρώματα για την κάθε ταχύτητα. Παρατηρούμε ότι στο βόρειο τμήμα του νησιού (περιοχή Αιγιάλης) το αιολικό δυναμικό είναι σχετικά φτωχό σε σχέση με τη νότια περιοχή (περιοχή Αρκεσίνης). Δυστυχώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου για το νησί. Υπάρχουν ορισμένα αποσπασματικά στοιχεία για ορισμένους μόνο μήνες του έτους και για περιοχές με σχετικά χαμηλή μέση ταχύτητα ανέμου. Εμείς θα τοποθετήσουμε τις ανεμογεννήτριες στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού όπου οι μέσες ετήσιες ταχύτητες ανέμου υπερβαίνουν τα 10 m/s. Επειδή δεν υπάρχουν καθόλου διαθέσιμα στοιχεία για την περιοχή αυτή, αναγκαζόμαστε να ανακατασκευάσουμε με στατιστικές μεθόδους χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου. Η διαδικασία έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 2.3.

Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κατανομή Weibull. Συνεπώς η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Σ.Π.Π.) είναι η ακόλουθη:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \text{ για } 0 \leq v \leq \infty$$

όπου  $k$  είναι η παράμετρος μορφής και  $c$  η παράμετρος κλίμακας.

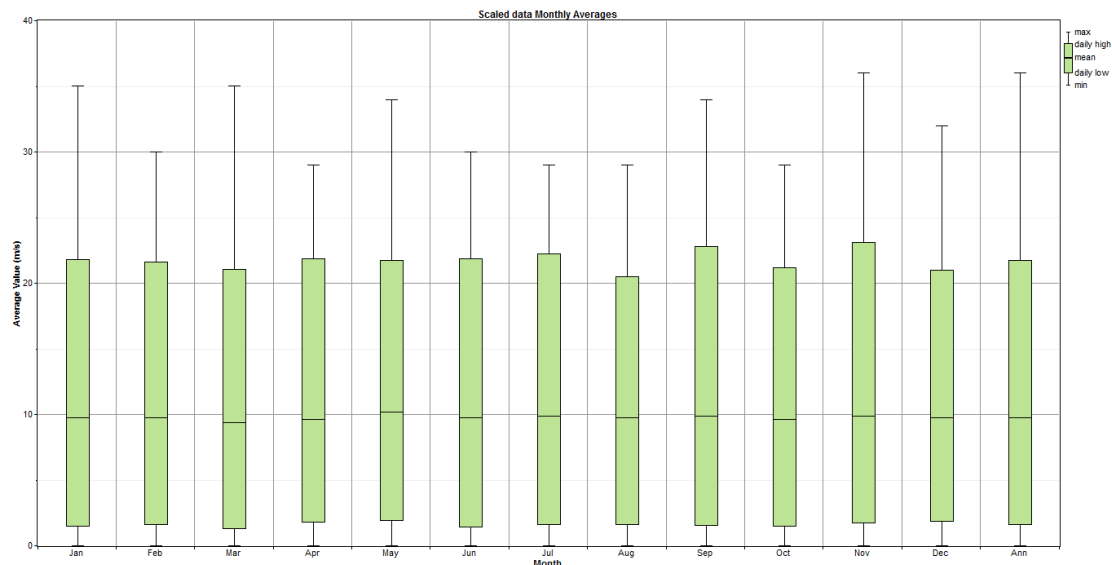
Τυπικές τιμές της παραμέτρου  $k$  είναι από 1,5 έως 2,5 ενώ για τον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές από 1,5 έως 2,0. Η παράμετρος  $c$  συνδέεται με την μέση ταχύτητα του ανέμου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{V} = c * \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `wblrnd` του Matlab (η οποία κατασκευάζει αριθμούς που ακολουθούν κατανομή Weibull), προσομοιώνουμε μία χρονοσειρά

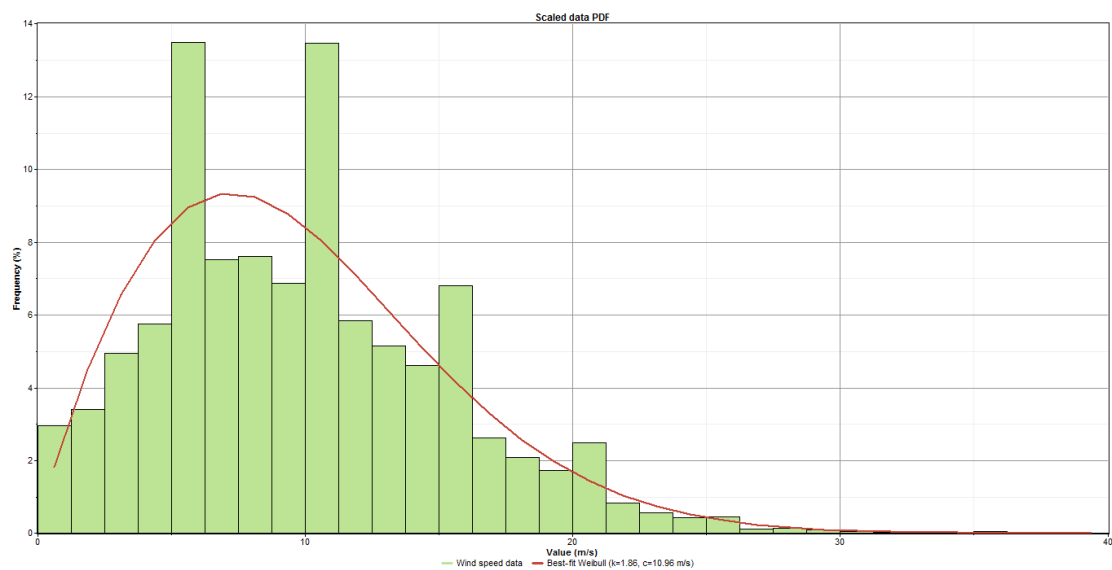
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

ταχυτήτων ανέμου με 8760 ωριαίες τιμές. Για την προσομοίωση αυτή θεωρούμε  $k = 1,86$  και  $\bar{V} = 9,76 \text{ m/s}$  (αρκετά αυστηρή επιλογή). Επίσης θεωρείται ότι οι Α/Γ τοποθετούνται σε σημείο με υψόμετρο 300m (τυπικό υψόμετρο στα νοτιοδυτικά του νησιού) και ότι το ύψος της Α/Γ είναι 80m (Vestas V82, όπως εξηγείται παρακάτω). Η μέση τιμή του ανέμου για κάθε μήνα του έτους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8.8 Μέση τιμή και μέγιστες τιμές ανέμου για κάθε μήνα του έτους

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η Σ.Π.Π. της ταχύτητας του ανέμου:



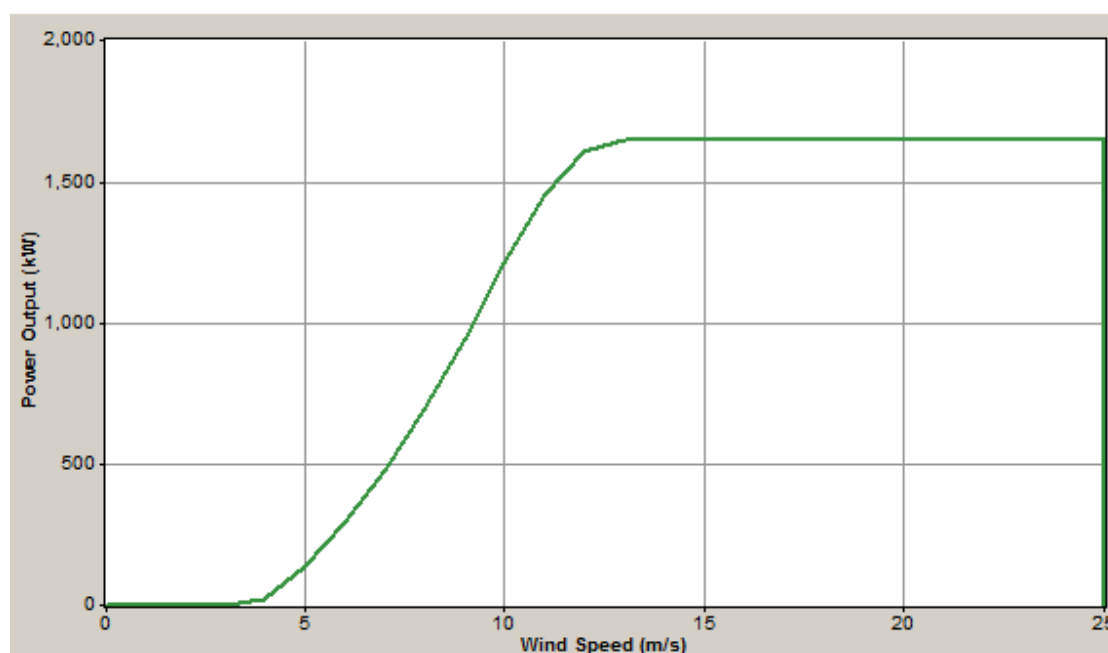
Σχήμα 8.9 Σ.Π.Π. της ταχύτητας του ανέμου.

Για τις ανάγκες της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η ανεμογεννήτρια Vestas V82, τις οποίες τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Vestas V82

Ονομαστική ισχύς εξόδου	1.650 kW
Συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική Τάση	690 V
Ύψος πλάνης	78 m
Ταχύτητα ένταξης (Cut-in wind speed)	3,5 m/s
Ονομαστική ταχύτητα	13 m/s
Ταχύτητα απένταξης (Cut-out wind speed)	20 m/s

Η καμπύλη ισχύος της φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8.10 Καμπύλη ισχύος Vestas V82

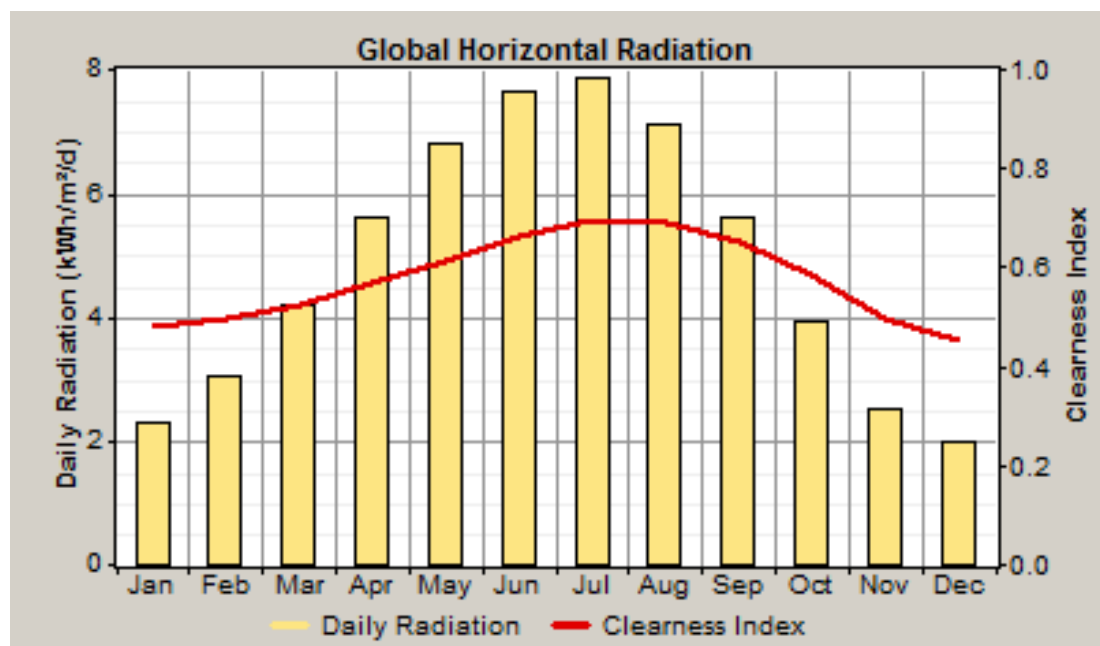
## 8.5 Ηλιακό δυναμικό

Η Αμοργός έχει τις ακόλουθες γεωγραφικές συντεταγμένες:

Γεωγραφικό πλάτος : 36° 49' Βόρεια

Γεωγραφικό μήκος: 25° 54' Ανατολικά

Με τα δεδομένα αυτά μπορούμε να εκτιμήσουμε τη μέση τιμή ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα του έτους, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.11. Στη συνέχεια, η ανακατασκευή ωριαίων χρονοσειρών ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του αλγορίθμου Graham, Hollands [29] θα μας δώσει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ωριαία παραγωγή από ΦΒ πλαίσια που είναι απαραίτητη για την ενεργειακή μας μελέτη. Η εφαρμογή του αλγορίθμου γίνεται αυτόματα από το λογισμικό Homer.



Σχήμα 8.11 Μέση τιμή ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε kWh/m<sup>2</sup>/ημέρα για κάθε μήνα του έτους

Θεωρείται η τοποθέτηση ΦΒ πλαισίων υπό γωνία 36,82° (ειδική κατασκευή) προσανατολισμένα ακριβώς προς το νότο (γωνία αζιμούθιου ίση με 0°). Η αντανάκλαση του εδάφους θεωρείται ίση με 20%, ενώ η διάρκεια ζωής των panel ίση με 20 έτη. Τέλος, οι συνολικές απώλειες κατά την παραγωγή ενέργειας από τα ΦΒ θεωρούνται ίσες με 20%. Οι απώλειες αυτές σχετίζονται με:

- Τη θερμοκρασία (όταν αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η απόδοση).
- Τη ρύπανση (όταν αυξάνεται η ρύπανση μειώνεται η απόδοση).
- Τη γήρανση (όσο γηράσκουν τα πλαίσια μειώνεται η απόδοση).
- Τις απώλειες των διόδων.
- Την ανομοιογένεια (τα ΦΒ εκ κατασκευής μπορεί να είναι ανομοιογενή μεταξύ τους).
- Τις απώλειες καλωδιώσεων.

Τα ΦΒ που θα χρησιμοποιήσουμε στη μελέτη αυτή δεν είναι εξοπλισμένα με σύστημα tracking.

## 8.6 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Για τις ανάγκες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημά μας θα χρησιμοποιήσουμε μπαταρίες μολύβδου-οξέως τύπου Horpecke 24 OPzS 3000. Τα χαρακτηριστικά μιας τέτοιας μπαταρίας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

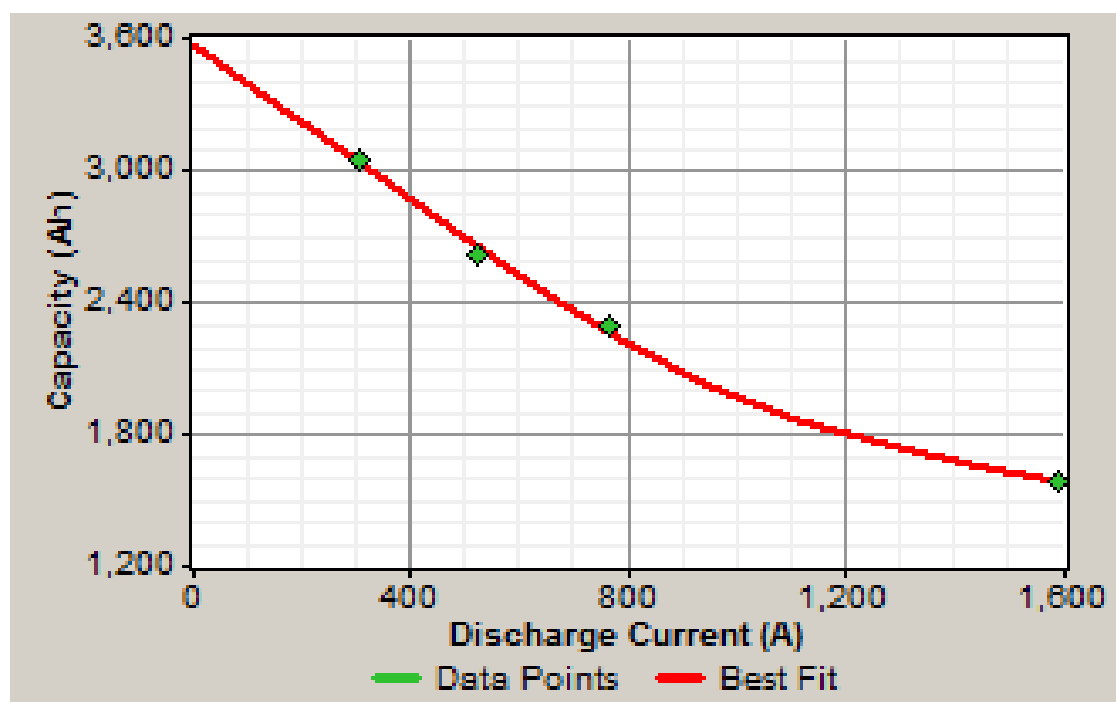
Πίνακας 8-3 Βασικά χαρακτηριστικά μπαταρίας Horpecke 24 OPzS 3000

Περιγραφή	Horpecke 24 OPzS 3000
Συντομογραφία	H3000
Κατασκευαστής	Horpecke
Ονομαστική χωρητικότητα	3000 Ah
Ονομαστική τάση	2 V
Απόδοση διπλής κατεύθυνσης	86 %
Ελάχιστο επίπεδο φόρτισης (Minimum SOC)	30%



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Float life	20 χρόνια
Μέγιστος ρυθμός φόρτισης	1 A/Ah
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης	610 A
Μέγιστη διαχειρισθείσα ενέργεια κατά τη διάρκεια ζωής (lifetime throughput)	10.196 kWh
Προτεινόμενη τιμή	10.241 kWh
Μέγιστη χωρητικότητα	3.575 Ah
Λόγος χωρητικότητας, c	0,315
Σταθερά ρυθμού	1,24 1/ώρα



Σχήμα 8.12 Καμπύλη χωρητικότητας της μπαταρίας Horpecke 24 OPzS 3000

### 8.7 Ο μετατροπέας AC-DC-AC

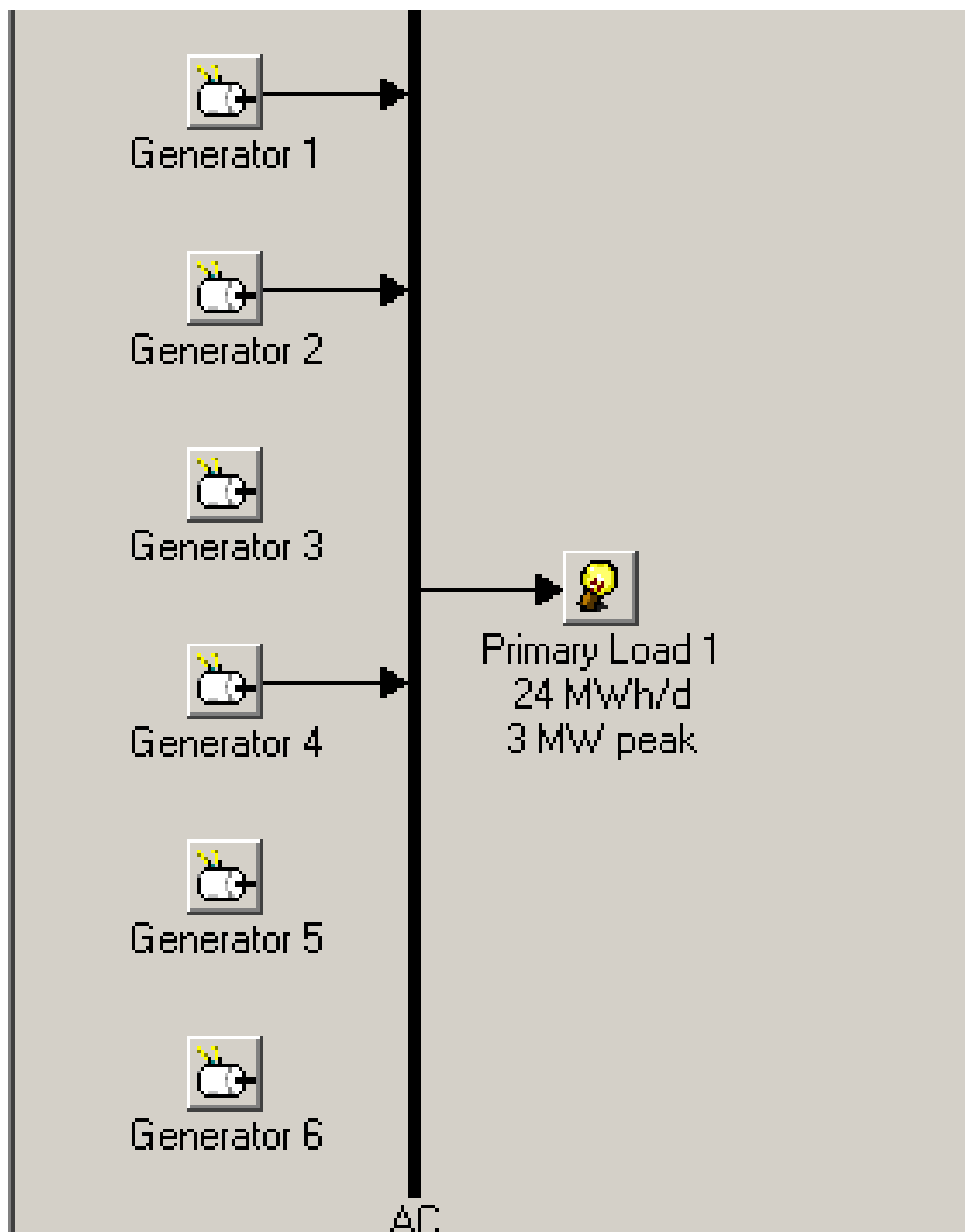
Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης του συστήματος με το λογισμικό Homer θεωρείται ένας μετατροπέας ισχύος ο οποίος μετατρέπει το ρεύμα από AC σε DC και από DC σε AC. Η απόδοση αναστροφής θεωρείται ίση με 90%, ενώ η απόδοση ανόρθωσης ίση με 85%. Η διάρκεια ζωής της συσκευής θεωρείται ίση με 15 έτη.

