



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μελέτη για εφαρμογή αυτόνομων υβριδικών  
συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις  
Υποσαχάρειες χώρες της Αφρικής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΑΝΤΙΚΟΣ Σ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μελέτη για εφαρμογή αυτόνομων υβριδικών  
συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις  
Υποσαχάρειες χώρες της Αφρικής**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΑΝΤΙΚΟΣ Σ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....

Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ν.Ι. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Π.Θ. Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2014

.....

**ΣΑΝΤΙΚΟΣ Σ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

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

Copyright© Σαντικός Σ. Γεώργιος, 2014

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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε συνεργασία με την Systems Sunlight SA. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι: "Μια πρόταση για εφαρμογή αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Υποσαχάριες χώρες της Αφρικής".

Για αρχή θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην εταιρία Systems Sunlight SA για την ευκαιρία που μου έδωσαν να συνεργαστώ μαζί τους και να εκπονήσω αυτή την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους Συμεών Παρχαρίδη (Ειδικός Τεχνικός Προϊόντος) και Μάνο Κυρίτση (Υπεύθυνος Πωλήσεων Μεγάλων Πελατών Διεθνών Αγορών) για την καθοδήγηση, την υποστήριξη τους καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια τους καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης. Η συνεργασία μας ήταν άψογη και οι υποδείξεις και οι συμβουλές τους υπήρξαν απαραίτητες για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα να εκφράσω την μεγάλη μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέπων Καθηγητή Κ.Γ Καραγιαννόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, την άψογη συνεργασία που είχαμε και κυρίως το έντονο ενδιαφέρον που έδειξε στη συνεργασία Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και Systems Sunlight SA.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής Καθηγητή Ν.Ι Θεοδώρου και Λέκτορα Π. Τσαραμπάρη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές τους σε όλα τα ακαδημαϊκά έτη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τη φίλη μου Λίνα Σταυρίδου για την υπερπολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση της καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Πέγκυ και Σπύρο, και τα αδέρφια μου, Κωνσταντίνο και Βασιλική, για την αμέριστη στήριξή τους και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια, τα οποία με βοήθησαν και μου έδωσαν την δύναμη να συνεχίσω και να πραγματοποιήσω τους στόχους μου. Σας ευχαριστώ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Σαντικός Σ. Γεώργιος



## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια τα ενεργειακά προβλήματα βρίσκονται στην κορυφή του ενδιαφέροντος επηρεάζοντας άμεσα και καθοριστικά τις οικονομίες και τις πολιτικές σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι αλλαγές που παρατηρούνται στον ενεργειακό τομέα είναι ριζικές, και μοιραία επηρεάζουν μακροπρόθεσμα την παγκόσμια οικονομική πορεία.

Μέσα σε όλο το σύγχρονο ενεργειακό σκηνικό εμφανίζεται πρόσφατα ένας νέος αλλά πολλά υποσχόμενος εταίρος, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι πηγές αυτές ενέργειας έχουν προχωρήσει αρκετά από πλευράς τεχνολογικής ωριμότητας σε πολλούς τομείς, όπως στερεά καύσιμα, βιοαέριο, βιοαιθανόλη, βιοντήζελ κλπ, και επιπλέον ευνοούνται από το διαμορφούμενο παγκόσμια πολιτικό σκηνικό που επιβάλλει άμεση λήψη δραστικών μέτρων για τη μείωση των εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων που επηρεάζουν δυσμενώς και αποσταθεροποιούν το κλίμα της γης.

Οι ΑΠΕ, φαίνεται να δίνουν λύσεις στις περιβαλλοντικές προκλήσεις, παρέχοντας συγχρόνως και διέξοδο στα θέματα της ενεργειακής ασφάλειας μέσα από την μείωση της εξάρτησης από εισαγωγές ενεργειακών πόρων. Πέρα από αυτά, υπόσχονται τόνωση των τοπικών αγορών και περιφερειακή ανάπτυξη.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επιλογή δύο κατάλληλων υβριδικών πακέτων τα οποία θα έχουν εφαρμογή σε μία χώρα της Αφρικής. Η επιλογή της κατάλληλης χώρας θα γίνει με την βοήθεια μίας πολυκριτηριακής ανάλυσης, στην οποία λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως είναι το ποσοστό ηλεκτροδότησης, η μέση ετήσια παραγωγή ενός δοσμένου συστήματος, η μέση ταχύτητα του ανέμου κ.α. Μετά την επιλογή της χώρας περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής του πακέτου και υπολογίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

### Λέξεις Κλειδιά:

Αυτόνομα, υβριδικά συστήματα, αποθήκευση ενέργειας, συσσωρευτές, φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά συστήματα, Υποσαχάρια, Αφρική, πολυκριτηριακή αξιολόγηση.





## Abstract

In recent years energy problems are at the top of the interest directly and decisively influencing the economies and policies worldwide. The changes observed in the energy sector are profound, and fatal influence long-term global economic mainstream.

In all modern energy scene appears recently a young but promising partner, renewable energy sources (RES).

These sources of energy are well advanced in terms of technological maturity in many areas, such as solid fuels, biogas, bioethanol, biodiesel, etc., and additionally benefit from configurable global political landscape that requires immediate drastic measures to reduce greenhouse gases that affect distort and destabilize the earth's climate.

Renewable energy seems to provide solutions to environmental challenges, while providing an outlet and the issues of energy security through reducing dependence on energy imports. Beyond this, promise stimulate local markets and regional development.

The aim of this thesis is the selection of two suitable hybrid packages which will apply to a country in Africa. The choice of the appropriate country will be by means of a multi-criteria analysis, which takes into account various factors such as the rate of electrification, the average annual production of a given system, the average wind speed etc. After selecting the country described in detail the process of implementation of the package and calculate the technical characteristics.

### **Keywords:**

Standalone, hybrid systems, energy storage, batteries, photovoltaic systems, wind systems, sub-Saharan, Africa, multicriteria evaluation.



## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....</b>	<b>15</b>
1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	17
1.2 Φάσεις Εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας.....	17
1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	20
<b>Κεφάλαιο 2. Ηλιακή και Αιολική Ενέργεια.....</b>	<b>21</b>
2.1 Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	23
2.1.1 Εισαγωγή .....	23
2.1.2 Η Φωτοβολταϊκή Ενέργεια.....	24
2.1.3 Η Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Σήμερα .....	25
2.1.4 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	26
2.1.5 Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	27
2.1.6 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....	27
2.1.6.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα .....	29
2.1.6.2 Άμεσης Τροφοδοσίας του Φορτίου (Direct Coupled) .....	29
2.1.6.3 Με αποθήκευση της Παραγόμενης Ενέργειας.....	29
2.1.6.4 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα.....	29
2.1.7 Ο Ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του .....	29
2.1.8 Η Βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη .....	31
2.1.9 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης.....	32
2.2 Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες .....	34
2.2.1 Γενικά Στοιχεία .....	34
2.2.2 Τεχνολογία Ανεμογεννητριών.....	35
2.2.2.1 Στοιχεία Αεροδυναμικής.....	36
2.2.2.2 Δομή Ανεμογεννήτριας.....	37
2.2.2.3 Λειτουργία Ανεμογεννήτριας .....	39
2.2.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Ανεμογεννήτριας.....	45
<b>Κεφάλαιο 3. Υβριδικά Συστήματα .....</b>	<b>47</b>
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	49
3.2 Πλεονεκτήματα Υβριδικών Συστημάτων .....	51
3.3 Συστήματα Διασυνδεδεμένα στο Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	51
3.4 Τροφοδότηση Απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού .....	52
3.5 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα.....	53
3.5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά .....	53
3.5.2 Οι Συσσωρευτές στα Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα.....	54

3.5.3 Αυτόνομα συστήματα με εφεδρική πηγή ενέργειας.....	55
3.5.4 Ρυθμιστές, Μετατροπείς, Αντιστροφείς.....	55
3.6 Συσσωρευτές.....	57
3.7 Κατηγοριοποίηση Τεχνολογιών.....	58
3.8 Κατηγορίες Μπαταριών.....	59
3.8.1 Μπαταρίες Μολύβδου Οξέως.....	59
3.8.2 Μπαταρίες Μολύβδου Οξέως Ανασυνδιασμένου Αερίου.....	61
3.8.3 Μπαταρίες Νικελίου Καδμίου.....	62
3.8.4 Μπαταρίες Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου.....	64
3.8.5 Μπαταρίες Νατρίου Θείου.....	65
3.8.6 Μπαταρίες Τεχνολογίας Λιθίου.....	67
3.8.7 Μπαταρίες Ροής.....	68
3.8.7.1 Vanadium Redox Battery (VRB).....	70
3.8.7.2 Μπαταρίες Ψευδαργύρου Βρωμίου.....	71
3.8.7.3 Μπαταρίες Πολυθειούχου Βρωμιδίου.....	72
3.9 Εμπειρία Εφαρμογής Υβριδικών Συστημάτων στο Νησί King.....	72
<b>Κεφάλαιο 4. Παρούσα Κατάσταση Στην Αφρική.....</b>	<b>75</b>
4.1 Γενικά Στοιχεία για την Αφρική.....	77
4.2 Γεωφυσική Εξέταση.....	77
4.3 Το Κλίμα, τα Νερά και η Βλάστηση της Αφρικής.....	78
4.4 Οικονομία.....	79
4.5 Ορυκτός Πλούτος και Μεταλλεύματα.....	80
4.6 Ενεργειακή Κατάσταση.....	81
<b>Ο Σκοπός και Η Συνεισφορά Της Εργασίας.....</b>	<b>99</b>
Σκοπός.....	101
Η συνεισφορά της εργασίας.....	102
<b>Κεφάλαιο 5. Πολυκριτηριακά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων.....</b>	<b>103</b>
5.1 Εισαγωγή.....	105
5.2 Εισαγωγή Στις Μεθόδους Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων.....	106
5.2.1 Κατηγορίες Μεθόδων Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων.....	106
5.2.2 Βασικές Μέθοδοι Αναγωγής σε Ένα Κριτήριο.....	106
5.2.2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP).....	106
5.2.2.2 Multi Attribute Utility Theory (MAUT).....	108
5.2.3 Μέθοδοι Ασαφούς Λογικής.....	109
5.2.3.1 Fuzzy AHP.....	110
5.2.3.2 Linguistic Ordered Weighted Average (LOWA).....	113
5.2.4 Βασικές Μέθοδοι Σχέσεων Υπεροχής.....	114

5.2.4.1 Οικογένεια Μεθόδων ELECTRE.....	114
5.2.4.2 PROMETHEE.....	120
5.2.5 Εφαρμογές Πολυκριτηριακών Μεθόδων.....	125
5.3 Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων ELECTRE I .....	128
5.3.1 Συλλογή στοιχείων 27 χωρών .....	128
5.3.2 Επιλογή, στάθμιση και κανονικοποίηση καταλλήλων κριτηρίων.....	135
5.3.3 Πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας .....	147
5.3.4 Κατασκευή πυρήνα .....	150
5.3.5 MAUT .....	158
5.4 Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων MAUT.....	160
5.5 Υποστήριξη Απόφασης.....	164
<b>Κεφάλαιο 6. Μελέτη Αυτόνομων Υβριδικών Συστημάτων, Φωτοβολταϊκής και Αιολικής Ενέργειας.....</b>	<b>165</b>
6.1 Εισαγωγή .....	167
6.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος Αγροτικής Περιοχής .....	167
6.2.1 Δεδομένα .....	168
6.2.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος .....	169
6.2.2.1 Επιλογή Φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	169
6.2.2.2 Επιλογή Συσσωρευτών .....	172
6.2.2.3 Επιλογή Ρυθμιστή φόρτισης .....	175
6.2.2.4 Επιλογή Αυτόνομου Μετατροπέα.....	177
6.2.2.5 Επιλογή Ανεμογεννήτριας .....	179
6.2.2.6 Μονογραμμικό Σχέδιο .....	182
6.3 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος Αστικής Περιοχής.....	184
6.3.1 Δεδομένα.....	184
6.3.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος .....	184
6.3.2.1 Επιλογή Φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	184
6.3.2.2 Επιλογή Συσσωρευτών .....	186
6.3.2.3 Επιλογή Ρυθμιστή φόρτισης .....	187
6.3.2.4 Επιλογή Αυτόνομου Μετατροπέα.....	188
6.3.2.5 Επιλογή Ανεμογεννήτριας .....	189
6.3.2.6 Μονογραμμικό Σχέδιο .....	189
<b>Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα-Προοπτικές.....</b>	<b>191</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	193
7.2 Προοπτικές.....	195
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>197</b>



---

## *Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή*

---





## 1.1 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Τα τελευταία χρόνια τα ενεργειακά προβλήματα βρίσκονται στην κορυφή του ενδιαφέροντος επηρεάζοντας άμεσα και καθοριστικά τις οικονομίες και τις πολιτικές σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι αλλαγές που παρατηρούνται στον ενεργειακό τομέα είναι ριζικές, και μοιραία επηρεάζουν μακροπρόθεσμα την παγκόσμια οικονομική πορεία.

Οι ενεργειακοί κλυδωνισμοί γίνονται όλο και περισσότερο ανησυχητικοί συνδυαζόμενοι με τα διογκούμενα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν κατά βάση από την συνεχή χρήση ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την παγκόσμια βιομηχανική έκρηξη, και την αλματώδη ανάπτυξη των γιγάντιων Ασιατικών χωρών όπως η Ινδία και η Κίνα.[1]

Μέσα από αυτήν την διαμορφούμενη κατάσταση αναδύεται μια ανάγκη για ριζικές διαρθρωτικές αλλαγές στον χώρο της ενέργειας.

Μέσα σε όλο το σύγχρονο ενεργειακό σκηνικό εμφανίζεται πρόσφατα ένας νέος αλλά πολλά υποσχόμενος εταίρος, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι πηγές αυτές ενέργειας έχουν προχωρήσει αρκετά από πλευράς τεχνολογικής ωριμότητας σε πολλούς τομείς, όπως στερεά καύσιμα, βιοαέριο, βιοαιθανόλη, βιοντήζελ κλπ, και επιπλέον ευνοούνται από το διαμορφούμενο παγκόσμια πολιτικό σκηνικό που επιβάλλει άμεση λήψη δραστικών μέτρων για τη μείωση των εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων που επηρεάζουν δυσμενώς και αποσταθεροποιούν το κλίμα της γης.

Οι ΑΠΕ, φαίνεται να δίνουν λύσεις στις περιβαλλοντικές προκλήσεις, παρέχοντας συγχρόνως και διέξοδο στα θέματα της ενεργειακής ασφάλειας μέσα από την μείωση της εξάρτησης από εισαγωγές ενεργειακών πόρων. Πέρα από αυτά, υπόσχονται τόνωση των τοπικών αγορών και περιφερειακή ανάπτυξη.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επιλογή δύο κατάλληλων υβριδικών πακέτων τα οποία θα έχουν εφαρμογή σε μία χώρα της Αφρικής. Η επιλογή της κατάλληλης χώρας θα γίνει με την βοήθεια μίας πολυκριτηριακής ανάλυσης, στην οποία λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως είναι το ποσοστό ηλεκτροδότησης, η μέση ετήσια παραγωγή ενός δοσμένου συστήματος, η μέση ταχύτητα του ανέμου κ.α. Μετά την επιλογή της χώρας περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής του πακέτου και υπολογίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

## 1.2 Φάσεις Εκπόνησης Διπλωματικής Εργασίας

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μεταξύ Σεπτεμβρίου 2013 και Οκτωβρίου 2014, και η πορεία αυτής ακολούθησε τις εξής φάσεις, οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά και στην συνέχεια απεικονίζονται εποπτικά στο Σχήμα 1.1.

**Φάση 1<sup>η</sup>:** Μελέτη της υπάρχουσας κατάστασης στην Αφρική

Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης, έγινε έρευνα και συλλογή στοιχείων από την διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την υπάρχουσα κατάσταση της Αφρικής, τόσο γενικά όσο και ειδικότερα για τις ενεργειακές ανάγκες.

**Φάση 2<sup>η</sup>:** Συλλογή στοιχείων για την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής

Στην δεύτερη φάση της εργασίας, έγινε έρευνα και συλλογή στοιχείων, με την βοήθεια ηλεκτρονικής αναζήτησης, σχετικά με την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση, τις υπάρχουσες ανάγκες και ενεργειακές υποδομές, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν και τις δυνατότητες ανάπτυξης της Αφρικής όσον αφορά στον ενεργειακό τομέα της.

**Φάση 3<sup>η</sup>:** Παρουσίαση Πολυκριτηριακών Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

Σε αυτήν την φάση, έγινε έρευνα και καταγραφή στοιχείων σχετικά με τα Πολυκριτηριακά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων. Μελετήθηκαν οι κυριότερες κατηγορίες και συλλέχθηκαν στοιχεία για τις κυριότερες μεθόδους που ανήκουν στην κάθε κατηγορία. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή χωρών υποδοχής για την εφαρμογή υβριδικών πακέτων.

**Φάση 4<sup>η</sup>:** Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων

Η φάση αυτή αφορά την εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων για την επιλογή της πλέον κατάλληλης χώρας υποδοχής για την υλοποίηση του υβριδικού πακέτου.

**Φάση 5<sup>η</sup>:** Υλοποίηση υβριδικού πακέτου

Σε αυτήν την φάση, με βάση την χώρα επιλογής που προέκυψε από την προηγούμενη φάση έγινε αναλυτική περιγραφή του υβριδικού πακέτου. Παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πακέτου και διαμορφώνονται ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί τόσο σε μία συστοιχία κατοικιών σε αγροτική περιοχή όσο και σε μία μόνο κατοικία σε αστική περιοχή.

**Φάση 6<sup>η</sup>:** Εξαγωγή συμπερασμάτων και προοπτικές για το μέλλον

Στην τελευταία φάση, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προηγούμενα βήματα, έγινε η προσπάθεια της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι πιθανές προοπτικές για το μέλλον.

**Φάση 1<sup>η</sup>**

Μελέτη της υπάρχουσας κατάστασης στην Αφρική

**Φάση 2<sup>η</sup>**

Συλλογή στοιχείων για την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής

**Φάση 3<sup>η</sup>**

Παρουσίαση Πολυκριτηριακών Συστημάτων Υποστήριξης  
Αποφάσεων

**Φάση 4<sup>η</sup>**

Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων

**Φάση 5<sup>η</sup>**

Υλοποίηση υβριδικού πακέτου

**Φάση 6<sup>η</sup>**

Εξαγωγή συμπερασμάτων και προοπτικές για το μέλλον

**Σχήμα 1.1:** Φάσεις εκπόνησης διπλωματικής εργασίας

### 1.3 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο είναι μία εισαγωγή της υπάρχουσας κατάστασης παγκοσμίως όσον αφορά την ενεργειακή κατάσταση. Επιπλέον, γίνεται μια αναφορά στα στάδια υλοποίησης της εργασίας και στην δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μία σύντομη αναφορά σε δύο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Φωτοβολταϊκά συστήματα και Αιολική ενέργεια. Οι ΑΠΕ αυτές θα αξιοποιηθούν για την εφαρμογή του υβριδικού πακέτου στην συνέχεια της διπλωματικής και για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν στον τρόπο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πάνελ και ανεμογεννητριών και γενικότερα θεωρητικά στοιχεία για τις δύο αυτές μορφές ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν υβριδικά συστήματα. Περιγράφονται αναλυτικά τα συστατικά τους στοιχεία και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στους συσσωρευτές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στοιχεία που συλλέχθηκαν σχετικά με την Αφρική, τόσο γενικότερα όσο και ειδικότερα για την ενεργειακή της κατάσταση. Γίνεται μία σύντομη αναφορά σε γενικά στοιχεία που αφορούν την μορφολογία, οικονομία και το κλίμα. Στην συνέχεια αναλύεται η ενεργειακή κατάσταση που επικρατεί και παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν τους εγκατεστημένους σταθμούς παραγωγής ενέργειας στις χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφονται αρχικά οι κατηγορίες μεθόδων και στην συνέχεια οι κύριες τεχνικές Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων διακριτού συνόλου επιλογών και αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι της κάθε τεχνικής.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του υβριδικού πακέτου που προτείνεται για υλοποίηση τόσο σε μία συστοιχία κατοικιών σε αγροτική περιοχή όσο και σε μία μεμονωμένη κατοικία σε αστική περιοχή.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν και γίνεται αναφορά στις προοπτικές που υπάρχουν για το μέλλον.

---

## *Κεφάλαιο 2. Ηλιακή και Αιολική Ενέργεια*

---



## 2.1 Ηλιακή Ενέργεια και Φωτοβολταϊκά Συστήματα

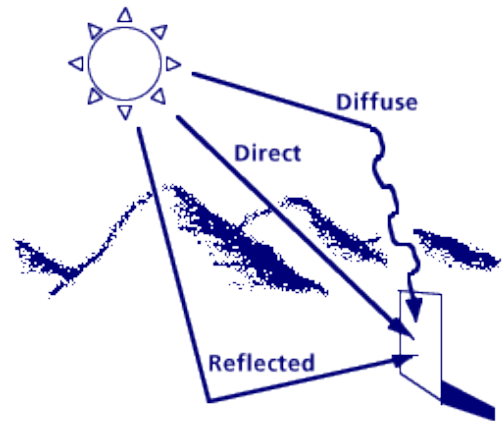
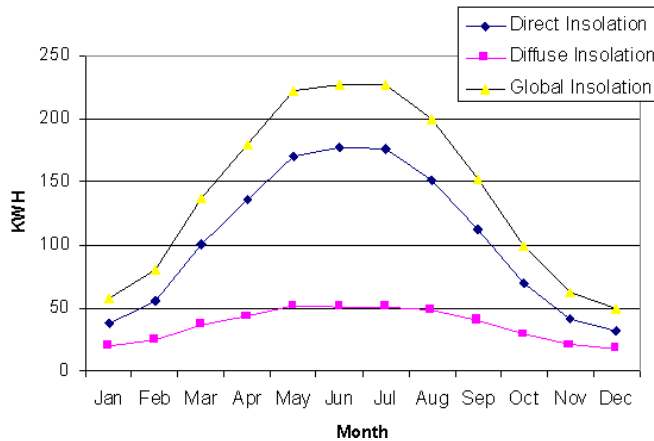
### 2.1.1 Εισαγωγή

Σε πολλές οι εφαρμογές απαιτείται η χρήση ενέργειας, δεν είναι όμως πάντα εύκολη η εξασφάλισή της, όπως συμβαίνει σε συστήματα διαστημικών σταθμών. Η αδυναμία να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας εκτός της ηλιακής στις διαστημικές εφαρμογές λόγω της εξ' ορισμού δυσκολίας που υπάρχει στο διαστημικό περιβάλλον, αποτέλεσε την αφορμή για την έρευνα και ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, της τεχνολογίας δηλαδή που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική.[1]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν τις ρίζες τους στα διαστημικά προγράμματα των ΗΠΑ το 1960. Ο άλλος πρώιμος τομέας που οδήγησε στην επέκταση της αγοράς ήταν εφαρμογές για πολύ μικρές ποσότητες ισχύος όπως στις τηλεπικοινωνίες.

Υπάρχουν τρεις τύποι ακτινοβολίας που προσπίπτουν στον ηλιακό συλλέκτη.

- **Άμεση ακτινοβολία (Direct radiation):** Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απ' ευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα.
- **Διάχυτη ακτινοβολία (Diffuse radiation):** Η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα.
- **Ανακλώμενη ακτινοβολία (Reflected radiation):** Η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στο έδαφος.
- **Συνολική Ακτινοβολία (Total solar radiation):** Το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μια επιφάνεια (συνήθως οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια, συχνά καλούμενη κοσμική ακτινοβολία).[1],[2]



**Σχήμα 2.1:** Αριστερά: η κατανομή της μέσης ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο αναλυμένη σε άμεση και διάχυτη/ανακλώμενη ακτινοβολία. Δεξιά: μέτρηση της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

### 2.1.2 Η Φωτοβολταϊκή Ενέργεια

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια οφείλεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, χάρη στο οποίο υπάρχει η δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και την λειτουργία, οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες μπορούν να καταταγούν σε 3 κυρίες κατηγορίες:[1]

- Απλές διατάξεις, όπου τα ηλιακά κύτταρα είναι τοποθετημένα σε σταθερά επίπεδα πλαίσια και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με την φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.
- Διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά κύτταρα να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό κύτταρο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία ανά μονάδα εμβαδού της επιφανείας του.
- Διατάξεις που με την χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά κύτταρα.

Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνητή ψύξη των ηλιακών κυττάρων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.[3]



### 2.1.3 Η Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Σήμερα

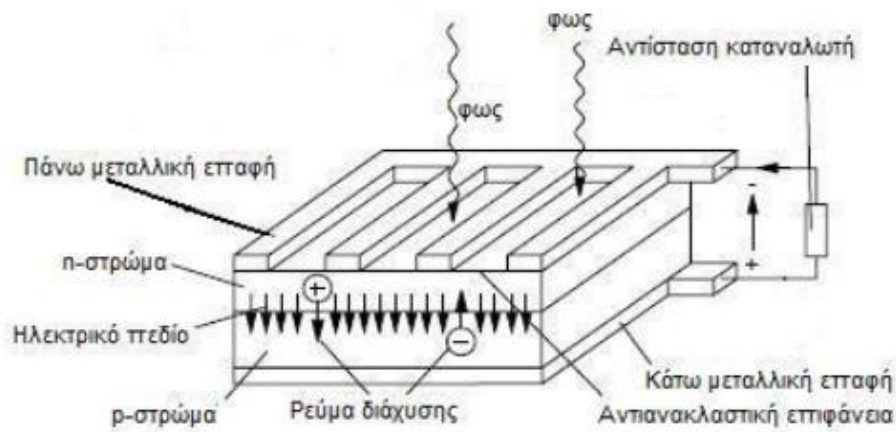
Οι πιο κοινοί τύποι ημιαγωγικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην σημερινή αγορά των ηλιακών κυττάρων και συστημάτων είναι οι εξής:

- Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο
- Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο
- $\text{CuInSe}_2$
- $\text{CdTe}$

Η φωτοβολταϊκή ισχύς μπορεί να παραχθεί με πολλούς τρόπους, με ποικιλία αποδοτικότητας και δαπάνης. Η ηλιακή τεχνολογία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες: διακριτή τεχνολογία κυττάρων και ενσωματωμένη τεχνολογία λεπτών ταινιών.[4]

Παρακάτω αναλύονται οι 4 διαφορετικοί τύποι των ημιαγωγικών υλικών:

- Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο: Μονοκρυσταλλικά κύτταρα αυξημένου πυριτίου, (200  $\mu\text{m}$ ). Τα ερευνητικά κύτταρα έχουν φθάσει σχεδόν σε αποδοτικότητα 24%, με τις εμπορικές ενότητες των μονοκρυσταλλικών κυττάρων να υπερβαίνουν το 15%. [4]
- Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο: Τεμαχισμένα κομμάτια χυτού πυριτίου. Τα κύτταρα αυτά είναι λιγότερο ακριβά να κατασκευαστούν και λιγότερο αποδοτικά από τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου. Η αποδοτικότητα προσεγγίζει το 18% των ερευνητικών κυττάρων, και οι εμπορικές ενότητες πλησιάζουν αποδοτικότητα 14%. [4]
- $\text{CuInSe}_2$ : Πολυκρυσταλλικό υλικό με ενσωματωμένη τεχνολογία λεπτών ταινιών Copper Indium Diselenide ( $\text{CuInSe}_2$ ). Έχει φθάσει σε ερευνητική αποδοτικότητα το 17,7 %, παραδίδει την υψηλότερη ολοκληρωμένη αποδοτικότητα ενότητας για τις πλήρεις μεγέθους ενότητες δύναμης, που φθάνουν πάνω από 11%. [4]
- Telluride καδμίου ( $\text{CdTe}$ ): Λεπτό πολυκρυσταλλικό υλικό, που προέρχεται από την ηλεκτροαπόθεση. Οι μικρές εργαστηριακές συσκευές εξάτμισης υψηλού ποσοστού πλησιάζουν την αποδοτικότητα 16%, με τις εμπορικά ταξινομημένες ενότητες (7200 $\text{m}^2$ ) που μετριοούνται στις ενότητες αποδοτικότητας και παραγωγής 8,34% σε περίπου 7%. [4]



Σχήμα 2.2: Γεωμετρία Φωτοβολταϊκού στοιχείου

### 2.1.4 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Παράγουν «δωρεάν» ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο που είναι μια ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή
- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά, χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη, με ελάχιστη συντήρηση.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- Λειτουργούν και με νεφελώδη ουρανό (διάχυτη ακτινοβολία).
- Δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια σε αντίθεση με τα θερμικά συστήματα.
- Κατασκευάζονται από πυρίτιο, ένα από τα πλέον σε αφθονία στοιχεία.
- Πλέον αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του.
- Μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή ισχύων (από mW μέχρι MW).
- Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος/βάρος επομένως κατάλληλα για εγκατάσταση σε στέγες.

- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Είναι δυνατόν να συναρμολογηθούν τυποποιημένα στοιχεία μαζικής παραγωγής σε σύστημα οποιουδήποτε μεγέθους (και βαθμό απόδοσης πρακτικά ανεξάρτητο του μεγέθους) για να καλύψουν μικρές, μέσες και μεγάλες ενεργειακές ανάγκες.
- Έχουν πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής ( τουλάχιστον 20 ή 30 χρόνια)[1],[5]

### 2.1.5 Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι τα ακόλουθα:

- Τα φωτοβολταϊκά, όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη. Το κλίμα αυτό όμως έχει αλλάξει δραματικά. Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της Σχεδίαση Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.[1],[5]
- Απαίτηση χρήσης σχετικά μεγάλων επιφανειών για την εγκατάσταση τους λόγω της μικρής απόδοσης
- Ο απαραίτητος περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό για να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης από τη ρύπανση (αιθάλη, σκόνη, αλάτι θαλάσσης κτλ).
- Υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών σε συσσωρευτές λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως το κόστος είναι αυξημένο.[1]

### 2.1.6 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

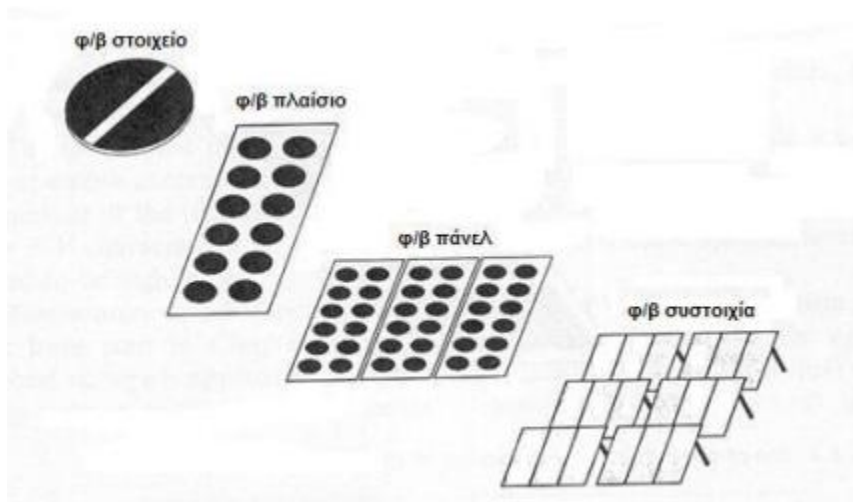
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών με βασικό κριτήριο την απαίτηση ισχύος. Το εύρος αυτό αναφέρεται στην κάλυψη ηλεκτρικής ισχύος καταναλωτικών προϊόντων χαμηλής ισχύος, όπως αριθμομηχανές και ωρολόγια, έως συστήματα μεγάλης ισχύος, όπως της τροφοδοσίας απομακρυσμένων ή όχι από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα κτιριακών συγκροτημάτων ή ακόμη και νησιών. Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχει διάκριση των Φ/Β συστημάτων σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι: [1]

- Απομονωμένα ή εκτός δικτύου Φ/Β συστήματα (Stand-alone – Off-grid).

- Συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (On-grid).

Τα απομονωμένα συστήματα δεν είναι συνδεδεμένα σε κάποιο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας γι' αυτό ονομάζονται επίσης και Φ/Β συστήματα εκτός δικτύου (off-grid). Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που χρειάζεται ηλεκτρική ισχύς σε κάποιο σημείο όπου είναι αδύνατη η μεταφορά ενέργειας ή αν υπάρχει η επιθυμία πλήρους αυτονομίας ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιο δίκτυο και έχουν τυπικές τιμές ισχύος 100 Wp έως 200 kWp. [1]

Για να εξασφαλιστούν οι επιθυμητές τιμές τάσης και ρεύματος, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση πολλών Φ/Β κυττάρων σε σειρά και παράλληλα. Οι συνδέσεις των κυττάρων μεταξύ τους γίνονται πίσω από μία γυάλινη επιφάνεια, πάνω στην οποία τοποθετούνται τα κύτταρα. Η γυάλινη πλάκα ενισχύεται με ένα πλαίσιο από αλουμίνιο ή από ευγενή χάλυβα που βελτιώνει την σταθερότητα της. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζεται η ηλιακή γεννήτρια ή διαφορετικά το Φ/Β πλαίσιο. Το συνηθέστερο μέγεθος μιας ηλιακής γεννήτριας κυμαίνεται μεταξύ του 0,25 έως 1m<sup>2</sup>. Για να υπάρξει μεγαλύτερη ισχύ πρέπει να τοποθετηθούν πολλές ηλιακές γεννήτριες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Μια τέτοια σύνθεση λέγεται φωτοβολταϊκό πάνελ. Πολλά τέτοια σε σειρά ή παράλληλα δημιουργούν μια Φ/Β συστοιχία. Πολλές Φ/Β συστοιχίες μαζί διαμορφώνουν ένα Φ/Β Πάρκο ή Φ/Β Σύστημα. [6]



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση Φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας των Φ/Β συστημάτων, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- Αυτόνομα Φ/Β συστήματα.
- Υβριδικά Φ/Β συστήματα.[1],[6]

### **2.1.6.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα**

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα η αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από Φ/Β συστοιχίες. Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι άμεση στους καταναλωτές ή μέσω συσσωρευτών. Επίσης, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι συνεχούς (DC) ή εναλλασσόμενης τάσης (AC). Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχει διάκριση των αυτόνομων συστημάτων ως εξής:

### **2.1.6.2 Άμεσης Τροφοδοσίας του Φορτίου (Direct Coupled)**

Στα συγκεκριμένα συστήματα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στο φορτίο και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες δεν απαιτείται τακτική λειτουργία του συστήματος καθώς και σε φορτία συνεχούς ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα άντλησης νερού. [59]

### **2.1.6.3 Με αποθήκευση της Παραγόμενης Ενέργειας**

Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδιάζονται σύμφωνα με τις επιθυμητές μέρες αυτονομίας, κάτι το οποίο καθορίζει το μέγεθος των συσσωρευτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα Φ/Β συστήματα τροφοδοσίας φωτισμού οδών, διατάξεων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού σε δύσβατες περιοχές, τροχόσπιτων και φάρων σε θαλάσσιες περιοχές. [59]

### **2.1.6.4 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα**

Όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν καλύπτεται από τη Φ/Β συστοιχία σε αυτόνομα Φ/Β συστήματα τότε χρησιμοποιείται ο συνδυασμός της με κάποια άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι πηγές μπορεί να είναι συμβατικών καυσίμων ή από Α.Π.Ε. Κυρίως χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ανεμογεννήτριες αντίστοιχα. Συχνά στα συστήματα αυτά προβλέπεται αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν εφαρμογές στις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστική εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων σε κατοικίες. [59]

## **2.1.7 Ο Ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του**

Ηλιακός συλλέκτης είναι μια συγκεκριμένη επιφάνεια (με συγκεκριμένες διαστάσεις) που ο σκοπός της είναι να συλλέγει την ηλιακή ακτινοβολία και ανάλογα με την περίπτωση (τεχνολογία που χρησιμοποιείται) να τη μετατρέψει στην ανάλογη μορφή ενέργειας. Ηλεκτρική ενέργεια όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκά, θερμική ενέργεια όταν πρόκειται για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες υγρού μέσου κλπ. Το σημαντικό

ζήτημα είναι με ποιο τρόπο θα τοποθετηθεί ο συλλέκτης έτσι ώστε να συλλέγει όσο το δυνατό καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία.[4],[7]



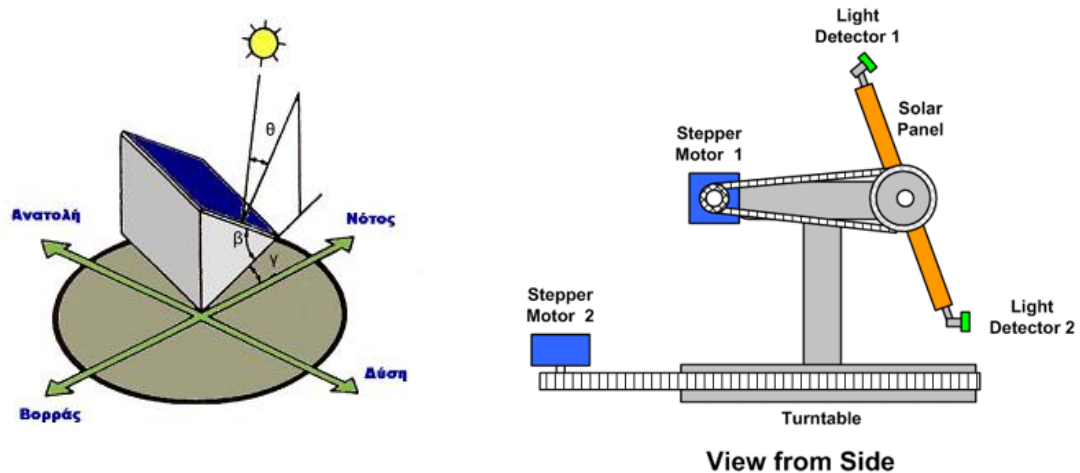
Σχήμα 2.4.: Ηλιακοί συλλέκτες.

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες, την κλίση και την αζιμούθια γωνία.

- Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  μέχρι  $180^\circ$ . Για γωνίες  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.[4],[7]
- Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ( $\gamma$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με την  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση.[4],[7]

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων, solar panel with tracking), ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι

διατάξεις όμως αυτές είναι λίγο πιο πολύπλοκες, πολύ πιο δαπανηρές και χρειάζονται συντήρηση. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών που χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα, είτε μέγιστη απόδοση στον ελάχιστο χώρο. .[4],[7]



**Σχήμα 2.5:** Αριστερά: Η κλίση ( $\beta$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\gamma$ ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης. Δεξιά: φωτοβολταϊκή διάταξη με tracking.[4]

### 2.1.8 Η Βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας με την παρακάτω σχέση:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \sin \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega$$

όπου  $\delta$  (απόκλιση Γης),  $\beta$  (κλίση συλλέκτη),  $\gamma$  (αζιμουθιακή γωνία),  $\varphi$  (γεωγραφικό πλάτος),  $\omega$  (ωριαία γωνία Ήλιου).[8],[9]

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή. Οι γενικοί κανόνες για την βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι οι ακόλουθοι:[7],[8]

- Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ). [7],[8]
- Κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ - 15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ).[7],[8]
- Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ - 15^\circ$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.[7],[8]
- Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο  $\gamma$ ) είναι νότιος ( $\gamma = 0^\circ$ ), ενώ απόκλιση κατά  $20^\circ - 30^\circ$  από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.[7],[8]

### 2.1.9 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης

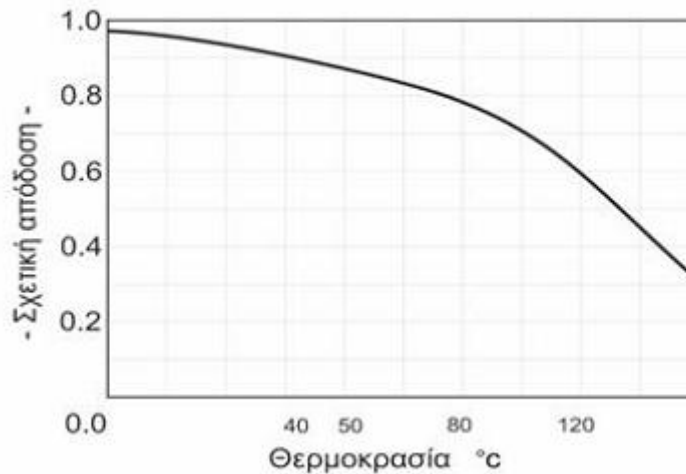
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν σκούρο χρώμα, γεγονός που βοηθά στην απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοστών ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και στην αύξηση της θερμοκρασίας τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας όμως, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης που δημιουργείται στα άκρα του Φ/Β κυττάρου, συγκεκριμένα πάνω από τους  $25^\circ\text{C}$  για κάθε ένα παραπάνω βαθμό υπάρχει αντίστοιχη μείωση της απόδοσης κατά 0,4%. [9]

Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί σε θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$  που συχνά, ιδίως τους θερινούς μήνες, διαφέρει σημαντικά από την πραγματική θερμοκρασία .[9]

Πιο συγκεκριμένα, έχει μετρηθεί ότι λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά  $25^\circ\text{C}$  ως  $30^\circ\text{C}$ , ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσος όρος στους υπολογισμούς συνήθως χρησιμοποιείται αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $30^\circ\text{C}$ . Επίσης, για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $s_\theta$  με τον οποίο πολλαπλασιάζεται ο συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζεται και για τα Φ/Β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιείται το γινόμενο  $\eta_\pi \cdot s_\theta$ . [10]

Σε συμβατική θερμοκρασία ο  $s_\theta$  είναι ίσος με την μονάδα, και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή.





**Σχήμα 2.6:** Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους.. [4]

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικό. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη. [10]

Όταν η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάται ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας ( $\sigma_p$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_p$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων για τους υπολογισμούς, χρησιμοποιείται το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης  $n_{\pi}$ , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία  $\sigma_{\theta}$  και για τη ρύπανση  $\sigma_p$ . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή: [9],[10]

$$E = \Pi \cdot S \cdot n_{\pi} \cdot \sigma_p \cdot \sigma_{\theta}$$

## 2.2 Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού έχει τις ρίζες της βαθιά μέσα στην ιστορία και στην εξέλιξη του ανθρώπου (ανεμόμυλοι, ναυσιπλοΐα κτλ). Τις τελευταίες όμως δεκαετίες, ο άνεμος συνδέθηκε με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες. Παράλληλα, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οι γενικότερες κλιματολογικές αλλαγές του πλανήτη οδήγησαν σε μια ευρεία ευαισθητοποίηση και στο πρωτόκολλο του Κιότο. Έτσι, πλέον η διείδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ενεργειακή παραγωγή είναι ραγδαία, δημιουργούνται ολοένα και μεγαλύτερα αιολικά πάρκα ενώ οι Α/Γ τείνουν να μπουν και στον οικιακό τομέα.[11]

### 2.2.1 Γενικά Στοιχεία

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη. Χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθεί ότι κατά μέσο όρο, κάθε κιλοβατώρα που παράγεται καίγοντας άνθρακα ή πετρέλαιο, εκλύει στην ατμόσφαιρα ένα περίπου κιλό διοξειδίου του άνθρακα, 10-20 γραμμάρια διοξειδίου του θείου, 1,5-15 γραμμάρια οξειδίων του αζώτου, 1-5 γραμμάρια μικροσωματιδίων και πολλούς ακόμη επικίνδυνους αέριους ρύπους.[11]

Αν υπήρχε η δυνατότητα, με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε πολλούς αιώνες πριν, με διαφορετικό τρόπο και συνεχίζεται μέχρι σήμερα με ένα πολύ ευοίωνο μέλλον.

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/sec, σε ύψος 10m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την "πρώτη" περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.[11]



Σχήμα 2.7: Ανεμόμυλοι και Αιολικά Πάρκα

Η συστηματική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού κάθε χώρας συμβάλει:

- Στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- Στον σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων και συμβάλει στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο MW αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας .[11]

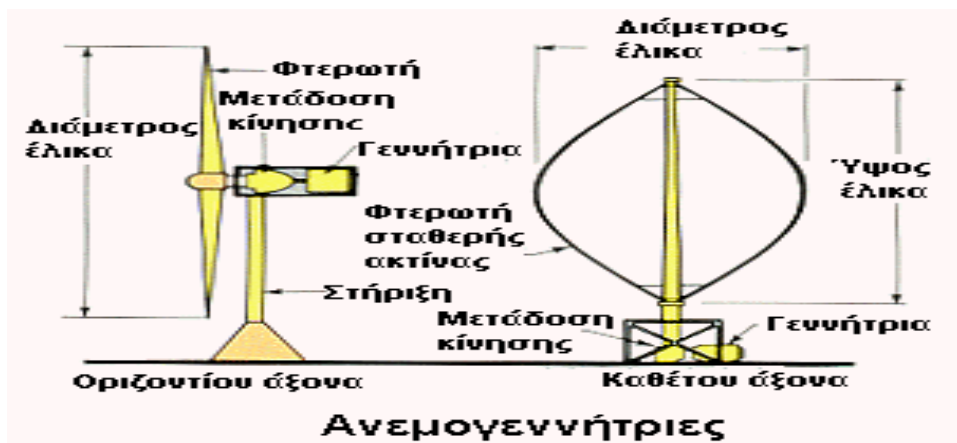
Τα ενδεχόμενα προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, τηλεόραση και τηλεπικοινωνίες που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και επίσης πιθανά προβλήματα αισθητικής. [11]

### 2.2.2 Τεχνολογία Ανεμογεννητριών

Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν μόνο με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο (μετατροπή περιστροφικής κίνησης σε ευθύγραμμη). Μόνο τέτοιου είδους Α/Γ χρησιμοποιούνται εμπορικά.[11],[12]

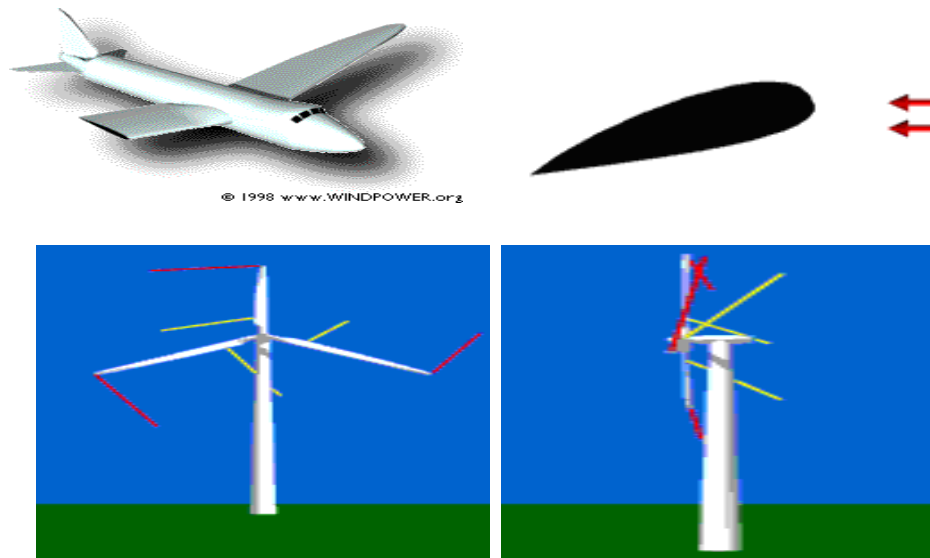
- Ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα όπου παραμένει σταθερός. Το βασικό πλεονέκτημα του δεύτερου είδους είναι ότι δεν χρειάζεται yaw control και το gear box με τη γεννήτρια τοποθετούνται στο έδαφος. Όμως, η ταχύτητα ανέμου κοντά στο έδαφος είναι χαμηλή καθώς και ο βαθμός απόδοσης, ενώ χρειάζεται εκκίνηση της μηχανής. Η μοναδική μηχανή τέτοιου είδους είναι η Darrieus ενώ τέτοιες Α/Γ χρησιμοποιούνται σπανιότατα. Με την αύξηση της ισχύος και των διαστάσεων των Α/Γ εκτιμάται ότι στα υπεράκτια αιολικά πάρκα τέτοιου είδους Α/Γ θα βρουν εφαρμογή.[11], [12]



Σχήμα 2.8: Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου και Κατακόρυφου Άξονα

### 2.2.2.1 Στοιχεία Αεροδυναμικής

Η λειτουργία μιας Α/Γ στηρίζεται στην αεροδυναμική και στις βασικές αρχές της αεροναυπηγικής. Όσον αφορά το περύγιο του αεροπλάνου, η ταχύτητα του ανέμου στην επάνω επιφάνεια του φτερού είναι μεγαλύτερη από ότι στην κάτω, οπότε η πίεση είναι χαμηλότερη από κάτω. Έτσι, η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο φτερό προκαλούν την ανύψωσή του. Αν η θεωρία αυτή μεταφερθεί στο περύγιο της Α/Γ συνεπάγεται ότι σε κάθε περύγιο ασκείται μία συνισταμένη δύναμη που προκαλεί ροπή και τελικά περιστροφή .[12]



Σχήμα 2.9: Αναπαράσταση δυνάμεων

Καθώς οι Α/Γ έχουν περίπου σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η ταχύτητα του ακροπτερυγίου είναι 64m/s ενώ στο  $\frac{1}{4}$  του μήκους του πτερυγίου γύρω στα 16m/s. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στο μέσο έχουν και μία προς τα πίσω συνιστώσα.[12]

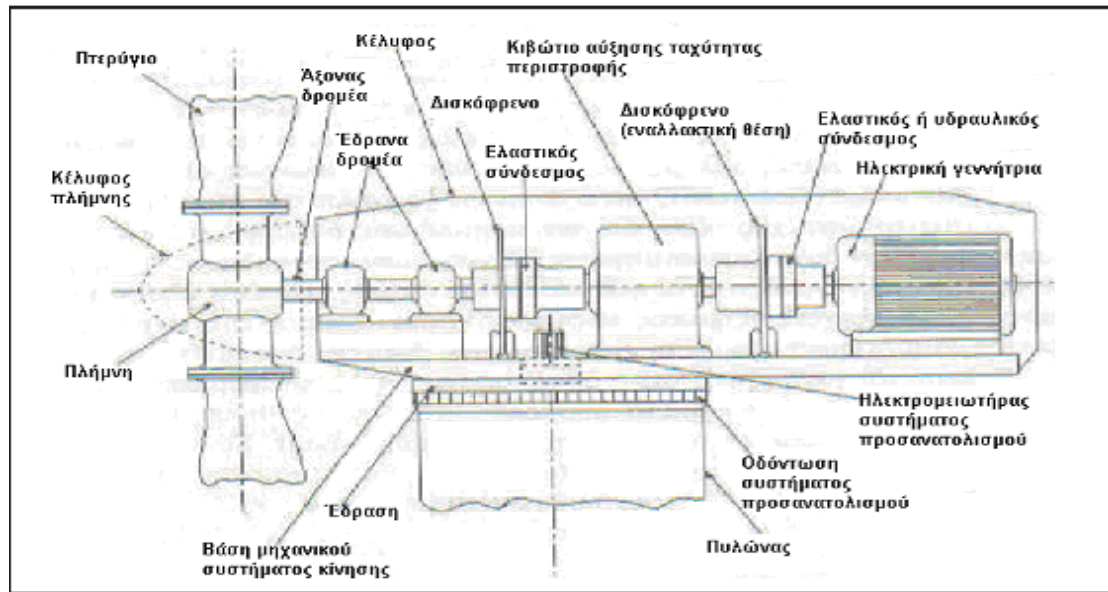
Πρέπει να αναφερθεί ακόμα ότι τα πτερύγια της Α/Γ παρουσιάζουν ένα twist το οποίο εξασφαλίζει την κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και τη δημιουργία του stall effect σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.[12]

### 2.2.2.2 Δομή Ανεμογεννήτριας

Μια ανεμογεννήτρια αποτελείται συνήθως από τα παρακάτω μέρη:[13]

- Ανεμόμετρο (Anemometer): Μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταβιβάζει τα ανεμολογικά δεδομένα σε έναν ελεγκτή.
- Πτερύγια (Blades): Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρία πτερύγια. Ο άνεμος πάνω στα πτερύγια δημιουργεί άνωση (lift) που έχει σαν αποτέλεσμα μια ροπή γύρω από τον άξονα περιστροφής και αναγκάζει τα πτερύγια να περιστρέφονται.
- Φρένο (Brake): Ένα δισκόφρενο το οποίο μπορεί να λειτουργεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά για να σταματήσει τον κινητήρα σε περίπτωση ανάγκης.
- Ελεγκτής (Controller): Ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή σε ταχύτητες ανέμου περίπου 8-10 μίλια την ώρα και κλείνει τη μηχανή περίπου στα 65 μίλια την ώρα. Οι ανεμογεννήτριες δε μπορούν να δουλεύουν σε ταχύτητες ανέμου πάνω απ' τα 65 μίλια την ώρα γιατί οι γεννήτριές τους μπορούν να υπερθερμανθούν ή/και τα πτερύγια τους να σπάσουν.

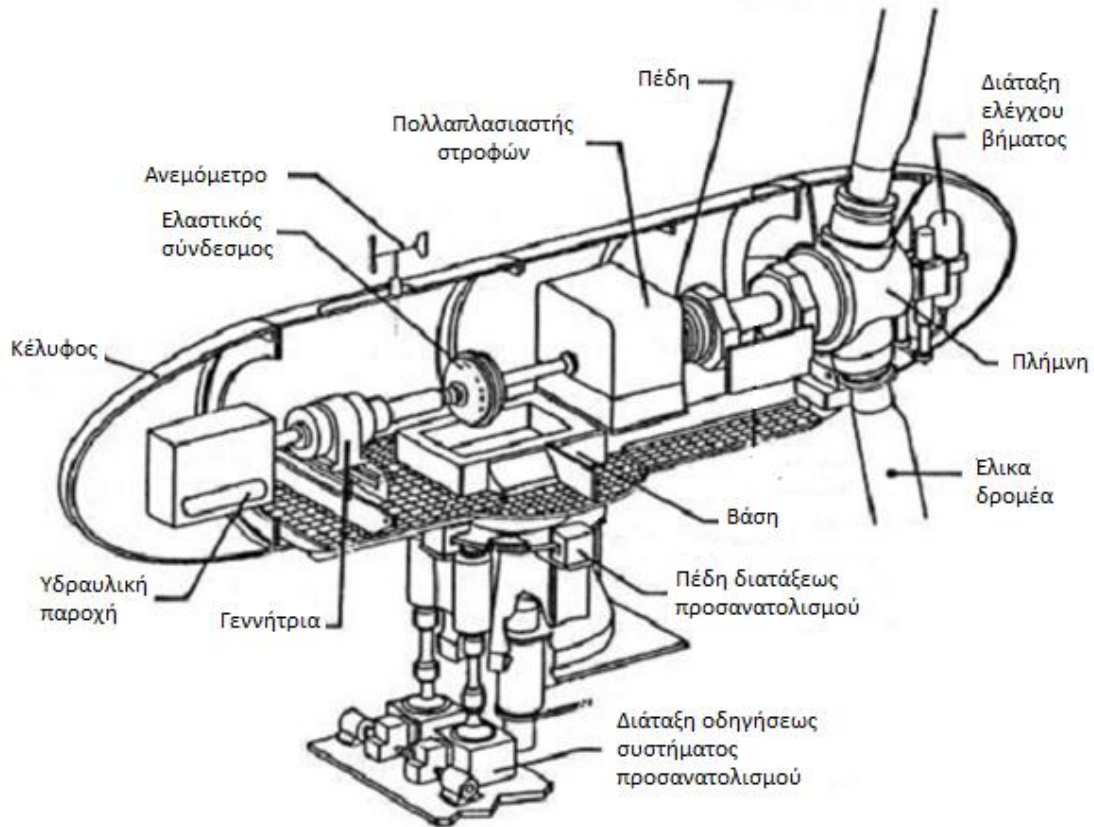
- Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box): Το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από τις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό στις 1200 με 1500 στροφές ανά λεπτό. Η ταχύτητα περιστροφής απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι από τα πιο ακριβά μέρη μιας ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί έχουν μελετήσει και δημιουργήσει γεννήτριες οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής χωρίς να απαιτούνται κιβώτια ταχυτήτων.[13]
- Γεννήτρια (Generator): Συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 50 ή 60 Hz.
- Άξονας υψηλής ταχύτητας (High-speed Shaft): Οδηγεί τη γεννήτρια.
- Άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low-speed Shaft): Ο ρότορας κινεί τον άξονα χαμηλής ταχύτητας περίπου στις 30 με 60 στροφές ανά λεπτό.
- Κέλυφος (Nacelle): Ο ρότορας συνδέεται με το κέλυφος, το οποίο βρίσκεται πάνω απ' τον πύργο και περιλαμβάνει το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και το φρένο. Ένα κάλυμμα προστατεύει τα μέρη εντός του κελύφους. Μερικά κελύφη είναι αρκετά μεγάλα ώστε να μπορεί ένας τεχνικός να κάθεται όρθιος μέσα σε αυτό ενώ δουλεύει.
- Κλίση (Pitch): Τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ώστε να μειώνουν τα αεροδυναμικά φορτία (lift) πάνω στην περύγωση στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου και να τα μειώνουν στις μικρές ταχύτητες.
- Ρότορας (Rotor): Τα πτερύγια και το κεντρικό σημείο ονομάζονται ρότορας.
- Πύργος (Tower): Οι πύργοι είναι κατασκευασμένοι από χαλύβδινο κέλυφος ή χωροδικτύωμα. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος, οι υψηλοί πύργοι περιέχουν γεννήτριες που συλλέγουν περισσότερη ενέργεια και παράγουν περισσότερο ηλεκτρισμό
- Ανεμοδείκτης (Wind vane): Υπολογίζει την διεύθυνση του ανέμου και επικοινωνεί με τον οδηγό εκτροπής ώστε να προσανατολίζεται στον άνεμο.
- Οδηγός εκτροπής (Yaw drive): Φέρνει τις ανεμογεννήτριες προς τον άνεμο. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν υπήνεμα δεν απαιτούν οδηγό εκτροπής. Ο άνεμος μόνος φέρνει υπήνεμα το ρότορα.
- Κινητήρας εκτροπής (Yaw motor): δίνει ενέργεια στον οδηγό εκτροπής.[13]



Σχήμα 2.10: Σχηματική Αναπαράσταση Ανεμογεννήτριας Οριζόντιου Άξονα

### 2.2.2.3 Λειτουργία Ανεμογεννήτριας

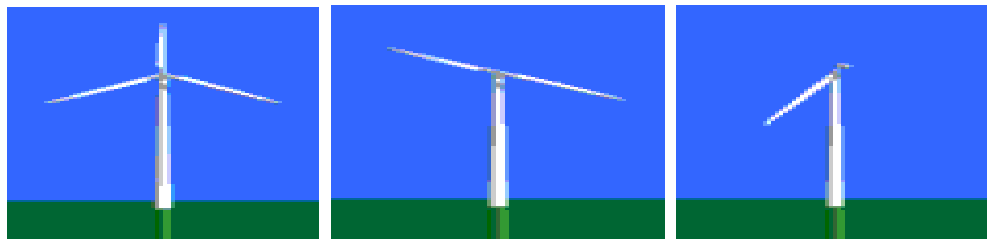
Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερόγιο μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος (Σχήμα 2.11). Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, υπάρχει σύστημα πέδησης που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της.[11]



Σχήμα 2.11: Επεξήγηση Λειτουργίας

Μία τυπική ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα εξής μέρη:

- **Πτερύγια Ανεμογεννήτριας:** Οι ανεμογεννήτριες με ζυγό αριθμό πτερυγίων δεν είναι δημοφιλείς και ο σημαντικότερος λόγος είναι η σταθερότητα τους. Μια Α/Γ με περιττό αριθμό πτερυγίων (τουλάχιστον τριών) μπορεί να θεωρηθεί παρόμοια με έναν δίσκο κατά την υπολογισμό των δυναμικών ιδιοτήτων της μηχανής. Η πιο κοινή μορφή είναι αυτή με 3 πτερύγια. Η Α/Γ δύο πτερυγίων δεν συνηθίζεται παρόλο που έχει το πλεονέκτημα μειωμένου κόστους και βάρους. Επιπλέον, τείνει να έχει δυσκολία διείσδυσης στη αγορά, επειδή απαιτείται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής για να παραχθεί η ίδια ενέργεια. Τέλος, προκαλεί αυξημένο θόρυβο και απαιτείται πιο σύνθετο σχέδιο, ο δρομέας πρέπει να είναι σε θέση να γείρει προκειμένου να αποφευχθούν οι απότομοι κραδασμοί. [11]



Σχήμα 2.12: Ανεμογεννήτριες με 1,2 και 3 πτερύγια



Τέλος, η Α/Γ ενός μόνο πτερυγίου έχει τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της προηγούμενης σε μεγαλύτερο βαθμό, ενώ επιπλέον χρειάζεται αντίβαρο για να αντισταθμίζεται το βάρος του μοναδικού πτερυγίου που φέρει.