### 8.8 Προσομοίωση υπάρχοντος συστήματος

#### 8.8.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε πιο πάνω, ο τοπικός σταθμός παραγωγής της Αμοργού αποτελείται από 6 γεννήτριες diesel. Επειδή η αιχμή του φορτίου του νησιού είναι 3 MW από αυτές λειτουργούν μόνο αυτές με α/α 1, 2 και 4 σύμφωνα με την προκαθορισμένη σειρά ένταξης. Οι υπόλοιπες μονάδες παραμένουν ανενεργές καθόλη τη διάρκεια του έτους. Λόγω έλλειψης στοιχείων για το δίκτυο διανομής του νησιού, αυτό δεν θα μοντελοποιηθεί αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αφού λόγω του μικρού μεγέθους του δικτύου οι απώλειες δεν ξεπερνούν το 2-3%. Η

μοντελοποίηση θα γίνει με βάση το λογισμικό Homer. Το υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα του νησιού απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



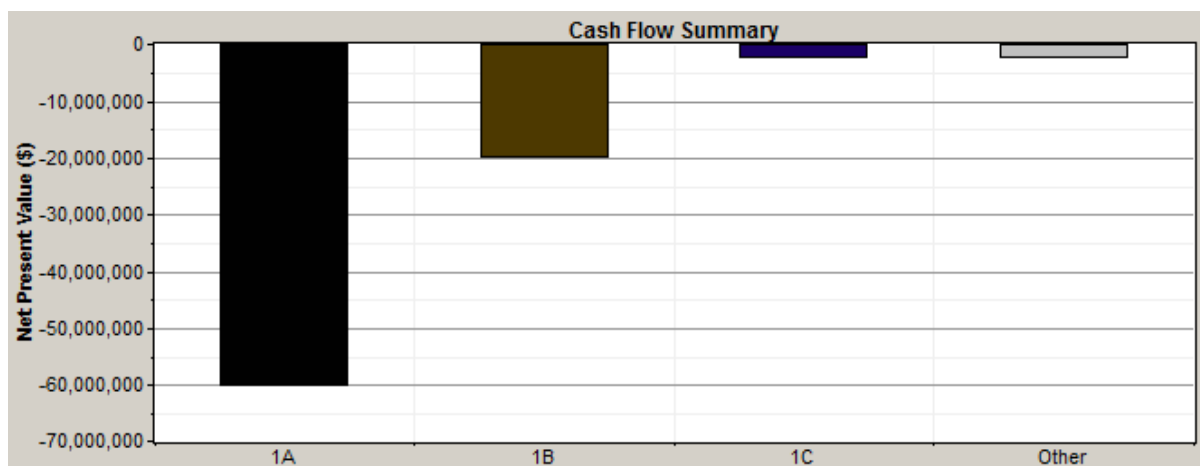
Σχήμα 8.13 Υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού

Οι τρεις γεννήτριες που είναι σε λειτουργία είναι ίδιου τύπου (MITSUBISHI S16R-PTA). Θεωρούμε ότι το κόστος αγοράς τους είναι περίπου \$1.000.000, όσο και το κόστος αντικατάστασής τους, και ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι \$8/ώρα. Επίσης, υπάρχει και ο παράγοντας του κόστους δικαιωμάτων εκπομπών. Σήμερα οι τιμές εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τόνο έχουν υποχωρήσει πάρα πολύ (κάτω από \$1 ανά τόνο), ενώ παλαιότερα (π.χ. το 2006) είχαν φτάσει και ξεπεράσει τα \$30 ανά τόνο. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη και μία ανάλυση ευαισθησίας για την τιμή του

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

κόστους των εκπομπών. Το κόστος δικαιωμάτων εκπομπών προς το παρόν θα θεωρηθεί ίσο με \$20/τόνο.

### 8.8.2 Οικονομική ανάλυση



Σχήμα 8.14 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας υπάρχοντος συστήματος

Πίνακας 8-4 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας υπάρχοντος συστήματος

Εξάρτημα	Κεφάλαιο (\$)	Αντικατάσταση (\$)	Λ&Σ (\$)	Καύσιμο	Εναπομείνουσα αξία (\$)	Σύνολο (\$)
Γεννήτρια 1	-1.000.000	-302.007	-895.858	-58.116.984	182.516	-60.132.340
Γεννήτρια 2	-1.000.000	0	-328.788	-18.486.004	128.958	-19.685.832
Γεννήτρια 4	-1.000.000	0	-26.998	-1.486.420	224.456	-2.288.964
Άλλο	0	0	-2.259.727	0	0	-2.259.727
Σύστημα	-3.000.000	-302.007	-3.511.371	-78.089.416	535.930	-84.366.840

Συνοπτικά:

- Συνολική ΚΠΑ: \$ -84.366.816
- Κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy-LCOE): \$ 0,742 / kWh
- Λειτουργικό κόστος: \$ 6.365.059 / έτος

### 8.8.3 Ηλεκτρική ανάλυση

Γενικά ηλεκτρικά στοιχεία

Πίνακας 8-5 Παραγωγή όλων των γεννητριών σε kWh/έτος

Παραγωγή	kWh/έτος	%
Γεννήτρια 1	6,846,986	76
Γεννήτρια 2	2,023,885	22
Γεννήτρια 4	160,768	2

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**

Πίνακας 8-6 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο για το υπάρχον σύστημα

<b>Κατανάλωση</b>	<b>kWh/yr</b>	<b>%</b>
Φορτίο	8,899,921	100

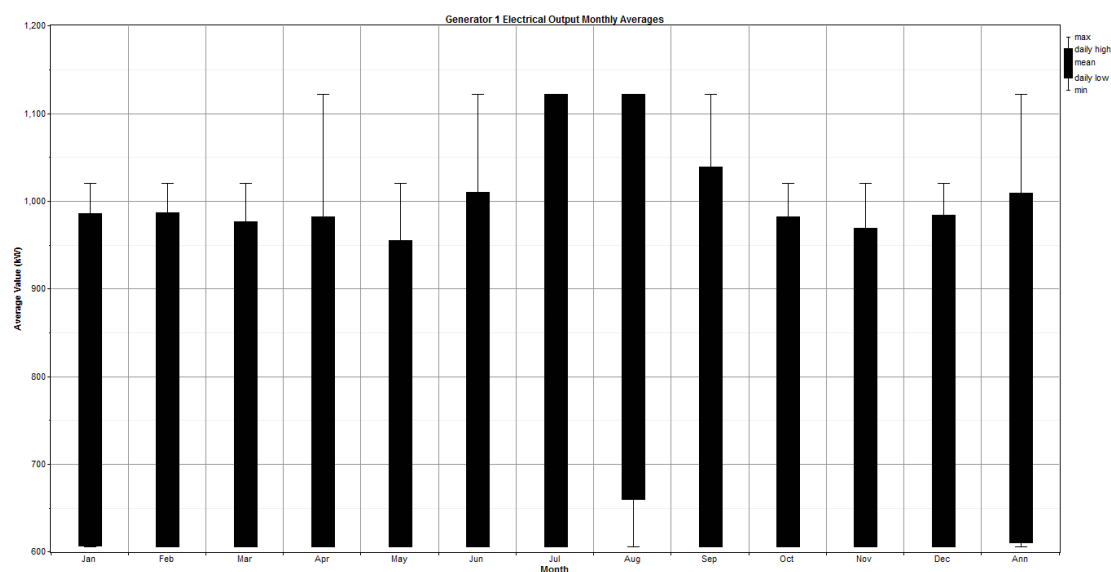
Πίνακας 8-7 Περίσσεια ηλεκτρισμού (λόγω τεχνικών ελαχίστων των γεννητριών) και μη εξυπηρετηθέν φορτίο

<b>Ποσότητα</b>	<b>kWh/έτος</b>	<b>%</b>
Περίσσεια ηλεκτρισμού	131.771	1.46
Μη εξυπηρετηθέν ηλεκτρικό φορτίο	0.00171	0.00
Έλλειψη ικανότητας	0.00	0.00

**Γεννήτρια 1**

Πίνακας 8-8 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρια 1

<b>Ποσότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Ώρες λειτουργίας	8.760	Ώρες/έτος
Αριθμός εκκινήσεων	1	Εκκινήσεις/έτος
Διάρκεια ζωής	20,5	Χρόνια
Capacity factor	69,7	%
Σταθερό κόστος γεννήτριας	182	\$/ώρα
Οριακό κόστος γεννήτριας	0,468	\$/kWh
Παραγωγή ηλεκτρισμού	6.846.986	kWh/έτος
Μέση παραγωγή ηλεκτρισμού	782	kW
Ελάχιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	606	kW
Μέγιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	1.122	kW
Κατανάλωση καυσίμου	2.497.966	L/έτος
Ειδική κατανάλωση καυσίμου	0,365	L/kWh
Ενέργεια εισαχθέντος καυσίμου	24.579.990	kWh/έτος
Μέση ηλεκτρική απόδοση	27,9	%



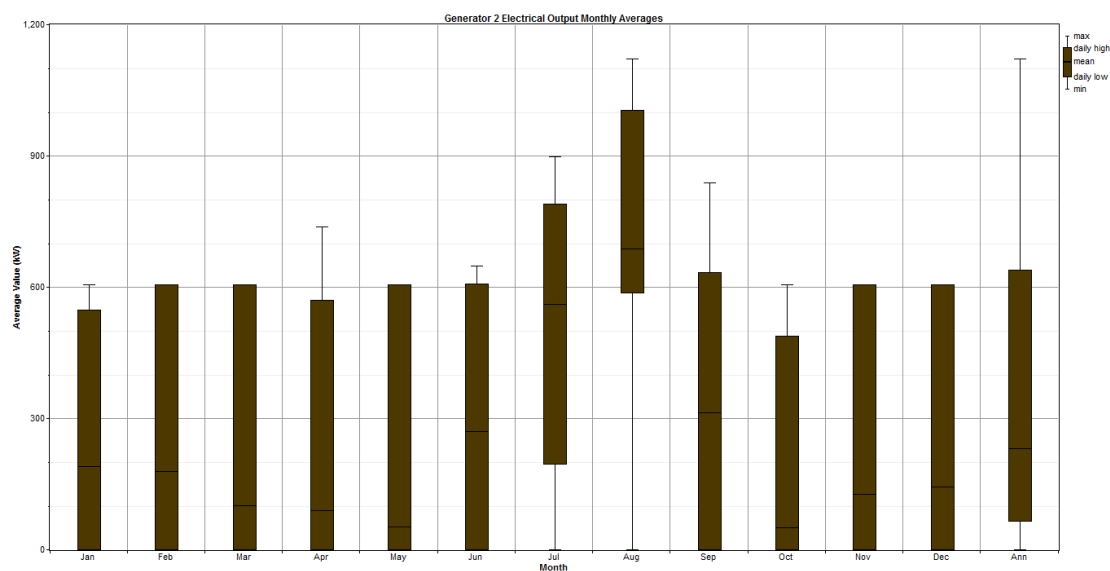
Σχήμα 8.15 Παραγωγή Γεννήτριας 1 κάθε μήνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Γεννήτρια 2

Πίνακας 8-9 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρια 2

<b>Ποσότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Ώρες λειτουργίας	3.215	Ώρες/έτος
Αριθμός εκκινήσεων	377	Εκκινήσεις/έτος
Διάρκεια ζωής	56,0	Χρόνια
Capacity factor	20,6	%
Σταθερό κόστος γεννήτριας	182	\$/ώρα
Οριακό κόστος γεννήτριας	0,468	\$/kWh
Παραγωγή ηλεκτρισμού	2.023.885	kWh/έτος
Μέση παραγωγή ηλεκτρισμού	630	kW
Ελάχιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	606	kW
Μέγιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	1.122	kW
Κατανάλωση καυσίμου	794.560	L/έτος
Ειδική κατανάλωση καυσίμου	0,393	L/kWh
Ενέργεια εισαχθέντος καυσίμου	7.818.468	kWh/έτος
Μέση ηλεκτρική απόδοση	25,9	%



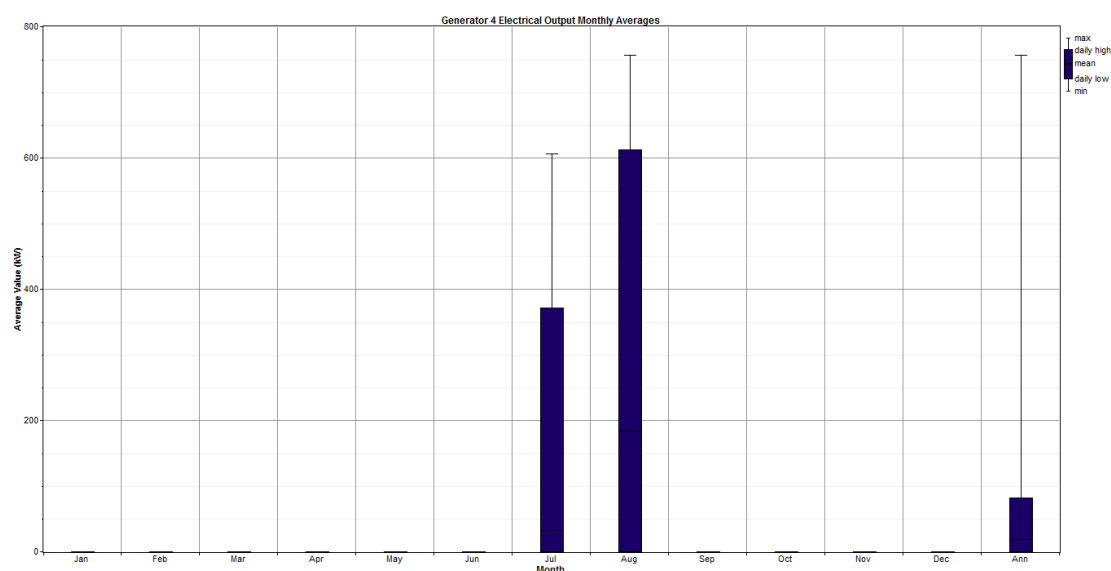
Σχήμα 8.16 Παραγωγή Γεννήτριας 2 κάθε μήνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Γεννήτρια 4

Πίνακας 8-10 Στοιχεία παραγωγής για τη γεννήτρα 4

<b>Ποσότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Ώρες λειτουργίας	264	Ώρες/έτος
Αριθμός εκκινήσεων	69	Εκκινήσεις/έτος
Διάρκεια ζωής	682	Χρόνια
Capacity factor	1,64	%
Σταθερό κόστος γεννήτριας	182	\$/ώρα
Οριακό κόστος γεννήτριας	0,468	\$/kWh
Παραγωγή ηλεκτρισμού	160.768	kWh/έτος
Μέση παραγωγή ηλεκτρισμού	609	kW
Ελάχιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	606	kW
Μέγιστη παραγωγή ηλεκτρισμού	756	kW
Κατανάλωση καυσίμου	63.889	L/έτος
Ειδική κατανάλωση καυσίμου	0,397	L/kWh
Ενέργεια εισαχθέντος καυσίμου	628.666	kWh/έτος
Μέση ηλεκτρική απόδοση	25,6	%



Σχήμα 8.17 Παραγωγή Γεννήτριας 4 κάθε μήνα

Εκπομπές

Πίνακας 8-11 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία του τοπικού σταθμού παραγωγής

<b>Μολυντής</b>	<b>Εκπομπές (kg/έτος)</b>
Διοξείδιο του άνθρακα	8.838.544
Μονοξείδιο του άνθρακα	21.817
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	2.417
Σωματιδιακή ύλη	1.645
Διοξείδιο του θείου	17.749
Οξείδια του αζώτου	194.672

Ανάλυση ευαισθησίας για τις άλλες περιπτώσεις κόστους εκπομπών

- Για κόστος εκπομπών ίσο με \$1/τόνο το κόστος της ενέργειας ανέρχεται σε 0,723 \$/kWh
- Για κόστος εκπομπών ίσο με \$40/τόνο το κόστος της ενέργειας ανέρχεται σε 0,761 \$/kWh

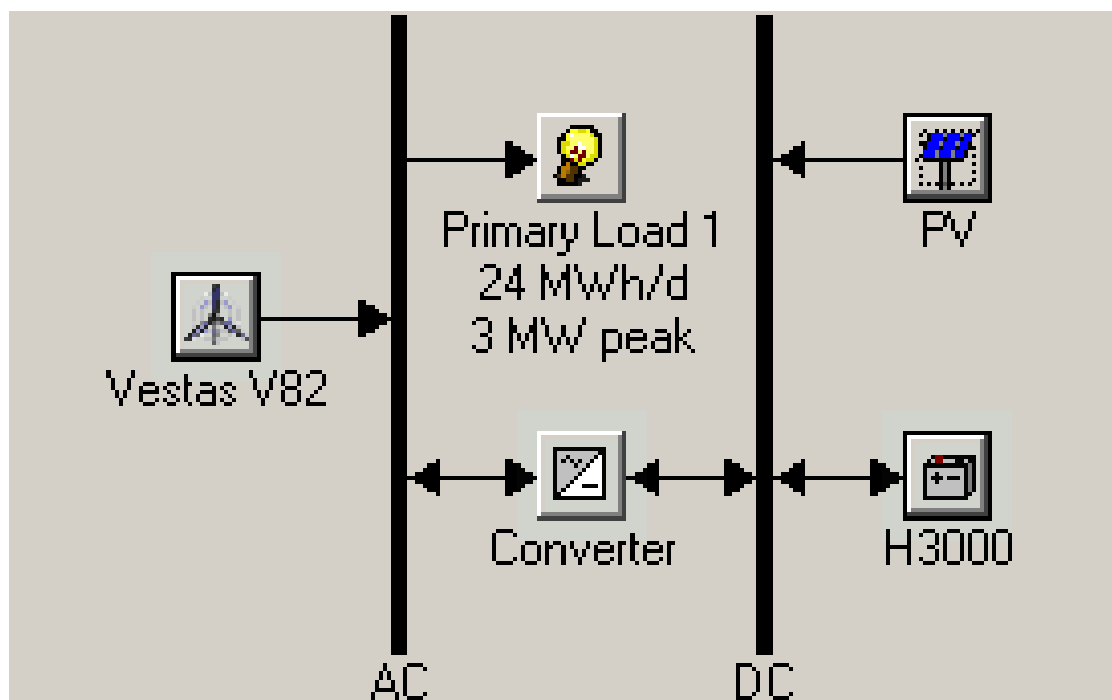
## **8.9 Σενάριο 1 : Αντικατάσταση όλων των πετρελαϊκών μονάδων με μονάδες ΑΠΕ (χωρίς βιομάζα)**

### **8.9.1 Εισαγωγή**

Στο σημείο αυτό θα αντικαταστήσουμε όλες τις μονάδες diesel και θα χρησιμοποιήσουμε μόνο μονάδες ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες) για την ηλεκτροδότηση του νησιού. Έτσι λοιπόν, θεωρούμε ότι είναι δυνατή η εγκατάσταση Α/Γ τύπου Vestas V82 στην περιοχή γύρω από την Αρκεσίνη, όπου το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό. Το κόστος αγοράς και αντικατάστασης της κάθε Α/Γ θεωρείται ίσο με \$1.600.000, ενώ το κόστος Λ&Σ ίσο με \$32000/έτος (2%). Επίσης, θεωρείται δυνατή η εγκατάσταση ΦΒ πάρκου σε κοντινό σημείο με τις ανεμογεννήτριες. Θεωρούμε ότι το κόστος αγοράς και αντικατάστασης για κάθε 100 kW φωτοβολταϊκών είναι ίσο με \$130.000, ενώ το κόστος Λ&Σ ίσο με \$1300 (1%). Επίσης, θεωρούμε ότι το κόστος λιανικής αγοράς και αντικατάστασης των μπαταριών ανέρχεται σε \$2171 η καθεμιά και το κόστος Λ&Σ ανέρχεται σε \$22/έτος. Το κόστος του μετατροπέα θεωρείται ίσο με \$250.000/MW. Για τους υπολογισμούς του κόστους λήφθηκαν υπόψη οι κάτωθι παράγοντες:

- Δεν λαμβάνεται υπόψη η μείωση της αξίας των ΦΒ στο κόστος αντικατάστασης. Με άλλα λόγια, όταν ένα ΦΒ πλαίσιο θα αντικατασταθεί (π.χ. σε 20 χρόνια) το κόστος των ΦΒ τότε θα είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το σημερινό (πολύ κάτω από το μισό). Εμείς αυτό δεν το λαμβάνουμε υπόψη και θεωρούμε ότι και σε 20 χρόνια τα ΦΒ θα έχουν την ίδια τιμή. Αυτό αναγκάζομαστε να το κάνουμε διότι οι εξελίξεις στο χώρο τω ΦΒ είναι τόσο γρήγορες ώστε δεν μπορούμε να κάνουμε προβλέψεις για την τιμή τους μετά από ένα τόσο μεγάλο διάστημα.
- Λαμβάνεται υπόψη η χονδρική τιμή πώλησης των μπαταριών. Εμείς θα χρειασθούμε για το σύστημά μας λίγες χιλιάδες από τις μπαταρίες που αναφέραμε πριν. Με παραγγελία μιας τέτοιας ποσότητας είναι λογικό ότι η τιμή της κάθε μονάδας θα μειωθεί αρκετά (έως 40%). Συνεπώς θεωρούμε ότι οι μπαταρίες αγοράζονται στο 60% της λιανικής τους τιμής.

Επιπλέον, λόγω της ισχύος του φορτίου θεωρούμε ότι ο DC ζυγός δεν μπορεί να έχει τάση λιγότερη από 1000 V, ώστε να αποφευχθούν προβλήματα που σχετίζονται με την αρμονική παραμόρφωση και το φιλτράρισμα των αρμονικών του PWM inverter (βλ. κεφάλαιο 9). Η μοντελοποίηση-διαστασιολόγηση του συστήματος γίνεται με βάση το λογισμικό Homer. Και πάλι αγνοείται η επίδραση του δικτύου διανομής. Το σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

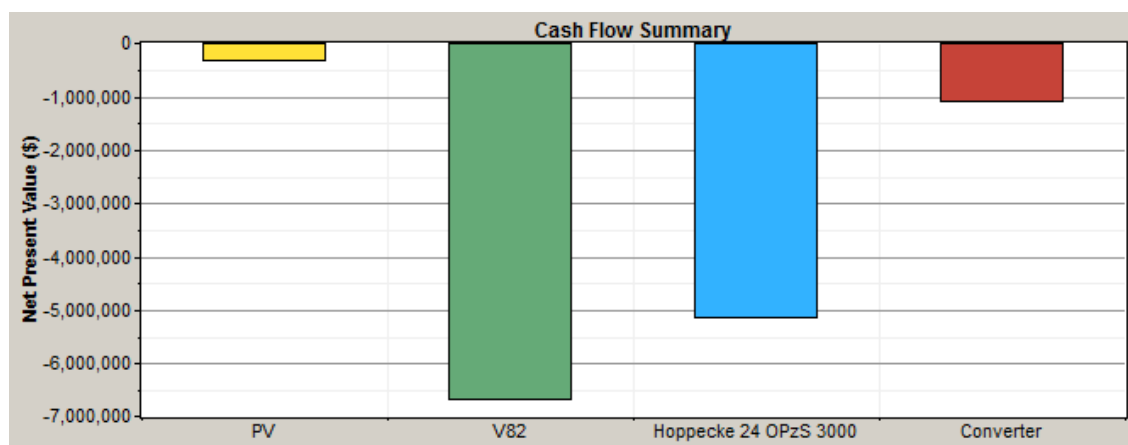


Σχήμα 8.18 Το ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού που λειτουργεί 100% με ΑΠΕ (1)

Όπως προκύπτει από το λογισμικό, η βέλτιστη οικονομική κατάσταση του συστήματος περιλαμβάνει:

- 200 kW φωτοβολταϊκών
- 3 Α/Γ Vestas V82
- 2000 μπαταρίες H3000
- Ένα (ή πολλούς) μετατροπέα 3000 kW

### 8.9.2 Οικονομική ανάλυση



Σχήμα 8.19 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (1)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Πίνακας 8-12 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (1)

<b>Εξάρτημα</b>	<b>Κεφάλαιο (\$)</b>	<b>Αντικατάσταση (\$)</b>	<b>Λ&amp;Σ (\$)</b>	<b>Καύσιμο</b>	<b>Εναπομείνουσα αξία (\$)</b>	<b>Σύνολο (\$)</b>
Φωτοβολταϊκά	-260.000	-81.069	-33.237	0	45.435	-328.871
Ανεμογεννήτριες	-4.800.000	-1.496.664	-1.227.203	0	838.796	-6.685.071
Μπαταρίες	-2.605.200	-2.268.470	-562.468	0	302.299	-5.133.838
Μετατροπέας	-750.000	-312.949	-95.875	0	58.250	-1.100.575
Σύστημα	-8.415.200	-4.159.153	-1.918.783	0	1.244.780	-13.248.357

Συνοπτικά έχουμε:

- Συνολική ΚΠΑ: \$ 13.248.357
- Κόστος ενέργειας: \$ 0.116/kWh
- Λειτουργικό κόστος: \$ 378.082/έτος

### 8.9.3 Ηλεκτρική ανάλυση

#### Γενικά ηλεκτρικά στοιχεία

Πίνακας 8-13 Παραγωγή όλων των ΑΠΕ σε kWh/έτος (1)

<b>Παραγωγή</b>	<b>kWh/έτος</b>	<b>%</b>
Φωτοβολταϊκά	316.356	1
Ανεμογεννήτριες	27.820.148	99
Σύνολο	28.136.504	100

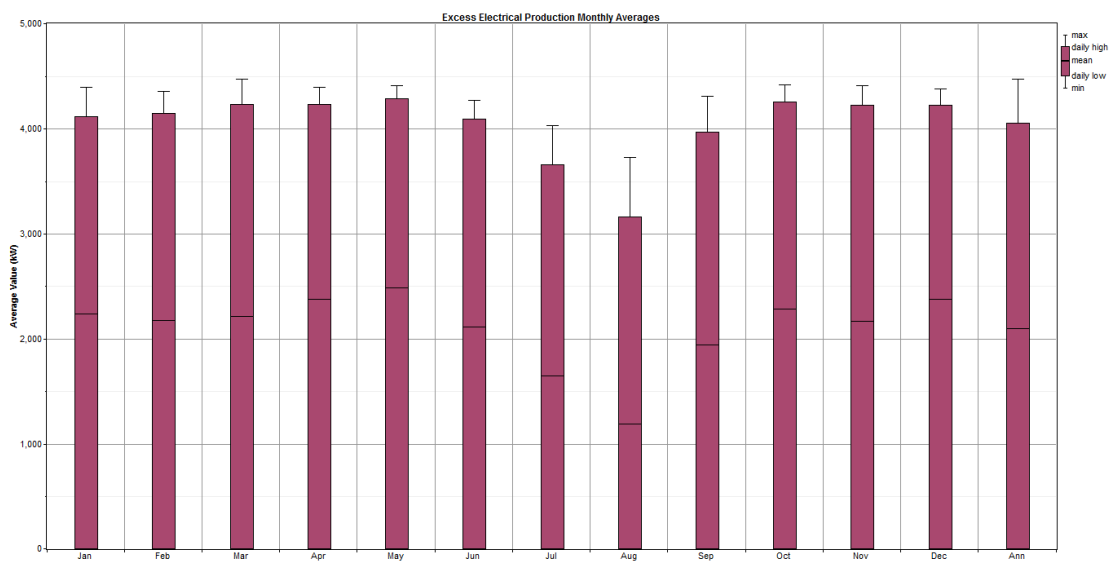
Πίνακας 8-14 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο (1)

<b>Κατανάλωση</b>	<b>kWh/yr</b>	<b>%</b>
Φορτίο	8.896.783	100

Πίνακας 8-15 Περίσσεια ηλεκτρισμού και μη εξυπηρετηθέν φορτίο (1)

<b>Ποσότητα</b>	<b>kWh/έτος</b>	<b>%</b>
Περίσσεια ηλεκτρισμού	18.376.640	65,3
Μη εξυπηρετηθέν ηλεκτρικό φορτίο	3.138	0,0
Έλλειψη ικανότητας	8.338	0,1

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

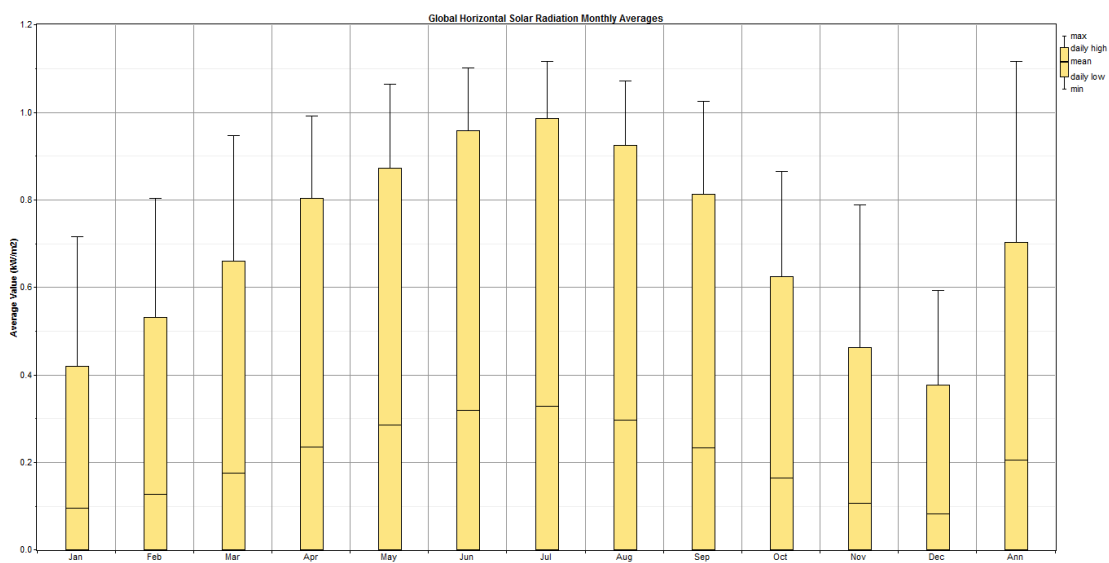


Σχήμα 8.20 Μέσες μηνιαίες τιμές περίσσειας ηλεκτρικής παραγωγής (1)

### Φωτοβολταϊκά

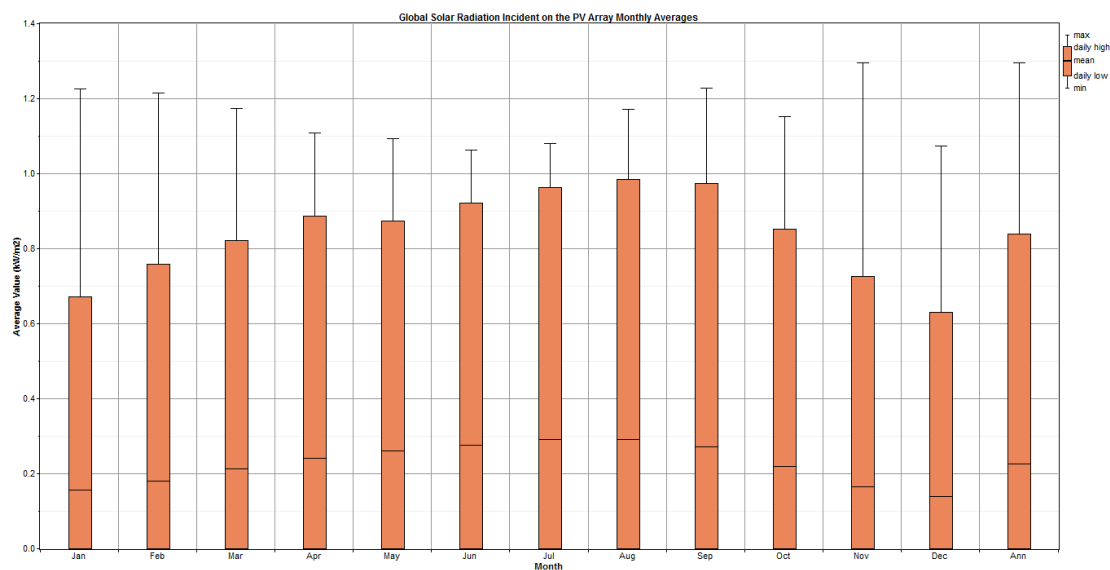
Πίνακας 8-16 Στοιχεία παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά (1)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
Ονομαστική ικανότητα	200	kW
Μέση παραγωγή	36	kW
Μέση παραγωγή	867	kWh/ημέρα
Capacity factor	18,1	%
Συνολική παραγωγή	316.356	kWh/έτος
Ελάχιστη παραγωγή	0	kW
Μέγιστη παραγωγή	207	kW
Διείσδυση ΦΒ	3,55	%
Ώρες λειτουργίας	4.386	ώρες/έτος
LCOE	0,0813	\$/kWh

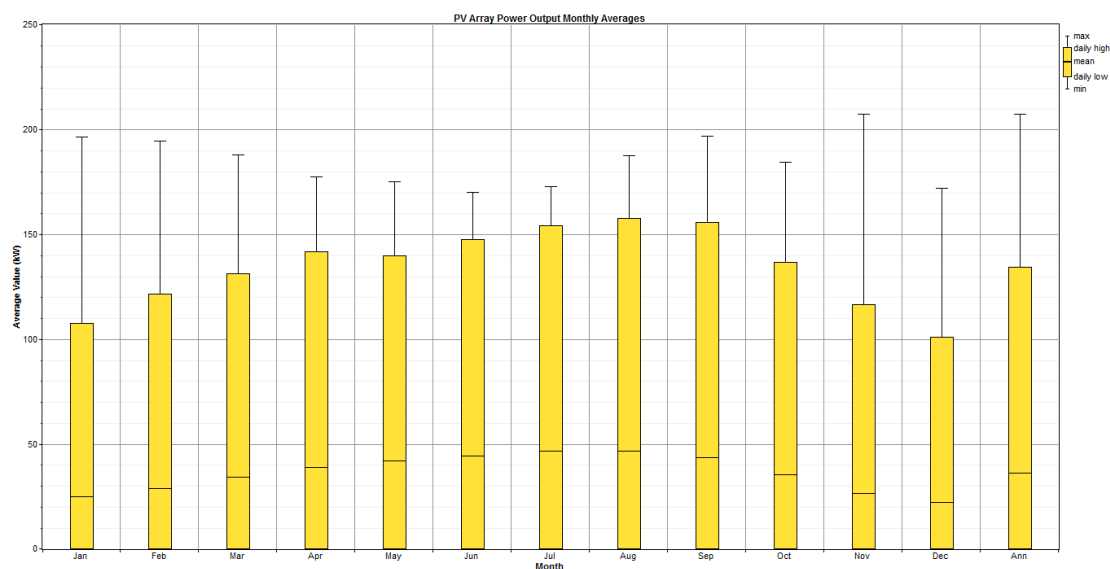


Σχήμα 8.21 Μέσες μηνιαίες τιμές οριζόντιας εξωατμοσφαιρικής ηλιακής ακτινοβολίας (1)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



Σχήμα 8.22 Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα ΦΒ πλαίσια (1)



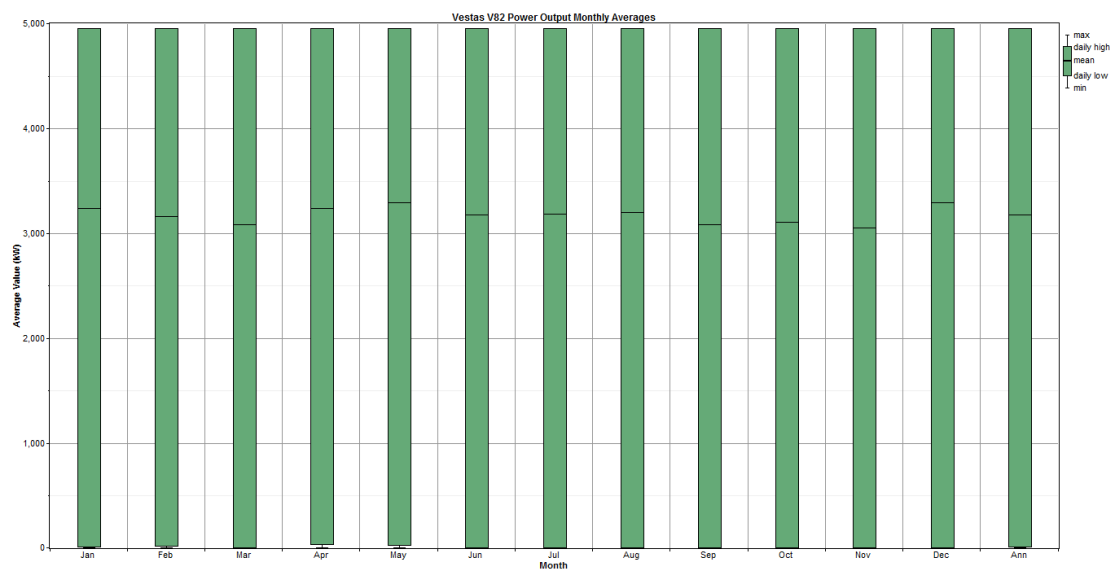
Σχήμα 8.23 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από ΦΒ (1)

**Ανεμογεννήτριες**

Πίνακας 8-17 Στοιχεία παραγωγής για τις ανεμογεννήτριες (1)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
Συνολική ονομαστική ικανότητα	4.950	kW
Μέση παραγωγή	3.176	kW
Capacity factor	64,2	%
Συνολική παραγωγή	27.820.148	kWh/έτος
Ελάχιστη παραγωγή	0	kW
Μέγιστη παραγωγή	4.950	kW
Διείσδυση αιολικών	313	%
Ώρες λειτουργίας	7.747	ώρες/έτος
LCOE	0,0188	\$/kWh

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



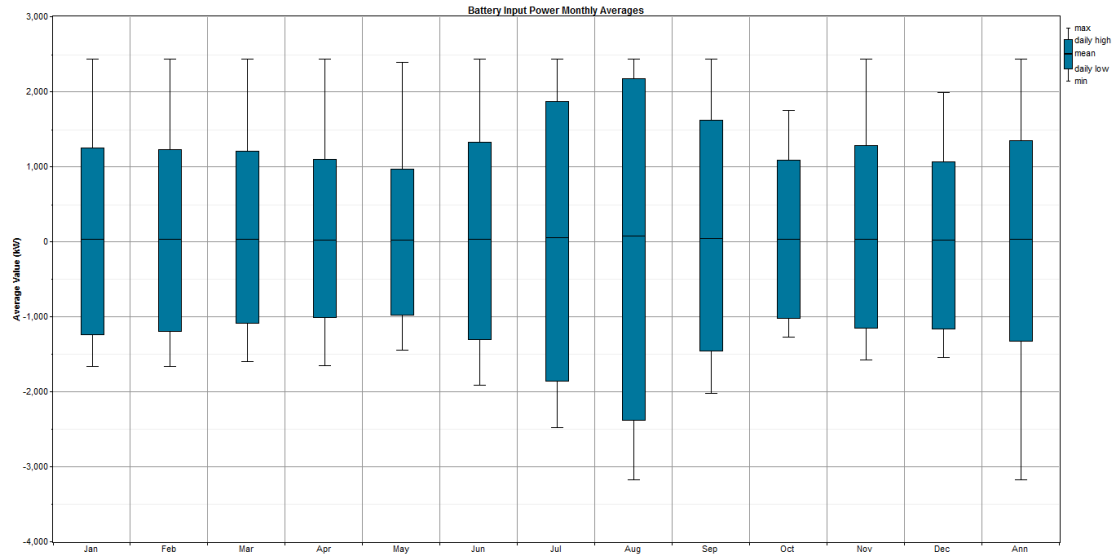
Σχήμα 8.24 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από τις Α/Γ (1)

**Μπαταρίες**

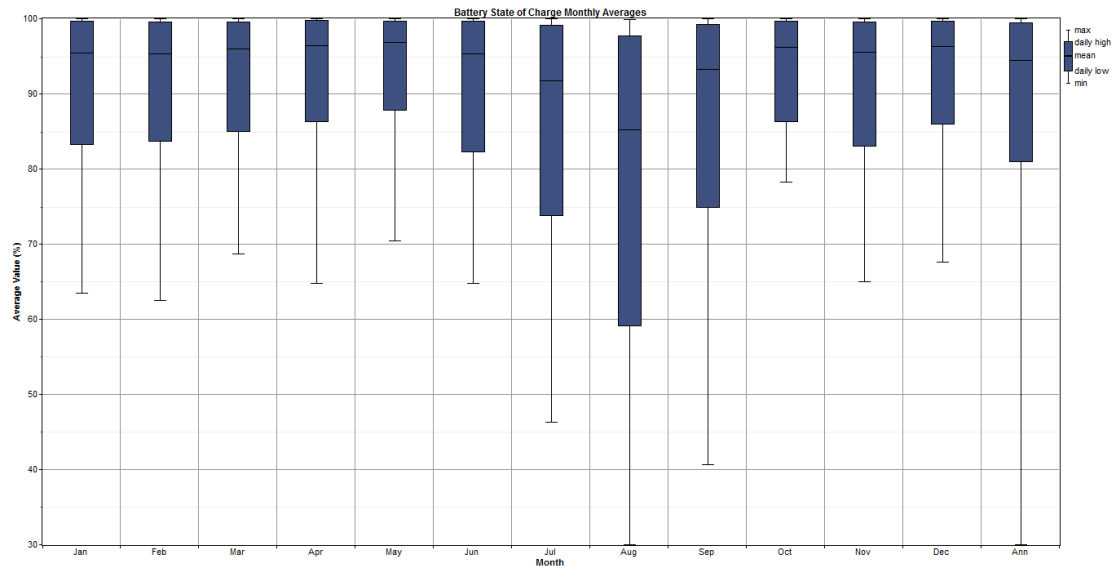
Πίνακας 8-18 Στοιχεία για τις μπαταρίες (1)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
Μέγεθος στοιχειοσειράς	500	
Στοιχειοσειρές εν παραλλήλω	4	
Μπαταρίες	2.000	
Τάση ζυγού	1.000	V
Ονομαστική χωρητικότητα	12.000	kWh
Ωφέλιμη ονομαστική χωρητικότητα	8.400	kWh
Αυτονομία	8,27	ώρες
Μέγιστη διαχειρισθείσα ενέργεια κατά τη διάρκεια ζωής (lifetime throughput)	20.392.000	kWh
Κόστος ενέργειας από μπαταρίες	0,138	\$/kWh
Μέσο κόστος πρωτογενούς ενέργειας	0,000	\$/kWh
Εισαχθείσα ενέργεια	2.200.441	kWh/έτος
Εξαχθείσα ενέργεια	1.892.580	kWh/έτος
Εξάντληση αποθήκευσης	182	kWh/έτος
Απώλειες	307.679	kWh/έτος
Ετήσια διαχειρισθείσα ενέργεια	2.040.819	kWh/έτος
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής	9,99	έτη

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



Σχήμα 8.25 Μέσες μηνιαίες τιμές της ενέργειας που εισήχθη στις μπαταρίες (1)



Σχήμα 8.26 Ποσοστό φόρτισης μπαταριών (State of charge-SOC) (1)