- **Πέδηση Ανεμογεννήτριας:** Για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις. Σε ειδικές κατασκευές εκτός από την παρουσία των αερόφρενων (π.χ. επίπεδες πλάκες κάθετες στην επιφάνεια του πτερυγίου) χρησιμοποιούνται και μικρά αλεξίπτωτα, που απελευθερώνονται φυγοκεντρικά μετά από κάποιο όριο στροφών.[11]
- **Πλήμνη:** Αποτελεί το δεύτερο συστατικό της πτερωτής (δρομέα) και περιλαμβάνει εκείνο το μέρος της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο προσαρμόζονται τα πτερύγια. Η τελική της μορφή εξαρτάται τόσο από το είδος της πτερωτής όσο και από τους επιθυμητούς βαθμούς ελευθερίας στη θέση σύνδεσης πτερυγίων και άξονα.[11]
- **Pitch control-Stall effect:** Οι Α/Γ είναι σχεδιασμένες να παράγουν μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια σε ταχύτητες ανέμου περί τα 12-15m/s και να είναι αξιόπιστες από θέμα ζημιάς ή και καταστροφής σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Αυτό επιτυγχάνεται με τις εξής μεθόδους:[11]

**Pitch control:** Σε αυτόν τον έλεγχο, ο controller της Α/Γ υπολογίζει συνέχεια την παραγόμενη ενέργεια και αν υπερβαίνει κάποιο όριο ρυθμίζει αυτόματα την κλίση των πτερυγίων ως προς τον άνεμο.

**Passive Stall control:** Η γωνία του πτερυγίου ως προς τον άνεμο παραμένει σταθερή. Όμως, το φτερό είναι έτσι φτιαγμένο από πλευράς αεροδυναμικής ώστε σε υψηλές ταχύτητες ανέμου να δημιουργούνται δύνες στην πίσω πλευρά του εμποδίζοντας την υπερτάχυνση. Έχει το μειονέκτημα ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου υπάρχει μείωση της παραγόμενης ενέργειας κάτω από την ονομαστική.

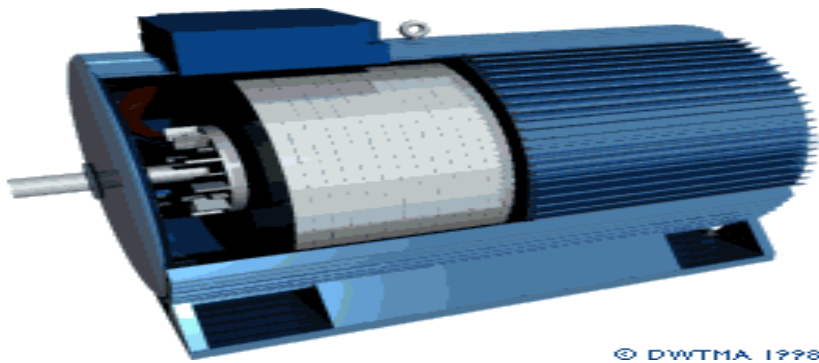
**Active Stall control:** Οι Α/Γ που χρησιμοποιούν αυτό το είδος ελέγχου διαθέτουν φτερά με ρυθμιζόμενη γωνία (pitch control). Σε ονομαστική ταχύτητα ανέμου τα πτερύγια στρέφονται στην αντίθετη κατεύθυνση από ότι σε Pitch control ώστε να εξασφαλίζεται ακρίβεια στην εξερχόμενη ενέργεια ακόμα και σε συνθήκες με απότομες ριπές ανέμου.

**Yaw control:** Η Α/Γ πρέπει να είναι πάντα σε κάθετη διεύθυνση ως προς τον άνεμο. Αυτό εξασφαλίζεται με το yaw control καθώς τα δεδομένα από τον ανεμοδείκτη στην κορυφή του πύργου περνούν από επεξεργασία και η Α/Γ στρέφεται κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου ενώ υπεισέρχεται κι ένα σφάλμα, το οποίο προκαλεί ανομοιομορφία στις φορτίσεις του πύργου και στη ροπή του κάθε πτερυγίου. Επιπλέον υπάρχει έλεγχος για την αποφυγή περιστροφής των καλωδίων σε περίπτωση σταθερής σε φορά περιστροφής.



Σχήμα 2.13: Pitch control

- **Κιβώτιο Ταχυτήτων:** Η δύναμη από την περιστροφή των πτερυγίων μεταφέρεται στη γεννήτρια μέσω του άξονα, και του κιβωτίου ταχυτήτων. Εάν χρησιμοποιούνταν μια συνηθισμένη γεννήτρια (με δύο, τέσσερις, ή έξι πόλους), άμεσα συνδεδεμένη με ένα ρεύμα AC 50 Hz, θα έπρεπε να υπάρχει Α/Γ με δυνατότητα περιστροφής μεταξύ 1000 και 3000 rpm. Με διάμετρο πτερυγίων περίπου 40 μέτρα, θα αναπτυσσόταν περιστροφική ταχύτητα στα άκρα των πτερυγίων διπλάσια από την ταχύτητα του ήχου. Μια άλλη δυνατότητα θα ήταν να χρησιμοποιηθεί μια αργή γεννήτρια με πολλούς πόλους, έτσι θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μία γεννήτρια 200 πόλων για να υπάρχει περιστροφική ταχύτητα 30 περιστροφών/λεπτό. (Πρέπει να σημειωθεί ότι με την πρόοδο των ηλεκτρονικών ισχύος, έχουν καταργηθεί τα gear box, καθώς η ρύθμιση ταχύτητας, συχνότητας και λοιπών χαρακτηριστικών γίνονται εξολοκλήρου από συστήματα ανόρθωσης-αντιστροφής).[11]
- **Γεννήτρια:** Υπάρχουν 2 τύποι γεννητριών που χρησιμοποιούνται, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες.

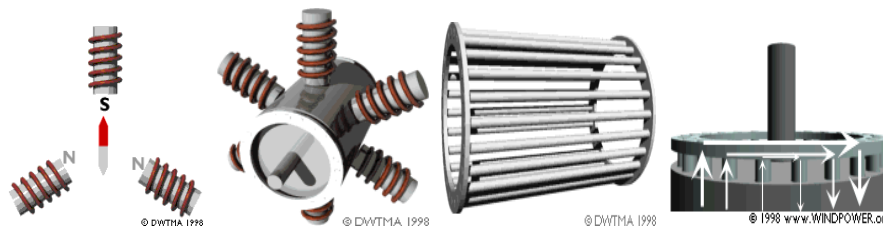


Σχήμα 2.14: Σχηματική Αναπαράσταση Γεννήτριας

**Σύγχρονη Γεννήτρια:** Μια σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται από ένα δρομέα και ένα στάτη. Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται μία πυξίδα και τρεις μαγνήτες, είναι μια διάταξη προσέγγισης μιας 2-πολικής μηχανής. Όταν μια δύναμη αναγκάσει την περιστροφή του δρομέα (2, 3 ή 4 πόλων) τότε θα δημιουργηθεί τάση επαγωγής και τα πηνία θα αρχίσουν να διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Στις σύγχρονες μηχανές η ταχύτητα του δρομέα είναι η σύγχρονη, δηλαδή έχει την ίδια συχνότητα(50Hz) με το εναλλασσόμενο ρεύμα.[12]

Επομένως για να επιτευχθεί μικρότερη περιστροφική ταχύτητα δρομέα πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των πόλων. Συνήθως χρησιμοποιούνται 4 ή 6 πόλοι. Η επιλογή αριθμού πόλων έχει να κάνει με το κόστος και το μέγεθος της γεννήτριας καθώς μία μικρή και αργή γεννήτρια είναι πιο ακριβή σε σχέση με μια μεγάλη και γρήγορη.

Στην πράξη, οι σύγχρονες γεννήτριες μαγνητών δεν χρησιμοποιούνται ευρέως καθώς οι μόνιμοι μαγνήτες απομαγνητίζονται λόγω των ισχυρών μαγνητικών πεδίων μέσα στη γεννήτρια. Ένας άλλος λόγος είναι ότι οι ισχυροί μαγνήτες είναι αρκετά ακριβοί, ακόμα και σήμερα.[12]

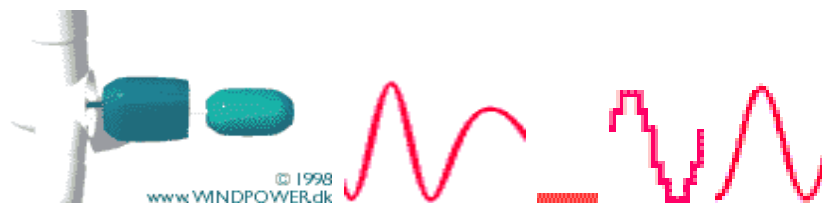


Σχήμα 2.15: Ρότορας Σύγχρονης (αριστερά) και Ασύγχρονης (δεξιά) Γεννήτριας

**Ασύγχρονη γεννήτρια:** Αυτού του είδους η γεννήτρια παρουσιάζει μεγάλη αξιοπιστία και χαμηλό κόστος ενώ παράλληλα παρουσιάζει μηχανικές ιδιότητες πολύ χρήσιμες για την Α/Γ (ολίσθηση, ικανότητα υπερφόρτωσης). Η βασική διαφορά της σύγχρονης και της ασύγχρονης γεννήτριας σχετίζεται με το δρομέα ο οποίος αποτελείται από ράβδους αλουμινίου και χαλκού .[12]

Μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του δρομέα και του στάτη υπάρχει μια μικρή γωνία ενώ και τα δύο πεδία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Επομένως, ο δρομέας στρέφεται με λίγο μικρότερη ή μεγαλύτερη ταχύτητα ανάλογα σε λειτουργία γεννήτριας ή κινητήρα. Αυτή η διαφορά ταχύτητας ονομάζεται ολίσθηση, κυμαίνεται περίπου στο 1% και ποικίλει ανάλογα με την ροπή που δημιουργείται από τον άνεμο στο δρομέα και τις τριβές. Αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους που χρησιμοποιούνται περισσότερο ασύγχρονες γεννήτριες. Πρέπει τέλος να αναφερθεί ότι για τη λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας χρειάζεται να μαγνητιστεί ο στάτης (πυκνωτές, δίκτυο) .[12]

- **Σύνδεση με το Ηλεκτρικό Δίκτυο:** Η γεννήτρια (σύγχρονη, ασύγχρονη) παράγει εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας και τιμής. Για να συνδεθεί λοιπόν με το δίκτυο πρέπει να μετασχηματιστεί (σχήμα 2.16)



**Σχήμα 2.16:** Διαδικασία Μετασχηματισμού για σύνδεση με το Ηλ/κό Δίκτυο

Το πρώτο στάδιο είναι η μετατροπή AD-DC, με ανόρθωση ελεγχόμενη με θυρίστορ ή αλλά διακοπτικά στοιχεία. Μετά γίνεται η αντίστροφη διαδικασία με κατάλληλους inverter έτσι ώστε να προκύψει τάση σταθερής συχνότητας και μέτρου. Τέλος με τα κατάλληλα φίλτρα εξαλείφονται οι αρμονικές περιττής τάξης έτσι ώστε να βρίσκεται η τάση μέσα στα επιτρεπόμενα όρια αρμονικής παραμόρφωσης (THD < 5%). [12]

Με την παραπάνω διαδικασία επιτυγχάνεται κάτι πολύ σημαντικό, η Α/Γ δεν είναι αναγκαίο να στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, κι έτσι παράγει για κάθε ταχύτητα ανέμου την μέγιστη δυνατή ισχύ προσαρμόζοντας την ταχύτητα των ακροπερυγίων και απαλείφοντας τυχόν κραδασμούς από δυνατές ριπές του ανέμου. Επιπλέον, με τα ηλεκτρονικά ισχύος ρυθμίζεται η άεργος καταναλισκόμενη ισχύς.

Το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι το κόστος το οποίο βέβαια μειώνεται σταδιακά ενώ παράλληλα υπάρχουν πολλές απώλειες ενέργειας. [13]

- **Ηλεκτρονικός Έλεγχος:** Όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα της Α/Γ μπορούν και ελέγχονται καθώς τα στοιχεία συγκεντρώνονται σε έναν υπολογιστή. Μέσω του υπολογιστή, τα δεδομένα (από 100-500 παράμετροι) στέλνονται (μέσω GSM modem, οπτικών ινών, τηλεφωνικών γραμμών) στο κεντρικό control panel όπου γίνεται επεξεργασία και κατάλληλες ρυθμίσεις. [13]
- **Πύργος Στήριξης – Πυλώνας:** Υπάρχουν 3 είδη πύργων. [13]

**Σωληνοειδής πύργος από χάλυβα:** Κατασκευάζεται σε τομείς μειούμενης διαμέτρου ανάλογα με το ύψος οι οποίοι ενώνονται στο σημείο εγκατάστασης.

**Δικτυωτός πύργος από συγκολλημένο ατσάλι:** Έχει χαμηλότερο κόστος αλλά δεν είναι αισθητικά ωραίος.

**Πύργος μικρής διαμέτρου που στηρίζεται σε συρματόσχοινα:** Χρησιμοποιείται σε μικρού μεγέθους Α/Γ,

Γενικά ο πυλώνας κατασκευάζεται από χάλυβα ώστε να δύναται να αντέχει ισχυρές μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές, ενώ η έδρασή του γίνεται συνήθως σε δύο ένσφαιρα έδρανα ικανά να παραλαμβάνουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα φορτία. [13]

### 2.2.3 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις της Ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες επηρεάζουν σε ένα βαθμό το περιβάλλον που τοποθετούνται, είτε μεμονωμένα είτε πολλές μαζί, με τους εξής τρόπους: [13]

- **θόρυβος:** Το επίπεδο του ήχου σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια είναι 50-60 dB, που είναι αντίστοιχο με την ένταση μιας συζήτησης. Σε απόσταση 200 μέτρων, η στάθμη του θορύβου πέφτει στα 44 dB, στα υπήνεμα της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητα ανέμου 8 m/s, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες ο ήχος επικαλύπτεται από τη βουή του ανέμου.[13]
- **πανίδα-ορνιθοπανίδα:** Το θέμα της προστασίας των πουλιών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό αιολικών πάρκων. Έτσι, πρέπει να αποφεύγεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε περιοχές προστασίας πουλιών, περιοχές RAMSAR ή περιοχές ευαίσθητες οικολογικά. [13]
- **φυσικό τοπίο:** Οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές. Ακόμα όμως, κι όταν υπάρχουν κατοικημένες περιοχές κοντά σε αιολικά πάρκα, η αλλοίωση του τοπίου δεν είναι μεγάλη. [13]



---

## *Κεφάλαιο 3. Υβριδικά Συστήματα*

---





### 3.1 Γενικά Στοιχεία

Ο στοχαστικός χαρακτήρας πολλών μορφών ΑΠΕ θέτει ορισμένους τεχνικοοικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς κατά τη χρήση τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Για παράδειγμα η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει τη χρήση αποθηκευτικών μέσων εξαιτίας των διακυμάνσεων στη διάθεσή της. Το ίδιο ισχύει και για την αιολική ενέργεια. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν άλλες μορφές ΑΠΕ που παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και υπάρχει καλύτερη προβλεψιμότητα τους, όπως η γεωθερμία και η βιομάζα. Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην έρευνα και ανάπτυξη των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [14].

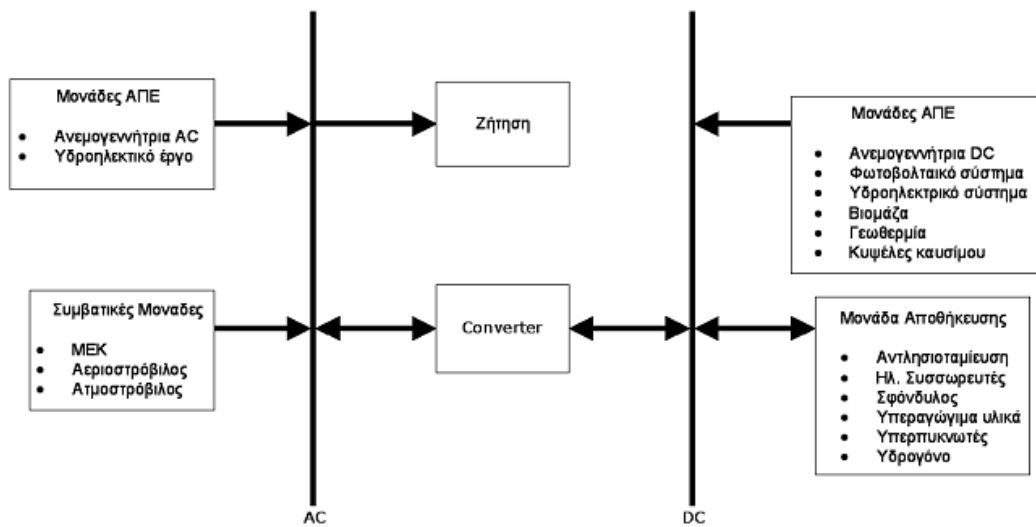
Ο όρος «Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας», ή «Υβριδικά Συστήματα», αναφέρεται σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνται πολλαπλές διατάξεις ενεργειακής μετατροπής, ή περισσότερα του ενός καύσιμα για την ίδια διάταξη, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας. Ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Με αυτήν την έννοια, τα υβριδικά συστήματα αποτελούν μία εναλλακτική επιλογή αντί των συμβατικών συστημάτων, τα οποία τυπικά βασίζονται στην παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα [15]. Τα Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας (ΥΣΕ) είναι δυναμικά συστήματα ισχύος, τα οποία χρησιμοποιούν πάνω από μία μεθόδους παραγωγής ενέργειας, για κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Στόχος ενός υβριδικού συστήματος, είναι η υποστήριξη μονάδων ΑΠΕ και βοήθεια ενσωμάτωσής τους στο ενεργειακό ισοζύγιο. Ο συνδυασμός πολλών τεχνολογιών παράλληλα, εξασφαλίζει σταθερότητα και ασφάλεια στο σύστημα, ελαχιστοποιώντας τις μεταβολές της τάσης και εξασφαλίζοντας τη ζήτηση.[14]

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να βρουν εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις οι πιο σημαντικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- Συστήματα Διασυνδεδεμένα στο Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας
- Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα
- Τροφοδότηση Απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού

Τα βασικά μέρη που αποτελούν ένα ΥΣΕ είναι: α) οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, β) οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, γ) η μονάδα ελέγχου παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συντονισμού των διάφορων διαθέσιμων επιλογών για κάλυψη των αναγκών. Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ΑΠΕ,

διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και συστήματα διαχείρισης φορτίου.[14]



Σχήμα 3.1: Βασικά μέρη υβριδικού συστήματος ενέργειας

Ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που:[14]

- Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ.
- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού. Ως ενέργεια που απορροφά ο υβριδικός σταθμός από το δίκτυο ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ενέργειας που μετράται κατά την είσοδό της στο σταθμό και της ενέργειας που αποδίδεται απευθείας στο δίκτυο από τις μονάδες ΑΠΕ του υβριδικού σταθμού. Η διαφορά αυτή υπολογίζεται, για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, σε ωριαία βάση. Αν για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας εφαρμόζεται τεχνολογία διαφορετική από αυτή των φωτοβολταϊκών, μπορεί να χρησιμοποιείται και συμβατική ενέργεια που δεν απορροφάται στο δίκτυο, εφόσον η χρήση της ενέργειας αυτής κρίνεται αναγκαία για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η χρησιμοποιούμενη συμβατική ενέργεια δεν μπορεί να υπερβαίνει το 10% της συνολικής ενέργειας που παράγεται, σε ετήσια βάση, από τις μονάδες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δε μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

### 3.2 Πλεονεκτήματα Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα εκμεταλλεύονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας και παρέχουν ενέργεια τέτοιας ποιότητας όπως αυτής του δικτύου, με ένα εύρος από 1 kW μέχρι πολλές εκατοντάδες kW. Έτσι μπορούν να αναπτυχθούν σαν αυτόνομα καινούρια και ανεξάρτητα συστήματα μέσα σε μικρά συστήματα διανομής ενέργειας (mini-grids) και να ενταχθούν σε υπάρχουσες θερμικές μονάδες βασιζόμενες στο πετρέλαιο μετά από τις απαραίτητες επεμβάσεις στο υπάρχον σύστημα.[14]

Παράλληλα, τα υβριδικά συστήματα βρίσκουν εφαρμογή σε περιοχές όπου η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και η μεταφορά του καυσίμου θεωρούνται ανοικονομικές επιλογές (αγροτικές περιοχές, μη διασυνδεδεμένα νησιά). Παρέχουν επίσης την δυνατότητα μελλοντικής σύνδεσης με το δίκτυο στις περιοχές που γίνεται η εγκατάστασή τους. Επιπλέον, λόγω της υψηλής αποδοτικότητας τους και της αξιοπιστίας τους, τέτοιου τύπου συστήματα μπορούν να φανούν χρήσιμα σαν μία αποτελεσματική λύση παροχής ισχύος σε περιπτώσεις διακοπών παροχής ή ακόμη και σε εξειδικευμένους καταναλωτές, όπως οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί και οι νοσοκομειακές μονάδες.[14]

Τα υβριδικά συστήματα που περιέχουν τεχνολογία με καύσιμο (ντιζελογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, μονάδες παραγωγής ενέργειας από βιομάζα) λειτουργούν με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση, επειδή προβλέπεται παραγωγή ενέργειας από αυτό μόνο σε περιόδους υψηλής ζήτησης φορτίου ή χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με μία αυτόνομη μονάδα συμβατικής τεχνολογίας μόνη της.[14]

Εάν στα προηγούμενα χαρακτηριστικά προστεθούν τα κλασικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, όπως η ανυπαρξία κινδύνου ενεργειακού εφοδιασμού από τα ορυκτά καύσιμα, η προβλεψιμότητα του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η γρήγορη εγκατάσταση των τεχνολογιών, η ασφαλής λειτουργία των εγκαταστάσεων και η ανταγωνιστικότητά τους, σε οικονομικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό και πολιτικό επίπεδο, σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας (κυρίως της πυρηνικής και του πετρελαίου), τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας μπορούν να αποτελέσουν την καλύτερη αποκεντρωμένη λύση.[14]

### 3.3 Συστήματα Διασυνδεδεμένα στο Κεντρικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα απαρτίζονται από τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό των δικτύων

αυτών είναι ότι διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα και ότι η τάση και η συχνότητα δεν επηρεάζονται από την παρουσία επιπρόσθετων γεννητριών ή φορτίων, είναι δηλαδή δίκτυα άπειρου ζυγού. Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε ένα τέτοιο δίκτυο, τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή αέργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να εγκαθίστανται είτε αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ως συστήματα υποστήριξης σε περιπτώσεις διακοπής του ηλεκτρικού δικτύου, είτε μπαίνουν σε λειτουργία τις ώρες αιχμής όταν η τιμή της kWh είναι υψηλή [14]. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μονάδες ΑΠΕ οι οποίες είτε διασυνδέονται απευθείας στο δίκτυο, είτε αποθηκεύουν την ενέργειά τους σε μέσα αποθήκευσης ώστε αυτή να χρησιμοποιηθεί όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Συνήθως οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή αυτή είναι η τιμή της παραγόμενης kWh από την κάθε μορφή ΑΠΕ και το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Σε μερικές περιπτώσεις η παρουσία του υβριδικού σταθμού επηρεάζει την ικανότητα του κεντρικού δικτύου να διατηρεί σταθερή τάση και συχνότητα, οπότε γίνεται λόγος για ασθενές δίκτυο και συνήθως απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου.[14]

### **3.4 Τροφοδότηση Απομονωμένων Φορτίων ή Φορτίων Ειδικού Σκοπού**

Υβριδικά συστήματα χωρίς δίκτυο διανομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση απομονωμένων φορτίων ή φορτίων ειδικού σκοπού, τα οποία μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, ή ακόμα και μεταβλητής τάσης και συχνότητας. Παραδείγματα τέτοιων φορτίων αποτελούν οι ηλεκτρικοί φάροι, ο φωτισμός της σήμανσης στους αυτοκινητόδρομους, η άντληση νερού, τα συστήματα αφαλάτωσης καθώς και οι ηλεκτρικοί μύλοι. Μία εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος θα μπορούσε να περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ σε συνδυασμό με μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος. Σε αυτά τα συστήματα ο έλεγχος συχνότητας και τάσης καθώς και η διαχείριση της περίσσειας ισχύος δεν αποτελούν τις κύριες παραμέτρους σχεδίασης. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα χρησιμοποίησης και συμβατικής γεννήτριας που λειτουργεί όποτε η παραγωγή ΑΠΕ δεν επαρκεί, αλλά συνήθως δεν λειτουργεί παράλληλα με τις γεννήτριες ΑΠΕ [15].