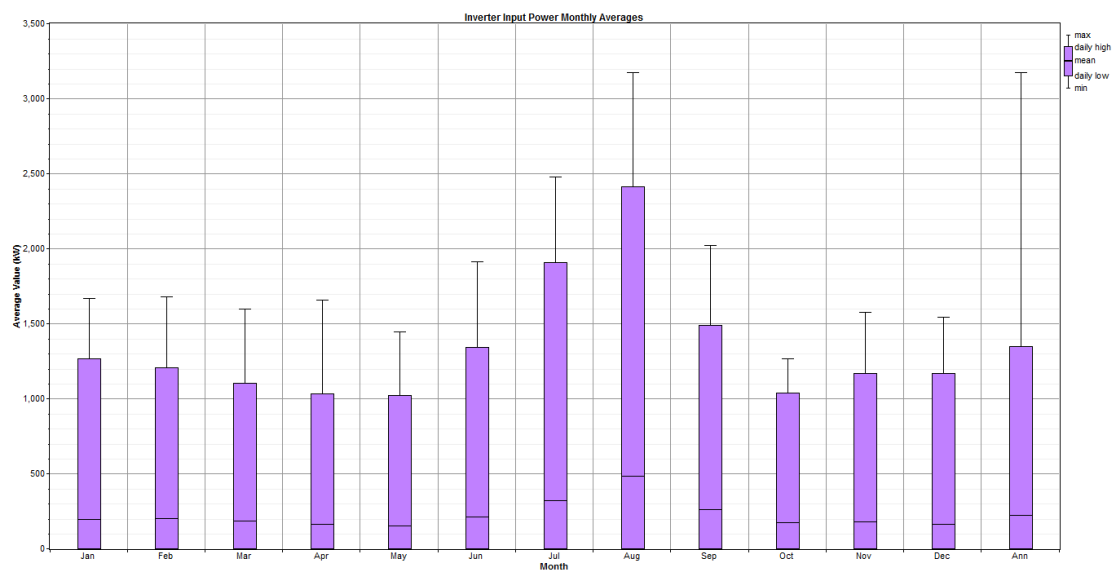
Παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του State Of Charge των μπαταριών εμφανίζεται τον Αύγουστο. Αυτό είναι λογικό επειδή το μήνα αυτό εμφανίζεται η αιχμή της κατανάλωσης, η οποία υπερβαίνει κατά πολύ το φορτίο βάσης.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**

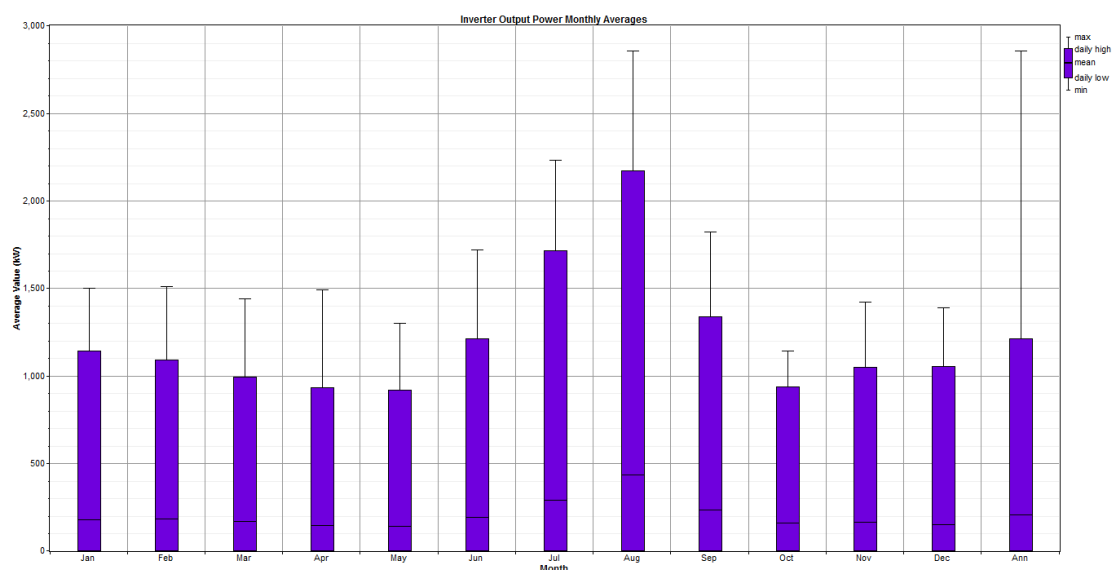
**Μετατροπéας**

Πίνακας 8-19 Στοιχεία για το μετατροπέα (1)

Ποσότητα	Αναστροφéας	Ανορθωτής	Μονάδες
Χωρητικότητα	3.000	3.000	kW
Μέση έξοδος	203	232	kW
Ελάχιστη έξοδος	0	0	kW
Μέγιστη έξοδος	2.855	2.440	kW
Capacity factor	6.8	7,7	%
Ώρες λειτουργίας	2.128	5.542	ώρες/έτος
Εισαχθείσα ενέργεια	1.972.368	2.388.763	kWh/έτος
Εξαχθείσα ενέργεια	1.775.143	2.030.444	kWh/έτος
Απώλειες	197.225	358.319	kWh/έτος
Ώρες λειτουργίας	2.128	5.542	ώρες/έτος

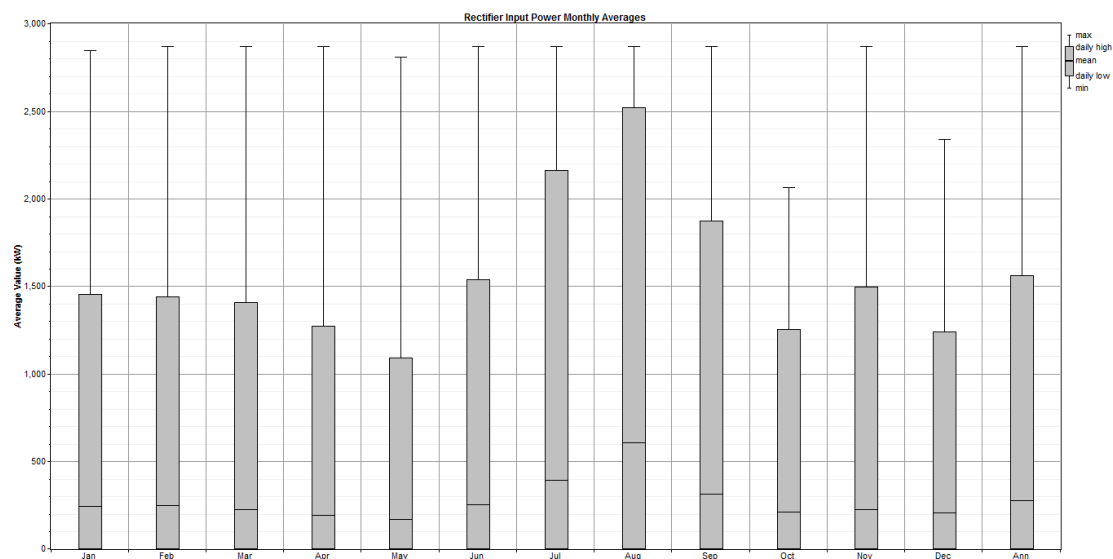


Σχήμα 8.27 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον αναστροφέα (1)

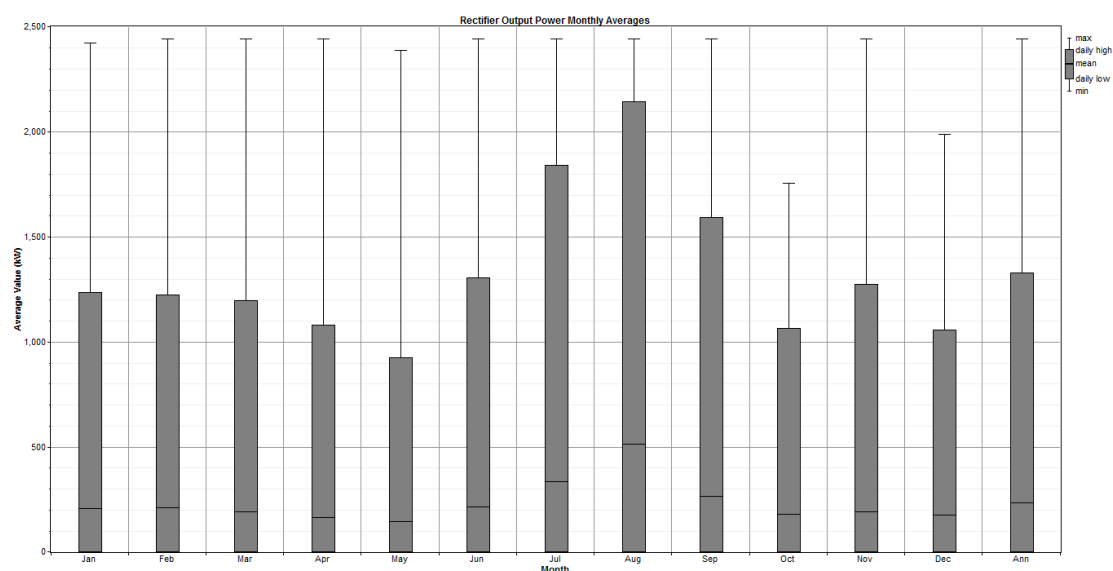


Σχήμα 8.28 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον αναστροφέα (1)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ



Σχήμα 8.29 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον ανορθωτή (1)



Σχήμα 8.30 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον ανορθωτή (1)

### Εκπομπές

Πίνακας 8-20 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία των μονάδων ΑΠΕ (1)

Μολυντής	Εκπομπές (kg/έτος)
Διοξείδιο του άνθρακα	0
Μονοξείδιο του άνθρακα	0
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0
Σωματιδιακή ύλη	0
Διοξείδιο του θείου	0
Οξείδια του αζώτου	0

Η εποχικότητα της ταχύτητας του ανέμου αγνοήθηκε λόγω έλλειψης δεδομένων. Η στατιστική αναπαράσταση των χρονοσειρών του ανέμου έγινε σε

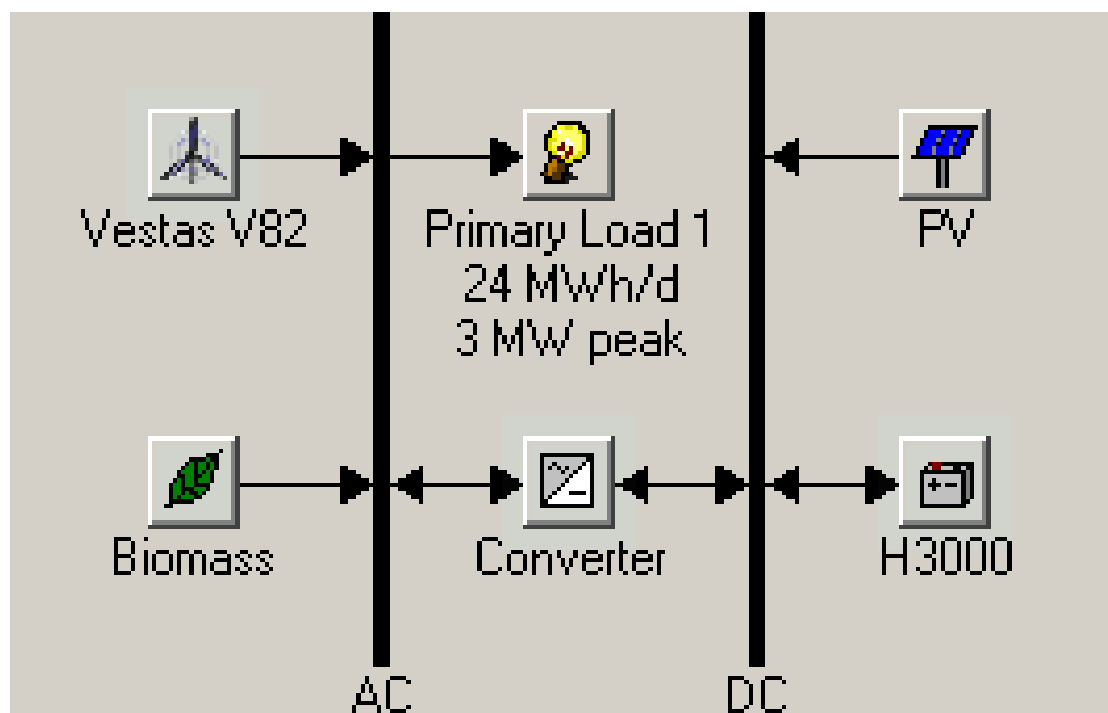
ετήσια και όχι σε μηνιαία βάση, διότι ήταν γνωστή μόνο η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου και όχι οι επιμέρους μηνιαίες μέσες ταχύτητες.

Πρέπει να παρατηρηθεί πως η φόρτιση των μπαταριών φτάνει το τεχνικό της ελάχιστο (30%) κάποιες μέρες του Αυγούστου, όταν η ζήτηση ηλεκτρισμού στο νησί είναι η μέγιστη. Αυτός ο μήνας παρουσιάζει επίσης το μικρότερο μέσο ποσοστό φόρτισης των μπαταριών από όλους τους μήνες.

## **8.10 Σενάριο 2 : Αντικατάσταση όλων των πετρελαϊκών μονάδων με μονάδες ΑΠΕ (με βιομάζα)**

### **8.10.1 Εισαγωγή**

Στην ενότητα αυτή ισχύουν όλα τα εισαγωγικά που γράφτηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Πρέπει όμως να επισημάνουμε πως το θεωρούμενο κόστος μιας εγκατάστασης βιομάζας της τάξης των 100 kW είναι 1100\$/kW. Επιπλέον, το κόστος της βιομάζας θεωρείται ίσο με 30 \$/tn. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της μονάδας βιομάζας αγνοήθηκε λόγω της πολύ μικρής συμμετοχής της στην ηλεκτροπαραγωγή (βλ. παρακάτω).



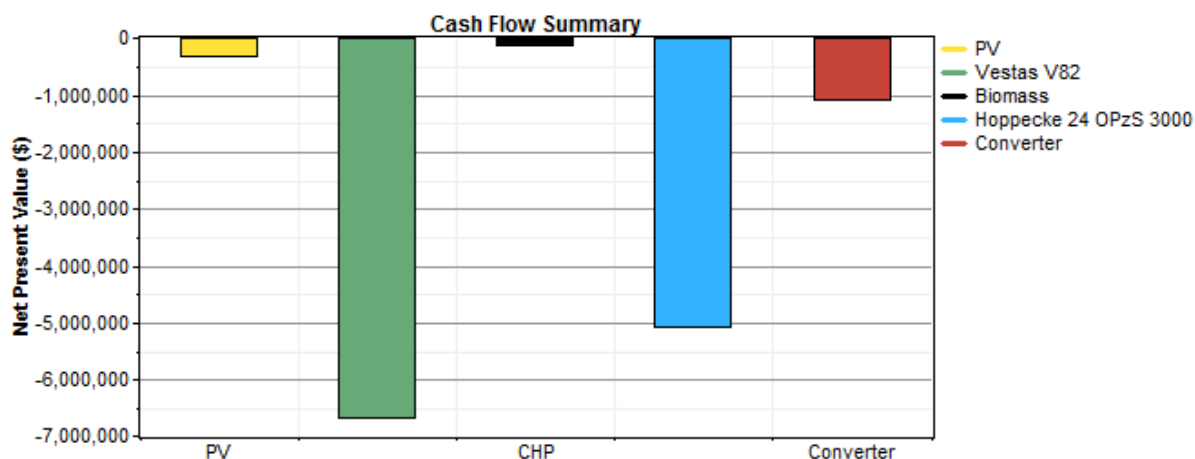
Σχήμα 8.31 Το ηλεκτρικό σύστημα της Αμοργού που λειτουργεί 100% με ΑΠΕ (2)

Όπως προκύπτει από το λογισμικό, η βέλτιστη οικονομική κατάσταση του συστήματος περιλαμβάνει:

- 200 kW φωτοβολταϊκών
- 3 Α/Γ Vestas V82
- 2000 μπαταρίες H3000
- Ένα μετατροπέα 3000 kW
- Μία εγκατάσταση βιομάζας 100 kW



### 8.10.2 Οικονομική ανάλυση



Σχήμα 8.32 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (2)

Πίνακας 8-21 Οικονομικά στοιχεία λειτουργίας συστήματος ΑΠΕ (2)

Εξάρτημα	Κεφάλαιο (\$)	Αντικατάσταση (\$)	Λ&Σ (\$)	Καύσιμο	Εναπομείνουσα αξία (\$)	Σύνολο (\$)
Φωτοβολταϊκά	-260.000	-81.069	-33.237	0	45.435	-328.871
Ανεμογεννήτριες	-4.800.000	-1.496.664	-1.227.203	0	838.796	-6.685.071
Βιομάζα	-110.000	0	0	-27.954	21.903	-116.051
Μπαταρίες	-2.606.000	-2.232.708	-562.468	0	332.910	-5.068.266
Μετατροπέας	-750.000	-312.949	-95.875	0	58.250	-1.100.575
Σύστημα	-8.526.000	-4.123.391	-1.918.783	-27.954	1.297.294	-13.298.834

Συνοπτικά έχουμε:

- Συνολική ΚΠΑ: \$ 13,298,830
- Κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy-LCOE): \$ 0,117/kWh
- Λειτουργικό κόστος: \$ 373,363/έτος

### 8.10.3 Ηλεκτρική ανάλυση

#### Γενικά ηλεκτρικά στοιχεία

Πίνακας 8-22 Παραγωγή όλων των ΑΠΕ σε kWh/έτος (2)

Παραγωγή	kWh/έτος	%
Φωτοβολταϊκά	316.356	1
Ανεμογεννήτριες	27.820.148	99
Βιομάζα	34.775	0
Σύνολο	28.171.278	100

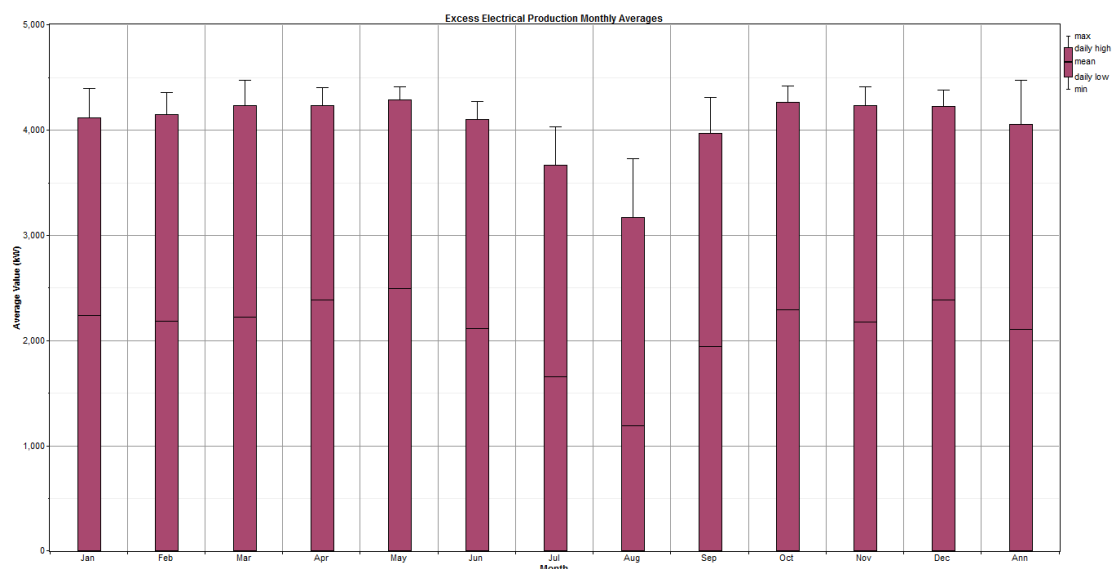
Πίνακας 8-23 Κατανάλωση συστήματος ανά φορτίο (2)

Κατανάλωση	kWh/yr	%
Φορτίο	8.896.808	100

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**

Πίνακας 8-24 Περίσσεια ηλεκτρισμού και μη εξυπηρετηθέν φορτίο (2)

<b>Ποσότητα</b>	<b>kWh/έτος</b>	<b>%</b>
Περίσσεια ηλεκτρισμού	18.428.758	65,4
Μη εξυπηρετηθέν ηλεκτρικό φορτίο	3.113	0,0
Έλλειψη ικανότητας	8.034	0,1



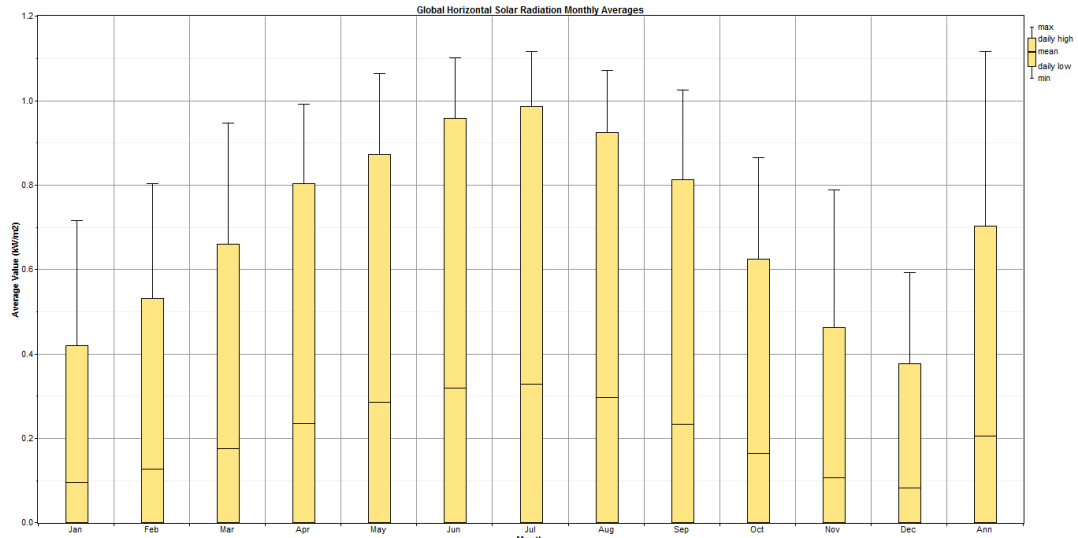
Σχήμα 8.33 Μέσες μηνιαίες τιμές περίσσειας ηλεκτρικής παραγωγής (2)

**Φωτοβολταϊκά**

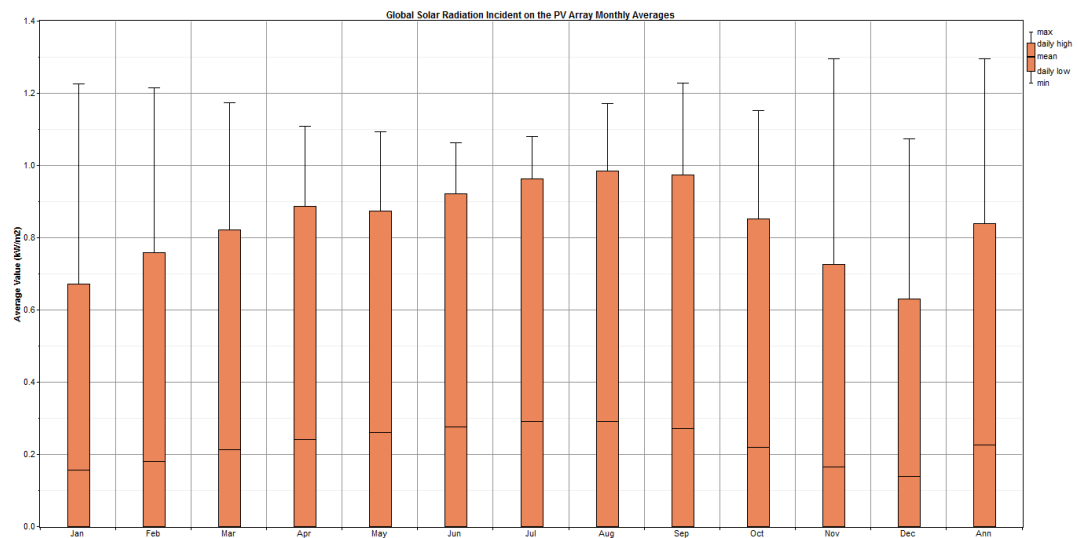
Πίνακας 8-25 Στοιχεία παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά (2)

<b>Ποσότητα</b>	<b>Τιμή</b>	<b>Μονάδες</b>
Ονομαστική ικανότητα	200	kW
Μέση παραγωγή	36	kW
Μέση παραγωγή	867	kWh/ημέρα
Capacity factor	18,1	%
Συνολική παραγωγή	316.356	kWh/έτος
Ελάχιστη παραγωγή	0	kW
Μέγιστη παραγωγή	207	kW
Διείσδυση ΦΒ	3,55	%
Ώρες λειτουργίας	4.386	ώρες/έτος
LCOE	0,0813	\$/kWh

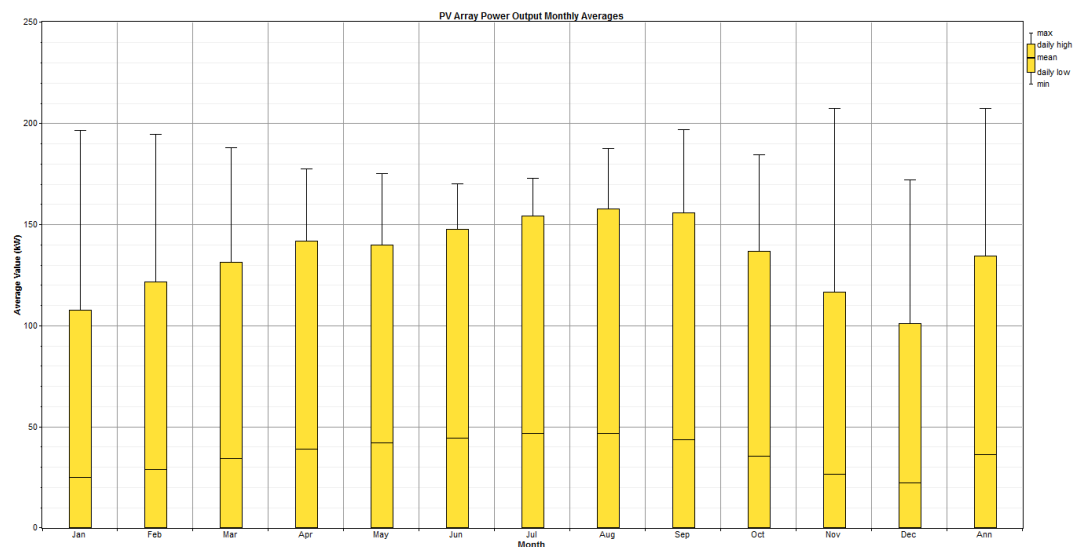
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



Σχήμα 8.34 Μέσες μηνιαίες τιμές οριζόντιας εξωατμοσφαιρικής ηλιακής ακτινοβολίας (2)



Σχήμα 8.35 Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στα ΦΒ πλαίσια (2)



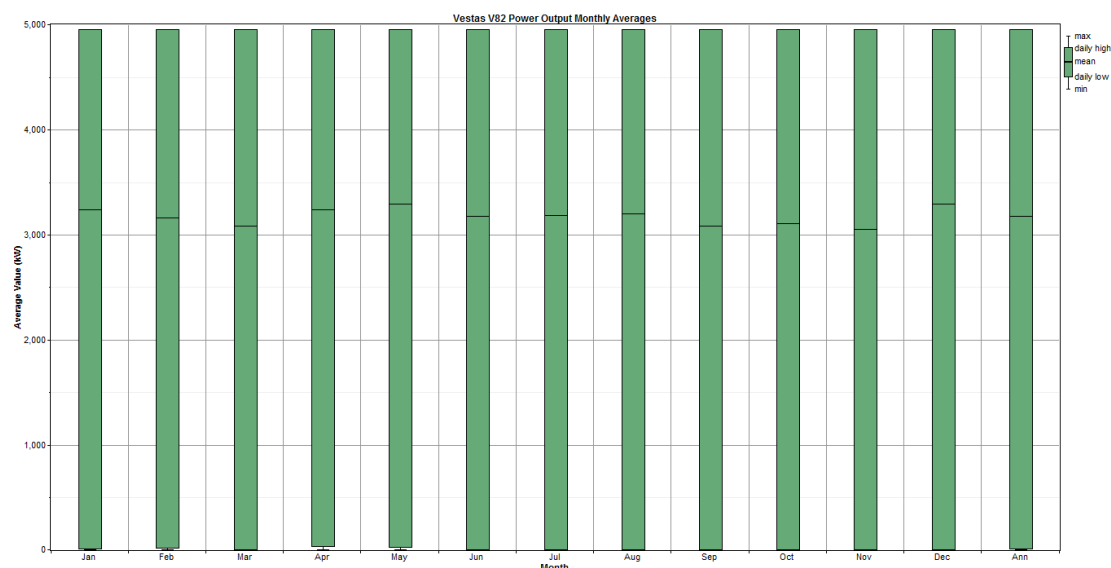
Σχήμα 8.36 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από ΦΒ (2)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

Ανεμογεννήτριες

Πίνακας 8-26 Στοιχεία παραγωγής για τις ανεμογεννήτριες (2)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
Συνολική ονομαστική ικανότητα	4.950	kW
Μέση παραγωγή	3.176	kW
Capacity factor	64,2	%
Συνολική παραγωγή	27.820.148	kWh/έτος
Ελάχιστη παραγωγή	0	kW
Μέγιστη παραγωγή	4.950	kW
Διείσδυση αιολικών	313	%
Ώρες λειτουργίας	7.747	ώρες/έτος
LCOE	0,0188	\$/kWh



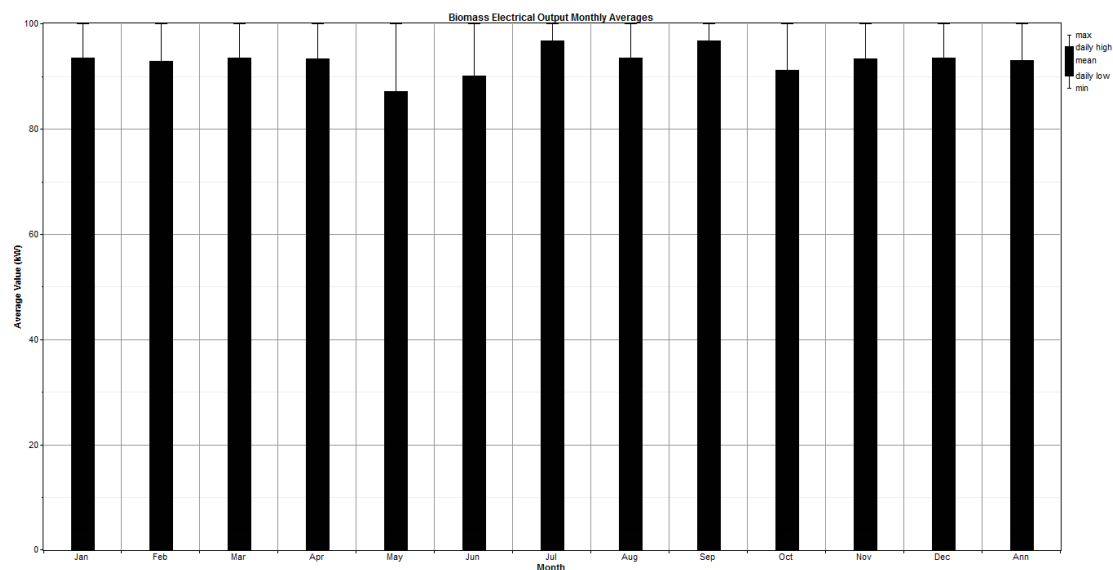
Σχήμα 8.37 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από τις Α/Γ (2)

Βιομάζα

Πίνακας 8-27 Στοιχεία παραγωγής για τις γεννήτριες βιομάζας

Ώρες λειτουργίας	349	ώρες/έτος
Αριθμός εκκινήσεων	349	Εκκινήσεις/έτος
Διάρκεια ζωής	172	έτη
Capacity factor	3,97	%
Σταθερό κόστος παραγωγής	1,94	\$/ώρα
Οριακό κόστος παραγωγής	0,0618	\$/kWh
Ηλεκτρική παραγωγή	34.775	kWh/έτος
Μέση ηλεκτρική έξοδος	99,6	kW
Ελάχιστη ηλεκτρική έξοδος	48,2	kW
Μέγιστη ηλεκτρική έξοδος	100	kW
Κατανάλωση βιομάζας	72,9	Τόνοι/έτος
Ειδική κατανάλωση καυσίμου	1,467	kg/kWh
Ενέργεια εισαχθέντος καυσίμου	77.953	kWh/έτος
Μέση ηλεκτρική απόδοση	44,6	%

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



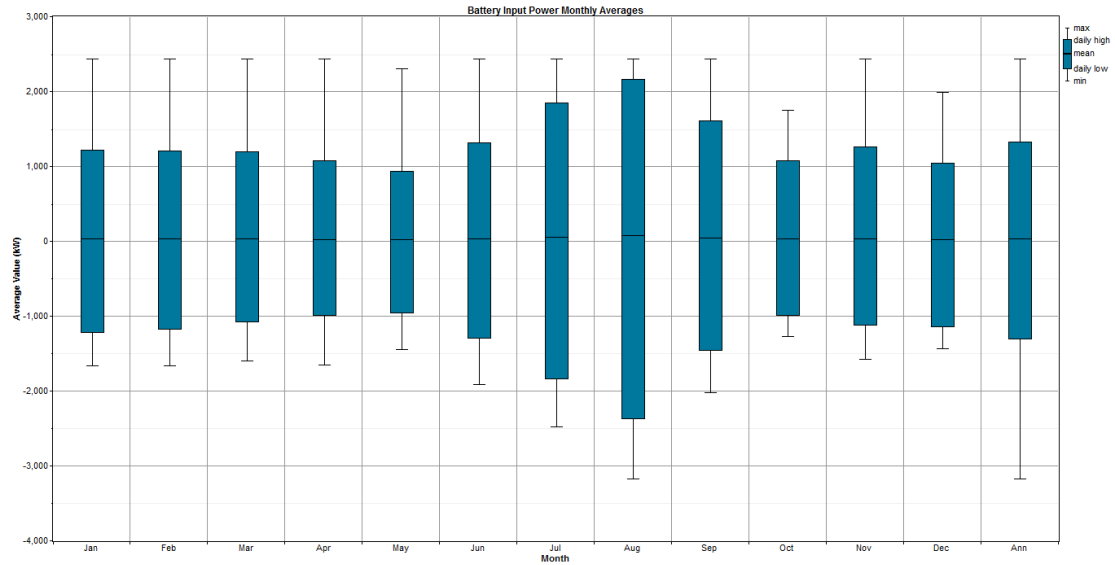
Σχήμα 8.38 Μέσες μηνιαίες τιμές παραγωγής ισχύος από βιομάζα (2)

**Μπαταρίες**

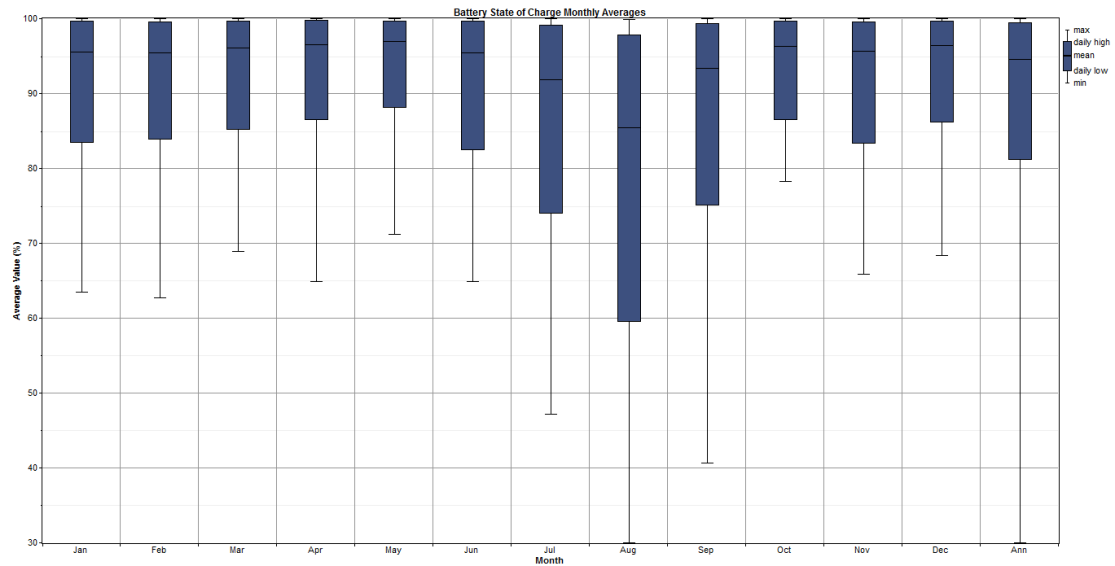
Πίνακας 8-28 Στοιχεία για τις μπαταρίες (2)

Ποσότητα	Τιμή	Μονάδες
Μέγεθος στοιχειοσειράς	500	
Στοιχειοσειρές εν παραλλήλω	4	
Μπαταρίες	2.000	
Τάση ζυγού	1.000	V
Ονομαστική χωρητικότητα	12.000	kWh
Ωφέλιμη ονομαστική χωρητικότητα	8.400	kWh
Αυτονομία	8,27	ώρες
Μέγιστη διαχειρισθείσα ενέργεια κατά τη διάρκεια ζωής (lifetime throughput)	20.392.000	kWh
Κόστος ενέργειας από μπαταρίες	0,138	\$/kWh
Μέσο κόστος πρωτογενούς ενέργειας	0,000	\$/kWh
Εισαχθείσα ενέργεια	2.156.251	kWh/έτος
Εξαχθείσα ενέργεια	1.854.561	kWh/έτος
Εξάντληση αποθήκευσης	169	kWh/έτος
Απώλειες	301.521	kWh/έτος
Ετήσια διαχειρισθείσα ενέργεια	1.999.823	kWh/έτος
Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής	10,2	έτη

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



Σχήμα 8.39 Μέσες μηνιαίες τιμές της ενέργειας που εισήχθη στις μπαταρίες (2)



Σχήμα 8.40 Ποσοστό φόρτισης μπαταριών (State of charge-SOC) (2)

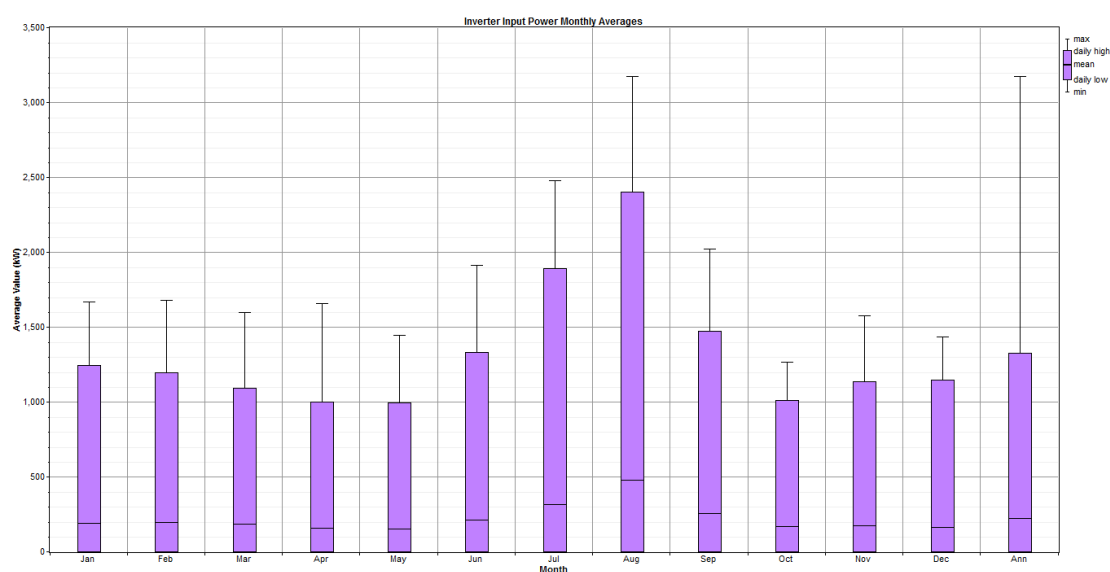
Παρατηρούμε ότι η ελάχιστη τιμή του State Of Charge των μπαταριών εμφανίζεται τον Αύγουστο. Αυτό είναι λογικό επειδή το μήνα αυτό εμφανίζεται η αιχμή της κατανάλωσης, η οποία υπερβαίνει κατά πολύ το φορτίο βάσης.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**

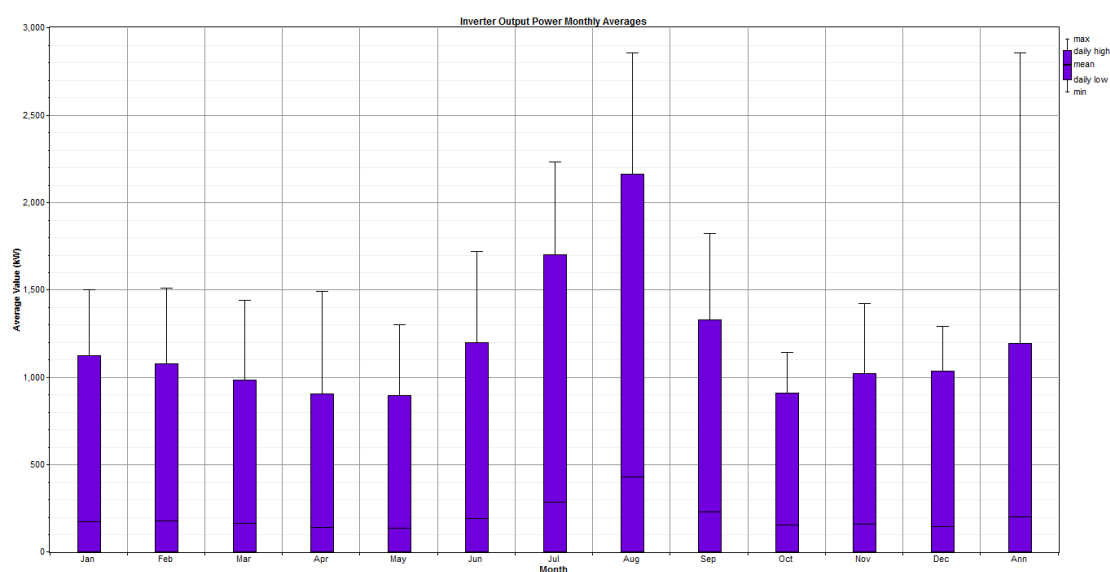
**Μετατροπείς**

Πίνακας 8-29 Στοιχεία για το μετατροπέα (2)

Ποσότητα	Αναστροφέας	Ανορθωτής	Μονάδες
Χωρητικότητα	3.000	3.000	kW
Μέση έξοδος	199	227	kW
Ελάχιστη έξοδος	0	0	kW
Μέγιστη έξοδος	2.855	2.440	kW
Capacity factor	6,6	7,6	%
Ώρες λειτουργίας	2.116	5.519	ώρες/έτος
Εισαχθείσα ενέργεια	1.934.268	2.339.367	kWh/έτος
Εξαχθείσα ενέργεια	1.740.853	1.988.459	kWh/έτος
Απώλειες	193.415	350.908	kWh/έτος
Ώρες λειτουργίας	2.116	5.519	ώρες/έτος

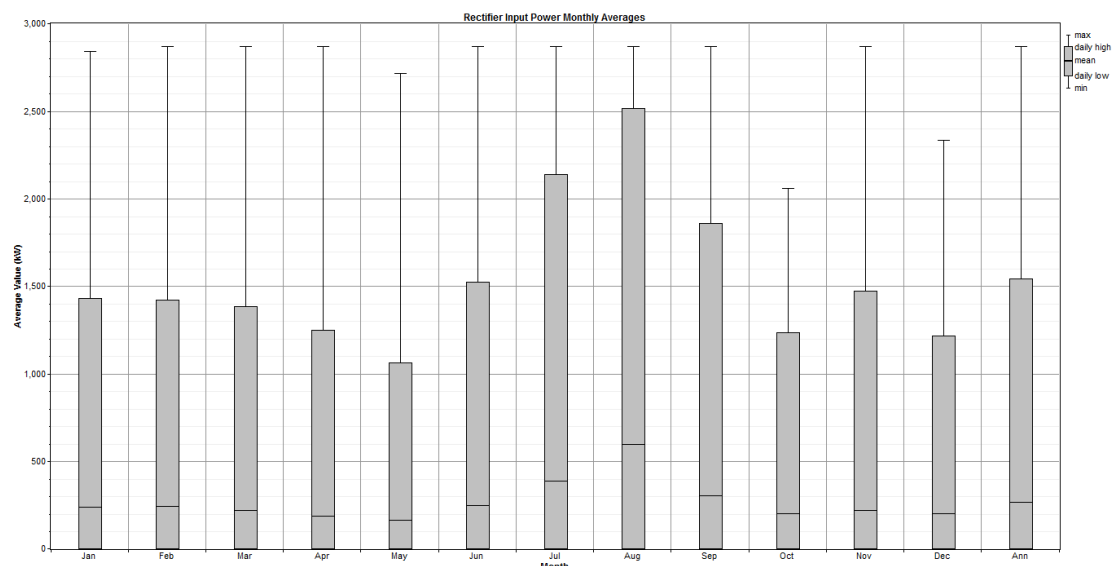


Σχήμα 8.41 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον αναστροφέα (2)