### 3.5 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων ή νησιωτικών περιοχών που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η μετατροπή ενός συμβατικού αυτόνομου σταθμού σε υβριδικό αποσκοπεί κατά κύριο λόγο στην ελάττωση της κατανάλωσης καυσίμου και των ωρών λειτουργίας των συμβατικών γεννητριών. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα, είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, πρέπει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής άεργου ισχύος ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από τις μονάδες ΑΠΕ του συστήματος ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιον τρόπο ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Τα αυτόνομα δίκτυα δεν έχουν άπειρο ζυγό, οπότε επηρεάζονται έντονα από την σύνδεση επιπρόσθετου φορτίου ή γεννήτριας. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου [15]

#### 3.5.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόνομους σταθμούς, μπορεί να στηρίζεται στη συνεργασία ηλεκτρικών πηγών διαφόρου είδους, όπου μια πηγή να δρα συμπληρωματικά προς την άλλη, ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου αυτόνομου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο σχήμα 3.2.[14]



**Σχήμα 3.2:** Γενικό διάγραμμα αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το βασικό συστατικό ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής είναι οι διάφορες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορούν να συνεργαστούν με σκοπό την εξυπηρέτηση των καταναλωτικών αναγκών του συστήματος με αξιόπιστο και οικονομικό τρόπο. Τέτοιες ενεργειακές πηγές μπορούν να αποτελέσουν τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες, τα θερμικά ηλιακά, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, ή και ακόμα οι κυψέλες καυσίμου.[14] Ταυτόχρονα, σε ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής κρίνεται απαραίτητη η παρουσία συστοιχιών μπαταρίας οι οποίες δρουν επικουρικά για να καλύψουν τις ταχείες μεταβολές τόσο του φορτίου, όσο και της παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας έχουν παίξει οι μονάδες ηλεκτρόλυσης που αποθηκεύουν την περίσσεια ισχύος σε υδρογόνο. Συνήθως, όπως δείχνει και το σχήμα 3.2, το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει επίσης, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας, βοηθητικές γεννήτριες, όπως ντιζελογεννήτριες, για την αντιμετώπιση εκτάκτων περιστάσεων (συντήρηση ή βλάβη συστήματος, μειωμένο ανανεώσιμο δυναμικό, τροφοδότηση έκτακτων φορτίων, κ.α.) σε περιπτώσεις που οι συσσωρευτές είναι αδύνατο να ανταποκριθούν. Τέλος, η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος και η αύξηση της απόδοσής του απαιτούν διατάξεις για τη ρύθμιση και μετατροπή της τάσης, ή άλλες διατάξεις προστασίας και ελέγχου.[15]

### 3.5.2 Οι Συσσωρευτές στα Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα

Για τη σωστή εκλογή, σχεδίαση και λειτουργία των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι όπως:

- Τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας
- Οι συσκευές προσαρμογής και ελέγχου της ισχύος
- Το φορτίο
- Οι μετεωρολογικές συνθήκες
- Ο συγκεκριμένος τύπος του συσσωρευτή.[15]

Ο τρόπος με τον οποίο θα λειτουργήσει ένας συσσωρευτής επηρεάζει τόσο τον τύπο όσο και την ιδιαίτερη κατασκευή των στοιχείων του. Σ' ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ο κύκλος λειτουργίας των συσσωρευτών καθορίζεται κυρίως από:

- Το προφίλ του φορτίου
- Την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη χρονική σχέση της με το φορτίο
- Την ύπαρξη ή μη εφεδρικής πηγής ενέργειας. [15]

### 3.5.3 Αυτόνομα συστήματα με εφεδρική πηγή ενέργειας

Στα συστήματα αυτά υπάρχει μια εφεδρική πηγή, ενώ για περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας ή μεγάλης ζήτησης υπάρχουν και συσσωρευτές με χωρητικότητα που κυμαίνεται από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες, ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου που πρέπει να καλύψει το ηλιακό σύστημα και τις κλιματολογικές συνθήκες. Γενικά ο κύκλος λειτουργίας είναι παρόμοιος με των συσσωρευτών των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο. Ωστόσο αν υπάρχει διαθέσιμη αρκετή χωρητικότητα (μερικές μέρες) προκύπτουν κάπως χαμηλότεροι ρυθμοί φόρτισης/εκφόρτισης και λιγότεροι πλήρεις κύκλοι στη μονάδα του χρόνου.[14]

### 3.5.4 Ρυθμιστές, Μετατροπείς, Αντιστροφείς

Η καλή λειτουργία και η αυξημένη απόδοση των υβριδικών συστημάτων υποβοηθείται συχνά με τη χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, συνήθως ηλεκτρονικών ισχύος, που επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η κάθε ενεργειακή πηγή. Ο ρυθμιστής φόρτισης (charge controller) της μπαταρίας είναι μια τέτοια διάταξη, αποτελεί το σύνδεσμο μεταξύ της όποιας ενεργειακής πηγής, της μπαταρίας και του φορτίου και έχει ως στόχο να αποτρέψει την υπερφόρτιση και την βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας.[14]

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται στο υβριδικό σύστημα και ανεμογεννήτριες, πριν το ρυθμιστή φόρτισης συνδέεται και ένας ανορθωτής τάσης (rectifier) ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγει η μηχανή σε συνεχές, προκειμένου, μέσω του ρυθμιστή φόρτισης, η περίσσεια ενέργειας να οδηγηθεί και να αποθηκευτεί κατάλληλα στη συστοιχία των συσσωρευτών.[14]

Ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει να διατηρείται η τάση εξόδου της ενεργειακής πηγής, είτε αυτή προέρχεται από Φ/Β, είτε από ανορθωμένη τάση ανεμογεννήτριας, στην επιθυμητή τιμή, έχοντας ταυτόχρονα την ικανότητα, όταν οι συσσωρευτές του συστήματος φορτισθούν πλήρως, να διοχετεύει την περίσσεια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στην εκάστοτε ενεργειακή πηγή σε κατάλληλες αντιστάσεις ή προς τη γη, προστατεύοντας έτσι τους συσσωρευτές από τους κινδύνους της υπερφόρτισης.[14]

Επίσης, η τάση φόρτισης των συσσωρευτών μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί εντελώς από την τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας, με την παρεμβολή ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος. Ο μετατροπέας αυτός παραλαμβάνει την τάση που δίνει η Φ/Β γεννήτρια, που είναι αναγκαστικά ασταθής λόγω των διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, τη μετατρέπει στην ευνοϊκή τάση για τη φόρτιση των συσσωρευτών και τη σταθεροποιεί, ώστε να εξασφαλίζονται οι βέλτιστες συνθήκες φόρτισης [5]

Παρόλο που ένα υβριδικό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει χωρίς ρυθμιστή φόρτισης και αυτό συμβαίνει συχνά σε μικρά συστήματα, η μακροχρόνια λειτουργία των αυτόνομων υβριδικών συστημάτων απαιτεί τη λειτουργία ρυθμιστή φόρτισης, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη το υψηλό κόστος αγοράς των συσσωρευτών. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός ρυθμιστή φόρτισης είναι τα εξής:[16]

- Μικρή εσωτερική κατανάλωση ρεύματος (<5 mA)
- Υψηλό βαθμό απόδοσης (96% - 98%)
- Διακοπή του φορτίου αν εμφανιστεί βαθιά εκφόρτιση
- Τακτική φόρτιση σε υψηλότερη τάση
- Προστασία από αντίστροφη πολικότητα
- Προστασία από υπερφόρτιση
- Λειτουργία σε θερμοκρασίες 0°C-50°C.[16]

Όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα ενός αυτόνομου συστήματος, τόσο πρέπει να λαμβάνονται περισσότερα υπόψη στο σχεδιασμό του. Με κατάλληλη διαχείριση της ενέργειας η χρήση των συλλεκτών και η διάρκεια ζωής ευαίσθητων μονάδων του συστήματος μπορούν να βελτιωθούν. Για το λόγο αυτό συνιστάται το σύστημα να έχει πίνακα ελέγχου (control panel) που να πληροφορεί το χρήστη για την τρέχουσα κατάσταση του και να του δίνει συμβουλές για το πώς να αντιδράσει σε περίπτωση ανάγκης. Ο πίνακας ελέγχου είναι η μονάδα στην οποία φαίνεται η κατάσταση του συστήματος κάθε στιγμή. Έχει επικοινωνία με όλες τις μονάδες και μπορεί σε περίπτωση που εμφανισθεί κάποιο πρόβλημα να διακόψει τη λειτουργία, ώστε να προστατευθεί το σύστημα [16].

Συγκεκριμένα για τα Φ/Β συστήματα, εκτός από το ρυθμιστή τάσης, υπάρχουν και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως είναι οι ρυθμιστές ισχύος, γνωστοί ως MPPT (Maximum Power Point Trackers), δηλαδή διατάξεις παρακολούθησης του σημείου της μέγιστης ισχύος. Ο προορισμός τους είναι να επιδιώκουν τη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας στο σημείο της καμπύλης τάσης-έντασης που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση, όσο επιτρέπει ο συντελεστής πλήρωσης (FF). Στη συνέχεια, με τον μετατροπέα τάσης, η τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας μετατρέπεται στην απαιτούμενη για τη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος. Πάντως, το κόστος των διατάξεων αυτών είναι σημαντικό, και έτσι, συνήθως παραλείπονται στα σχετικά μικρής ισχύος Φ/Β συστήματα [5].

Τέλος, μια πολύ σημαντική διάταξη στο σχεδιασμό ενός αξιόπιστου αυτόνομου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί ο αντιστροφέας τάσης (inverter). Η



συγκεκριμένη ηλεκτρονική συσκευή έχει τη ικανότητα να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα των συσσωρευτών ή της εξόδου της Φ/Β γεννήτριας σε εναλλασσόμενο εξυπηρετώντας κατάλληλα το εναλλασσόμενο φορτίο του δικτύου. Κύρια κίνητρα για την προτίμηση της εναλλασσόμενης τάσης, και την τοποθέτηση μεταλλακτών και μετασχηματιστών, είναι ότι οι ηλεκτρικές συσκευές του εμπορίου είναι συνήθως κατασκευασμένες για εναλλασσόμενο ρεύμα και έχουν μικρότερο κόστος από τις αντίστοιχες του συνεχούς ρεύματος. Επίσης, η ανύψωση της τάσης, που γίνεται συγχρόνως με τη μετατροπή της από συνεχή σε εναλλασσόμενη, συνεπάγεται μείωση των απωλειών στους αγωγούς του δικτύου. Σημειώνεται, πάντως, ότι και η λειτουργία των παραπάνω διατάξεων συνοδεύεται με συχνά αξιόλογες απώλειες. Γενικά, συντελεστής απόδοσης των διαφόρων ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέρθηκαν είναι συνήθως περίπου 90-95%, εφόσον λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ, αλλά γίνεται πολύ μικρότερος όταν η ισχύς είναι μειωμένη.[14]

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αντιστροφείας τάσης αυτόνομου συστήματος είναι τα ακόλουθα [16]:

- Μεγάλο εύρος τάσης εισόδου (-10% με +30% της ονομαστικής τάσης)
- Τάση εξόδου όσο το δυνατόν πιο κοντά στην καμπυλοειδή κυματομορφή
- Μικρή διακύμανση στην συχνότητα και τάση εξόδου
- $\pm 8\%$  σταθερότητα τάσης,  $\pm 2\%$  σταθερότητα συχνότητας
- Υψηλός βαθμός απόδοσης στα μερικά φορτία. Βαθμός απόδοσης τουλάχιστον 90% στο 10% του φορτίου
- Ικανότητα να υπομένει μικρής διάρκειας υπερφορτώσεις για τις συνθήκες εκκίνησης συσκευών (π.χ. 2 με 3 φορές την ονομαστική ένταση του ρεύματος για 5s για το ψυγείο και το πλυντήριο)
- Ελάχιστες δυνατές υπερ-τάσεις για επαγωγικά και χωρητικά φορτία
- Ικανότητα να αντέχει βραχυκύκλωμα.

### 3.6 Συσσωρευτές

Για τη συνεχή λειτουργία των συστημάτων παραγωγής είναι απαραίτητη η δυνατότητα συσσώρευσης μέρους της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για να παρέχει αυτή στην κατανάλωση, όταν το σύστημα αδυνατεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια .[17]

Κύριος σκοπός μια μπαταρίας είναι η συσσώρευση της ηλεκτρικής ενέργειας (χωρητικότητα) με παράλληλη δυνατότητα συνεχούς απόδοσής της .Ο σκοπός

αυτός, εκπληρώνεται σε μια κατάλληλη και σωστή μπαταρία όταν έχει τις εξής ιδιότητες :

- Ικανοποιητικά υψηλή δεκτικότητα φόρτισης

Χαρακτηρίζεται από την όσο το δυνατό υψηλή ένταση ρεύματος φόρτισης, σε δεδομένη τάση φόρτισης και με αποφυγή πτώσης τάσης στο εσωτερικό της .Ο συντελεστής απόδοσης της φόρτισης βρίσκεται στο 90% περίπου .Επίσης η μπαταρία πρέπει να μπορεί να φορτίζεται και με ρεύμα χαμηλής τάσης.[17]

- Μεγάλη αντοχή σε κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης

Σημαίνει ότι είναι επιθυμητό η μπαταρία να είναι σε θέση να πετύχει μεγάλο αριθμό φορτίσεων – εκφορτίσεων .Ο αριθμός των κύκλων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το βάθος εκφόρτισης .Δηλαδή, όσο πιο μικρό το βάθος εκφόρτισης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κύκλος ζωής της μπαταρίας.[17]

- Δυνατότητα επαρκούς επαναφόρτισης

Η δυνατότητα επαρκούς επαναφόρτισης είναι δεδομένη όταν παρατηρείται το φαινόμενο της γρήγορης επαναφόρτισης μέχρι την ονομαστική της χωρητικότητα, με αμελητέες απώλειες στη συσσωρευμένη χωρητικότητα.[17]

- Απλή και αξιόπιστη λειτουργία

Για να υπάρξει απλή και αξιόπιστη λειτουργία είναι επιθυμητό κατά την διάρκεια ενός έτους να μπορεί να γίνει συμπλήρωση υγρών μια με δυο φορές και ότι πρέπει να διατηρείται η μπαταρία καθαρή, να μην υπάρχει υπερχειλίση υγρών και να αποφευχθούν τυχόν βραχυκυκλώματα των πόλων.[17]

### 3.7 Κατηγοριοποίηση Τεχνολογιών

Οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση δύο κριτήρια:

- Λειτουργία
- Μορφή αποθήκευσης.

Με βάση το πρώτο κριτήριο, οι τεχνολογίες διακρίνονται σε αυτές που αποσκοπούν πρωταρχικά στην ποιότητα και την αξιοπιστία της παρεχόμενης ισχύος και χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ονομαστικής ισχύος αλλά από σχετικά μικρό ενεργειακό περιεχόμενο, και σε αυτές που σχεδιάζονται για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Στην κατηγορία διαχείρισης ενέργειας εντάσσονται οι τεχνολογίες PHS,

CAES, TES, solar fuel, οι μπαταρίες μεγάλης κλίμακας, οι μπαταρίες ροής και οι κυψέλες καυσίμου, ενώ οι πυκνωτές/υπερπυκνωτές, η τεχνολογία SMES, οι σφόνδυλοι και οι μπαταρίες μικρής κλίμακας εντάσσονται στην κατηγορία ποιότητας ισχύος και αξιοπιστίας. [17]

Με βάση τη μορφή με την οποία αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε:

- Ηλεκτρική αποθήκευση: Ηλεκτροστατική αποθήκευση με τη χρήση πυκνωτών και υπερπυκνωτών, καθώς και μαγνητική αποθήκευση με τη χρήση τεχνολογίας SMES[17]
- Μηχανική αποθήκευση: Σε μορφή κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι) ή σε μορφή δυναμικής ενέργειας (PHS και CAES).[17]
- Χημική αποθήκευση: Με τη μορφή ηλεκτροχημικής ενέργειας (συμβατικές μπαταρίες, μπαταρίες ροής) ή με τη μορφή χημικής ενέργειας (κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες μετάλλου αέρα) ή με τη μορφή θερμοχημικής ενέργειας (τεχνολογία solar fuel).[17]
- Θερμική αποθήκευση: Αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας.[17]

### 3.8 Κατηγορίες Μπαταριών

#### 3.8.1 Μπαταρίες Μολύβδου Οξέως

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως (lead – acid), που εφευρέθηκαν το 1859, αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μορφή επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσκευών. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία. Στην κατάσταση πλήρους φόρτισης αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (κάθοδος) βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θειικό οξύ. Σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θειικό μόλυβδο, η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται και ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον θειικό οξύ και ουσιαστικά μετατρέπεται σε νερό. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση και την φόρτιση είναι [17], [18], [19]:



Οι διάφοροι τύποι συσσωρευτών μολύβδου – οξέος χωρίζονται στις εξής κατηγορίες σε σχέση με την τεχνολογία τους:

- Συσσωρευτές «ανοιχτού τύπου»
- Συσσωρευτές «κλειστού τύπου» με αναπνοή
- Συσσωρευτές «στεγνού τύπου» με βαλβίδα υπερπίεσης

Ανάλογα με τον τύπο της ανόδου οι μπαταρίες διακρίνονται σε τύπου Manhex, σωληνωτού τύπου και τύπου λεπτής επίπεδης πλάκας. Η ονομαστική τάση κάθε κελιού είναι περίπου 2 Volt [19]. Με κριτήριο τη λειτουργία, οι δύο κύριοι τύποι μπαταριών μολύβδου οξέως είναι οι flooded batteries και οι VRLA. Στις πρώτες ο ηλεκτρολύτης είναι σε υγρή μορφή και απαιτείται συστηματική προσθήκη αποσταγμένου νερού για σωστή λειτουργία. Σε περίπτωση υπερφόρτισης παρατηρείται υπερβολική ηλεκτρόλυση του νερού με ταυτόχρονη εκπομπή υδρογόνου και οξυγόνου από κάθε κελί, αέρια που συνιστούν ένα εκρηκτικό μίγμα. Για αυτό το λόγο απαιτείται η παρουσία μηχανισμού που σταματά τη διαδικασία φόρτισης όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη (trickle charge) [20]. Οι μπαταρίες VRLA διαφέρουν στο ότι σφραγίζονται με μία βαλβίδα ελέγχου της πίεσης και στο ότι ο ηλεκτρολύτης είναι ακινητοποιημένος σε μορφή gel ή σε απορροφητικό γυαλί (absorbent glass mat). Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των τελευταίων είναι η δραματική μείωση της απαιτούμενης συντήρησης, η μη εκπομπή όξινων αερίων, το μικρότερο βάρος και η πιο εύκολη τοποθέτηση, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος [21], [20], [22].

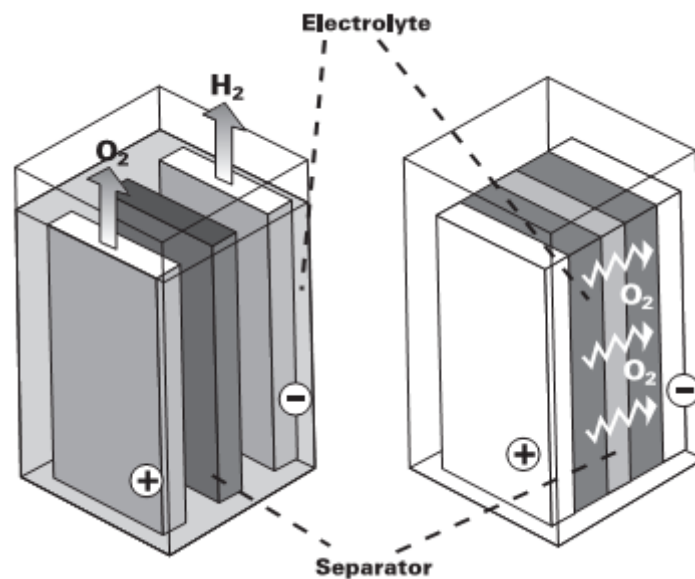
Η βασικότερη αιτία της τόσο ευρείας διάδοσης των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι το μικρό κόστος τους συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μπαταριών (\$200 – 400 ανά kWh), σε συνδυασμό με την εμπορική διαθεσιμότητα, αλλά και η πολυετής συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλούς βαθμούς απόδοσης (roundtrip efficiency) της τάξης του 70 - 90%, καθώς και από υψηλή αξιοπιστία [17]. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου οξέως είναι μικρότερος από 0,25% [23]. Επίσης, πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι οι μικροί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης που παρουσιάζει και η εξαιρετική συμπεριφορά στην παροχή βηματικής τάσης. Για τον τελευταίο λόγο οι μπαταρίες αυτές μπορούν να παρακολουθήσουν αποτελεσματικά τις γρήγορες αλλαγές του φορτίου, ιδιότητα που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος, UPS, διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας και για power bridging σε υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούν ΑΠΕ. [19]

Από την άλλη μεριά, οι εφαρμογές τους για διαχείριση ενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι πολύ περιορισμένες εξαιτίας της μικρής διάρκειας ζωής τους και της χαμηλής ειδικής ενέργειας, που εν γένει κυμαίνεται μεταξύ 25 και 50 Wh/kg. Επιπρόσθετα

αρνητικά χαρακτηριστικά αποτελούν η μειωμένη απόδοση σε πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές θερμοκρασίες (σύνηθες θερμοκρασιακό εύρος  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), η χρήση μη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, η ανάγκη για συχνή αναπλήρωση νερού και το συνιστώμενο μικρό βάθος εκφόρτισης. Παρόλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί σε μερικές εμπορικές εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας μεγάλης κλίμακας όπως στα BEWAG, Iberdrola, PREPA, Chino [[21],] [17]. Γενικά μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι ελκυστικές ως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές ισχύος 100 kW έως 10 MW [18].

### 3.8.2 Μπαταρίες Μολύβδου Οξέως Ανασυνδιασμένου Αερίου

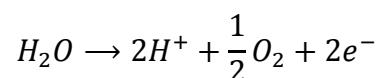
Μια παραλλαγή των μπαταριών Μολύβδου Οξέως, είναι οι μπαταρίες Μολύβδου Οξέως Ανασυνδιασμένου Αερίου (OPzV). Στις παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου οξέως, η υπερφόρτιση οδηγεί στην απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα αερίου υδρογόνου και οξυγόνου, οπότε ορισμένη ποσότητα νερού χάνεται από την μπαταρία, αρά πρέπει να ξαναγεμίζεται με νερό τακτικά.[24]



**Σχήμα 3.3:** Δομή μπαταρίας Μολύβδου Οξέως Ανασυνδιασμένου Αερίου

Η συνολική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα στη μπαταρία ανασυνδιασμένου αερίου OPzV, είναι:[24]

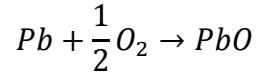
- Στο τέλος της φόρτισης ή σε περίπτωση υπερφόρτισης, αέριο οξυγόνο απελευθερώνεται στην θετική πλάκα



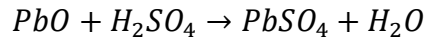
- Η εσωτερική της δομή επιτρέπει στο οξυγόνο που έχει παραχθεί στην θετική πλάκα να διαδοθεί προς την αρνητική πλάκα. Το οξυγόνο διαχέεται στον

ηλεκτρολύτη που είναι σε μορφή τζελ και στο μικροπορώδη διαχωριστικό στην αρνητική.

- Τότε το οξυγόνο κάνει χημική αντίδραση με τον σπογγώδη μόλυβδο του δραστικού υλικού και έτσι δημιουργείται οξείδιο του μολύβδου.

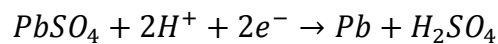


- Στη συνέχεια το οξείδιο του μολύβδου αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη που αποτελείται από θειικό οξύ και παράγεται θειικός μόλυβδος και νερό.



Μέρος του σπογγώδη μολύβδου έχει μεταβεί πλέον στην κατάσταση θειικού μολύβδου και το νερό που είχε καταναλωθεί στην θετική πλάκα, έχει πλέον αναπληρωθεί.

- Τέλος ο σπογγώδης μόλυβδος της αρνητικής πλάκας που είχε χημικά αποφορτιστεί (γινόμενος θειικός μόλυβδος), φορτίζεται ξανά ηλεκτροχημικά παράγοντας μόλυβδο και θειικό οξύ.



- Όσο η μπαταρία παραμένει σε πλήρη φόρτιση, τότε η ισορροπία διατηρείται.

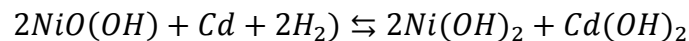
Εξαιτίας του ανασυνδιασμένου αερίου στην μπαταρία OPzV, το νερό διασπάται και αναπληρώνεται με τον ίδιο ρυθμό όταν βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση και δεν χρειάζεται συντήρηση για προσθήκη νερού, καθόλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Η μπαταρία OPzV είναι κατά τα άλλα ίδια σε χρήση με την απλή μολύβδου οξέως, απλά έχει υποστεί μια πολύ σημαντική μετατροπή, που βοήθησε στην καθιέρωσή της στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ.[24]

### 3.8.3 Μπαταρίες Νικελίου Καδμίου

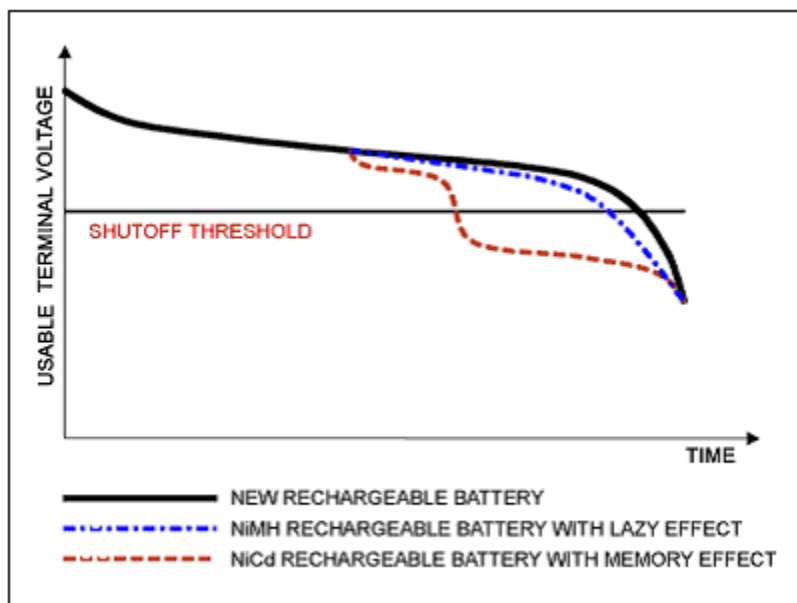
Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd) κατατάσσονται μαζί με τις μολύβδου οξέως από άποψη δημοτικότητας και τεχνολογικής ωριμότητας, αφού χρησιμοποιούνται για περίπου εκατό χρόνια. Τα κελιά αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτη με υδροξείδιο του καλίου και ένα διαχωριστή, ενώ συνήθως περικλείονται σε μεταλλική θήκη που σφραγίζεται με μία πλάκα εφοδιασμένη με βαλβίδα ασφαλείας. Το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο απομονωμένα το ένα από το άλλο μέσω του διαχωριστή τυλίγονται σε σπирάλ σχήμα μέσα στη θήκη. Σε κατάσταση πλήρους φόρτισης το θετικό ηλεκτρόδιο περιέχει υδροξείδιο του νικελίου και το αρνητικό κάδμιο. Η ονομαστική τάση εκφόρτισης του κελιού είναι 1,2 Volt σε ρυθμό εκφόρτισης 0,2C και ελαττώνεται με τη μείωση της

θερμοκρασίας. Η συνολική χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (με φορά προς τα δεξιά η εκφόρτιση) [17], [26], [27]:



Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου οξέως, οι νικελίου καδμίου έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας (50-75 Wh/kg), μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000 – 2500 κύκλοι), υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση (60 – 75%) είναι και πιο ακριβές [17], [21], [27]. Επιπλέον πλεονεκτήματα τους αποτελούν η αυξημένη αξιοπιστία και οι πολύ μικρές ανάγκες για συντήρηση, η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης και η εξαιρετική παροχή βηματικής τάσης. Για τους λόγους αυτούς είναι γενικά κατάλληλες για φορητές συσκευές, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, UPS και εκκίνηση κινητήρων. Ωστόσο, σήμερα οι φορητές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές χρησιμοποιούν άλλες τεχνολογίες ηλεκτροχημικής αποθήκευσης [17], [22]. Η τεχνολογία αυτή έχει χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Έχουν εγκατασταθεί υβριδικά συστήματα που διαθέτουν μπαταρίες νικελίου καδμίου ως διατάξεις αποθήκευσης, όπως το υβριδικό σύστημα στο Wales της Αλάσκας [28]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μεγαλύτερης ισχύος σύστημα ηλεκτροχημικής αποθήκευσης παγκοσμίως έχει εγκατασταθεί στο Golden Valley της Αλάσκας και χρησιμοποιεί μπαταρίες NiCd. Αποτελείται από τέσσερις συστοιχίες μπαταριών με 3440 κελιά η καθεμία και έχει ικανότητα απόδοσης ισχύος 40 MW για 7 min ή 27MW για 15 min.

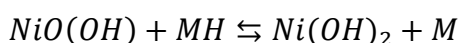
Το βασικό μειονέκτημά τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος (\$1000/kWh) εξαιτίας της ακριβής κατασκευαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό μέταλλο που εισάγει προβλήματα διάθεσης και ανακύκλωσης των μπαταριών νικελίου καδμίου [17],[21],[27]. Αρνητικό χαρακτηριστικό αποτελεί και το φαινόμενο μνήμης (memory effect), σύμφωνα με το οποίο όταν μία μπαταρία NiCd φορτίζεται και εκφορτίζεται εκατοντάδες φορές σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, τείνει να το «θυμάται» και τελικά μπορεί να εκφορτιστεί αποτελεσματικά μόνο μέχρι το ποσοστό αυτό. Στην πραγματικότητα, στο σημείο που αρχίζει η επαναφόρτιση παρατηρείται μία δραματική μείωση της τάσης της μπαταρίας, σαν να ήταν πλήρως εκφορτισμένη, ενώ πρωτογενώς η χωρητικότητα δεν μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, εάν το σύστημα που ηλεκτροδοτείται από την μπαταρία δε μπορεί να λειτουργήσει κατά τη διάρκεια της χαμηλής τιμής της τάσης, είναι αδύνατο να αξιοποιήσει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια, οπότε πρακτικά η μπαταρία εμφανίζει μειωμένη χωρητικότητα. Αν παρατηρηθεί το memory effect, μπορεί να εξαλειφθεί μετά από μία σειρά πλήρων εκφορτίσεων της μπαταρίας.