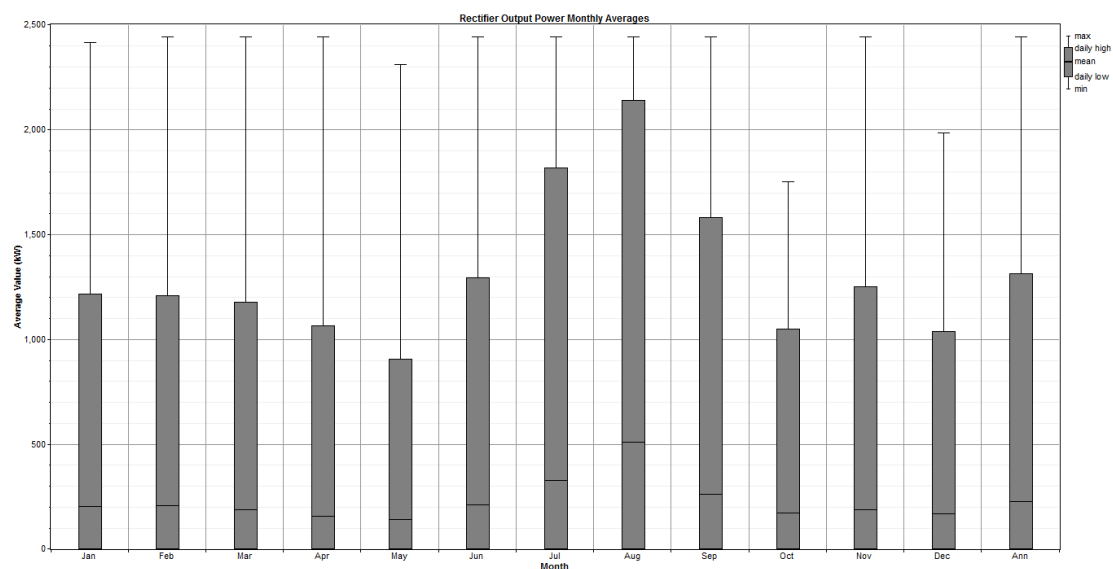


Σχήμα 8.42 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον αναστροφέα (2)

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ**



Σχήμα 8.43 Μέσες μηνιαίες τιμές εισαχθείσας ισχύος στον ανορθωτή (2)



Σχήμα 8.44 Μέσες μηνιαίες τιμές εξαχθείσας ισχύος από τον ανορθωτή (2)

**Εκπομπές**

Πίνακας 8-30 Στοιχεία εκπομπών από τη λειτουργία των μονάδων ΑΠΕ (2)

<b>Μολυντής</b>	<b>Εκπομπές (kg/έτος)</b>
Διοξείδιο του άνθρακα	12,6
Μονοξείδιο του άνθρακα	0,474
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες	0,0525
Σωματιδιακή ύλη	0,0357
Διοξείδιο του θείου	0
Οξείδια του αζώτου	4,23



Ανάλυση ευαισθησίας

Πραγματοποιώντας ανάλυση ευαισθησίας στη μεταβλητή της τιμής της βιομάζας, διαπιστώνουμε ότι:

- Για τιμή βιομάζας ίση με \$20/tn η τιμή της ενέργειας παραμένει ίση με \$0,117/kWh
- Για τιμή βιομάζας ίση με \$40/tn η τιμή της ενέργειας παραμένει ίση με \$0,117/kWh

Συνεπώς η τιμή της διαθέσιμης βιομάζας δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην τιμή της παραγόμενης ενέργειας. Αυτό εξηγείται εύκολα διότι η ενέργεια που παράγεται από τη βιομάζα είναι κάτω από το 1% της συνολικής ενέργειας.

Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση, όπου συμμετέχει και η βιομάζα στην ηλεκτροπαραγωγή, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τιμή της kWh είναι ελαφρά αυξημένη (κατά 0,001 \$/kWh). Όμως, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η δυνατότητα χρήσης Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) για τη θέρμανση των γειτονικών σπιτιών, μειώνοντας τα κόστη θέρμανσης. Η μονάδα ΣΗΘ δεν μοντελοποιήθηκε λόγω παντελούς έλλειψης στοιχείων σχετικά με το θερμικό φορτίο της Αμοργού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Προκαταρκτική και ενεργειακή μελέτη αντικατάστασης των πετρελαϊκών μονάδων της Αμοργού με μονάδες ΑΠΕ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

# ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ-ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΘΑ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΗΣΕΙ ΠΛΗΡΩΣ ΤΙΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΤΗΣ ΑΜΟΡΓΟΥ

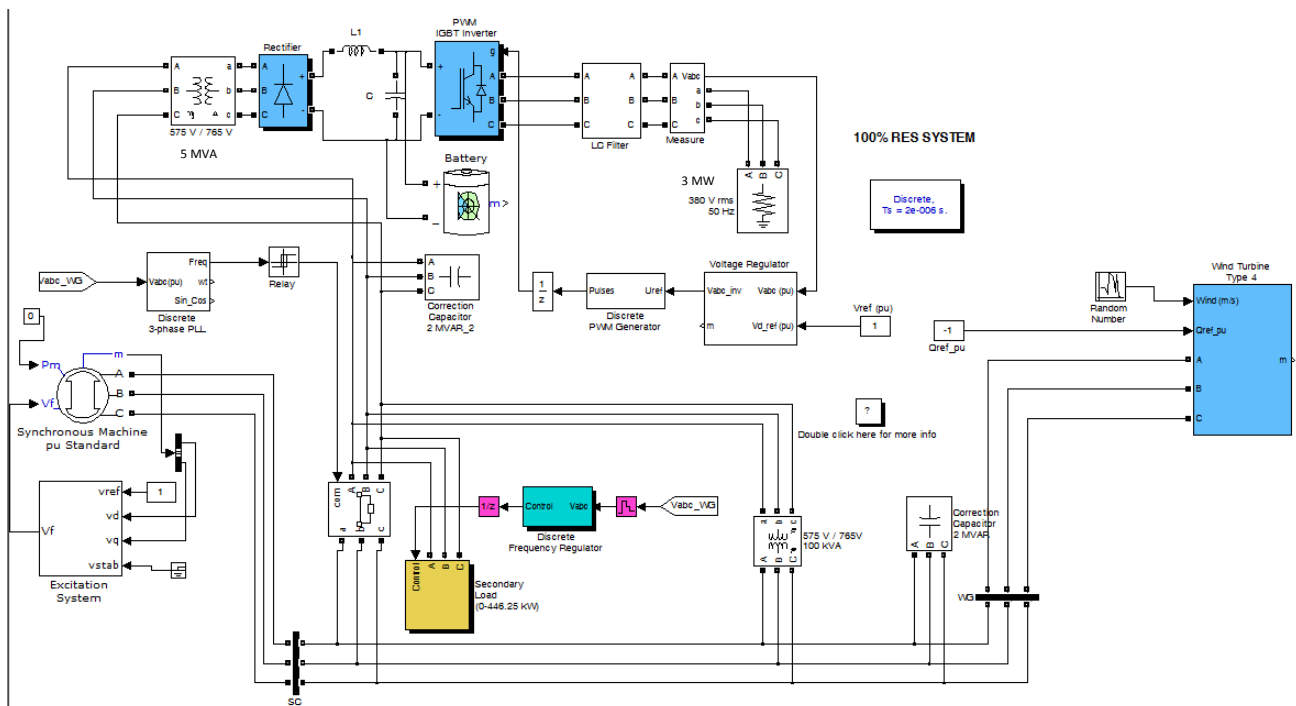
### 9.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανάμεσα σε άλλες περιπτώσεις, είδαμε και την περίπτωση της λειτουργίας του δικτύου της Αμοργού μόνο με ΑΠΕ. Είδαμε αναλυτικά το κόστος της περίπτωσης αυτής, τη διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος και τη συνεισφορά της κάθε πηγής ΑΠΕ στο τελικό αποτέλεσμα. Όμως, στο σημείο αυτό εγείρονται διάφορα ζητήματα για το κατά πόσο ένα τέτοιο σύστημα είναι εφικτό σήμερα. Μερικές από τις ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν είναι:

- Είναι η ποιότητα της τάσης στο φορτίο ικανοποιητική για τη λειτουργία του;
- Ποιος κάνει ρύθμιση τάσης και συχνότητας σε όλη τη διάρκεια του έτους (π.χ. ακόμη και όταν δεν υπάρχει αέρας);

Στην παρούσα εργασία αναπτύξαμε μία ιδέα για το πώς θα μπορούσε να υλοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα. Η προσομοίωση του συστήματος έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink.

Το υλοποιηθέν σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 9.1 Υλοποίηση σε Matlab/Simulink του συστήματος της Αμοργού που λειτουργεί μόνο με ανεμογεννήτριες

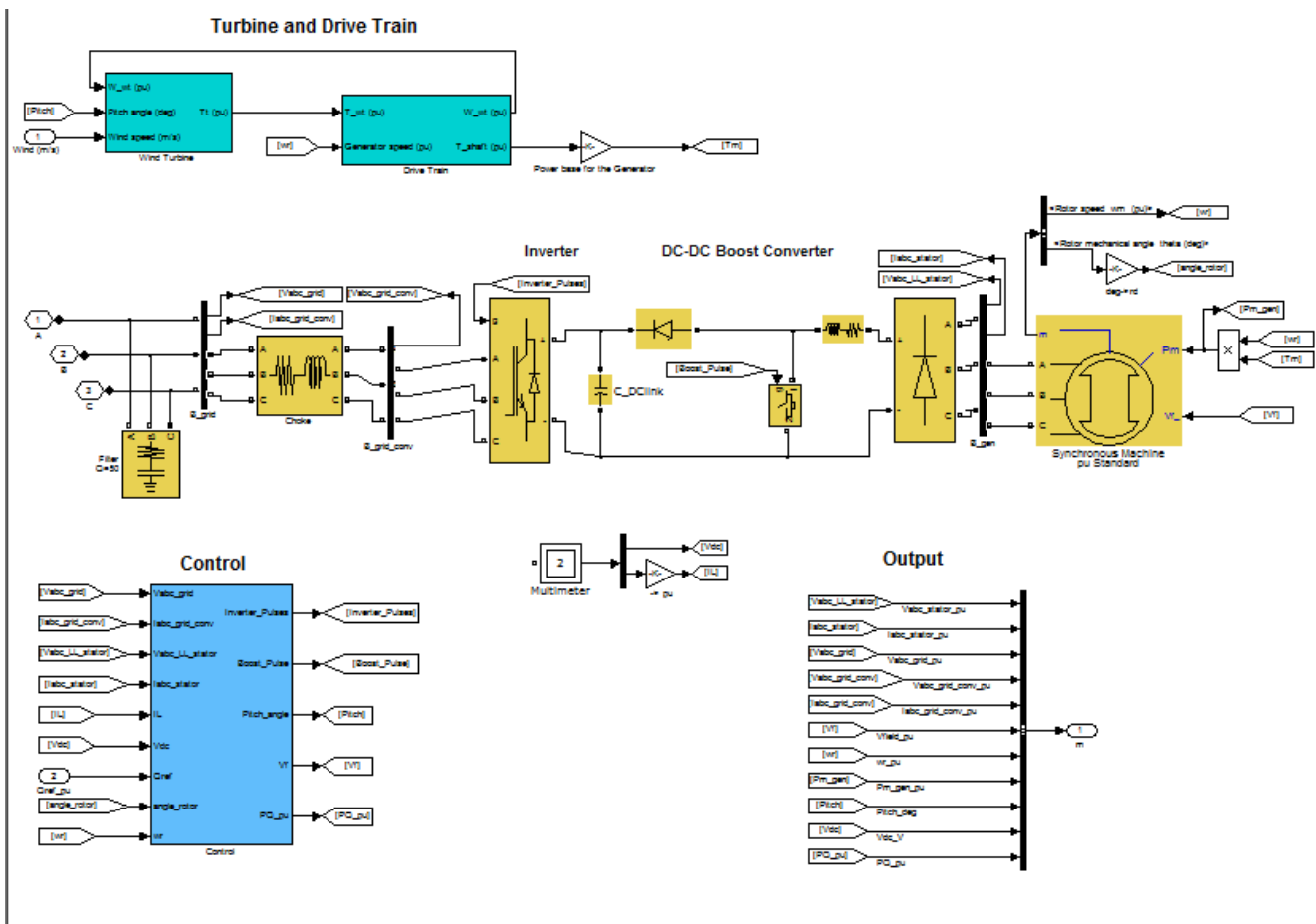
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο για τα πλαίσια του λογισμικού Matlab/Simulink. Αποτέλεσμα αυτού είναι το λογισμικό να τρέχει πάρα πολύ αργά. Συνεπώς δεν μας επιτρέπεται να κάνουμε προσομοιώσεις άνω των τριάντα δευτερολέπτων για το σύστημα αυτό, χρησιμοποιώντας έναν απλό οικιακό υπολογιστή. Επιλέξαμε στην προσομοίωση να μην τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια αλλά να δημιουργήσουμε ένα σύστημα που αποτελείται μόνο από ανεμογεννήτριες. Ο λόγος είναι ότι η προσθήκη και των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα επιβαρύνει ακόμη περισσότερο το ήδη υπερφορτωμένο μοντέλο, ενώ τα ΦΒ, όπως φαίνεται και από το λογισμικό Homer δεν υπερβαίνουν σε ισχύ τα 200 kW (συμμετέχουν ελάχιστα στην κάλυψη του φορτίου, επιβαρύνοντας δυσανάλογα την προσομοίωση).

## 9.2 Τμήματα του μοντέλου

Το μοντέλο αποτελείται από:

- Ένα αιολικό πάρκο τριών ανεμογεννητριών από 1650 kW η καθεμιά (Vestas V82). Κάθε Α/Γ είναι εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια.



Σχήμα 9.2 Η δομή της ανεμογεννήτριας στο Matlab/Simulink

Η Α/Γ αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια, ακολουθούμενη από έναν ανορθωτή πλήρους γέφυρας (μη ελεγχόμενο), από ένα DC-DC μετατροπέα και τέλος από έναν αναστροφέα PWM. Με άλλα λόγια, πρόκειται για μία Α/Γ με σύγχρονη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

γεννήτρια και πλήρη μετατροπέα 4 τεταρτημορίων. Επίσης, στη διάταξη περιλαμβάνονται και τα υπόλοιπα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία (π.χ. φίλτρα, γεννήτρια παλμών PWM κλπ). Ο τρόπος λειτουργίας των στοιχείων έχει εξηγηθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

- Ένα σύγχρονο πυκνωτή

Ο σύγχρονος πυκνωτής είναι μία γεννήτρια των 10 MW με μηδενική ισχύ εισόδου. Ο ρόλος του είναι να ρυθμίζει την τάση στο δίκτυο παραγωγής, καθώς και να δίνει την απαραίτητη άεργο ισχύ για να λειτουργεί το σύστημα. Η λειτουργία του ελέγχεται από το ειδικά διαμορφωμένο σύστημα διέγερσης (excitation system) όπως φαίνεται στο σχήμα 9.1. Ως σύγχρονους πυκνωτές μπορούμε να λειτουργήσουμε τις γεννήτριες diesel που υπάρχουν στο νησί, με μηδενική ισχύ εισόδου. Έτσι θα φτιάξουμε έναν σύγχρονο πυκνωτή 5 MW περίπου. Τα υπόλοιπα 5 MW μπορούν να βρεθούν σχεδόν χωρίς κόστος από γεννήτριες diesel άλλων νησιών οι οποίες αποξηλώθηκαν λόγω της σύνδεσης των νησιών αυτών με το διασυνδεδεμένο δίκτυο της χώρας.

- Ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή πλήρους γέφυρας, πριν από τον οποίο προηγείται κατάλληλος μετασχηματιστής

Ο ανορθωτής μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές για την τροφοδότηση του αναστροφέα και την φόρτιση της μπαταρίας. Ο μετασχηματιστής έχει τον κατάλληλο λόγο μετασχηματισμού ώστε να προκαλούνται οι λιγότερες διαταραχές στη συχνότητα του συστήματος παραγωγής και να φορτίζεται ικανοποιητικά η μπαταρία.

- Έναν PWM αναστροφέα, ο οποίος ακολουθούμενος από κατάλληλα φίλτρα τροφοδοτεί το φορτίο

Ο αναστροφέας είναι αυτός που αναλαμβάνει την κάλυψη του φορτίου. Η λογική PWM του δίνει τις εξής δυνατότητες:

- Να καλύπτει οποιοδήποτε ισχύ φορτίου στο νησί (μέσα στα όρια της ισχύος που αναμένεται να εμφανισθεί στο νησί) μεταβάλλοντας κατάλληλα το συντελεστή διαμόρφωσης.
- Να «απορροφά» τις μικρές μεταβολές του μέτρου της τάσης της μπαταρίας λόγω της αλλαγής του State of charge πάλι ρυθμίζοντας κατάλληλα τον συντελεστή διαμόρφωσης.

- Ένα σύνολο 2000 μπαταριών (η οποία μοντελοποιείται από μία ισοδύναμη μπαταρία) που παρεμβάλλεται μεταξύ ανορθωτή και αναστροφέα.

Η ισοδύναμη μπαταρία μοντελοποιεί μία συστοιχία 2000 μπαταριών τύπου Horpecke 24OPzS 3000 ονομαστικής τάσης 2V και χωρητικότητας 3000 Ah η καθεμιά. Οι μπαταρίες αυτές είναι οργανωμένες σε συστοιχίες των 500 μπαταριών, οπότε ο ζυγός που σχηματίζεται έχει τάση 1000 V dc. Συνεπώς και η τάση της ισοδύναμης μπαταρίας ρυθμίζεται στα 1000 V. Η ισοδύναμη μπαταρία θα έχει χωρητικότητα  $2000 \cdot 3000 = 6000000$  Ah.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

- Δύο πυκνωτές εξομάλυνσης

Οι πυκνωτές εξομάλυνσης έχουν διπλό ρόλο: Εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις της ισχύος της ανεμογεννήτριας και μειώνουν την επίδραση των μεταβατικών φαινομένων κατά τις συχνές ζεύξεις-αποζεύξεις το διακόπτη ισχύος.

- Ένα διακόπτη απόζευξης του συστήματος ηλεκτρονικά ισχύος-μπαταρία-φορτίο, για τον έλεγχο του κάτω ορίου της συχνότητας

Όταν η παραγωγή είναι αρκετά μικρή και δεν είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες του συστήματος μπαταρία-φορτίο, πέφτει η συχνότητα του συστήματος παραγωγής. Για να αποτραπεί η κατάρρευση συχνότητας, μόλις η συχνότητα πέσει κάτω από τα 58 Hz, ένας ειδικά διαμορφωμένος ηλεκτρονόμος (ρελέ) κάνει απόζευξη, κόβοντας στα δύο το κύκλωμα.

- Ένα δευτερεύον φορτίο απόρριψης ελεγχόμενο από PI ελεγκτή.

Το δευτερεύον φορτίο ελέγχεται μέσω ενός ελεγκτή PI, και έχει ενσωματωμένα 256 φορτία των 20 kW. Όταν η συχνότητα στο σύστημα παραγωγής υπερβεί τα 60 Hz, διότι παράγεται τέτοια ενέργεια ώστε το σύστημα μπαταρία-φορτίο δεν μπορεί να την απορροφήσει, το δευτερεύον φορτίο ενεργοποιεί διαδοχικά κατάλληλο αριθμό από φορτία, απορρίπτοντας την πλεονάζουσα ισχύ και διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα στα 60 Hz. Με άλλα λόγια το δευτερεύον φορτίο είναι ο σταθεροποιητής του άνω ορίου της συχνότητας.

- Έναν δευτερεύοντα μικρό μετασχηματιστή ο οποίος συνδέει μόνιμα το σύστημα παραγωγής με το σύστημα κατανάλωσης με ισχύ ίση με 100 kW.

Ο ρόλος του μετασχηματιστή αυτού είναι να μειώνει τα μεταβατικά φαινόμενα κατά τις συχνές ζεύξεις-αποζεύξης του διακόπτη ισχύος. Πράγματι έχει βρεθεί πειραματικά ότι η ισχύς αυτή είναι η πιο κατάλληλη ώστε να καταστούν τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα βιώσιμα, χωρίς να επιβαρύνεται το σύστημα παραγωγής με μεγάλη ισχύ όταν δεν υπάρχει καθόλου παραγωγή.

- Το φορτίο

την προσομοίωση αυτή έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε το φορτίο αιχμής του νησιού (3 MW) και προσπαθήσαμε να λειτουργεί ο συντελεστής διαμόρφωσης γύρω από το 0,8 για το φορτίο αυτό. Έτσι, το σύστημα μπορεί άνετα να καλύψει το φορτίο αιχμής και αφήνεται και κάποιο περιθώριο για παραπάνω φορτίο σε περίπτωση που χρειασθεί μελλοντικά.