**Σχήμα 3.4:** Σύγκριση του memory effect στους συσσωρευτές NiCd και του lazy effect στους συσσωρευτές NiMH. Shutoff threshold είναι το ελάχιστο όριο τάσης για να μπορεί να αποδώσει ισχύ ο συσσωρευτής.

### 3.8.4 Μπαταρίες Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου

Οι μπαταρίες υδριδίου μετάλλου (NiMH) αποτελούν επέκταση της τεχνολογίας που εφαρμοζόταν στις μπαταρίες νικελίου καδμίου με την κύρια διαφορά να εντοπίζεται στην πλάκα της ανόδου που κατασκευάζεται από υδρίδιο ενός μετάλλου M. Οι συνολικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση (προς τα δεξιά) και κατά τη φόρτιση (προς τα αριστερά) είναι [29]:



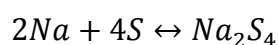
Η χρήση υδριδίου του μετάλλου αντί για κάδμιο εκμηδενίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μπαταριών NiCd, ενώ παράλληλα περιορίζεται η επίδραση του φαινομένου μνήμης, το οποίο εδώ αποκαλείται lazy effect [19]. Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες που παρουσιάζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 1000 κύκλους εκφόρτισης σε βάθος 80%. Η ειδική ενέργεια των μπαταριών NiMH είναι εν γένει 30 – 50% μεγαλύτερη από των μπαταριών NiCd, με μία αντιπροσωπευτική τιμή 70 Wh/kg [29]. Το σημαντικότερο μειονέκτημα έναντι της τεχνολογίας NiCd είναι τα υψηλότερα ποσοστά αυτοεκφόρτισης που κυμαίνεται μεταξύ 5 – 10% την πρώτη μέρα και σταθεροποιείται περίπου σε 0,5 – 1% την ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου [27]. Επιπλέον μειονεκτήματα είναι η χαμηλή αποδοτικότητα των κελιών τους, ο σχετικά χαμηλός βαθμός αξιοπιστίας, η υψηλή θερμοκρασία που δημιουργείται κατά την φόρτιση και το υψηλό τους κόστος, το οποίο όμως αναμένεται να μειωθεί δραματικά στο μέλλον [21], [19].

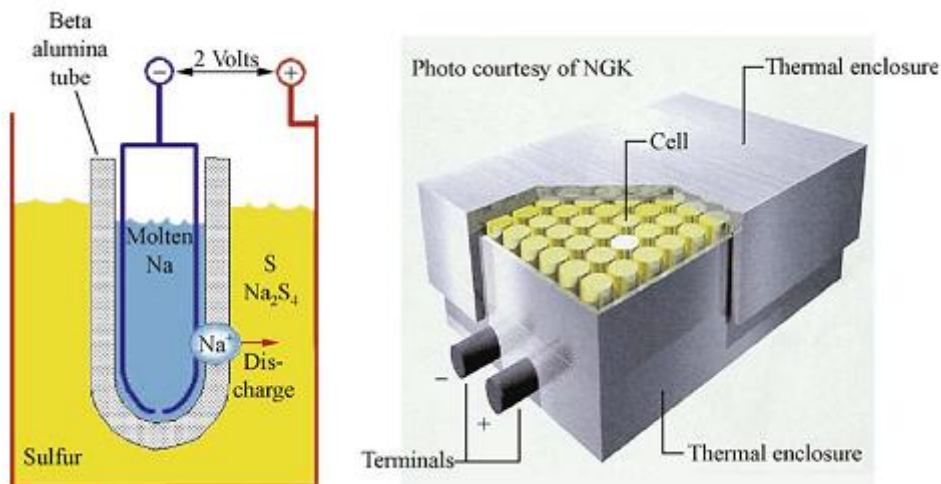


Η τεχνολογία NiMH έχει φτάσει σε μεγάλο βαθμό ωριμότητας για μία ποικιλία εμπορικών εφαρμογών μεταξύ των οποίων εφαρμογές μικρής ισχύος όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές και εργαλεία με κινητήρα, μέχρι εφαρμογές μεγάλης ισχύος όπως αεροδιαστημικές εφαρμογές και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα. Ακόμα, μέχρι σήμερα έχουν υλοποιηθεί επιτυχώς μερικά αποθηκευτικά συστήματα μεγάλης κλίμακας με τεχνολογία NiMH για σταθερά συστήματα εφεδρείας ηλεκτρικής ισχύος και εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής. Παράλληλα, γίνονται δοκιμαστικές εφαρμογές της τεχνολογίας ως αποθηκευτικό μέσο σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, ως εφεδρεία σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, καθώς και σε συστήματα κάλυψης αιχμής (peak shaving) [29].

### 3.8.5 Μπαταρίες Νατρίου Θείου

Οι μπαταρίες νατρίου – θείου (NaS) αποτελούν μία νέα τεχνολογία αποθήκευσης που προς το παρόν καταλαμβάνει ένα σχετικά μικρό μερίδιο της αγοράς, αλλά εκτιμάται ότι στο μέλλον θα γίνει εξαιρετικά δημοφιλής [30]. Κατασκευαστικά περιλαμβάνουν ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο με ενεργά στοιχεία τηγμένο θείο και τηγμένο νάτριο αντίστοιχα, τα οποία διαχωρίζονται από έναν στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη από β-οξείδιο του αργιλίου (solid beta alumina ceramic electrolyte), ο οποίος επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου αυτού. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης ενός κελιού, το νάτριο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα παρέχοντας τάση περίπου 2 Volt, ενώ τα κατιόντα νατρίου που προκύπτουν μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς το ηλεκτρόδιο τηγμένου θείου σχηματίζοντας πολυθειούχο νάτριο. Αυτή η διαδικασία είναι αντιστρέψιμη, καθώς κατά τη φόρτιση το εξωτερικό ρεύμα αναγκάζει το πολυθειούχο νάτριο να ελευθερώσει το κατιόν νατρίου στον ηλεκτρολύτη, ώστε να γίνει πάλι στοιχειακό νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο [17],[30]. Η συνολική χημική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):





Σχήμα 3.5: Η δομή μίας μπαταρίας NaS .

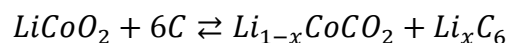
Στα θετικά της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται οι μεγάλες τιμές πυκνότητας ενέργειας και ισχύος που κυμαίνονται μεταξύ 100-240 Wh/kg και 150-230 W/kg αντίστοιχα. Η τυπική διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 2500 κύκλοι, χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (75-90%) και από ικανότητα παροχής βηματικής ισχύος για 30 sec πάνω από έξι φορές μεγαλύτερη από την συνεχή ονομαστική ικανότητα. Η τελευταία ιδιότητα καθιστά κατάλληλες και οικονομικές τις μπαταρίες NaS σε εφαρμογές που συνδυάζουν ποιότητα ισχύος και κάλυψη φορτίου [17]. Ακόμα, εξαιτίας της ύπαρξης του κεραμικού ηλεκτρολύτη που χαρακτηρίζεται από μηδενική αγωγιμότητα ηλεκτρονίων, εξαλείφεται το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούν υλικά φιλικά προς το περιβάλλον, το κόστος τους θεωρείται σχετικά χαμηλό (\$350/kWh), οι ανάγκες συντήρησης ασήμαντες και η περίοδος λειτουργίας πολύ ικανοποιητική [18],[30]. Από την άλλη, σημαντικό μειονέκτημα της τεχνολογίας αποτελεί η μη καταλληλότητα της για συγκεκριμένες εφαρμογές, δεδομένης της ανάγκης να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας τους σε υψηλά επίπεδα (μεταξύ 300 °C και 350 °C ), ώστε να είναι δυνατή η πραγματοποίηση του ηλεκτροχημικού φαινομένου [18].

Σε γενικές γραμμές οι μπαταρίες NaS είναι περισσότερο κατάλληλες για σταθερές εφαρμογές μεγάλης ισχύος και μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί για κάλυψη φορτίου (load leveling), peak shaving, παροχή έκτακτης ισχύος, UPS, βελτίωση ποιότητας ισχύος σε βιομηχανικές μονάδες και υποβοήθηση μονάδων ΑΠΕ [31]. Στην Ιαπωνία μόνο, έχουν γίνει έργα επίδειξης σε πάνω από 30 εγκαταστάσεις με συνολική ονομαστική ισχύ 20 MW και αποθηκευμένη ενέργεια κατάλληλη για κάλυψη φορτίου για 8 ώρες καθημερινά. Παραδείγματα αποτελούν η μονάδα 6 MW/8h στην επιχείρηση ηλεκτρικής ισχύος του Τόκυο και η μονάδα 8 MW/7,25 h στο εργοστάσιο της Hitachi. Η μεγαλύτερης ισχύος εγκατάσταση μπαταριών NaS είναι 34 MW/245MWh για σταθεροποίηση της ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου 51

MW στη βόρεια Ιαπωνία [17],[31]. Το 2002 στις ΗΠΑ ξεκίνησε η πρώτη επίδειξη συστήματος NaS στο Ohio με χωρητικότητα 7,2 MWh και δυνατότητα απόδοσης ισχύος έως 1,2 MW [31],[17]. Επίσης στην Ιαπωνία, το 2001 ο οργανισμός NEDO ανέπτυξε ένα υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από μία Α/Γ ισχύος 500 kW και σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες NaS ισχύος 400 kW, με βασικό στόχο την σταθεροποίηση των διαταραχών μικρής και μεγάλης διάρκειας της ισχύος εξόδου αλλά και την ενίσχυση της αξιοπιστίας [31].

### 3.8.6 Μπαταρίες Τεχνολογίας Λιθίου

Οι μπαταρίες που βασίζονται στο λίθιο συνιστούν μία σχετικά νέα τεχνολογία η οποία σήμερα εφαρμόζεται κυρίως σε φορητές συσκευές, αλλά στο σύντομο μέλλον αναμένεται η χρήση τους σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Η τεχνολογία περιλαμβάνει δύο κύριους τύπους μπαταριών: τις ιόντων λιθίου (**Li-ion**) και τις λιθίου πολυμερούς (**Li-poly**). Στις πρώτες, η κάθοδος κατασκευάζεται από μεταλλικό οξείδιο λιθίου που συνήθως είναι  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMO}_2$  ή  $\text{LiNiO}_2$ , η άνοδος από γραφιτικό άνθρακα με δομή στοιβάδας, ενώ ο ηλεκτρολύτης από τη διάλυση αλάτων λιθίου (όπως το  $\text{LiPF}_6$ ) σε οργανικούς ανθρακικούς διαλύτες. Κατά τη φάση της φόρτισης, τα άτομα λιθίου στην κάθοδο μετατρέπονται σε ιόντα και μετακινούνται διαμέσου του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο, όπου συνδυάζονται με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και τοποθετούνται ως άτομα λιθίου μεταξύ των ανθρακικών στοιβάδων. Αυτή η διαδικασία αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης [17],[30]. Η σημαντικότερη διαφορά των μπαταριών Li-poly είναι ότι ο διαλύτης είναι από στερεό πολυμερές και χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και ως διαχωριστής. Οι συνολικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στους δύο τύπους μπαταριών είναι (προς τα δεξιά είναι η φόρτιση):[30]



Το βασικότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι οι πολύ υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας που κυμαίνονται μεταξύ 80 – 150 Wh/kg για τις μπαταρίες Li-ion και 100 – 150 Wh/kg για τις Li-poly, καθώς και οι πολύ μεγάλοι βαθμοί απόδοσης που μπορεί να αγγίξουν και το 100% [30]. Πιο συγκεκριμένα, οι μπαταρίες Li-ion εμφανίζουν αξιοσημείωτη διάρκεια ζωής συνδυασμένη με αρκετά βαθιές εκφορτίσεις, καθώς 3000 κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης με βάθη εκφόρτισης 80% αποτελούν τυπικές τιμές. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα αποτελούν ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (<5% ανά μήνα), η μικρή ανάγκη για συντήρηση και η ικανότητα παροχής ρευμάτων πολύ υψηλής τιμής [18]. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής τους επηρεάζεται αρνητικά σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μπορεί να μειωθεί δραστικά σε περίπτωση υπερβολικά βαθιάς εκφόρτισης, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές εφεδρείας. Επιπλέον αρνητικά

στοιχεία αποτελούν ο περιορισμένος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης για λόγους αποφυγής δημιουργίας metallic lithium plating και η μεγάλη ευαισθησία σε περίπτωση υπερφόρτισης [30]. Οι μπαταρίες Li-poly πλεονεκτούν έναντι των Li-ion από άποψη βάρους και ασφάλειας, καθώς σε αντίθεση με τις τελευταίες δεν εμφανίζουν κίνδυνο αυτανάφλεξης. Από την άλλη μεριά, το σημαντικότερο πρόβλημα που παρουσιάζουν είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής (περίπου 600 κύκλοι) και το πιο στενό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας σε σχέση με τις μπαταρίες Li-ion [30].

Κοινό πλεονέκτημα και των δύο τεχνολογιών είναι ότι η ονομαστική τάση του κελιού είναι 3,7 Volt, δηλαδή μεγαλύτερη από τις άλλες τεχνολογίες. Για αυτό το λόγο απαιτείται η σύνδεση μικρότερου αριθμού κελιών σε σειρά ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο τάσης, οδηγώντας ίσως έτσι σε μικρότερο τελικό κόστος κατασκευής [19]. Αντίθετα, σημαντικό κοινό μειονέκτημα συνιστά ο μικρότερος βαθμός αξιοπιστίας συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες μολύβδου οξέως και νικελίου καδμίου. Σήμερα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου καλύπτουν το 50% της αγοράς των μικρών φορητών συσκευών αν και υπάρχουν προκλήσεις για την επέκτασή τους σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Το μεγαλύτερο εμπόδιο είναι το μεγάλο κόστος εξαιτίας της ακριβής παραγωγής και συσκευασίας, καθώς και της παρουσίας ειδικών κυκλωμάτων προστασίας από υπερφόρτιση [17],[30].

Σήμερα η έρευνα στις μπαταρίες τεχνολογίας λιθίου επικεντρώνεται κυρίως στη μείωση του κόστους που κυμαίνεται γενικά μεταξύ \$900 - \$1300/kWh με τη χρήση φθηνότερων υλικών, την αύξηση της διάρκειας ζωής και τη μείωση του κινδύνου αυτανάφλεξης στην περίπτωση της τεχνολογίας Li-ion [17],[30]. Αρκετές εταιρίες προσπαθούν να μειώσουν το κόστος παραγωγής των μπαταριών Li-ion με σκοπό την επέκτασή τους στην αγορά μεγάλης κλίμακας ισχύος και προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν παραχθεί μοντέλα επίδειξης ισχύος 3 kW. [30]

### 3.8.7 Μπαταρίες Ροής

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries), ή πιο απλά μπαταρίες ροής, συνιστούν μία σχετικά νέα τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης με δυνατότητα επαναφόρτισης. Σε γενικές γραμμές, αποτελούνται από έναν αριθμό ηλεκτροχημικών κυψελών, δύο ηλεκτρολύτες και δύο δεξαμενές για την αποθήκευσή τους. Κάθε κυψέλη περιλαμβάνει δύο διαμερίσματα, την άνοδο και την κάθοδο, που χωρίζονται από μία μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων και είναι ένα για κάθε ηλεκτρολύτη. Με τη βοήθεια αντλιών οι δύο ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν διαμέσου των κυψελών και καθώς περνάνε από τη μεμβράνη ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται και ο άλλος ανάγεται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα. Με αυτόν τον τρόπο η αποθηκευμένη χημική ενέργεια

μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά τη φάση της εκφόρτισης. Η χρήση των αντλιών έχει σαν συνέπεια κάποιες παρασιτικές απώλειες στη διάταξη, αλλά παράλληλα συνεισφέρει στη διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα [18].

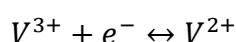
Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής αποθηκεύουν ενέργεια στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη και επιπλέον η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι ανεξάρτητη από την ικανότητα παροχής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα αποθήκευσης καθορίζεται από την ποσότητα του διαθέσιμου ηλεκτρολύτη και το μέγεθος των δεξαμενών, ενώ η ικανότητα απόδοσης ισχύος εξαρτάται από το ενεργό εμβαδό της στοίβας των κυψελών. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες ροής διαφέρουν από τις κυψέλες καυσίμου, αφού στις τελευταίες μόνο τα ηλεκτρικά ενεργά χημικά στοιχεία (υδρογόνο, μεθανόλη, οξυγόνο) ρέουν διαμέσου της κυψέλης, ενώ ο ηλεκτρολύτης παραμένει συνεχώς στο εσωτερικό της. Η σημαντικότερη, βέβαια, διαφορά με τις κυψέλες καυσίμου είναι το γεγονός ότι στις μπαταρίες ροής η χημική αντίδραση είναι αντιστρέψιμη, οπότε είναι δευτερεύοντα αποθηκευτικά μέσα και μπορούν να επαναφορτιστούν χωρίς αντικατάσταση του ηλεκτρικά ενεργού υλικού. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ηλεκτρολυτών που ορίζουν ισάριθμες κατηγορίες μπαταριών ροής: ηλεκτρολύτης θεικού οξέως με vanadium redox couples, ηλεκτρολύτης βρωμιούχου ψευδαργύρου και ηλεκτρολύτης βρωμιδίου του νατρίου / πολυθειούχου νατρίου [17],[22].

Οι τρεις τύποι μπαταριών ροής παρουσιάζουν κάποια κύρια κοινά χαρακτηριστικά. Αρχικά, υπάρχει η δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσών ισχύος, αλλά και η δυνατότητα συνεχούς απόδοσης ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα έως και δέκα ώρες. Κατά δεύτερο λόγο, επιτρέπεται η ευέλικτη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης δεδομένου ότι η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος είναι ανεξάρτητα μεγέθη. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες ροής εμφανίζουν γρήγορη απόκριση και μπορούν να μεταβούν από λειτουργία φόρτισης σε λειτουργία εκφόρτισης σε περίπου 1 ms επειδή η διάρκεια των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής είναι πολύ μικρή. Ακόμα, οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, ενώ η αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος επιτυγχάνεται απλά με την προσθήκη μεγαλύτερων δεξαμενών και περισσότερου ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα αποθήκευσης δεν υποφέρουν από αυτοεκφόρτιση αφού οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι ξεχωριστά και δε μπορούν να αντιδράσουν. Στις αρνητικές ιδιότητες της τεχνολογίας συγκαταλέγονται ο χαμηλός βαθμός απόδοσης λόγω των απωλειών από τη χρήση των αντλιών και των απωλειών των χημικών αντιδράσεων, οι χαμηλές τιμές ειδικής ενέργειας και το αυξημένο κόστος κτήσης καθώς και το λειτουργικό κόστος [22].

Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρεις κυριότερες τεχνολογίες μπαταριών ροής.

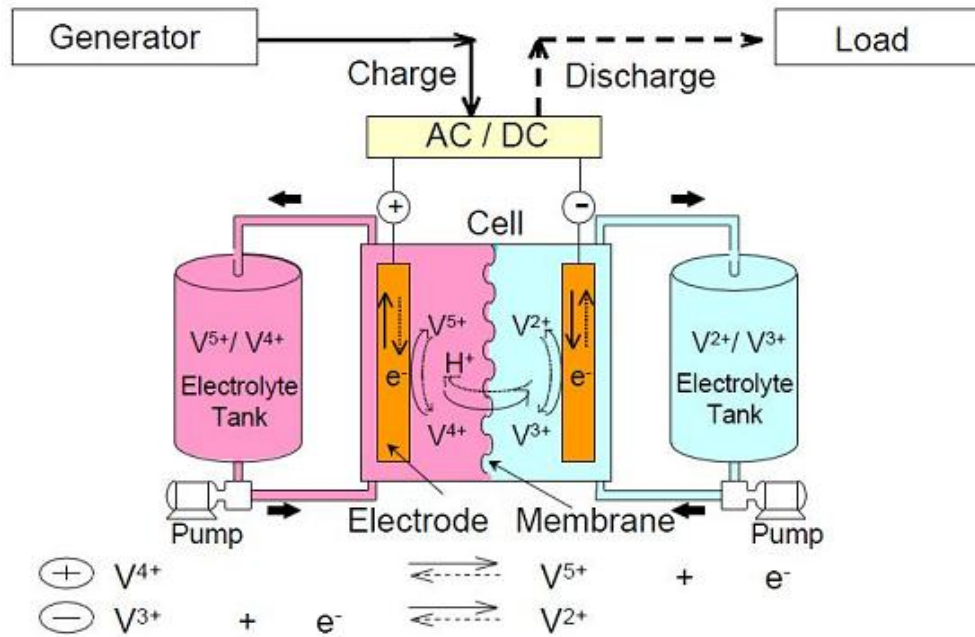
### 3.8.7.1 Vanadium Redox Battery (VRB)

Αυτός ο τύπος μπαταρίας αποθηκεύει ενέργεια με τη χρήση οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου (vanadium redox couples), που είναι  $V^{2+}/V^{3+}$  στην άνοδο και  $V^{4+}/V^{5+}$  στην κάθοδο της κυψέλης, και που περιέχονται σε ήπιο διάλυμα ηλεκτρολύτη θειικού οξέως. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης ανταλλάσσονται κατιόντα υδρογόνου μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών διαμέσου της περατής μεμβράνη πολυμερούς. Η τάση κάθε κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 1,4 – 1,6 Volt και ο βαθμός απόδοσης μπορεί να είναι έως και 85%. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται για το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι αντίστοιχα (η φόρτιση είναι προς τα δεξιά):[17]



Σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας VRB είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής υπό καθεστώς βαθιών εκφορτίσεων, καθώς έχουν αναφερθεί διάρκειες ζωής έως και πάνω από 10.000 κύκλους με βάθη εκφόρτισης 75% [22]. Επιπλέον η θερμοκρασία λειτουργίας είναι κανονική και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Αρνητικό της τεχνολογίας αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας με τιμές μεταξύ 10 – 30 Wh/kg. Οι μπαταρίες VRB είναι κατάλληλες για μία ευρεία περιοχή εφαρμογών, αποθήκευσης ενέργειας για επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και για βιομηχανικούς καταναλωτές. Αυτές περιλαμβάνουν βελτίωση ποιότητας ισχύος με εξομάλυνση της τάσης, UPS, κάλυψη αιχμής (peak shaving), αύξηση της ασφάλειας τροφοδοσίας και ενσωμάτωση με συστήματα ΑΠΕ. Η πλειονότητα των έργων ανάπτυξης της τεχνολογίας εστιάζει σε σταθερές εφαρμογές εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας [17].

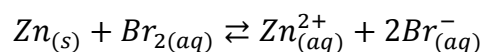
Η τεχνολογία VRB αποτέλεσε καινοτομία του πανεπιστημίου του New South Wales της Αυστραλίας στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος μπαταρίας ροής. Συστήματα VRB ικανότητας ισχύος έως 500 kW για δέκα ώρες, δηλαδή χωρητικότητας 5 MWh, έχουν εγκατασταθεί στην Ιαπωνία από την SEI για το πανεπιστήμιο Kwansai Gakuin. Επίσης, τέτοια συστήματα έχουν εφαρμοστεί για βελτίωση ποιότητας ισχύος, όπως για παράδειγμα το σύστημα ικανότητας ισχύος 3 MW για 1,5 δευτερόλεπτο για την εταιρία Tottori Sanyo Electric [17]. Στο πεδίο των υβριδικών συστημάτων παράδειγμα εφαρμογής της τεχνολογίας VRB ως σύστημα αποθήκευσης αποτελεί ο υβριδικός σταθμός στο King Island της Αυστραλίας, όπου έχει εγκατασταθεί σύστημα ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας 800 kWh.[17]



Σχήμα 3.6: Η αρχή λειτουργίας της μπαταρίας VRB

### 3.8.7.2 Μπαταρίες Ψευδαργύρου Βρωμίου

Οι μπαταρίες ψευδαργύρου βρωμίου (Zinc Bromine – ZnBr) χαρακτηρίζονται ως υβριδικές μπαταρίες ροής. Σε κάθε κυψέλη δύο διαφορετικοί ηλεκτρολύτες ρέουν κατά μήκος συνθετικών ηλεκτροδίων άνθρακα –πλαστικού σε δύο διαμερίσματα διαχωρισμένα από μεμβράνη πορώδους πολυολεφίνης. Κατά την εκφόρτιση, ο ψευδάργυρος και το βρώμιο αντιδρούν δίνοντας άλας βρωμιούχου ψευδαργύρου και παράγοντας τάση 1,8 Volt σε κάθε κυψέλη. Αυτή η διαδικασία αυξάνει την περιεκτικότητα των ιόντων Zn<sub>2</sub> και Br<sup>-</sup> και στους δύο ηλεκτρολύτες. Κατά τη φόρτιση, μεταλλικός ψευδάργυρος επικάθεται σε μορφή λεπτού στρώματος στη μία πλευρά του ηλεκτροδίου, ενώ στην άλλη μεριά της μεμβράνης το βρώμιο αντιδρά με οργανικές ουσίες με αποτέλεσμα την παραγωγή thick bromine oil το οποίο βυθίζεται στο κάτω μέρος της δεξαμενής. Η συνολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση)[17]:



Δεδομένου ότι το ενεργό στοιχείο Zn επικάθεται στο ένα ηλεκτρόδιο της κυψέλης κατά τη φάση της φόρτισης, η πυκνότητα ενέργειας καθορίζεται όχι μόνο από την ποσότητα του ηλεκτρολύτη όπως στις μπαταρίες VRB, αλλά και από το εμβαδό της στοιβάδας των κυψελών. Για το λόγο αυτό, στην τεχνολογία ZnBr η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος δεν είναι εντελώς ανεξάρτητα μεγέθη. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από την εταιρία Exxon στην αρχή της δεκαετίας του 1970 και η καθαρή απόδοση της είναι περίπου 75%. Με την πάροδο των ετών

κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πολλές μπαταρίες ZnBr χωρητικότητας της τάξης των kWh. Το 1991 η εταιρία Meidisha έκανε επίδειξη ενός τέτοιου συστήματος αποθήκευσης ισχύος 1 MW και χωρητικότητας 4 MWh στην εταιρία ηλεκτρικής ισχύος Kyushu. [17]

### 3.8.7.3 Μπαταρίες Πολυθειούχου Βρωμιδίου

Οι μπαταρίες πολυθειούχου βρωμιδίου (polysulphide bromide – PSB - Regenesys) ανήκουν στην τεχνολογία regenerative κυψελών καυσίμου και παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας λόγω της πραγματοποίησης αντιστρέψιμης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ ενός διαλύματος ηλεκτρολύτη βρωμιδίου του νατρίου και ενός διαλύματος πολυθειούχου νατρίου [22]. Η συνολική αντίδραση είναι (προς τα δεξιά η εκφόρτιση):[17]



Τα ηλεκτρόδια χωρίζονται εντός των κυψελών από πολυμερή μεμβράνη που επιτρέπει μόνο στα κατιόντα νατρίου να περάσουν παράγοντας μία διαφορά δυναμικού περίπου 1,5 Volt κατά μήκος της κυψέλης. Τα κελιά συνδέονται σε σειρά και παράλληλα ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα τάσης και ρεύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας PSB είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος και, όπως και στις μπαταρίες ZnBr, ο καθαρός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 75%. Η εταιρία Regenesys Technologies κατασκευάζει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες PSB χωρητικότητας 120 MWh και ικανότητας απόδοσης ισχύος 15 MW στον σταθμό παραγωγής του Innogy's Little Barford στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το δεύτερο σύστημα επίδειξης από την ίδια εταιρία έχει χωρητικότητα 120 MWh και ικανότητα ισχύος 12 MW και βρίσκεται στο Tennessee Valley Authority (TVA) στο Columbus των ΗΠΑ [17].

## 3.9 Εμπειρία Εφαρμογής Υβριδικών Συστημάτων στο Νησί King

Το νησί King είναι ένα από τα κατοικημένα νησιά που βρίσκονται στον πορθμό Bass μεταξύ Αυστραλίας και Τασμανίας. Έχει έκταση 1098 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 1.723 κατοίκους. Το φορτίο του νησιού είναι σχετικά μεγάλο με ελάχιστη τιμή 1,2 MW και τιμή αιχμής 3,3 MW, η οποία παρατηρείται κατά τους κρούς χειμερινούς μήνες.[15]

Το νησί δεν είναι διασυνδεδεμένο ούτε με την Αυστραλία ούτε με την Τασμανία και μέχρι πρόσφατα η ηλεκτρική ισχύς παραγόταν στο νησί αποκλειστικά από ντιζελογεννήτριες. Ωστόσο, σήμερα η αιολική ισχύς συνεισφέρει ένα σημαντικό ποσοστό της ετήσιας ζήτησης ενέργειας. Η αιολική ισχύς εμφανίζεται



ανταγωνιστική οικονομικά και αναδεικνύεται σε σημαντική πηγή ενέργειας του νησιού λόγω του εξαιρετικού αιολικού δυναμικού (μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης 9,2 m/s). Ο υβριδικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στο King ξεκίνησε να κατασκευάζεται το 1998 με σκοπό τη συνέργεια ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών συστημάτων, γεννητριών diesel και συσσωρευτών. Σήμερα ο σταθμός διαθέτει τα στοιχεία, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.[15]

**Πίνακας 3.1:** Τα στοιχεία του υβριδικού συστήματος του νησιού King.

Στοιχεία Συστήματος	Χαρακτηριστικά Μεγέθη
5 Ανεμογεννήτριες	3x250 kW, 2x850 kW
6 Φ/Β συστήματα	100 kW σύνολο
4 Ντιζελογεννήτριες	3x1.600 kW, 1x1.200 kW
Συστοιχία μπαταριών VRB	800 kWh
Σύστημα ελέγχου συχνότητας με ωμικό φορτίο	Τρεις αντιστάτες ονομαστικής ισχύος 500 kW ο καθένας

Η διείσδυση αιολικής ενέργειας μετά το 1998 (μέχρι τότε ήταν εγκατεστημένες 3 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 250 kW έκαστη) και πριν το 2003, όπου και προστέθηκαν άλλες 2 ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος 850 kW έκαστη, έφτασε το 13% και αυτό είχε ως αποτέλεσμα 16% λιγότερη ετήσια κατανάλωση καυσίμου, κάτι που μεταφράζεται σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 590 λίτρα ετησίως. Επιπλέον, κατά το έτος 1999 μετρήθηκε ότι οι ολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ελαττώθηκαν κατά 2.000 τόνους ετησίως.[15]

Μετά το 2003, με την επέκταση του αιολικού πάρκου και την ενσωμάτωση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας VRB (Vanadium Redox Battery), παρατηρήθηκε αύξηση της μέσης διείσδυσης ΑΠΕ, η οποία το 2005 έφτασε το 33%. Επιπλέον, το σύστημα αποθήκευσης εξομάλυνε την τάση εξόδου του αιολικού πάρκου αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας και παρέχοντας την στο σύστημα όταν αυτή χρειαζόταν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, παρέχεται εγγυημένη ισχύς που προέρχεται από αιολική παραγωγή δηλαδή όταν παρατηρηθεί μείωση της αιολικής ισχύος, αντί να ξεκινήσει η δεύτερη ντιζελογεννήτρια δίνεται σήμα στη μονάδα αποθήκευσης να παρέχει στο σύστημα την υπολειπόμενη ενέργεια. Ο αντιστροφέας του συστήματος αποθήκευσης έχει δυνατότητα ρύθμισης τάσης και συχνότητας και επιτρέπει τη βέλτιστη λειτουργία του υβριδικού συστήματος.[34]

Το σύστημα ελέγχου που εγκαταστάθηκε το 2008 περιλαμβάνει ένα ωμικό φορτίο μεγάλης τιμής το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται γρήγορα ώστε να απορροφά την περίσσεια αιολικής ισχύος, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα απορριπτόταν επιβραδύνοντας τις ανεμογεννήτριες. Έτσι, δε μειώνεται η παραγωγή των

ανεμογεννητριών και η περίσσεια ισχύος μετατρέπεται στην ουσία σε στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά προς την συμβατική παραγωγή. Με αυτόν τον τρόπο, το ωμικό φορτίο διατηρεί ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης και συμβάλει στη διατήρηση σταθερής συχνότητας στο μικροδίκτυο. Ακόμα, το σύστημα ελέγχου θα επιτρέπει τη φόρτιση των ντιζελογεννητριών στο τεχνικό τους ελάχιστο όποτε το φορτίο του νησιού είναι μικρότερο από το συνδυασμό αιολικής και ηλιακής παραγωγής, συμβάλλοντας στην περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Εκτιμάται ότι η λειτουργία του συστήματος ελέγχου θα αυξήσει τη διείσδυση ΑΠΕ σε ποσοστό 45%.[15],[34]

---

## *Κεφάλαιο 4. Παρούσα Κατάσταση Στην Αφρική*

---



## 4.1 Γενικά Στοιχεία για την Αφρική

Η Αφρική είναι η τρίτη σε έκταση ήπειρος της γης. Με έκταση 31.000.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα, βρίσκεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της στην τροπική ζώνη. Είναι η ήπειρος των μεγάλων ερήμων, των τροπικών χωρών και της μαύρης φυλής.[33]

Ο πληθυσμός της διπλασιάστηκε τα τελευταία 25 χρόνια και έχει φτάσει σήμερα τα 555 εκατομμύρια κατοίκους. Αποτελείται από 1000 περίπου εθνικές ομάδες που έχουν διαφορετική γλώσσα, θρησκεία, διαφορετικά ήθη και έθιμα και διαφορετικό πολιτισμό. Το 80% περίπου των κατοίκων της ανήκουν στη μαύρη φυλή.[33]

Η Αφρική στο παγκόσμιο χάρτη βρίσκεται στα νότια της Ευρώπης και στα νοτιοδυτικά της Ασίας. Βρέχεται βόρεια από την Μεσόγειο θάλασσα, ανατολικά από την Ερυθρά θάλασσα και τον Ινδικό ωκεανό και δυτικά από τον Ατλαντικό ωκεανό.

Στις πιο άγονες περιοχές της Αφρικής, η οικονομία βασιζόταν και βασίζεται ακόμη στο κυνήγι. Η γεωργική καλλιέργεια ήταν και είναι ανύπαρκτη, γίνεται όμως συνήθως κάποιο περιορισμένης έκτασης εμπόριο με γειτονικούς λαούς. Σήμερα, οι ιθαγενείς που αποζούν από το κυνήγι έχουν περιοριστεί σε δυσπρόσιτες περιοχές και βρίσκονται μόνο στη Νοτιοδυτική Αφρική (Βουσμάνοι) και στα δάση του Κονγκό (Πυγμαίοι). [33]

Ο βασικός τρόπος ζωής ήταν από παράδοση η κτηνοτροφία, κυρίως στις μισοάγονες παρυφές της Σαχάρας (βοοειδή, αιγοπρόβατα). Πολύ διαδεδομένα ζώα είναι οι καμήλες και τα άλογα στις άγονες περιοχές. Οι χοίροι απαντούν σε λίγες περιοχές, ενώ οι σκύλοι και τα πουλερικά είναι άφθονα σε όλη την ήπειρο.[33]

Η παραδοσιακή οικονομία ενός ποσοστού που φθάνει τα 90% του πληθυσμού βασίζεται στη γεωργία (συνήθως μαζί με την κτηνοτροφία και το κυνήγι) και στην καλλιέργεια αυτόχθονων και εισαχθέντων δέντρων και φυτών. Οι μέθοδοι καλλιέργειας ποικίλλουν πολύ, ανάλογα με τις περιοχές.

Η κατανομή του πληθυσμού παρουσιάζει μεγάλη ανισότητα. Ορισμένες περιοχές είναι πολύ πυκνοκατοικημένες, ενώ άλλες είναι πολύ αραιοκατοικημένες. Από τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι η Μεσογειακή παράλια ζώνη, μεγάλο μέρος των κρατών της Δυτικής Αφρικής, οι περιοχές των Μεγάλων Λιμνών και οι ορεινές περιοχές της Ανατολικής Αφρικής, ενώ η Σαχάρα, η Καλαχάρι και τα πυκνά δάση του Κονγκό είναι αραιοκατοικημένες περιοχές, πολλές χωρίς καν μόνιμο πληθυσμό.[32]

## 4.2 Γεωφυσική Εξέταση

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, η Αφρική βρίσκεται νότια της Ευρώπης και νοτιοδυτικά της Ασίας και χωρίζεται από τις ηπείρους αυτές με θαλάσσια στενά. Ο ισημερινός

διέρχεται περίπου από το μέσο της, το μεγαλύτερο τμήμα της βρίσκεται στην τροπική ζώνη, ενώ το βόρειο και το νότιο τμήμα της στις αντίστοιχες εύκρατες ζώνες. [34]

Τα χαρακτηριστικά της ηπείρου αυτής είναι ο μικρός θαλάσσιος διαμελισμός, οι λίγες οροσειρές και οι λίγες πεδιάδες. Γενικά το έδαφος της Αφρικής είναι επίπεδο και βρίσκεται σε αρκετό ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Η Αφρική δηλαδή είναι ένα υψίπεδο και αυτός είναι ο λόγος που οι ακτές της είναι απότομες.

Στη βόρεια περιοχή, από τον Ατλαντικό ως την Ερυθρά θάλασσα, εκτείνεται η έρημος Σαχάρα, που καλύπτει το 1/3 της ηπείρου και είναι η μεγαλύτερη έρημος της γης. Έρημο συναντούμε και στο νότιο τμήμα της ηπείρου (έρημος Καλαχάρι). [34]

Στα βορειοδυτικά βρίσκεται η οροσειρά του Άτλαντα. Στα ανατολικά υψώνονται τα ηφαιστειογενή όρη της Αιθιοπίας, της Κένυας και το Κιλιμάντζαρο (ύψος 5.895μ.), που είναι και το υψηλότερο όρος της ηπείρου. Ανάμεσα στα όρη αυτά σχηματίζονται πολλές και μεγάλες λίμνες.[34]

Οι μεγαλύτερες πεδιάδες της Αφρικής βρίσκονται στα λεκανοπέδια του Κονγκό και του Νίγηρα ποταμού.

Στην Αφρική δεν υπάρχουν πολλά νησιά. Μικρές μόνο ομάδες νησιών συναντούμε στον Ατλαντικό ωκεανό και στον Ινδικό τη Μαδαγασκάρη, το μόνο μεγάλο αφρικανικό νησί.[33]

### **4.3 Το Κλίμα, τα Νερά και η Βλάστηση της Αφρικής**

Οι κυριότερες κλιματικές ζώνες της Αφρικής περιλαμβάνουν την εύφορη μεσογειακή παραλία, με την κοιλάδα του Κάτω Νείλου, τη Σαχάρα, την ζώνη της σαβάνας από τη Σενεγάλη ως την Αιθιοπία και τις ημι-άγονες περιοχές της Σομαλίας. Τη ζώνη των δασών της Δυτικής Αφρικής κατά μήκος των ακτών του Ατλαντικού που φθάνει ως το λεκανοπέδιο του Κονγκό. Τις ορεινές περιοχές της Αιθιοπίας και της Ανατολικής Αφρικής, που εκτείνονται ως τη Ρουάντα. Τις σαβάνες της Ανατολική, Κεντρικής και Νότιας Αφρικής, την εύφορη νοτιοαφρικανική ακτή και τη νήσο της Μαδαγασκάρης.[33]

Υπάρχουν λίγες μεγάλες οροσειρές, λίγοι μεγάλοι πλωτοί ποταμοί και λίγα φυσικά λιμάνια. Το ύψος των βροχοπτώσεων ποικίλλει πολύ (από 1.500 χιλιοστόμετρα σε περιοχές της τροπικής των δασών μέχρι κάτω των 130 χιλιοστομέτρων στις διάφορες άγονες περιοχές). Το μεγαλύτερο επομένως μέρος της Αφρικανικής ηπείρου περιλαμβάνει οροπέδια με θαμνώδη βλάστηση και λιβάδια. [33]

Οι περιοχές της Αφρικής γύρο από τον ισημερινό έχουν τροπικό κλίμα. Βόρεια και νότια της ζώνης του τροπικού κλίματος εκτείνονται μεγάλες περιοχές με κλίμα ερήμου και μόνο ένα τμήμα στα βόρεια και στα νότια της ηπείρου έχει εύκρατο μεσογειακό κλίμα. Υπάρχει επίσης γύρο από το τροπικό κλίμα, μία παραλλαγή του,

το υποτροπικό κλίμα και τέλος στο εσωτερικό της ηπείρου το θερμό και ξηρό κλίμα.[33]

Μεσογειακό κλίμα: Οι βροχές πέφτουν τους χειμερινούς μήνες, που για το νότιο ημισφαίριο είναι ο Ιούνιος, ο Ιούλιος και ο Αύγουστος.[34]

Κλίμα ερήμου: Οι θερμοκρασίες είναι πολύ υψηλές με μεγάλες διαφορές μεταξύ ημέρας και νύχτας. Οι βροχές είναι σπάνιες και υπάρχουν περιοχές όπου δε βρέχει σχεδόν ποτέ (Η Σαχάρα).[34]

Κλίμα θερμό και ξηρό: Εδώ οι βροχοπτώσεις είναι λίγες, εποχιακές και οι θερμοκρασίες υψηλές. Η βλάστηση είναι χαμηλή και εποχιακή.[34]

Κλίμα υποτροπικό (θερμό): Οι θερμοκρασίες είναι υψηλές όλο το έτος και διακρίνουμε μια περίοδο βροχών και μια περίοδο ξηρασίας. Περιοχή με πολύ υψηλή χλόη και αραιά μεγάλα δέντρα. Σ' αυτές ζουν πολλά κοπάδια από φυτοφάγα και σαρκοφάγα ζώα.[34]

Τροπικό κλίμα: Η θερμοκρασία όλο το χρόνο είναι πολύ υψηλή και πέφτουν πολλές βροχές (Το τροπικό δάσος).[34]



Σχήμα 4.1: Αφρική

#### 4.4 Οικονομία

Το βιοτικό επίπεδο των λαών της Αφρικής είναι πολύ χαμηλό. Τα προϊόντα που παράγονται δεν επαρκούν για τις ανάγκες των κατοίκων. Πολλοί άνθρωποι

υποφέρουν από την κακή διατροφή, την πείνα και τις αρρώστιες. Επίσης η ένωση σ' ένα κράτος πολλών φυλών με διαφορετική γλώσσα, θρησκεία και τρόπο ζωής δημιουργεί προβλήματα στα νεοϊδρυθέντα κράτη της Αφρικής. Αυτά τα προβλήματα σιγά-σιγά ξεπερνιούνται. Παρ' όλες όμως τις δυσκολίες οι αφρικανικοί λαοί εργάζονται για να καλυτερέψουν τη ζωή τους και θέλουν και αυτοί η γνώμη τους να είναι σεβαστή στον κόσμο.[36]

Όλοι σχεδόν οι Αφρικανοί είναι μικροϊδιοκτήτες γης, που από παράδοση βασίζονται σε απλές πλουτοπαραγωγικές πηγές, εργαλεία και τεχνικές, γιατί σκόνταφταν πάντα στις κακές επικοινωνίες και δεν είχαν συνδεθεί με μεγάλης έκτασης εμπόριο. Από παράδοση η παραγωγή περιοριζόταν αποκλειστικά και μόνο στα μέσα συντήρησης. Μονάδα παραγωγής και διάθεσης προϊόντων ήταν κανονικά η κοινότητα ή η οικογένεια (μη ειδικευμένα σύνολα που δεν ήταν κατά κύριο λόγο οικονομικές αλλά και οικιακές, πολιτικές και θρησκευτικές ομάδες). Από παράδοση, επίσης, το βιοτικό επίπεδο ήταν λίγο πολύ το ίδιο, αφού ήταν ένα δεδομένο του τόπου. Παλαιότερα υπήρχαν λίγες αγορές και σπάνια κάποιο νόμισμα, μια και οι συναλλαγές γίνονταν ανάμεσα σε συγγενείς ή γείτονες, υπό μορφή ανταλλαγής ή δώρου. Η αμοιβή εργασίας ήταν άγνωστη, αν και η άτυπη συνεργασία στον τομέα της δουλειάς ή και αλλού ήταν σχεδόν καθολική. Την κύρια εξαίρεση αποτελούσαν μερικές κοινωνίες που επιδίδονταν, αιώνες ολόκληρους, σε μεγάλων αποστάσεων εμπόριο και είχαν αναπτύξει συναλλακτικές μεθόδους, μέσα και δεξιότητες καθώς και το κατάλληλο πολιτικό εποικοδόμημα που εξασφάλιζε την προστασία των εμπορικών τους οδών.[36]

Κατά τον περασμένο αιώνα αυτή η παραδοσιακή εικόνα άλλαξε με την εγκατάσταση αποικιακής διακυβέρνησης και αργότερα με την αναγνώριση πολιτικής ανεξαρτησίας στο μεγαλύτερο τμήμα της ηπείρου. Η Αφρική έγινε τμήμα του παγκόσμιου συστήματος οικονομικής παραγωγής και συναλλαγών. Οι άλλοτε αυτοκρατορίες έχασαν την επιρροή τους στον έλεγχο των σπουδαιότερων εξωτερικών αγορών, όσο αναπτύσσονται άλλες αγορές στην Ευρώπη, στον Νέο Κόσμο και σε ολόκληρο τον Ινδικό Ωκεανό. Από τις πιο σημαντικές εξελίξεις ήταν το δουλεμπόριο, που τροφοδότησε την Αμερικανική ήπειρο και την Ανατολή. Η ανακάλυψη και εκμετάλλευση ορυκτών (όπως χρυσού, διαμαντιών, κασσίτερου και βωξίτη), καθώς και η προσοδοφόρα εξαγωγή προϊόντων (κακάο, καφέ, φοινικέλαιου, βαμβακιού). Η επιβολή φορολογίας σε χρήμα στις περισσότερες αποικιακές χώρες, πράγμα που ανάγκασε τους κατοίκους να πωλούν τα προϊόντα τους ή να εκμισθώνουν την εργασία τους και η δημιουργία βιομηχανικών και διοικητικών κέντρων και λιμανιών.[34], [35]

#### **4.5 Ορυκτός Πλούτος και Μεταλλεύματα**

Το υπέδαφος της Αφρικής είναι πολύ πλούσιο και περιέχει όλων των ειδών τα μεταλλεύματα.



Στις βόρειες περιοχές της Αφρικής και συγκεκριμένα στις χώρες γύρω από τη Σαχάρα υπάρχουν τεράστια αποθέματα πετρελαίου. Στο νότο, αντίθετα, βγαίνει το 98% της παγκόσμιας παραγωγής διαμαντιών και το 77% της παγκόσμιας παραγωγής χρυσού. Από την άποψη αυτή κανονικά η αφρικανική ήπειρος θα έπρεπε να είναι η πιο πλούσια στον κόσμο.[35]

Η παραγωγή κοβαλτίου στη Δημοκρατία του Κονγκό, στο Μαρόκο και στη Ζάμπια φτάνει το 75% της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ το χρώμιο, που παράγεται στη Ροδεσία και στη Νότιο Αφρική αντιπροσωπεύει το 55% της παγκόσμιας παραγωγής.

Ανάμεσα στα άλλα ορυκτά αξίζει να αναφερθούν τα φωσφορικά άλατα που δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν. Στο σημείο αυτό αρκεί να αναφερθεί ότι η Αφρική, παρόλη την τεράστια παραγωγή φωσφορικών αλάτων από τα οποία παράγονται φωσφορικά λιπάσματα, είναι στην τελευταία θέση από τις άλλες ηπείρους στη χρησιμοποίηση των λιπασμάτων αυτών.[35]

Παράγονται ακόμη σε μεγάλες ποσότητες μαγγάνιο, χαλκός, βωξίτης, μόλυβδος, ψευδάργυρος, βανάδιο, κασσίτερος, μαρμαρυγιάς, γραφίτης, σίδηρος, τιτάνιο και αμίαντος. Το μόνο που δεν υπάρχει στην Αφρική είναι γαιάνθρακας. Την έλλειψη αυτή την αναπληρώνει η παρουσία του πετρελαίου.[36]

#### **4.6 Ενεργειακή Κατάσταση**

Η ενέργεια έχει πρωταρχική σημασία για την καταπολέμηση της φτώχειας, προσφέροντας μεγάλα οφέλη στους τομείς της υγείας, του αλφαριθμητισμού και της ισοτιμίας. Πάνω από το ένα τέταρτο του πληθυσμού της υφελίου δεν έχει καμία πρόσβαση σε σύγχρονες υπηρεσίες ενέργειας. Στην υποσαχάρια Αφρική, το 80% των ανθρώπων δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό. Για μαγείρεμα και θέρμανση στηρίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην καύση βιομάζας – ξύλου, κάρβουνου και κοπριάς.[35]

Οι φτωχοί δαπανούν μέχρι και το ένα τρίτο του εισοδήματός τους για ενέργεια, κυρίως για να μαγειρέψουν φαγητό. Οι γυναίκες ιδίως αφιερώνουν πολύ χρόνο στη συλλογή, κατεργασία και χρήση παραδοσιακών καυσίμων για μαγείρεμα. Η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας υπολογίζει ότι 2,5 εκατομμύρια γυναίκες και παιδιά μικρής ηλικίας στις αναπτυσσόμενες χώρες πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο από την εισπνοή των αναθυμιάσεων από παρωχημένες εστίες καύσης βιομάζας εσωτερικού χώρου. [35]

Περίπου 500 εκατομμύρια άνθρωποι που ζουν σε αφρικανικά έθνη νοτίως της Σαχάρας δεν έχουν πρόσβαση στο δημόσιο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Καμερούν. Από τα 30.000 χωριά του Καμερούν, μόνο τα 2.000 περίπου έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο. Η κηροζίνη, το ξύλο και η παραφίνη χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ενέργειας, και

είναι ιδιαίτερα δαπανηρά για τους περισσότερους ανθρώπους οι οποίοι αναγκάζονται να ζουν στην απόλυτη φτώχεια. [35]

Με βάση εκτιμήσεις που έχουν γίνει, στην Αφρική ζουν πάνω από 620 εκατομμύρια άνθρωποι δίχως ηλεκτρισμό, ενώ 730 εκατομμύρια από αυτούς αναγκάζονται να χρησιμοποιούν αναποτελεσματικές λύσεις για το μαγείρεμα, όπως τη στερεή βιομάζα (καυσόξυλα κτλ). Χαρακτηριστικό είναι ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο, δεν είναι καν αρκετή για να τροφοδοτήσει σταθερά μία και μόνο λάμπα των 50watt.

Η καλύτερη λειτουργία του τομέα της ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση ότι οι πολίτες της Αφρικής μπορούν να εκπληρώσουν τις φιλοδοξίες τους. Η Αφρική διαθέτει επαρκές ενεργειακό δυναμικό για να καλύψει τις ανάγκες της, αλλά η εκμετάλλευσή του δεν ήταν εφικτή μέχρι σήμερα. Η Υποσαχάρια Αφρική διαθέτει το 30% των αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, που ανακαλύφθηκαν κατά τη διάρκεια των τελευταίων πέντε ετών σε μια ζώνη που περιλαμβάνει τη Νιγηρία, τη Νότια Αφρική και την Αγκόλα. Επίσης, σημαντική θεωρείται η δυνατότητα ανάπτυξης όλων των μορφών ΑΠΕ. Χαρακτηριστικά, στις ενεργειακές πηγές της ηπείρου θα πρέπει να αναφερθούν οι τεράστιες δυνατότητες ανάπτυξης της υδροηλεκτρικής ενέργειας, παρ' όλες τις ιδιομορφίες που παρουσιάζει η μορφολογία του εδάφους της Αφρικής. Επίσης, η Βόρειος Αφρική διαθέτει εξαιρετικό ηλιακό δυναμικό που ξεπερνά κατά πολύ τις τοπικές ενεργειακές ανάγκες.[35]

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, οι επενδύσεις στην ενέργεια έχουν αυξηθεί σημαντικά από το 2000 και μετά, αλλά στοχεύουν κυρίως στην εξαγωγή της παραγωγής και όχι στην εσωτερική της κατανάλωση.

Οι προβλέψεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) κάνουν λόγο για ηλεκτροδότηση σε ένα δισεκατομμύριο κατοίκους έως το 2040, αλλά λόγω της ταχείας αύξησης του πληθυσμού, και πάλι θα είναι περισσότεροι από μισό δισεκατομμύριο εκείνοι, που θα παραμείνουν χωρίς πρόσβαση σε αυτήν. Η έκθεση του IEA καταλήγει, ότι τρεις δραστικές ενέργειες, θα μπορούσαν να ενισχύσουν την Υπό-Σαχάρια οικονομία κατά 30% ως το 2040, ενισχύοντας τις οικονομίες των χωρών της περιοχής και αυξάνοντας το κατά κεφαλήν εισόδημα των κατοίκων.[35]

Οι δράσεις αυτές είναι:[36]

- Η επένδυση ενός επιπλέον ποσού \$450,000,000,000 στον επενδυτικό τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, για τη μείωση των διακοπών ρεύματος κατά το ήμισυ και την επίτευξη καθολικής πρόσβασης ηλεκτρικής ενέργειας στις αστικές περιοχές.
- Η περιφερειακή συνεργασία και η παροχή διευκολύνσεων στη νέα γενιά και τη δημιουργία έργων μεγάλης κλίμακας, με τη δυνατότητα περαιτέρω επέκτασης στο διασυνοριακό εμπόριο.

- Η καλύτερη διαχείριση των ενεργειακών πόρων και των εσόδων, με τη θέσπιση ισχυρών και διάφανων διαδικασιών, που θα επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη χρήση των εσόδων από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Η έκθεση του IEA προειδοποιεί ότι οι δράσεις αυτές θα πρέπει να συνοδεύονται από ένα εύρος μεταρρυθμίσεων διακυβέρνησης, εάν πρόκειται πράγματι η νοτίως της Σαχάρας Αφρική, να μπει σε μια πιο γρήγορη διαδρομή προς ένα σύγχρονο, ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα για όλους.[36]

Οι υποψήφιες χώρες για την υποδοχή του υβριδικού πακέτου είναι οι χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής. Οι λόγοι που επιλέγονται αυτές οι χώρες είναι οι παρακάτω:

- Στην Υποσαχάρια Αφρική υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για ηλεκτροδότηση
- Υπάρχει ευνοϊκό κλίμα για την ικανοποιητική λειτουργία των ΦΒ συστημάτων
- Είναι χώρες υπό ανάπτυξη οπότε είναι κατάλληλες για επενδύσεις
- Οι χώρες της βόρειας Αφρικής έχουν ακατάλληλο κλίμα τόσο λόγω υπερβολικά υψηλής θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει χαμηλότερη απόδοση των Φ/Β συστημάτων, όσο και λόγω της σκόνης που προέρχεται από την Σαχάρα και προκαλεί μεγάλη επικάλυψη στα πάνελ που εμποδίζουν την αποτελεσματική λειτουργία των πάνελ

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαθέσιμοι σταθμοί παραγωγής στις χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής, ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιεί ο κάθε σταθμός καθώς και η ενεργειακή αυτονομία και το ποσοστό ηλεκτροδότησης της κάθε χώρας. Να σημειωθεί ότι για όποια στοιχεία δεν ήταν δυνατό να βρεθούν πληροφορίες, τα αντίστοιχα κελιά τους στους πίνακες έχουν μείνει κενά.[32],[34],[35],[36]

**Πίνακας 4.1:** Αγκόλα

<b>Αγκόλα</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Capanda	520	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Cambambe	180	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Matala	40,8	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mabubas dam	17,8	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 848,7%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 30,0%		

Πίνακας 4.2: Μπενίν

<b>Μπενίν</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Maria Gleta	80	Φυσικό αέριο
-	65,6	Υδροηλεκτρική ενέργεια
-	40	Φυσικό αέριο
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 54,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 27,4%		

Πίνακας 4.3: Μποτσουάνα

<b>Μποτσουάνα</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Morupule	220	Γαιάνθρακας
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 45,8%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 45,4%		

Πίνακας 4.4: Καμερούν

<b>Καμερούν</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Edea	204	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Song Loulou	384	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Lagdo	72	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Memve'ele	200	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kribi	216	Φυσικό αέριο
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 127,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 48,7%		

Πίνακας 4.5: Κεντροαφρικανική Δημοκρατία

<b>Κεντροαφρικανική Δημοκρατία</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Boali I	9	Υδρομυλος
Boali II	10	Υδρομυλος
Boali III	10	Υδρομυλος
-	15,5	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 91,6%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 4%		

Πίνακας 4.6: Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό

<b>Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Inga I	351	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Inga II	1.424	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Ruzizi I	40	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Ruzizi II	45	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Zongo	75	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Nseke	248	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Nzilo	108	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Tshopo	18	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kyimbi	18	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 101,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 11,1%		

Πίνακας 4.7: Δημοκρατία του Κονγκό

<b>Δημοκρατία του Κονγκό</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Imboulou Dam	120	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Moukoulou	74	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Cote Mateve	350	Υγραέριο
Mpila	24,6	Diesel
Djeno	50	Υγραέριο
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 1.089,6%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 37,1%		

Πίνακας 4.8: Αιθιοπία

<b>Αιθιοπία</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Tis Abay I	12	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Koka	43	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Awash II	32	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Awash III	32	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Fincha	134	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Melka Wakena	150	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sor	5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Tis Abay II	73	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Gilgel Gibe I	184	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Tekeze	300	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Gilgel Gibe II	420	Υδρόμυλος
Beles	460	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Gilgel Gibe III	1.870	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Fincha Amerti Neshe	100	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 92,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 17,0%		

Πίνακας 4.9: Γκαμπόν

Γκαμπόν		
Σταθμός Παραγωγής	Παραγωγή (MW)	Τύπος
Tchimbele	69	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kinguele	58	Υδροηλεκτρική ενέργεια
-	210	Θερμοηλεκτρικός σταθμός αερίου
-	30	Μαζούτ
Παρατηρήσεις		
Ενεργειακή Αυτονομία: 757,4%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 36,7%		

Πίνακας 4.10: Γκάνα

Γκάνα		
Σταθμός Παραγωγής	Παραγωγή (MW)	Τύπος
Tema	70	Diesel
Takoradi	330	Υγραέριο
Akosombo	1.020	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kpong	160	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Bui	400	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Παρατηρήσεις		
Ενεργειακή Αυτονομία: 76,3%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 60,5%		