- Έναν αντλησιοταμιευτήρα (δεν μοντελοποιείται)

Ο αντλησιοταμιευτήρας δεν μοντελοποιήθηκε, με σκοπό να μειωθεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου και να γίνει εφικτή η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε λογικό χρόνο. Ο σκοπός του αντλησιοταμιευτήρα είναι να κρατά τη συχνότητα σταθερή όταν το σύστημα παραγωγής και το σύστημα κατανάλωσης είναι αποσυσζευγμένα και δεν υπάρχει καθόλου παραγωγή ισχύος από το σύστημα παραγωγής. Με άλλα λόγια, ο αντλησιοταμιευτήρας πρέπει να μπορεί να καλύψει τα 100 kW της ισχύος του δευτερεύοντος μικρού μετασχηματιστή και τις ωμικές απώλειες του συστήματος παραγωγής. Ο αντλησιοταμιευτήρας αντλεί νερό όταν υπάρχει πλεονάζουσα ισχύς στο σύστημα παραγωγής. Δηλαδή ένα μέρος της ισχύος

που κατευθύνεται προς το φορτίο απόρριψης δεν απορρίπτεται και χρησιμοποιείται για άντληση νερού.

### **9.3 Λειτουργία του συστήματος**

Στο σημείο αυτό, ας δούμε την όλη λογική λειτουργίας του συστήματος. Στην ουσία, το όλο σύστημα αποτελείται από δύο υποσυστήματα: το «σύστημα παραγωγής» και το «σύστημα κατανάλωσης» που συνδέονται μεταξύ τους με το διακόπτη ισχύος και ένα δευτερεύοντα μικρό μετασχηματιστή (θα μιλήσουμε μετά για αυτόν). Το σύστημα παραγωγής αποτελείται από ένα σύγχρονο πυκνωτή, από ένα αιολικό πάρκο και από έναν πυκνωτή εξομάλυνσης. Το σύστημα κατανάλωσης αποτελείται από: ένα δευτερεύον φορτίο απόρριψης, έναν πυκνωτή εξομάλυνσης, έναν ανορθωτή, μία συστοιχία μπαταριών, έναν αναστροφέα και το κύριο φορτίο του νησιού. Στο σημείο αυτό, ας σημειώσουμε ότι το σύστημα παραγωγής, βλέπει ως φορτίο του ολόκληρο το σύστημα κατανάλωσης. Διακρίνουμε τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

- Το σύστημα παραγωγής παράγει ακριβώς όση ισχύ ζητά το σύστημα κατανάλωσης. Δηλαδή, το σύστημα παραγωγής παράγει ακριβώς όση ισχύ ζητούν οι μπαταρίες για να φορτίσουν και το φορτίο για να καλυφθεί. Τότε η συχνότητα στο σύστημα παραγωγής παραμένει σταθερή και ανάμεσα στα 58 και στα 60 Hz. Το φορτίο απόρριψης είναι εκτός λειτουργίας.
- Το σύστημα παραγωγής παράγει περισσότερη ισχύ από ότι χρειάζεται το σύστημα κατανάλωσης. Τότε υπάρχει αύξηση της συχνότητας στο σύστημα παραγωγής. Μόλις η συχνότητα επιχειρήσει να ανέβει πάνω από τα 60 Hz ενεργοποιείται το δευτερεύον φορτίο απόρριψης, το οποίο απορρίπτει την πλεονάζουσα ισχύ, «φορτίζει» τον αντλησιοταμιευτήρα, και διατηρεί σταθερή τη συχνότητα στο σύστημα παραγωγής στα 60 Hz.
- Το σύστημα παραγωγής δεν παράγει καθόλου ισχύ. Τότε η συχνότητα του συστήματος παραγωγής αρχίζει να πέφτει γρήγορα και μόλις φτάσει κάτω από τα 58 Hz ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή στο διακόπτη ισχύος να αποζεύξει το σύστημα παραγωγής από το σύστημα κατανάλωσης. Τώρα, τα συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης είναι συνδεδεμένα μόνο με ένα μετασχηματιστή ονομαστικής (μέγιστης) ισχύος 100 kW. Ένας αντλησιοταμιευτήρας (δεν μοντελοποιείται) αναλαμβάνει να καλύψει την ισχύ αυτή καθώς και τις απώλειες ισχύος που υπάρχουν λόγω των ωμικών αντιστάσεων του συστήματος. Συνεπώς, στο (αποσυζευγμένο) σύστημα παραγωγής υπάρχει τώρα τόση παραγωγή όση είναι και η κατανάλωση. Οπότε η συχνότητα (μετά από μερικές ταλαντώσεις λόγω μεταβατικών φαινομένων) διατηρείται σταθερή γύρω στα 58 Hz.
- Το σύστημα παραγωγής παράγει λιγότερη ισχύ από αυτή που χρειάζεται το σύστημα κατανάλωσης. Τότε η συχνότητα του συστήματος παραγωγής αρχίζει και πέφτει. Μόλις η συχνότητα φτάσει τα 58 Hz, ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή στο διακόπτη να αποζεύξει το σύστημα παραγωγής από το σύστημα κατανάλωσης. Μόλις γίνει η απόζευξη, στο σύστημα παραγωγής υπάρχει κάποια σημαντική παραγωγή (αν και λιγότερη από αυτή που ζητούσε το σύστημα κατανάλωσης) ενώ δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική κατανάλωση. Συνεπώς η συχνότητα του συστήματος παραγωγής αρχίζει να ανεβαίνει. Μόλις η συχνότητα του συστήματος παραγωγής φτάσει τα 60 Hz, ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή στο διακόπτη ισχύος να συζεύξει, με αποτέλεσμα

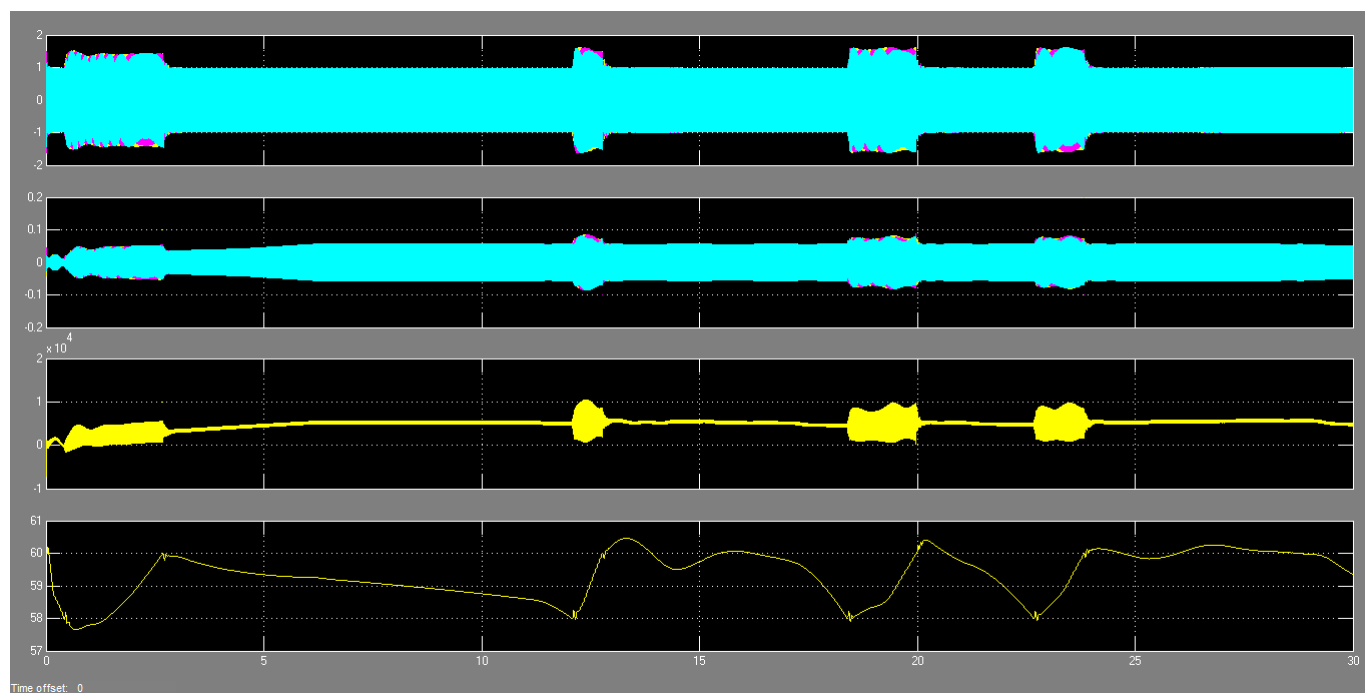
τα δύο συστήματα να είναι συνδεδεμένα ξανά. Τώρα όμως βρισκόμαστε πάλι στην αρχική περίπτωση όπου το σύστημα παραγωγής δεν παράγει όση ισχύ ζητά το σύστημα κατανάλωσης, οπότε η συχνότητα του συστήματος παραγωγής αρχίζει να πέφτει κ.ο.κ. Οπότε έχουμε μία ταλάντωση συχνότητας στο σύστημα παραγωγής με ελάχιστο τα 58 Hz και μέγιστο τα 60 Hz.

Το πιο σημαντικό από όλα στο σύστημα αυτό είναι το γεγονός ότι όλες αυτές οι διαταραχές στη συχνότητα, τα μεταβατικά φαινόμενα και οι διαταραχές στην παραγωγή της Α/Γ δεν «περνούν» στο φορτίο, αφού «απορροφώνται» από τη μπαταρία και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε πως έχει προβλεφθεί κατάλληλος συνδυασμός στοιχείων (τάση DC ζυγού, συντελεστής διαμόρφωσης PWM αναστροφέα, φίλτρο εξόδου) ώστε το σύστημα να μπορεί να λειτουργεί μέσα στα αποδεκτά όρια του συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για κάθε τιμή φορτίου που αναμένεται να εμφανισθεί στο νησί. Επιπλέον, υπάρχει κάτω όριο ασφαλείας (σε περίπτωση δηλαδή που εμφανισθεί κάποια στιγμή φορτίο κάτω από το ελάχιστο αναμενόμενο φορτίο) και άνω όριο ασφαλείας (σε περίπτωση που εμφανισθεί κάποια στιγμή φορτίο πάνω από το μέγιστο αναμενόμενο φορτίο).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα στιγμιότυπο από τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής για 30 δευτερόλεπτα (τόσο μπορεί να «τρέξει» το λογισμικό με τη δεδομένη πολυπλοκότητα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα). Η θεωρούμενη ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 10 m/s και διακύμανση 5 m/s. Βέβαια, έχουμε ρυθμίσει τις αλλαγές του ανέμου να γίνονται πολύ πιο συχνά από ότι στην πραγματικότητα με σκοπό να παρατηρηθούν οι επιδράσεις των αλλαγών του ανέμου στα στοιχεία του συστήματος παραγωγής, στο περιορισμένο χρονικό διάστημα προσομοίωσης. Στο σχήμα 9.3α παρατηρείται η τάση σε α.μ. μεγέθη (βασική πολική τάση 575 V) του συστήματος παραγωγής. Παρατηρούμε ότι ακόμα και στα μεταβατικά φαινόμενα (περιγράφηκαν πριν) η τάση δεν ξεπερνά το 1,5 α.μ. Στο σχήμα 9.3β παρουσιάζεται το ρεύμα της Α/Γ σε α.μ. τιμές ανηγμένο με βασική ισχύ 100 MVA. Παρατηρούμε ότι οι μεταβολές στο ρεύμα κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων είναι ανεκτή. Στο σχήμα 9.3γ παρουσιάζεται η ισχύς της Α/Γ, όπου παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις από τη φυσιολογική λειτουργία κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων. Οι αποκλίσεις αυτές, βέβαια, είναι δυνατό να διορθωθούν. Για παράδειγμα, η χρήση σφονδύλων, ή ενός μεγαλύτερου αντλησιοταμιευτήρα θα μπορούσε να βελτιώσει την κατάσταση. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η χρήση του μικρού δευτερεύοντος μετασχηματιστή βελτιώνει πάρα πολύ αυτές τις «ανωμαλίες». Χωρίς τη χρήση του, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται κατά τη ζεύξη-απόζευξη κάνουν τη λειτουργία του συστήματος απαγορευτική. Τέλος στο σχήμα 9.3δ παρουσιάζεται η συχνότητα του συστήματος παραγωγής. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα κυμαίνεται μέσα στα επιθυμητά όρια. Θέσαμε ως όρια συχνότητας τα όρια 58-60 Hz διότι παρατηρήσαμε ότι αυτά ήταν τα πιο κατάλληλα όρια ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερες ζεύξεις-αποζεύξεις, και άρα λιγότερα μεταβατικά φαινόμενα.



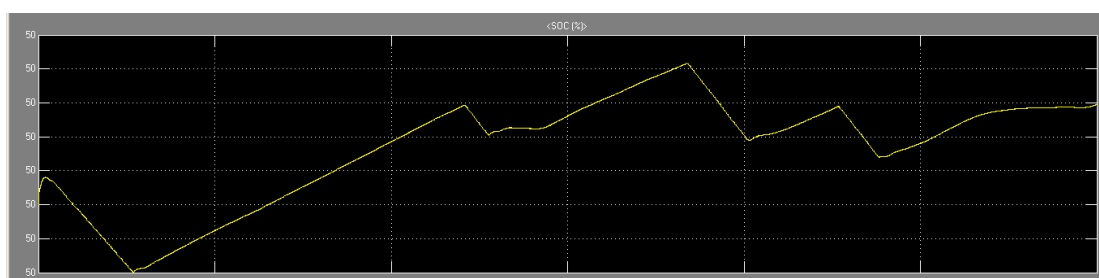
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού



Σχήμα 9.3 Καμπύλες για το σύστημα παραγωγής

- α) Η τάση του συστήματος παραγωγής σε α.μ. μεγέθη με βασική πολική τάση 575 V
- β) Το ρεύμα της Α/Γ σε α.μ. τιμές ανηγμένο με βασική ισχύ 100 MVA
- γ) Η ισχύς που παράγει το αιολικό πάρκο σε kW
- δ) Η συχνότητα του συστήματος παραγωγής

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge) , που μοντελοποιεί τη συστοιχία των μπαταριών. Φαίνονται οι μεταβολές του SOC λόγω της μεταβλητότητας στην ταχύτητα του ανέμου. Σημειώνεται πως στον άξονα των τεταγμένων ο αριθμός παραμένει στο 50%. Αυτό συμβαίνει διότι η αλλαγή στο SOC είναι πάρα πολύ μικρή (π.χ. στο έβδομο δεκαδικό ψηφίο) λόγω του ότι η μπαταρία είναι πάρα πολύ μεγάλη (6000000 Ah) και ο χρόνος που τρέχει η προσομοίωση πάρα πολύ μικρός.

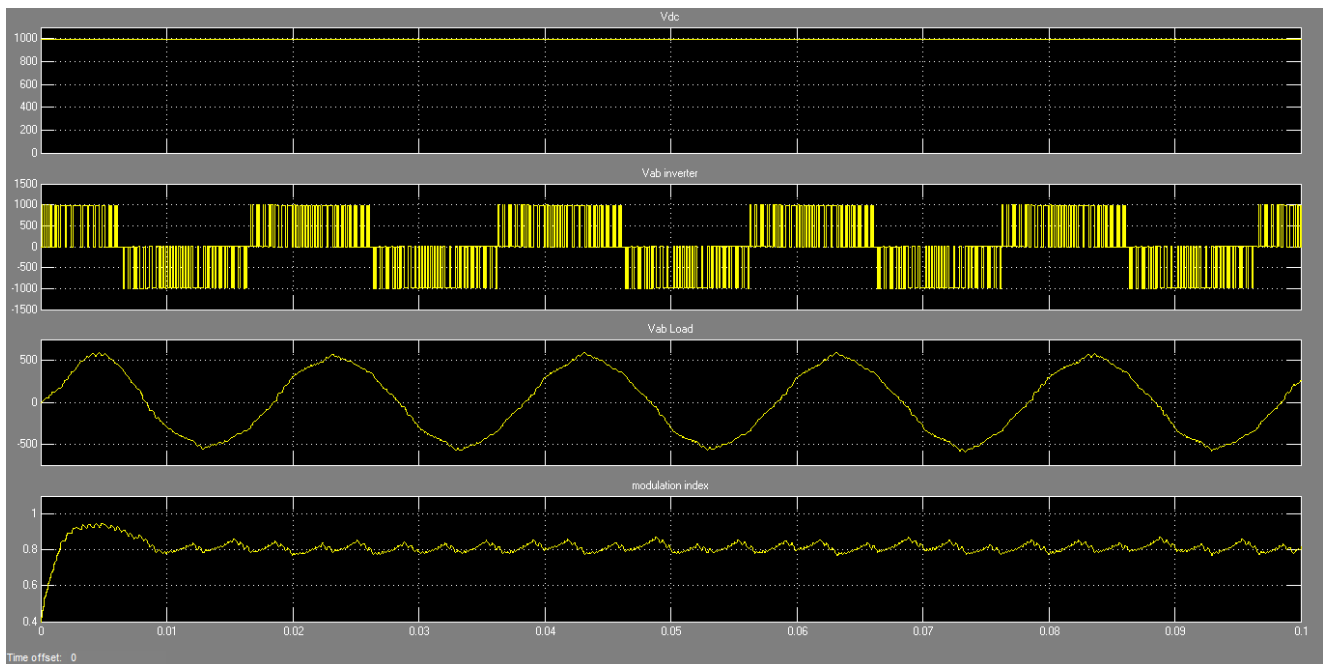


Σχήμα 9.4 Αλλαγή στο SOC των μπαταριών λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου

Στο σχήμα 9.5 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της λειτουργίας του συστήματος κατανάλωσης για 0,1 δευτερόλεπτα. Εδώ ο χρόνος τρεξίματος είναι ακόμη μικρότερος, διότι πρέπει να μειωθεί το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ώστε να «τρέξουν» σωστά τα ηλεκτρονικά ισχύος. Μεγαλύτεροι χρόνοι προσομοίωσης προκαλούν δυσλειτουργία στη μνήμη. Πάντως ο χρόνος αυτός είναι αρκούντως ικανοποιητικός για να δούμε τι γίνεται στο σύστημα κατανάλωσης. Στο σχήμα 9.5α φαίνεται η τάση στο DC ζυγό της μπαταρίας. Η τάση αυτή είναι ίση με 1000 V. Στο σχήμα 9.5β φαίνεται η έξοδος του inverter προ φίλτρου, ενώ στο σχήμα 9.5γ φαίνεται

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

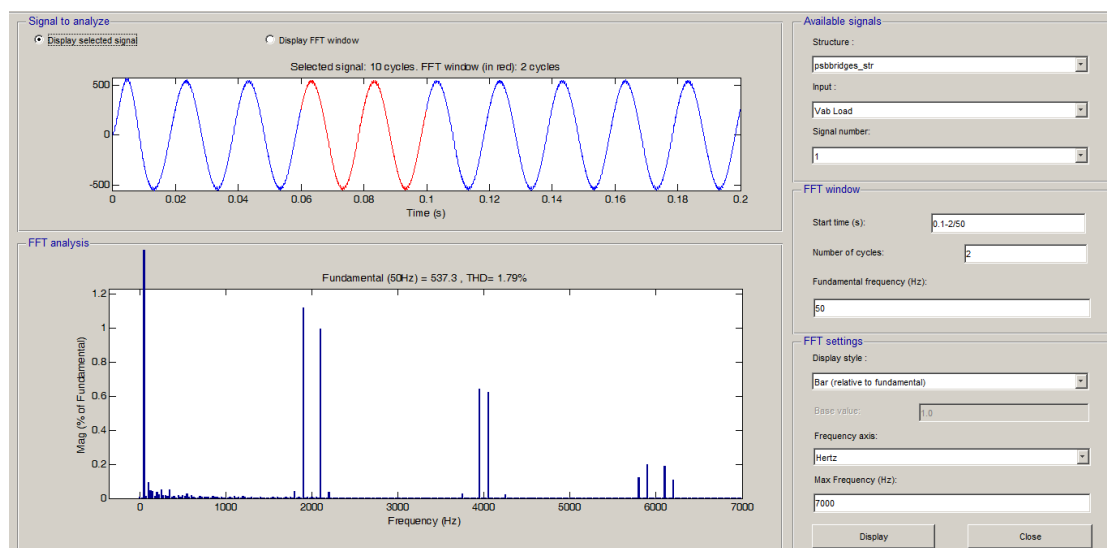
η πολική τάση του φορτίου. Τέλος στο σχήμα 9.5δ φαίνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης του PWM αναστροφέα για συνθήκες αιχμής φορτίου.



Σχήμα 9.5 Καμπύλες για το σύστημα κατανάλωσης

- α) Τάση στο DC ζυγό της μπαταρίας
- β) Πολική τάση ab στην έξοδο του inverter προ φίλτρου
- γ) Πολική τάση ab στο φορτίο
- δ) Συντελεστής διαμόρφωσης για το φορτίο αιχμής (3 MW).

Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιήσουμε ανάλυση FFT για να δούμε την ποιότητα ισχύος στο φορτίο, από την άποψη των αρμονικών. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο FFT analysis του Matlab/Simulink λαμβάνουμε το σχήμα 9.6:



Σχήμα 9.6 Ανάλυση FFT για την κυματομορφή του φορτίου

Ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion-THD) είναι 1,79%, ο οποίος είναι κάτω από το όριο του 3% και συνεπώς είναι

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

αποδεκτός. Βέβαια, όταν το φορτίο πλησιάζει το φορτίο βάσης, ο THD πλησιάζει στο 5%. Όμως αυτό δεν μας απασχολεί διότι THD μέχρι 5% είναι αποδεκτός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 Μελέτη εγκατάστασης-πραγματοποίησης ενός αιολικού συστήματος που θα υποκαταστήσει πλήρως της πετρελαϊκές μονάδες της Αμοργού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το υπάρχον σύστημα ηλεκτροδότησης στα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα της χώρας μας δεν είναι πλέον βιώσιμο. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με έναν πολύ ακριβό τρόπο, λόγω των υψηλών τιμών του πετρελαίου, ο οποίος βλάπτει σημαντικά το περιβάλλον λόγω των υπερβολικά υψηλών εκπομπών ρύπων.