Πίνακας 4.11: Ακτή Ελεφαντοστού

Ακτή Ελεφαντοστού		
Σταθμός Παραγωγής	Παραγωγή (MW)	Τύπος
Azito	288	Φυσικό αέριο
Ciprel	210	Φυσικό αέριο
Vridi	100	Φυσικό αέριο
Kossou	176	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Taabo	210	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Buyo	165	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Παρατηρήσεις		
Ενεργειακή Αυτονομία: 114,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 47,3%		

Πίνακας 4.12: Κένυα

<b>Κένυα</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Olkaria I	45	Γεωθερμία
Olkaria II	70	Γεωθερμία
Olkaria III	48	Γεωθερμία
Gitaru	225	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kiambere	168	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kindaruma	72	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Masinga	40	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Gogo	2	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kamburu	100	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mesco	0,4	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Ndula	2	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sagana	1,5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sondu - Miriu	60	Υδρόμυλος
Tana	14,4	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Turkwel	106	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Wanjii	7,4	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sosiani	0,4	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kipevu	63	Πετρέλαιο
Kipevu II	50	Πετρέλαιο
Kipevu III	120	Πετρέλαιο
Nairobi	102	Υγραέριο
Ngong	5,1	Αιολική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 83,2%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 16,1%		



Πίνακας 4.13: Μαδαγασκάρη

<b>Μαδαγασκάρη</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
-	104	Υδροηλεκτρική ενέργεια
-	211	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 90,6%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 19,0%		

Πίνακας 4.14: Μαλάουι

<b>Μαλάουι</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Kapichira	128	Υδρόμυλος
Nkhula A	24	Υδρόμυλος
Nkhula B	120	Υδρόμυλος
Tedzani I	20	Υδρόμυλος
Tedzani II	20	Υδρόμυλος
Tedzani III	50	Υδρόμυλος
Wovwe	4,5	Υδρόμυλος
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 89,1%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 9,0%		

Πίνακας 4.15: Μάλι

<b>Μάλι</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Manantali	200	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Félou falls	62,3	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sélingué Dam	44	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 78,4%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 12%		

Πίνακας 4.16: Μοζαμβίκη

<b>Μοζαμβίκη</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Cahora Bassa	2.075	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mavuzi	44.5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Chicamba	34	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Corumana	14	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 122,0%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 11,7%		

Πίνακας 4.17: Ναμίμπια

<b>Ναμίμπια</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Ruacana	332	Υδροηλεκτρική ενέργεια
van Eck	120	Γαϊάνθρακας
Paratus	24	Πετρέλαιο
Anixas	22,5	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 19,2%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 34,0%		

Πίνακας 4.18: Νίγηρας

<b>Νίγηρας</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MWh)</b>	<b>Τύπος</b>
Arlit	59.559	Γαϊάνθρακας
Niamey I	9.381	Diesel
Niamey II	8.098	Diesel
Malbaza	8.550	Diesel
Zinder	1.961	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 95,3%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 8,6%		

Πίνακας 4.19: Νιγηρία

<b>Νιγηρία</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
AES Barge	270	Φυσικό αέριο
Aba	140	Φυσικό αέριο
Afam IV-V	726	Φυσικό αέριο
Afam VI	624	Φυσικό αέριο
Alaoji	1.074	Φυσικό αέριο
Egbin	1.320	Φυσικό αέριο
Geregu I	414	Φυσικό αέριο
Geregu II	434	Φυσικό αέριο
Ibom	190	Φυσικό αέριο
Okpai	480	Φυσικό αέριο
Olorunsogo	336	Φυσικό αέριο
Olorunsogo II	675	Φυσικό αέριο
Omoku	150	Φυσικό αέριο
Omotosho I	336	Φυσικό αέριο
Omotosho II	450	Φυσικό αέριο
Sapele	1.020	Φυσικό αέριο
Sapele II	450	Φυσικό αέριο
Delta - Ughelli	900	Φυσικό αέριο
Kainji	800	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Jebba	540	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Shiroro	600	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Zamfara	100	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 211,3%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 50,6%		

Πίνακας 4.20: Σενεγάλη

<b>Σενεγάλη</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Dakar C1	9	Γαιάνθρακας
Dakar C2	86,2	Γαιάνθρακας
Dakar C3	148	Γαιάνθρακας
Dakar C4	95	Γαιάνθρακας
Dakar C5	12	Γαιάνθρακας
Ndar	7,2	Γαιάνθρακας
Kahone	102	Γαιάνθρακας
Boutoute	14	Γαιάνθρακας
Tambacounda	6	Γαιάνθρακας
Bel Air	102	Γαιάνθρακας
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 55,5%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 42,0%		

**Πίνακας 4.21: Νότιος Αφρική**

<b>Νότιος Αφρική</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Arnot	2.100	Γαιάνθρακας
Bloemfontein	102	Γαιάνθρακας
Camden	1.600	Γαιάνθρακας
Duvha	3.600	Γαιάνθρακας
Grootvlei	1.200	Γαιάνθρακας
Hendrina	2.000	Γαιάνθρακας
Kelvin	600	Γαιάνθρακας
Kendal	4.116	Γαιάνθρακας
Komati	1.000	Γαιάνθρακας
Kriel	3.000	Γαιάνθρακας
Lethabo	3.708	Γαιάνθρακας
Majuba	4.110	Γαιάνθρακας
Matimba	3.990	Γαιάνθρακας
Matla	3.600	Γαιάνθρακας
Pretoria West	180	Γαιάνθρακας
Rooiwal	300	Γαιάνθρακας
Tutuka	3.654	Γαιάνθρακας
Acacia	171	Υγραέριο
Ankerlig	1.338	Υγραέριο
Gourikwa	746	Υγραέριο
Newcastle Cogeneration Plant	26	Υγραέριο
Port Rex	171	Υγραέριο
Drakensberg Pumped Storage Scheme	1.000	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Gariiep Dam	360	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Ingula Pumped Storage Scheme	1.332	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Ncora Dam	2,1	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Palmiet Pumped Storage Scheme	400	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Steenbras Dam Pumped Storage	180	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Vanderkloof Dam	240	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Koeberg nuclear Σταθμός Παραγωγής	1.800	Πυρηνική ενέργεια
Coega	1,8	Αιολική ενέργεια
Darling	5,2	Αιολική ενέργεια
Klipheuwel	3,16	Αιολική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 111,5%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 75,0%		

**Πίνακας 4.22: Νότιο Σουδάν**

<b>Νότιο Σουδάν</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Juba	5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kapoeta	0,9	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Maridi	0,9	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Yei	1,2	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Wau	2	Diesel
Juba (Wartsila)	12	Diesel
Malakal	4,8	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 58,9%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 1%		

Πίνακας 4.23: Σουδάν

<b>Σουδάν</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Roseires 2	1.800	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Merowe	1.250	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Shereyk	350	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kajbar	300	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Sennar	15	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Roseires	450	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Jabal Awlia Σ	35	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Khashm al-Qirbah	15	Υδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 222,6%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 30,0%		

Πίνακας 4.24: Τανζανία

<b>Τανζανία</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Mtera	80	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kihansi	180	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Nyumba ya Mungu	8	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kidatu	204	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Pangani	68	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Hale	21	Υδροηλεκτρική ενέργεια
PAP	100	Diesel
Ubungo Thermal Power	102	Φυσικό αέριο
Ubungo II	120	Φυσικό αέριο
Tegeta	45	Φυσικό αέριο
Mtwara	18	Φυσικό αέριο
Dodoma	55	Diesel
Son	190	Φυσικό αέριο
Arusha	50	Diesel
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 92,0%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 13,9%		

Πίνακας 4.25: Ουγκάντα

<b>Ουγκάντα</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Bugoye	13	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Bujagali	250	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kabalega	9	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kanungu	6,6	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kiira	200	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mpanga	18	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mubuku I	5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Mubuku III	10	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Nalubaale	180	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Nyagak	3,5	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Kisiizi	0,3	Υδροηλεκτρική ενέργεια
Bugala	1,5	Diesel
Namanve	50	Πετρέλαιο
Tororo	80	Πετρέλαιο
Kakira	52	Βιομάζα
Kinyara	14,5	Βιομάζα
Lugazi	8,6	Βιομάζα
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 94,1%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 9,0%		



Πίνακας 4.26: Ζάμπια

<b>Ζάμπια</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (MW)</b>	<b>Τύπος</b>
Kafue Gorge	990	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Kariba North Bank	720	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Victoria Falls	108	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Lusemfwa and Mulungushi	54	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Isolated Generation	8	Diesel
Gas Turbine	80	Diesel
Lusiwasi	12	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Musonda Falls	5	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Chishimba Falls	6	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Lunzua	0,75	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 92,2%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 18,8%		

Πίνακας 4.27: Ζιμπάμπουε

<b>Ζιμπάμπουε</b>		
<b>Σταθμός Παραγωγής</b>	<b>Παραγωγή (GWh)</b>	<b>Τύπος</b>
Hwange	3.133,284	Γαϊάνθρακας
Kariba	5.387,349	Ηδροηλεκτρική ενέργεια
Harare	60,375	Γαϊάνθρακας
Munyati	203,653	Γαϊάνθρακας
Bulawayo	178,370	Γαϊάνθρακας
<b>Παρατηρήσεις</b>		
Ενεργειακή Αυτονομία: 89,7%		
Ποσοστό Ηλεκτροδότησης: 41,5%		



---

*Ο Σκοπός και Η Συνεισφορά Της Εργασίας*

---



## Σκοπός

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επιλογή δύο κατάλληλων υβριδικών πακέτων τα οποία θα έχουν εφαρμογή σε μία χώρα της Αφρικής. Η επιλογή της κατάλληλης χώρας θα γίνει με την βοήθεια μίας πολυκριτηριακής ανάλυσης, στην οποία λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως είναι το ποσοστό ηλεκτροδότησης, η μέση ετήσια παραγωγή ενός δοσμένου συστήματος, η μέση ταχύτητα του ανέμου κ.α. Μετά την επιλογή της χώρας περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής του πακέτου και υπολογίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

**Φάση 1<sup>η</sup>:** Μελέτη της υπάρχουσας κατάστασης στην Αφρική

Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης, έγινε έρευνα και συλλογή στοιχείων από την διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με την υπάρχουσα κατάσταση της Αφρικής, τόσο γενικά όσο και ειδικότερα για τις ενεργειακές ανάγκες.

**Φάση 2<sup>η</sup>:** Συλλογή στοιχείων για την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής

Στην δεύτερη φάση της εργασίας, έγινε έρευνα και συλλογή στοιχείων, με την βοήθεια ηλεκτρονικής αναζήτησης, σχετικά με την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση, τις υπάρχουσες ανάγκες και ενεργειακές υποδομές, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν και τις δυνατότητες ανάπτυξης της Αφρικής όσον αφορά στον ενεργειακό τομέα της.

**Φάση 3<sup>η</sup>:** Παρουσίαση Πολυκριτηριακών Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

Σε αυτήν την φάση, έγινε έρευνα και καταγραφή στοιχείων σχετικά με τα Πολυκριτηριακά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων. Μελετήθηκαν οι κυριότερες κατηγορίες και συλλέχθηκαν στοιχεία για τις κυριότερες μεθόδους που ανήκουν στην κάθε κατηγορία. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή χωρών υποδοχής για την εφαρμογή υβριδικών πακέτων.

**Φάση 4<sup>η</sup>:** Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων

Η φάση αυτή αφορά την εφαρμογή δύο πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων ELECTRE I και MAUT για την επιλογή της πλέον κατάλληλης χώρας υποδοχής για την υλοποίηση των υβριδικών πακέτων.

**Φάση 5<sup>η</sup>:** Υλοποίηση υβριδικού πακέτου

Σε αυτήν την φάση, με βάση την χώρα επιλογής που προέκυψε από την προηγούμενη φάση έγινε αναλυτική περιγραφή των υβριδικών πακέτων. Παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα μονογραμμικά σχέδια των πακέτων και

διαμορφώνονται ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί τόσο σε μία συστοιχία κατοικιών σε αγροτική περιοχή όσο και σε μία μόνο κατοικία σε αστική περιοχή.

**Φάση 6<sup>η</sup>:** Εξαγωγή συμπερασμάτων και προοπτικές για το μέλλον

Στην τελευταία φάση, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προηγούμενα βήματα, έγινε η προσπάθεια της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά την διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι πιθανές προοπτικές για το μέλλον.

## Η συνεισφορά της εργασίας

Για πρώτη φορά σε διπλωματική εργασία έγινε παραμετροποίηση της πολυκριτηριακής μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων ELECTRE I, ώστε να μπορέσει να υποστηρίξει βέλτιστη απόφαση για τόσο μεγάλο πλήθος επιλογών, όπως είναι οι 27 χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής, για οκτώ παραμετρικά κριτήρια.

Το αποτέλεσμα φαίνεται στα κεφάλαια 5.3.3 και 5.3.4 με τη δημιουργία των πολύπλοκων αυτών πινάκων, αλλά έχοντας ένα αξιόλογο αποτέλεσμα το οποίο επιβεβαιώνεται μετά, από την δεύτερη μέθοδο υποστήριξης αποφάσεων MAUT, η οποία κατέληξε στο ίδιο αποτέλεσμα με την ELECTRE I.

Με βάση αυτή την διπλωματική εργασία και τα αποτελέσματα της, μπορεί κάποιος ενδιαφερόμενος να κατανοήσει σε λεπτομέρεια την μελέτη, τον υπολογισμό, την σύνθεση και να κατασκευάσει ένα τέτοιο αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας, με φωτοβολταϊκή και αιολική ενέργεια.

---

*Κεφάλαιο 5. Πολυκριτηριακά Συστήματα  
Υποστήριξης Αποφάσεων*

---





## 5.1 Εισαγωγή

Η λήψη αποφάσεων είναι το συνηθέστερο αλλά και σημαντικότερο φαινόμενο της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η έννοια της απόφασης υπονοεί πάντα έναν λήπτη της απόφασης, ο οποίος μπορεί να είναι ένα άτομο ένα συλλογικό όργανο ή ακόμη μια πιο ασαφής οντότητα ή φορέας που επηρεάζει άμεσα την διαδικασία λήψης της απόφασης.[64]

Η δυσκολία ενός προβλήματος απόφασης έγκειται σε 2 παράγοντες, ο πρώτος είναι ο πολυδιάστατος χαρακτήρας των επιπτώσεων των δράσεων και ο δεύτερος είναι η βεβαιότητα ή αβεβαιότητα που διέπει τα δεδομένα του προβλήματος. Οι περισσότερες αποφάσεις σήμερα μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολυδιάστατες ή πολυκριτηριακές.

Η ραγδαία εξέλιξη της πληροφορικής σε συνδυασμό με την αναθεώρηση του τρόπου προσέγγισης των προβλημάτων απόφασης είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη των Συστημάτων Υποστήριξης Απόφασης (ΣΥΑ). Ο όρος αυτός εκπέμπει μια νέα αντίληψη στα πλαίσια της επιστήμης των αποφάσεων η οποία αφορά στο χειρισμό και την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων απόφασης. Στόχος των ΣΥΑ είναι η ενίσχυση του ρόλου του αποφασίζοντος μέσα στην επιχείρηση και η διευκόλυνση του έργου του για μια αποτελεσματικότερη διοίκηση. Τα ΣΥΑ αναδεικνύουν και αξιοποιούν κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο την συμβολή των μοντέλων απόφασης στην επιτυχή περάτωση μιας διαδικασίας απόφασης. Τα ΣΥΑ συμπλήρωσαν παρά αντικατέστησαν τα παραδοσιακά Πληροφοριακά Συστήματα Διοίκησης (ΠΣΔ) των οποίων η εμφάνιση τοποθετείται στις αρχές της δεκαετίας του '60. Τα ΠΣΔ και τα ΣΥΑ συνθέτουν σήμερα ένα δυναμικό πλαίσιο για αποτελεσματικότερη και αποδοτικότερη οργάνωση και διοίκηση.[64]

Πρέπει να τονιστεί ότι τα ΣΥΑ δεν δίνουν τη «σωστή απάντηση» γιατί δεν υπάρχει ο όρος βελτιστοποίηση που υπάρχει στην περίπτωση που πρέπει να ικανοποιηθεί ένας μόνο στόχος. Με τη χρήση πολλών κριτηρίων ή και πολλών αποφασιζόντων γίνεται συμβιβασμός. Έτσι η λύση ή το σύνολο των λύσεων προκύπτουν από συμβιβασμούς με βάση τη βαρύτητα των κριτηρίων ή και των αποφασιζόντων. Η υποκειμενικότητα συναντάται σε όλη τη διαδικασία των ΣΥΑ, όπως στην επιλογή των κριτηρίων και στα σχετικά βάρη τα οποία δίνονται σε αυτά τα κριτήρια. Παρόλα αυτά, τα ΣΥΑ έχουν σαν στόχο να διευκολύνουν τους αποφασίζοντες για την αναγνώριση μιας προτιμώμενης λύσης.[64]

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται αρχικά οι κατηγορίες μεθόδων και στη συνέχεια οι κύριες τεχνικές Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων διακριτού συνόλου επιλογών και αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι της κάθε τεχνικής.

## 5.2 Εισαγωγή Στις Μεθόδους Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων

### 5.2.1 Κατηγορίες Μεθόδων Πολυκριτηριακής Υποστήριξης Αποφάσεων

Μέσα στο διάστημα πολλών ετών από την εμφάνιση των μεθόδων πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων(MCDA) πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί και αναπτυχθεί. Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν σε πολλά σημεία, κάποιες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και δεν έχουν ιδιαίτερη αξία για την επίλυση άλλων προβλημάτων. Άλλες μέθοδοι είναι πιο γενικές και πολλές από αυτές έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς. Η κύρια ιδέα όλων των μεθόδων είναι να δημιουργήσουν μια πιο τυποποιημένη και καλύτερα δομημένη διαδικασία για λήψη απόφασης.[63]

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ταξινομηθούν οι υπάρχουσες μέθοδοι, οι 3 κύριες κατηγορίες είναι οι ακόλουθες

- Βασικές μέθοδοι αναγωγής σε ένα κριτήριο
- Μέθοδοι ασαφούς λογικής
- Βασικές μέθοδοι σχέσεων υπεροχής

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφούν αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των 3 κατηγοριών και θα αναφερθούν μερικές από τις κύριες μεθόδους που ανήκουν στις κατηγορίες αυτές.[63]

### 5.2.2 Βασικές Μέθοδοι Αναγωγής σε Ένα Κριτήριο

Όταν χρησιμοποιούμε αυτές τις μεθόδους μια αριθμητική τιμή  $V$  δίνεται σε κάθε εναλλακτική. Αυτές οι τιμές παράγουν μια σειρά προτίμησης για τις εναλλακτικές έτσι ώστε η εναλλακτική  $\alpha$  προτιμάται της εναλλακτικής  $\beta$  αν και μόνο αν  $V(\alpha) > V(\beta)$ . όταν χρησιμοποιούμε αυτή την προσέγγιση στα διάφορα κριτήρια δίνονται βάρη τα οποία αντιπροσωπεύουν την μερική τους συνεισφορά στο τελικό αποτέλεσμα βασισμένο στο πόσο σημαντικό είναι αυτό το κριτήριο για την λήψη απόφασης. Οι πιο σύνηθες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η MAUT και η AHP.[63]

#### 5.2.2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Η Analytic Hierarchy Process(AHP) η οποία αναπτύχθηκε από τον Saaty το 1980 αναγάγει ένα πολύπλοκο πρόβλημα σε μια ιεραρχία. Η θεωρία της βασίζεται στα ακόλουθα αξιώματα

Αξίωμα 1: (αμοιβαία σύγκριση), ο αποφασίζων πρέπει να μπορεί να κάνει συγκρίσεις και να δηλώνει το σθένος των αποφάσεων του. Η σθεναρότητα αυτών των

προτιμήσεων πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη αμοιβαιότητας: αν το A είναι  $\chi$  φορές περισσότερο προτιμητέο από το B, τότε το B είναι  $1/\chi$  φορές περισσότερο προτιμητέο από το A.[63]

Αξίωμα 2: (ομοιογένεια), η προτίμηση εκφράζεται από ένα κλειστό σύνολο κλίμακας.

Αξίωμα 3: (ανεξαρτησία), όταν εκφράζονται προτιμήσεις τα κριτήρια υποθέτονται ανεξάρτητα από τις ιδιότητες των εναλλακτικών.

Αξίωμα 4: (προσδοκία), για τον σκοπό της λήψης απόφασης η ιεραρχική δομή θεωρείται πλήρης.[63]

Στην αρχή της διαδικασίας πρέπει να καθοριστούν τα βάρη των στοιχείων των διαφορετικών ιεραρχιών με συγκρίσεις ζευγαριών. Θεωρούμε  $n$  στοιχεία,  $C_1, \dots, C_n$  τα σύνολα των στοιχείων και  $a_{ij}$  η σχέση των κριτηρίων  $C_i, C_j$  [63]

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

αν  $w_1, \dots, w_n$  τα αριθμητικά βάρη και  $w_i/w_j = a_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$  τότε ο πίνακας A γίνεται

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

Όταν ο πίνακας A πολλαπλασιαστεί με τον  $n \times 1$  πίνακα των βαρών W τότε

$$[A][W] = n[W] = \begin{bmatrix} w_1 + w_1 + \dots + w_1 \\ w_2 + w_2 + \dots + w_2 \\ \dots \\ w_n + w_n + \dots + w_n \end{bmatrix}$$

Η εξίσωση  $[A][W] = n[W]$  λέγεται χαρακτηριστική εξίσωση και το  $n$  είναι η χαρακτηριστική ρίζα του πίνακα A. Αν όλα τα στοιχεία του A ικανοποιούν την σχέση  $a_{ij} = (w_i/w_k)(w_k/w_j) = a_{ik}a_{kj}$  η οποία λέγεται κύρια σχέση συνοχής, τότε ο πίνακας είναι συνεκτικός διαφορετικά είναι μη συνεκτικός. Στην πράξη ο πίνακας A είναι σπάνια συνεκτικός, στην μη συνεκτική μορφή η χαρακτηριστική εξίσωση είναι

$[A][W'] = \lambda_{\max}[W']$  όπου  $\lambda_{\max}$  είναι η μεγαλύτερη χαρακτηριστική ρίζα και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [63]

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{w_j}{w_i}$$

το χαρακτηριστικό διάνυσμα  $[w']$  το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των σχετικών βαρών των εναλλακτικών υπολογίζεται από τις 2 παραπάνω εξισώσεις. [63]

Επιπλέον η συνοχή των συγκρίσεων πρέπει να επαληθευτεί, ο δείκτης συνοχής δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Και ο ρυθμός μη συνεκτικότητας δίνεται από τον τύπο

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Όπου το RI είναι ο δείκτης μέσης συνοχής. Αν  $CR < 0.1$  τότε ο πίνακας θεωρείται συνεκτικός διαφορετικά ο πίνακας είναι μη συνεκτικός και πρέπει να γίνουν νέες συγκρίσεις. [63]

### 5.2.2.2 Multi Attribute Utility Theory (MAUT)

Η μέθοδος MAUT είναι μια συστηματική μέθοδος προσδιορισμού και ανάλυσης πολλαπλών μεταβλητών για να παράσχει μια κοινή βάση για την λήψη απόφασης. Στην μέθοδο αυτή το στοιχείο κλειδί είναι η παραγωγή μιας πολλαπλών ιδιοτήτων συνάρτησης χρησιμότητας για την οποία είναι απαραίτητα οι απλές συναρτήσεις χρησιμότητας και τα βάρη των παραγόντων. [64]

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα παρακάτω

1) καθορισμός ενός στόχου και καθορισμός των παραμέτρων για την επίτευξή του

Ο καθορισμός ενός υλικού στόχου και εύρεση ιδιοτήτων/εναλλακτικών είναι βασικά και ουσιώδη στάδια για την διαδικασία αξιολόγησης της μεθόδου. Αρχικά ο στόχος της αξιολόγησης καθορίζεται εκτενώς και οι σχετικές ιδιότητες επίσης. [64]

2) καθορισμός ενός εύρους ιδιοτήτων

Πριν τον καθορισμό των συναρτήσεων χρησιμότητας των ιδιοτήτων πρέπει να καθοριστεί ένα κατάλληλο εύρος των ιδιοτήτων. Στον καθορισμό του εύρους ένα άνω και ένα κάτω όριο θέτονται χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα αποτελέσματα ερευνών των επιστημονικών αναλύσεων. [64]

3) παραγωγή των απλών συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε εναλλακτική

Αρχικά οι συναρτήσεις χρησιμότητας ελέγχονται για να διαπιστωθεί αν είναι αύξουσες ή φθίνουσες. Έπειτα η μορφή των απλών συναρτήσεων χρησιμότητας καθορίζεται σύμφωνα με την πολιτική του αποφασίζοντα για τις εναλλακτικές. Οι παρακάτω εξισώσεις δείχνουν τις μορφές των γενικών συναρτήσεων χρησιμότητας που είναι αντίστοιχα ακίνδυνη, ουδέτερη και επικίνδυνη όσον αφορά τους κινδύνους

$$U(x) = a - b \exp(-cx)$$

$$U(x) = a + b(cx)$$

$$U(x)=a+b\exp(cx)$$

Όπου  $a$  και  $b$  είναι σταθερές που χρησιμοποιούνται ώστε η συνάρτηση  $u(x)$  να ανήκει στο διάστημα  $[0,1]$ . Η σταθερά  $c$  είναι ο όρος της αύξουσας συνάρτησης όταν έχει αρνητικό πρόσημο και ο όρος μια φθίνουσας συνάρτησης όταν έχει θετικό πρόσημο όταν αναφέρεται στην πρώτη εξίσωση. Τα αντίθετα ισχύουν όταν αναφέρεται στην τρίτη εξίσωση. Επίσης στην δεύτερη εξίσωση το  $c$  είναι διπλή συνάρτηση,  $+1$  για μια αύξουσα συνάρτηση και  $-1$  για μια φθίνουσα συνάρτηση.[64]

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει ένα άθροισμα των αποτελεσμάτων. Συνήθως χρησιμοποιούνται προσθετικές ή πολλαπλασιαστικές μορφές στο μοντέλο αυτό. Η γενική μορφή ενός προσθετικού μοντέλου είναι

$$U_i(x_i)=\sum_{j=1}^n k_{ij}u_{ij}(x_{ij})$$

Όπου το  $j$  είναι η  $j$ -ιοστή ιδιότητα ενδιαφέροντος, το  $u_{ij}$  είναι η  $j$ -ιοστή ιδιότητα του  $i$ -οστού κριτηρίου,  $u_i$  είναι η προτίμηση του αποφασίζοντος ή η απλή συνάρτηση χρησιμότητας για το  $x_{ij}$ ,  $k_{ij}$  είναι η σχετική σπουδαιότητα της  $j$ -οστής ιδιότητας του  $i$ -οστού κριτηρίου και ισχύει για τις  $n$  ιδιότητες ότι  $\sum_{j=1}^n k_{ij} = 1$

4) υπολογισμός των παραγόντων με βάρη για κάθε ιδιότητα

Σε αυτό το στάδιο ο αποφασίζων καθορίζει την σχετική σπουδαιότητα των διαφόρων ιδιοτήτων. [64]

5) παραγωγή των πολλαπλών ιδιοτήτων συναρτήσεων χρησιμότητας

Με τις προηγούμενες υπολογισθείσες απλές συναρτήσεις χρησιμότητας και των παραγόντων τους με βάρη, οι πολλαπλών ιδιοτήτων συναρτήσεις χρησιμότητας μπορούν να καθοριστούν. Η επόμενη εξίσωση δείχνει την μαθηματική μορφή μιας πολλαπλών ιδιοτήτων συνάρτησης χρησιμότητας

$$U(x_1, \dots, x_m)=w_1u_1(x_1)+\dots+w_mu_m(x_m)$$

Όπου  $w_1, \dots, w_n$  είναι οι παράγοντες με βάρη των συναρτήσεων χρησιμότητας και το άθροισμα όλων αυτών είναι ίσο με την μονάδα. Ο όρος  $u_i$  είναι μια απλή συνάρτηση χρησιμότητας.[64]

### 5.2.3 Μέθοδοι Ασαφούς Λογικής

Στις μεθόδους αυτές η εναλλακτική που επιλέγεται πρέπει να έχει την μικρότερη απόσταση από την ιδανική θετική λύση και ταυτόχρονα την μεγαλύτερη απόσταση από την ιδανική αρνητική λύση. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται ασαφείς ομαδοποιήσεις και κλίμακες. Οι εναλλακτικές και τα κριτήρια συγκεντρώνονται και δημιουργείται ο ασαφής πίνακας του προβλήματος. Έπειτα με την διαδικασία της κανονικοποίησης τα στοιχεία μπορούν να συγκριθούν και να υπολογισθούν οι

αποστάσεις ώστε να καταλήξουμε στην προτεινόμενη εναλλακτική. Οι βασικές μέθοδοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή είναι οι fuzzy AHP και η LOWA.[63]

### 5.2.3.1 Fuzzy AHP

Σε μια τυπική μέθοδο AHP οι ειδικοί πρέπει να δώσουν έναν καθορισμένο αριθμό της κλίμακας 1-9 στις συγκρίσεις ζευγαριών έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα προτεραιότητας. Υποθέτοντας ότι δύο παράγοντες είναι ίσης σπουδαιότητας τότε έχουν μια κλίμακα του 1, αν ένας παράγοντας είναι ελαφρώς πιο σημαντικός από έναν άλλον τότε έχει μια κλίμακα του 3. Οι κλίμακες του 5, 7 και 9 χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν ένα παράγοντα ο οποίος είναι ισχυρά πιο σημαντικός, πολύ πιο ισχυρά σημαντικός και τελείως πολύ πιο σημαντικός αντίστοιχα. Οι κλίμακες του 2, 4, 6 και 8 χρησιμοποιούνται για να δείξουν ελαφρώς μικρές διαφορές μεταξύ των δύο ταξινομήσεων. Οι αντίστοιχοι αντίστροφοι αριθμοί (1, 1/2, 1/3, ..., 1/9), χρησιμοποιούνται για την αντίστροφη σύγκριση. Όμως συχνά η σύγκριση των παραγόντων περιλαμβάνει αβεβαιότητα και υποκειμενικότητα και καθιστά αδύνατη την σύγκριση. Σε αυτή την περίπτωση η τυπική μέθοδος AHP πρέπει να απορριφθεί λόγω της ύπαρξης ασαφούς ή ελλιπούς σύγκρισης. Η fuzzy AHP μέθοδος όμως μπορεί να λύσει το πρόβλημα αυτό. [63],[64]

Η fuzzy AHP μέθοδος είναι μια σημαντική επέκταση της τυπικής μεθόδου AHP η οποία αρχικά παρουσιάστηκε από τους Laarhoven και Pedrycz. Αργότερα παρουσιάστηκαν και άλλες επεκτάσεις όμως η περίπλοκη λειτουργία και η έλλειψη αποδεδειγμένων τεχνικών για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν υπονομεύσει την εφαρμογή τους στην πράξη. Η τροποποιημένη fuzzy AHP μέθοδος που προτάθηκε από τον Zeng περιλαμβάνει απλοποιημένες ασαφείς λειτουργίες και βήματα τα οποία είναι παρόμοια με αυτά της κλασσικής μεθόδου.