Από την ενεργειακή μελέτη βλέπουμε ότι η πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα επιτρέψει την παραγωγή πιο φθηνού και πιο «καθαρού» ηλεκτρισμού. Οι αριθμοί μιλούν από μόνοι τους: Το κόστος μιας kWh από diesel είναι 0,742\$ ενώ της ίδιας kWh από ΑΠΕ 0,116\$. Επίσης, η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών δεν επηρεάζει πολύ την τιμή της kWh από diesel. Επιπλέον, ακόμη και αν προσομοιώσουμε με βάση τις πιο παλιές τιμές του πετρελαίου στην Ελλάδα (π.χ τιμές του 2007)-θεωρώντας πως όταν παρέλθει η οικονομική κρίση η φορολογία θα μειωθεί και οι τιμές του diesel θα μειωθούν λόγω μείωσης της φορολογίας- πάλι η kWh από diesel κοστίζει πολύ πιο ακριβά από την kWh από ΑΠΕ. Βέβαια, είναι αλήθεια το γεγονός ότι στην τιμή των 0,116\$/kWh δεν περιλαμβάνεται ο ειδικός εξοπλισμός που θα χρειασθεί ώστε να «σταθεί» ένα τέτοιο σύστημα. Τέτοιος εξοπλισμός μπορεί να είναι οι πυκνωτές εξομάλυνσης, οι συσκευές ελέγχου, τα φορτία απόρριψης με τον έλεγχο τους κ.λ.π., δηλαδή όλα εκείνα που είδαμε πως χρειάζονται για να στηθεί ένα τέτοιο σύστημα στην προσομοίωση με το πακέτο Matlab/Simulink. Όλος αυτός ο εξοπλισμός σίγουρα θα αυξήσει την τιμή της kWh αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό που να πλησιάσει το κόστος της παραγωγής από diesel. Όσον αφορά τη βιομάζα, η χρήση της στην παρούσα εφαρμογή φαίνεται μη συμφέρουσα με την πρώτη ματιά καθώς ανεβάζει την τιμή της kWh στα 0,117\$ (δηλαδή την αυξάνει μόλις κατά 0,001 \$). Εντούτοις, η χρησιμοποίηση μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για τη θέρμανση των γειτονικών με την εγκατάσταση σπιτιών θα μειώσει τα κόστη θέρμανσης, καθιστώντας τη βιομάζα μία χρήσιμη προσθήκη στο σύστημα. Το σύστημα συμπαραγωγής δεν μοντελοποιήθηκε λόγω παντελούς έλλειψης στοιχείων σχετικά με το θερμικό φορτίο του νησιού. Βέβαια, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε τα τεράστια περιβαλλοντικά οφέλη: Το σύστημα ΑΠΕ χωρίς βιομάζα επέτυχε μηδενικές εκπομπές ρύπων ανά έτος, ενώ το σύστημα ΑΠΕ με βιομάζα επέτυχε εκπομπές CO<sub>2</sub> 12,6 kg/έτος, το οποίο είναι μηδενικό σε σχέση με τα 8.838.544 kg/έτος που εκπέμπονται από το υπάρχον σύστημα. Τα στοιχεία για τους υπόλοιπους αέριους ρυπαντές είναι ανάλογα. Εν κατακλείδι, από την ενεργειακή αυτή μελέτη, συμπεραίνεται πως η αντικατάσταση των πετρελαϊκών μονάδων από μονάδες ΑΠΕ στην Αμοργό έχει τεράστια οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Η μελέτη της εγκατάστασης με τη χρήση Matlab/Simulink δείχνει ότι ο δρόμος προς την παραγωγή ενέργειας μόνο από ΑΠΕ δεν είναι πολύ μακρύς. Το αναπτυχθέν μοντέλο κατάφερε να απορροφήσει όλες τις διαταραχές που προκαλούνται από τη μεταβλητότητα του ανέμου και από τα μεταβατικά φαινόμενα και παρέχει στο φορτίο ικανοποιητική ποιότητα ισχύος. Όμως οι διακυμάνσεις στην ισχύ, την τάση και το ρεύμα στο σύστημα παραγωγής καθώς και οι ταλαντώσεις της συχνότητας στο σύστημα παραγωγής σε τέτοιο μεγάλο βαθμό δεν είναι αποδεκτές. Όμως, παρότι οι τιμές αυτές είναι εκτός ορίων δεν απέχουν πολύ από το να συμμορφωθούν με τα όρια.

Με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών, θα ήταν δυνατή η εξομάλυνση των καμπυλών του συστήματος παραγωγής, με αποτέλεσμα να τεθούν οι διακυμάνσεις εντός των επιθυμητών ορίων. Μία καλή αρχή προς αυτή την κατεύθυνση θα ήταν η εξάλειψη των ανωμαλιών σύζευξης-απόσύνδεσης με τη χρήση των τεχνικών Direct Power Control (DPC) ή Voltage Orientated Control (VOC) αντί για το διακόπτη ισχύος. Οι τεχνικές αυτές έχουν ως στόχο να γίνεται ένας απευθείας έλεγχος της ισχύος που απορροφά το σύστημα κατανάλωσης (δηλαδή μπαταρία και φορτίο). Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της ισχύος που απορροφά το σύστημα κατανάλωσης γίνεται, όπως είδαμε, μέσω της (μεταβολής της) συχνότητας του συστήματος παραγωγής. Δηλαδή, ανάλογα με το αν υπάρχει έλλειμμα ή πλεόνασμα ενεργού ισχύος, πέφτει ή ανεβαίνει αντίστοιχα η συχνότητα του συστήματος παραγωγής, μέχρι η συχνότητα να φύγει από τα επιθυμητά όρια οπότε γίνεται απόσυνδεση ή απόρριψη φορτίου. Η τεχνική DPC έχει άλλη λογική: εφαρμόζεται ένας έλεγχος, ο οποίος ρυθμίζει το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή που βρίσκεται πριν από τον ανορθωτή έτσι ώστε το σύστημα κατανάλωσης να απορροφά όση ακριβώς ισχύ παράγει το σύστημα παραγωγής, διατηρώντας παράλληλα σταθερή τη συχνότητα του συστήματος παραγωγής. Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής όμως είναι αρκετά πολύπλοκη και ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Στο σημείο αυτό, θα αναλυθεί μία άλλη, σχετικά πιο απλή μέθοδος εξάλειψης των ανωμαλιών που οφείλονται στα μεταβατικά φαινόμενα. Στην παρούσα εργασία, για λόγους απλότητας, έχουμε μοντελοποιήσει το σύνολο των μπαταριών ως μία ενιαία ισοδύναμη μπαταρία η οποία διαμορφώνει το DC ζυγό. Κατά συνέπεια, συμμετέχει μία τεράστια μπαταρία (ή αλλιώς 2000 μπαταρίες) στα μεταβατικά φαινόμενα των ζεύξεων-απόσύνδεσεων. Θα ήταν πιο επικερδές (αλλά και πολύ πιο δύσκολο) να μοντελοποιήσουμε κάθε μία από τις μπαταρίες ξεχωριστά, και να «δώσουμε» σε κάθε μπαταρία το δικό της διακόπτη ζεύξης-απόσύνδεσης με το DC ζυγό. Με έναν κατάλληλο έλεγχο θα ήταν δυνατόν να συνδέουμε κάθε φορά για φόρτιση μόνο εκείνον τον αριθμό των μπαταριών που χρειαζόμαστε· δηλαδή τόσες μπαταρίες ώστε να διατηρείται η συχνότητα του συστήματος παραγωγής σταθερή, δηλαδή να απορροφάται κάθε στιγμή από το σύστημα κατανάλωσης ακριβώς η ισχύς που παράγει το σύστημα παραγωγής και να τροφοδοτείται το φορτίο χωρίς προβλήματα. Τα μεταβατικά φαινόμενα στις ζεύξεις λίγων μπαταριών λογικά θα είναι αρκετά λιγότερα από ότι στη λογική της μαζικής ένταξης-απόσύνδεσης του συνόλου των μπαταριών. Επιπλέον, η λελογισμένη χρήση του δείκτη διαμόρφωσης του PWM αναστροφέα θα μπορούσε να απορροφήσει τους «κραδασμούς» από τις ζεύξεις-απόσύνδεσεις των μπαταριών.

Τέλος θα θέλαμε στο σημείο αυτό να δούμε τα πράγματα και από μία άλλη οπτική γωνία. Αργά ή γρήγορα, η Αμοργός, μαζί με τα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου Πελάγους θα συνδεθούν με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Έτσι οι γεννήτριες diesel θα αχρηστευθούν, διότι το νησί θα ηλεκτροδοτείται από το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα το οποίο έχει πολύ χαμηλότερη τιμή kWh από ότι τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα που βασίζονται σε diesel. Έτσι, η Αμοργός τότε θα τροφοδοτείται κυρίως από τα λιγνιτικά εργοστάσια, δηλαδή με την καύση λιγνίτη. Αυτό ναί μεν θα μειώσει πάρα πολύ το κόστος του ηλεκτρισμού αλλά μάλλον θα αυξήσει τις συνολικές εκπομπές δηλητηριωδών αερίων. Θα ήταν λοιπόν συνετό, στο μεσοδιάστημα μέχρι να επιτευχθεί η σύνδεση να γίνει η προσπάθεια να μετατραπούν τα νησιωτικά συστήματα από συστήματα diesel σε συστήματα ΑΠΕ. Έτσι, μόλις επιτευχθεί τελικά η σύνδεση, η Αμοργός θα αποτελεί ένα μικροδίκτυο το οποίο θα είναι αυτόνομο, φιλικό προς το περιβάλλον και φθηνότερο. Αυτόνομο γιατί θα είναι διαστασιολογημένο ώστε να καλύπτει πλήρως και από μόνο του τις ανάγκες του

νησιού, φιλικό προς το περιβάλλον γιατί δεν θα έχει εκπομπές επικίνδυνων αερίων και φθηνότερο διότι θα του επιτρέπεται να ανταλλάσει ισχύ με το ανάντη δίκτυο μειώνοντας τις ανάγκες του για αποθήκευση ενέργειας. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε, επίσης, το γεγονός ότι η σύνδεση με το διασυνδεδεμένο σύστημα θα δώσει στην Αμοργό πλήρη σταθερότητα τάσης και συχνότητας, χωρίς μεταβολές και ταλαντώσεις.





**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Energy Information Administration (EIA). <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>.
- [2] Hadjipaschalis I, Kourtis G, Poulikkas A. Assessment of oxyfuel power generation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:2637–44.
- [3] Olsen KH. The clean development mechanism’s contribution to sustainable development: a review of the literature. *Climatic Change* 2007;84:59–73.
- [4] Distributed Generation Education Modules. <http://www.dg.history.vt.edu/index.html>; October, 2008.
- [5] Mudathir Funsho Akorede, Hashim Hizam, Edris Pouresmaeil, Distributed energy resources and benefits to the environment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 2, February 2010, Pages 724-734, ISSN 1364-0321
- [6] Strachan N, Farrell A. Emissions from distributed vs. centralized generation: the importance of system performance. *Energy Policy* 2006;34:2677–89.
- [7] Pudjianto D, Strbac G. Investigation of regulatory, commercial, economic and environmental issues in microgrids. *International Journal of Distributed Energy Resources* 2006;2:245–59.
- [8] Boedecker E, Cymbalsky J, Wade S. Modeling distributed electricity generation in the NEMS buildings models. Washington, DC: EIA; 2000.
- [9] Draper G, Vincent T, Kroll ME, Swanson J. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case–control study. *British Medical Journal* 2005;330:1290.
- [10] Gregory R, von Winterfeldt D. The effects of electromagnetic fields from transmission lines on public fears and property values. *Journal of Environmental Management* 1996;48:201–14.
- [11] Ruggero Schleicher-Tappeser, How renewables will change electricity markets in the next five years, *Energy Policy*, Volume 48, September 2012, Pages 64-75, ISSN 0301-4215
- [12] Jenkins N, Allan R, Crossley P, Kirschen D and Strbac G, *Embedded Generation*, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 2000.
- [13] Paulo Moisés Costa, Manuel A. Matos, J.A. Peças Lopes, Regulation of microgeneration and microgrids, *Energy Policy*, Volume 36, Issue 10, October 2008, Pages 3893-3904, ISSN 0301-4215, 10.1016/j.enpol.2008.07.013.

- [14] H. A. Gil, G. Joos, “Models for Quantifying the Economic Benefits of Distributed Generation”, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008.
- [15] Αικατερίνη Βαλαλάκη, Επίδραση της τιμολόγησης των ΑΠΕ στα Μικροδίκτυα, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2010.
- [16] A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou, “Operation of a Multiagent System for Microgrid Control”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 20, Issue 3, 2005, Page(s): 1447 – 1455.
- [17] S.I. Hatzivasiliadis, N.D. Hatziargyriou, A.L. Dimeas, “Development of an agent based intelligent control system for microgrids” Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008.
- [18] A.L. Dimeas, S.I. Hatzivasiliadis, N.D. Hatziargyriou, “Control agents for enabling customer-driven microgrids”, Proceedings of Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09.
- [19] Καρακυριάκου Ασημίνα, Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Υβριδικού Συστήματος Φωτοβολταϊκών και Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας με Βάση την Ανάλυση Διακύμανσης του Ηλεκτρικού Φορτίου, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2009
- [20] Φ.Δ. Κανέλλος, «Συμβολή στην Προσομοίωση και Αναγνώριση Ανεμογεννητριών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για τη Δημιουργία Μειωμένης Τάξης Ισοδύναμων Μοντέλων», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2003
- [21] Σ.Α. Παπαθανασίου, «Συμβολή στην Ανάλυση Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών με Ασύγχρονη Γεννήτρια για την επιλογή του Ηλεκτρικού Σχήματος», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Φεβρουάριος 1997
- [22] Φαραντάτος Ευάγγελος, «Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Σύγχρονη Μηχανή Για Μελέτες Ευστάθειας», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2006
- [23] Διαδικτυακός τόπος <http://www.taygeta.com/random/weibull.xml>
- [24] Διαδικτυακός τόπος [http://en.wikipedia.org/wiki/Random\\_number\\_generation](http://en.wikipedia.org/wiki/Random_number_generation)
- [25] Uniform random number generation (αρχείο 10.1007\_BF02136827).
- [26] Devroye, L. Non-Uniform Random Variate Generation. New York: Springer-Verlag, 1986
- [27] Κ.Θ. Δέρβος, «Εισαγωγή στα ημιαγώγιμα υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011

- [28] Κατσίκη Βασιλική, «Επίδραση της αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ στα μεγέθη ενός Μικροδικτύου», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Μάρτιος 2010
- [29] V.A. Graham, K.G.T. Hollands, A method to generate synthetic hourly solar radiation globally, *Solar Energy*. 44(6), 333-341 (1990)
- [30] V. A. Graham, K. G. T. Hollands, and T. E. Unny, A time series model for *K*, with application to global synthetic weather generation, *Solar Energy*. 40(2), 83-92 (1988).
- [31] G. E. P. Box and G. M. Jenkins, *Time series analysis: Forecasting and control* Holden-Day, San Francisco (1970).
- [32] R.J. Aguiar, M. Colla~Pereira, and J. P. Conde, Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of markov transition matrices, *Solar Energy*. 40(3), 269-279 (1988).
- [33] T. N. Goh and K. J. Tan, Stochastic modelling and forecasting of radiation data, *Solar Energy* 22, 105-111 (1977).
- [34] A.H. C. van Paassen, *Indoor climate, outdoor climate and energy consumption*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (1981).
- [35] D. C. Hittle and C. O. Pedersen, Periodic and stochastic behaviour of weather data, *ASHRAE Transactions*, Vol. 87, part 2 (1981).
- [36] A Balouktsis and P. Tsaides, Stochastic simulation model of hourly total solar radiation, *Solar Energy* 37, 119-126 (1986).
- [37] **B. Y. H.** Liu and R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distributions of of direct, diffuse, and total solar radiation, *Solar Energy* 4, 1-19 (1960).
- [38] L.O. Dagleman, A weather simulation model for building energy analysis, ASHRAE Symposium on Weather Data, Seattle, WA, Annual Meeting, June 1976, ASHRAE Transactions, pp. 435-447 (1976)
- [39] R. H. B. Excell, A mathematical model for solar radiation in south-cast Asia (Thailand), *Solar Energy* 26, 161-168 (1981).
- [40] C.' Mustacchi, V. Cena, and M. Rocchi, Stochastic simulation of hourly global radiation sequences, *Solar Energy* 23, 47-51 (1979).
- [41] V. A. Graham, *Stochastic synthesis of the solar atmospheric transmittance*. Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada (1985).
- [42] M. B. Fiering, Multivariate techniques for synthetic hydrology, ASCE Journal of Hydraulic Div., HY5, 43-60 (1964).

- [43] V.D. Valencia and J. C. Selmake, Disaggregation processes in stochastic hydrology, *Water Resources Research* 9, 580-585 (1964).
- [44] R. King and R. O. Buckius, Direct solar transmittance for a clear sky, *Solar Energy* 22, 297-301 (1979).
- [45] H. C. Hottel, A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres, *Solar Energy* 18, 129-134 (1976).
- [46] R. O. Buckius and R. King, Diffuse solar radiation on a horizontal surface for a clear sky, *Solar Energy* 21, 503 (1978).
- [47] K. G. T. Hollands (1984), A derivation of the diffuse fraction's dependence on the clearness index, *Proc. of Solar World Congress, 8th Biennial Congress of ISES, Perth, Australia*, Pergamos Press, New York. pp. 2088-2092 (1983).
- [48] J. F. Orgill and K. G. T. Holland, Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface, *Solar Energy* 19, 357-359 (1977).
- [49] M. Iqbal, Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface, *Solar Energy* 24, 491-500 (1980).
- [50] Athienitis, Personal communication, University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada (1985).
- [51] M. Collares-Pereira and A. Rabl, The average distribution of solar radiation---Correlations between diffuse and hemispherical, and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy* 22, 155-164 (1979).
- [52] K.G.T. Hollands and R. G. Huget, A probability density function for the clearness index with applications, *Solar Energy* 30, 195-209 (1983).
- [53] P. Bendt, M. Collares-Pereira, and A. Rabl, The frequency distribution of daily insolation values, *Solar Energy* 27, 1-5 (1981).
- [54] Κ.Θ. Δέρβος, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη θεωρία στην πράξη», Πανεπ. Εκδ. ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- [55] Αντώνιος Π. Γεωργιάδης, Σωτήριος Β. Σωτηρίου, «Αξιοποίηση της Βιομάζας στον Ελλαδικό Χώρο για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω Συστημάτων Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Ιούλιος 2011
- [56] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass\\_guide.pdf](http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomass_guide.pdf)
- [57] Kirubakaran V, Sivaramakrishnan V, Nalini R, Sekar T, Premalatha M, Subramanian P. A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:179–86.

- [58] Διαδικτυακός τόπος <http://www.resthermal.info/servlet/SDEBiomassServlet>
- [59] Weissbach RS, Karady GG, Farmer RG. A combined uninterruptible power supply and dynamic voltage compensator using a flywheel energy storage system. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2001;16:265–70.
- [60] Louie H, Strunz K. Superconducting magnetic energy storage (SMES) for energy cache control in modular distributed hydrogen-electric energy systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2007;17:2361–4.
- [61] Crotogino F, Mohmeyer KU, Scharf R, Huntorf CAES. More than 20 years of successful operation. In: *The Solution Mining Research Institute spring meeting*; 2001.
- [62] Bullough C, Gatzel C, Jakiel C, Koller M, Nowi A, Zunft S. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the integration of wind energy. In: *The European wind energy conference*; 2004.
- [63] The future of energy storage in a deregulated environment. IEEE panel session, PES summer meeting. Seattle, Washington; 2000.
- [64] Σπυρίδων Β. Γιαννούτσος, «Μελέτη και Σχεδίαση Τεχνικών Ελέγχου ενός Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας σε Συσσωρευτές (Battery Energy Storage System-BESS) για Αυτόνομα Νησιωτικά Συστήματα, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Ιούλιος 2010
- [65] M. Farber De Anda, J. Boyes, W. Torres «Lessons Learned From the Puerto Rico Battery Energy Storage System», Sandia Laboratories Technical Report SAND99-2232, 1999.
- [66] Golden Valley Electric Association (GVEA) Fairbank’s Battery Energy Storage System (BESS), διαθέσιμο <http://www.gvea.com/about/bess/>
- [67] Y.H. Pan, V. Srinivasan, C.Y. Wang, «An experimental and modeling study of isothermal charge/discharge behavior of commercial Ni-MH cells», *J. of Power Sources*, Vol. 112, Issue 1, 24 October 2002, pp 298-306.
- [68] Ali Nourai, Bradford P. Martin, and Doug R. Fitchett «Testing the limits [electricitystorage technologies]», *IEEE power and energy magazine*, Vol 3, Is 2, March 2005 pp: 40-46.
- [69] EU-DEEP The birth of a European Distributed EnErgy Partnership that will help the large scale implementation of distributed energy resources in Europe.FP6 Project: SES6-CT-2003-503516, Technical Annex, available [www.eu-deep.com](http://www.eu-deep.com)
- [70] Δικτυακός τόπος Energy Storage Association [www.energystorage.org](http://www.energystorage.org)

- [71] Ε.Γ. Ποταμιανάκης, «Προσομοίωση και Γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την Ανάλυση Βραχυπρόθεσμης Ευστάθειας Τάσης», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Απρίλιος 2006
- [72] P. Kundur, «Power System Stability and Control», McGraw-Hill 1994.
- [73] P.C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D.Sudhoff, «Analysis of Electric Machinery». IEEE Press, New York, 2000.
- [74] Σ.Ν. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Συμπεών 2007
- [75] Σ.Ν. Μανιάς, Αθ. Καλετσάνος, «Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά», Συμπεών 2001
- [76] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics Handbook”, Academic Press, 2001
- [77] N. Mohan, W.P. Robbin, and T. Undeland, “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 1995.
- [78] Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε)
- [79] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.)  
<http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
- [80] Erbs, D; Klein, S and Duffie, J : «Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation» In: Solar Energy 28 (1982) pp. 293-302.
- [81] Liu, B. and Jordan, R.: «The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation». In: Solar Energy 4 (1960) 3, pp.1-19.
- [82] Διαδικτυακός τόπος [www.in2greece.com](http://www.in2greece.com)