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ασαφής ομαδοποίηση για να δημιουργηθούν ομάδες αποφάσεων και μετά μια μέθοδος σαφήνειας εφαρμόζεται για να μετατρέψει τις ασαφείς κλίμακες σε ευκρινείς για τον υπολογισμό των βαρών προτεραιότητας. Μετά εφαρμόζοντας ασαφείς τελεστές, υπολογίζεται η ομάδα προτίμησης κάθε παράγοντα. Τα βήματα της μεθοδολογίας είναι τα ακόλουθα[63]

#### **Βήμα 1**

Μέτρηση παραγόντων στην ιεραρχία. Οι ειδικοί χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και την αυθεντία τους παρέχουν την κρίση τους για κάθε παράγοντα από το κατώτερο σημείο της ιεραρχίας. Αυτά μπορεί να είναι ακριβής αριθμητική τιμή, μια σειρά από αριθμητικές τιμές, έναν γλωσσικό όρο ή ένα συγκεχυμένο αριθμό. [63]

#### **Βήμα 2**

Σύγκριση παραγόντων χρησιμοποιώντας συγκρίσεις ζευγαριών. Οι ειδικοί πρέπει να συγκρίνουν κάθε παράγοντα σε ζευγάρια στο αντίστοιχο πεδίο τους σύμφωνα με την

δόμηση της ιεραρχίας και να τα βαθμονομήσουν είτε με μια ευκρινή είτε με μια ασαφή κλίμακα. [63]

### **Βήμα 3**

Μετατροπή των προτιμήσεων στον πρότυπο τραπεζοειδή ασαφή αριθμό (standardized trapezoidal fuzzy number (STFN)). Όπως περιγράφηκε στα βήματα 1 και 2, επειδή οι τιμές των παραγόντων είναι ευκρινείς με την μέθοδο STFN πρέπει να μετατραπούν σε μια καθολική μορφή για την σύνθεση των προτιμήσεων της ομάδας.[63]

Ένα STFN μπορεί να οριστεί ως  $\bar{A} = (a, b, c, d)$  όπου  $0 \leq a \leq b \leq c \leq d$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases}$$

### **Βήμα 4**

Συνάθροιση των ατομικών STFN σε ομάδες STFN. Ο σκοπός του βήματος αυτού είναι να εφαρμόσει τον κατάλληλο τελεστή ώστε να συναθροίσει ατομικές προτιμήσεις που έγιναν από ανεξάρτητους ειδικούς σε μια ομάδα προτίμησης για κάθε παράγοντα. Η συνάθροιση των STFN πραγματοποιείται εφαρμόζοντας τον τελεστή ασαφούς τραπεζοειδούς σταθμισμένου μέσου όρου[63]

$$\bar{S}_i = \bar{S}_{i1} \otimes c_1 \oplus \bar{S}_{i2} \otimes c_2 \oplus \dots \oplus \bar{S}_{im} \otimes c_m$$

Όπου  $\bar{S}_i$  το ασαφές συγκεντρωτικό αποτέλεσμα του παράγοντα  $F_i$ ,

$\bar{S}_{i1}, \bar{S}_{i2}, \dots, \bar{S}_{im}$  οι τιμές STFN του παράγοντα  $F_i$  υπολογισμένες από  $m$  ειδικούς  $E_1, E_2, \dots, E_m$

$\otimes, \oplus$  συμβολίζουν τους ασαφείς πολλαπλασιαστικούς και αθροιστικούς τελεστές

$c_1, c_2, \dots, c_m$  οι παράγοντες συμβολής των  $m$  ειδικών με την ιδιότητα  $c_1 + c_2 + \dots + c_m = 1$

Όμοια η συνάθροιση της κλίμακας των STFN ορίζεται ως

$$\bar{a}_{ij} = \bar{a}_{ij1} \otimes c_1 \oplus \bar{a}_{ij2} \otimes c_2 \oplus \dots \oplus \bar{a}_{ijm} \otimes c_m$$

Όπου  $\bar{a}_{ij}$  η συνολική ασαφής κλίμακα του  $F_i$  σε σύγκριση με το  $F_j$

$i, j=1, 2, \dots, n$

$\bar{a}_{ij1}, \dots, \bar{a}_{ijm}$  οι κλίμακες των STFΝ του  $F_i$  σε σύγκριση με το  $F_j$  υπολογισμένες από ειδικούς  $E_1, E_2, \dots, E_m$

### **Βήμα 5**

Δημιουργία σαφών κλιμάκων των STFΝ. Για να μετατραπούν οι συγκεντρωτικές κλίμακες των STFΝ σε αντίστοιχες ευκρινείς τιμές οι οποίες να απεικονίζουν επαρκώς την ομάδα των προτιμήσεων, απαιτείται μια διαδικασία σαφenoποίησης

Υποθέτοντας μια συγκεντρωτική κλίμακα STFΝ  $\bar{a}_{ij} = (a_{ij}^l, a_{ij}^m, a_{ij}^n, a_{ij}^u)$ , η αντίστοιχη ευκρινής τιμή  $a_{ij}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση[63]

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}^l + 2(a_{ij}^m + a_{ij}^n) + a_{ij}^u}{6}$$

Όπου  $a_{ii} = 1$  και  $a_{ji} = 1/a_{ij}$

Επομένως όλες οι συγκεντρωτικές ασαφής κλίμακες  $\bar{a}_{ij}$ ,  $i, j=1, 2, \dots, n$ , μετατρέπονται σε ευκρινείς  $a_{ij}$  εντός του εύρους [0,9].

### **Βήμα 6**

Υπολογισμός των βαρών προτεραιότητας των βαρών των εναλλακτικών. Υποθέτοντας ότι  $F_1, \dots, F_n$  είναι ένα σύνολο εναλλακτικών και  $a_{ij}$  είναι η σαφής κλίμακα που αντιπροσωπεύει την εναλλακτική  $F_i$  σε σύγκριση με την εναλλακτική  $F_j$ , η σύγκριση σε ζευγάρια δίνει τον ακόλουθο τετραγωνικό πίνακα[63]

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Τα βάρη προτεραιότητας δίνονται από τον ακόλουθο τύπο

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}$$

### **Βήμα 7**

Υπολογισμός των τελικών ασαφών αποτελεσμάτων.

$$(\tilde{F}S) = \sum_{i=1}^n \tilde{S}w_i^l, i=1, \dots, n$$

### **Βήμα 8**

Σύγκριση των τελικών ασαφών αποτελεσμάτων.



### 5.2.3.2 Linguistic Ordered Weighted Average (LOWA)

Η μέθοδος LOWA βασίζεται στην μέθοδο OWA η οποία εισήχθη από τον Yager και στον συνδυασμό των γλωσσικών ετικετών το οποίο ορίστηκε από τον Delgado. [63]

Έστω  $\{a_1, \dots, a_m\}$  ένα σύνολο από ετικέτες για συνάθροιση, τότε ο τελεστής LOWA ορίζεται ως

$$\Phi(a_1, \dots, a_m) = WB^T = C^m \{w_k, b_k, k=1, \dots, m\} = w_1 \odot b_1 \oplus (1-w_1) \odot C^{m-1} \{\beta_h, b_h, h=2, \dots, m\}$$

Όπου  $W = [w_1, \dots, w_m]$  είναι το διάνυσμα βάρους τέτοιο ώστε  $w_i \in [0, 1]$  και  $\sum w_i = 1$ ,

$$\beta_h = w_h / \sum_{k=2}^m w_k, h = 2, \dots, m$$

Και  $B$  είναι το διάνυσμα ετικετών, κάθε στοιχείο  $b_i \in B$  είναι η  $i$ -οστή μεγαλύτερη ετικέτα στο σύνολο  $a_1, \dots, a_m$ .

$C^m$  είναι ο κυρτός συνδυασμός τελεστών  $m$  ετικετών, αν  $m=2$  τότε ορίζεται ως

$$C^2 \{w_i, b_i, i=1, 2\} = w_1 \odot s_j \oplus (1-w_1) \odot s_i = s_k, s_i, s_j \in S, j \geq i$$

$$K = \min\{T, i + \text{round}(w_1(j-i))\}$$

Όπου  $b_1 = s_j$  και  $b_2 = s_i$

Ένας προτεινόμενος τρόπος από τον Yager για τον υπολογισμό των βαρών είναι ο ακόλουθος

$$W_i = Q(i/n) - Q((i-1)/n), i=1, \dots, n$$

$$Q(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ \frac{r-a}{b-a} & a \leq r \leq b \\ 1 & r > b \end{cases}$$

Όπου  $a, b, r \in [0, 1]$

Ο τελεστής LOWA έχει τις ακόλουθες ιδιότητες [63]

1) Ο τελεστής LOWA είναι γνησίως αύξων σε σχέση με τις τιμές των ορισμάτων και ισχύει το παρακάτω

Έστω  $A = [a_1, \dots, a_n]$  ένα διατεταγμένο διάνυσμα ορισμάτων και έστω  $B = [b_1, \dots, b_n]$  ένα δεύτερο διατεταγμένο διάνυσμα ορισμάτων τέτοιο ώστε  $\forall j, a_j \geq b_j$  τότε  $\Phi(A) \geq \Phi(B)$

2) Ο τελεστής LOWA είναι μεταβατικός

$$\varphi(a_1, \dots, a_n) = \varphi(\pi(a_1), \dots, \pi(a_n))$$

όπου  $\pi$  είναι η αντιμετάθεση στο σύνολο των ορισμάτων

3) Ο τελεστής LOWA είναι ένας «ή/και» τελεστής. Για κάθε διάνυσμα βάρους  $W$  και για κάθε διάνυσμα διατεταγμένων ετικετών  $A=[a_1, \dots, a_n]$  ισχύει

$$\min(a_1, \dots, a_n) \leq \varphi(a_1, \dots, a_n) \leq \max(a_1, \dots, a_n)$$

## 5.2.4 Βασικές Μέθοδοι Σχέσεων Υπεροχής

Στις μεθόδους αυτές οι εναλλακτικές συγκρίνονται σε ζευγάρια για να ελεγχθεί ποια από αυτές θα προτιμηθεί σε σχέση με κάθε κριτήριο. Αφού συγκεντρωθούν όλες οι πληροφορίες για όλα τα κριτήρια, το μοντέλο αυτό καθορίζει σε ποιο βαθμό μια από τις εναλλακτικές υπερτερεί μιας άλλης. Θεωρούμε ότι μια εναλλακτική  $a$  υπερτερεί μιας εναλλακτικής  $b$  αν υπάρχουν αρκετές αποδείξεις για να συμπεράνουμε ότι η  $a$  είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο και η  $b$  όταν λάβουμε υπόψη όλα τα κριτήρια. Οι κύριες μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η ELECTRE και η PROMETHEE.[64],[65]

### 5.2.4.1 Οικογένεια Μεθόδων ELECTRE

#### ELECTRE I

Η μέθοδος αυτή είναι πολύ απλή και πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν όλα τα κριτήρια έχουν κωδικοποιηθεί σε αριθμητικές κλίμακες και με παρόμοια εύρη. Σε μια τέτοια περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι μια εναλλακτική  $a$  υπερτερεί της εναλλακτικής  $b$  ( $aSb$ ) όταν πληρούνται 2 προϋποθέσεις. Ο δείκτης συσχέτισης ορίζεται ως [64]

$$C(aSb) = \sum_{j=1}^m W_j$$

Ορίζεται επίσης ο δείκτης ασυμφωνίας

$$d(aSb) = \max \{ g_j(b) - g_j(a) \}$$

Και οι 2 δείκτες πρέπει να υπολογίζονται για κάθε ζευγάρι εναλλακτικών. Από τις συγκρίσεις αυτές μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα συμπέρασμα από τα παρακάτω

- $aSb$  και όχι  $bSa$  (η  $a$  προτιμάται έναντι του  $b$ )
- $bSa$  και όχι  $aSb$  (η  $b$  προτιμάται έναντι του  $a$ )
- $aSb$  και  $bSa$  (οι  $a$  και  $b$  είναι αδιάφορες)
- όχι  $aSb$  και όχι  $bSa$  (οι  $a$  και  $b$  είναι παρόμοιες) [65]

#### ELECTRE II

Στην μέθοδο αυτή ορίζουμε 2 επίπεδα συσχέτισης  $s^1 > s^2$ ,

όπου  $s^1, s^2 \in [0.5, 1 - \min_j \in J w_j]$ , η συνθήκη συσχέτισης όπου το  $a$  υπερτερεί του  $b$  είναι η ακόλουθη

$c(aSb) \geq s^r$  και  $c(aSb) \geq c(bSa)$  για  $r=1,2$

Στην συνέχεια ακολουθείται ένας αλγόριθμος 4 βημάτων

1. διαίρεση του συνόλου  $A$  σε ένα σύνολο  $\bar{A}$
2. δημιουργία μιας πλήρους προ-ακολουθίας  $Z_1$  της  $\bar{A}$
3. . δημιουργία μιας πλήρους προ-ακολουθίας  $Z_2$  της  $\bar{A}$
4. δημιουργία της μερικής προ-ακολουθίας  $Z$ ,  $aZb \Leftrightarrow aZ_1b$  και  $aZ_2b$  [65]

### **ELECTRE III**

Η προέλευση της μεθόδου Electre προέρχεται από το 1965. Εκείνη την εποχή, μια ομάδα ερευνητών για να μπορέσει να λύσει ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα δημιούργησε την μέθοδο MARSAN, η οποία όμως είχε πολλές δυσκολίες στην εφαρμογή. Τότε ο B.Roy προσπάθησε να βρει μια νέο μέθοδο για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της προηγούμενης μεθόδου και έτσι δημιουργήθηκε η μέθοδος ELECTRE.[65]

Στην μέθοδο αυτή αρχικά πρέπει να καθοριστεί ένα σύνολο από πιθανές εναλλακτικές  $A=(A_1, A_2, \dots, A_n)$  που θα εκτιμηθούν κατά την διαδικασία αξιολόγησης. Στην συνέχεια καθορίζονται τα κριτήρια  $F=(1, 2, \dots, j, \dots, m)$  τα οποία βοηθούν στην συγκρότηση μιας σειράς κατάταξης των εναλλακτικών.

Δοθέντων δύο εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_k$  και υποθέτοντας ότι οι τιμές τους εκφράζονται ως  $g_j=g_j(A_i)$  και  $g_j=g_j(A_k)$  σύμφωνα με το  $j$ -ιστό κριτήριο μπορούμε να πούμε ότι το  $A_i$  κυριαρχεί του  $A_k$  αν

$$g_j(A_i) \geq g_j(A_k) \quad \forall j \in F$$

Η παραπάνω ανισότητα πρέπει να επαληθευτεί για ένα τουλάχιστον κριτήριο. Η  $F$  είναι αποδεκτή αν γίνεται δεκτή από όλους τους παράγοντες που εμπλέκονται στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ένα σύνολο κριτηρίων πρέπει να πληροί τις ακόλουθες απαιτήσεις:[65]

#### Πληρότητα

Τα κριτήρια δεν πρέπει να είναι ανεπαρκή ή υπερεπαρκή

Αν  $\forall F, g_j(A_i)=g_j(A_k) \Rightarrow A_i$  και  $A_k$  είναι αδιάφορα.

Αν ο αποφασίζων δεν θεωρεί την παραπάνω πρόταση αληθή τότε υποθέτει ότι κάποια σημαντικά κριτήρια αξιολόγησης δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

#### Συνοχή

Το σύνολο προτιμήσεων για κάθε κριτήριο πρέπει να συμφωνεί με τις γενικές προτιμήσεις.

Αν  $g_j(A_i) = g_j(A_k) \quad \forall j \neq k$  και  $g_k(A_i) > g_k(A_k) \Rightarrow$  το  $A_i$  προτιμάται έναντι του  $A_k$

#### Όχι πλεονάζοντα

Τα κριτήρια δεν πρέπει να είναι πλεονάζοντα και δεν πρέπει να επαναλαμβάνονται. Η διαγραφή κάποιων κριτηρίων μπορεί να κάνει μη έγκυρες κάποιες από τις προηγούμενες προϋποθέσεις για τουλάχιστον ένα ζευγάρι ενεργειών.[65]

Η μέθοδος ELECTRE χαρακτηρίζεται από μερική συγκέντρωση των προτιμήσεων. Ειδικότερα, είναι δυνατό να οριστεί η σχέση υπεροχής της εναλλακτικής  $A_i$  έναντι της εναλλακτικής  $A_k$  ως μια δυαδική σχέση στο  $A$ , αν είναι δυνατό να οριστεί βέβαια ότι η  $A_i$  είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η  $A_k$  δεδομένων των συνθηκών του προβλήματος, τις προτιμήσεις και την ποιότητα της αξιολόγησης της κάθε εναλλακτικής.[64]

Η υπόθεση της υπεροχής υποστηρίζεται από 2 συνθήκες δοκιμής.

1. συμφωνία

2. ασυμφωνία

Ένας δείκτης ο οποίος ορίζεται στο διάστημα  $[0,1]$  παρέχει μια αξιολόγηση για τον βαθμό αξιοπιστίας της κάθε σχέσης υπεροχής και αποτελεί μια δοκιμή για να επαληθευτεί η απόδοση της κάθε εναλλακτικής.[66]

Ενώ ένα κριτήριο ορίζεται ως ένα άκαμπτο εργαλείο στην κλασσική αντίληψη, η μεθοδολογία του ELECTRE εισάγει την ελαστική έννοια του ψευδο-κριτηρίου. Ορίζει μια κατάσταση αδιαφορίας σε μια ζώνη όπου η διαφορά των  $A_i$  και  $A_k$  είναι ιδιαίτερα μικρή. Επίσης ορίζει μια ζώνη ασθενούς προτίμησης ανάμεσα στις ζώνες αδιαφορίας και αυστηρής προτίμησης. Αυτές οι ζώνες αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα μεταξύ της αδιαφορίας και των αυστηρών συνθηκών προτίμησης. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει να αποφεύγονται αποφάσεις όταν τα δεδομένα δεν είναι εντελώς διαθέσιμα ή είναι αβέβαια.[66]

Ένα κατώφλι αδιαφορίας  $q_j$  και ένα κατώφλι αυστηρής προτίμησης  $p_j$  είναι καθορισμένα όσον αφορά το  $j$ -ιστό κριτήριο. Ειδικότερα το  $q_j$  δείχνει το κατώτατο όριο της αβεβαιότητας, που σχετίζεται με τους εκτελούμενους υπολογισμούς, ενώ το  $p_j$  μπορεί να θεωρηθεί ως το ανώτατο όριο του σφάλματος σε σχέση με τους εκτελούμενους υπολογισμούς. Ως εκ τούτου, ένα ψευδο-κριτήριο είναι μια συνάρτηση  $g_j$  στην οποία η διακριτή ικανότητα χαρακτηρίζεται από δύο  $\forall A_i$  και  $\forall A_k \in A$  κατώφλια που αναφέρονται στα  $q_j$  και  $p_j$  και ορίζονται ακολούθως: [66]

Τα  $A_i$  και  $A_k$  αδιάφορα αν

$$|g_j(A_i) - g_j(A_k)| \leq q_j$$

Το  $A_i$  προτιμάται ασθενέστερα του  $A_k$  αν

$$q_j < [g_j(A_i) - g_j(A_k)] \leq p_j$$

Το  $A_i$  προτιμάται ισχυρότερα του  $A_k$  αν

$$g_j(A_i) - g_j(A_k) > p_j$$

Σύμφωνα με το ίδιο κριτήριο είναι πάντα αληθές ότι

$$q_j \leq p_j$$

Ένα ψευδο-κριτήριο γίνεται αληθές κριτήριο αν

$$q_j = p_j$$

Για το  $j$ -ιοστό κριτήριο μπορεί να οριστεί το κατώφλι-βέτο  $v_j$  ως η οριακή τιμή της διαφοράς  $g_j(A_k) - g_j(A_i)$ , σύμφωνα με το οποίο είναι θεμιτό να απορρίψουμε την υπόθεση της υπεροχής του  $A_i$  έναντι του  $A_k$ . Συνεπάγεται ότι [66]

$$q_j < p_j < v_j$$

Τα παραπάνω κατώφλια δεν είναι πειραματικές τιμές από τις οποίες απαιτείται το ακριβές αποτέλεσμα αλλά είναι κατάλληλες ποσότητες τις οποίες εισάγουν οι ειδικοί για να κάνουν την μέθοδο πιο ευέλικτη λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα αβεβαιότητας και προσεγγιστικά.

Τα βάρη των κριτηρίων αποδίδονται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα

1. Μια πρώτη ιεράρχηση των κριτηρίων

2. Μια επακόλουθη απόδοση βαρών σύμφωνα με την ιεραρχία του κάθε κριτηρίου

Κατά την διαδικασία σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών, ο αναλυτής υπολογίζει τους δύο ακόλουθους δείκτες για την αξιολόγηση του βαθμού αντιστοιχίας μεταξύ αυτών των συγκρίσεων και του χρησιμοποιηθέντος συστήματος των βαρών και των κατωφλίων. [66]

- Δείκτης αντιστοιχίας σύμφωνα με ένα δοθέν κριτήριο
- Δείκτης γενικής αντιστοιχίας

Το πρώτο, το οποίο δίνεται από την σχέση  $c_j(A_i, A_k)$ , μας πληροφορεί για την ισχυρή προτίμηση της εναλλακτικής  $A_i$  σε σχέση με την εναλλακτική  $A_k$  σύμφωνα με το  $j$ -ιοστό κριτήριο. Αυτό είναι μια συνάρτηση της διαφοράς  $g_j(A_k) - g_j(A_i)$  και ορίζεται ως: [66]

$$c_j(A_i, A_k) = 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(A_k) - g_j(A_i) \text{ το } A_k \text{ προτιμάται ισχυρά έναντι του } A_i$$

$$0 < c_j(A_i, A_k) < 1 \Leftrightarrow q_j < g_j(A_k) - g_j(A_i) \leq p_j \text{ το } A_k \text{ προτιμάται ασθενώς έναντι του } A_i$$

$$c_j(A_i, A_k) = 1 \Leftrightarrow g_j(A_k) - g_j(A_i) \leq q_j \text{ τα } A_k \text{ και } A_i \text{ είναι αδιάφορα}$$

Με άλλα λόγια το  $c_j(A_i, A_k)$  δείχνει τον βαθμό συσχέτισης με την δήλωση ότι το  $A_i$  υπερέρχει του  $A_k$ . Μειώνεται γραμμικά από το ανώτατο επίπεδο μόλις το  $g_j(A_k)$  περνάει το κατώφλι αδιαφορίας και φτάνει στο κατώτερο επίπεδο μόλις το  $g_j(A_k)$  φτάνει στο κατώφλι προτίμησης.

Ο δείκτης της γενικής συσχέτισης  $C_{ik}$  αντιπροσωπεύει την ποσότητα των αποδείξεων για να υποστηρίξει την συσχέτιση ανάμεσα σε όλα τα κριτήρια, σύμφωνα με την υπόθεση ότι το  $A_i$  υπερέρχει του  $A_k$ . Ορίζεται ως τον σταθμισμένο μέσο όρο όλων των  $c_j(A_i, A_k) \forall F$  με την υπόθεση ότι το  $A_i$  υπερέρχει του  $A_k$ . [66]

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m W_j c_j(A_i, A_k)}{\sum_{j=1}^m W_j}$$

Όπου  $W_j$  το βάρος που σχετίζεται με το  $j$ -ιοστό κριτήριο.

Ο δείκτης ασυμφωνίας μεταξύ των εναλλακτικών  $A_i$  και  $A_k$  σύμφωνα με το  $j$ -ιοστό κριτήριο ορίζεται ως

$$d_j(A_i, A_k) = 1 \Leftrightarrow v_j < g_j(A_k) - g_j(A_i)$$

$$0 < d_j(A_i, A_k) < 1 \Leftrightarrow p_j < g_j(A_k) - g_j(A_i) = v_j$$

$$d_j(A_i, A_k) = 0 \Leftrightarrow g_j(A_k) - g_j(A_i) = p_j$$

Το  $d_j(A_i, A_k)$  εκφράζει τον βαθμό ασυμφωνίας με την δήλωση ότι  $A_i$  υπερέρχει του  $A_k$ . Αυξάνεται γραμμικά από το κατώτερο επίπεδο μέχρι το  $g_j(A_k)$  να περάσει το κατώφλι προτίμησης και φτάνει στο ανώτερο όριο μόλις το  $g_j(A_k)$  φτάνει στο κατώφλι-βέτο. [66]

Η ευελιξία επιτρέπει επαλήθευση αν η σχέση υπεροχής μεταξύ των δύο εναλλακτικών είναι αναμφισβήτητη, μη πειστική ή αν περιλαμβάνονται οι προηγούμενες συνθήκες. Εκφράζεται ως ένας δείκτης  $\delta_{ik}$  που ονομάζεται βαθμός αξιοπιστίας της υπεροχής. Όσον αφορά τα  $A_i$  και  $A_k$  ορίζεται ως

$$\delta_{ik} = C_{ik} \prod_{j \in \bar{F}} \frac{1 - d_j(A_i, A_k)}{1 - C_{ik}} \text{ όταν } d_j > C_{ik}$$

όπου  $\bar{F} = \{j / j \in F, d_j(A_i, A_k) > C_{ik}\}$  και  $\bar{F} \subset F$

Η εισαγωγή του  $\delta_{ik}$  είναι απαραίτητη επειδή το  $C_{ik}$  είναι ένας αξιόπιστος δείκτης αξιοπιστίας της υπεροχής μέχρι οι δείκτες αξιοπιστίας  $d_j$  να αποκτήσουν χαμηλές τιμές. Επιπλέον δεδομένου του βαθμού αξιοπιστίας της υπεροχής  $\delta_{em}$  των δύο εναλλακτικών  $A_e$  και  $A_m$  το γεγονός ότι  $\delta_{ik} > \delta_{em}$  δεν εννοεί ότι η υπεροχή του  $A_i$  έναντι του  $A_k$  είναι ισχυρότερη από την υπεροχή του  $A_e$  έναντι του  $A_m$ . [66]

Μια συνάρτηση, ονόματι κατώφλι διάκρισης,  $s(\lambda)$  ώστε να επαληθεύσει αν μια σχέση υπεροχής είναι περισσότερο αξιόπιστη από μια άλλη.

$$\text{Αν } \forall \lambda \in [0,1] \delta_{ik} = \lambda \text{ και } \delta_{em} = \lambda - \eta \text{ με } \eta > s(\lambda)$$

Τότε επαληθεύεται ότι η υπεροχή του  $A_i$  έναντι του  $A_k$  είναι αυστηρά πιο αξιόπιστη του  $A_e$  έναντι του  $A_m$ .

Η τελική ιεράρχηση προέρχεται από την «απόσταξη», μια διαδικασία η οποία παρέχει δύο πιθανές διατάξεις [66]

1. η πρώτη προέρχεται από μια φθίνουσα απόσταξη, στην οποία η σειρά ιεράρχησης αρχίζει από την ισχυρότερη προτιμώμενη εναλλακτική.

2. η δεύτερη προέρχεται από μια αύξουσα απόσταξη στην οποία η σειρά ιεράρχησης αρχίζει από την ασθενέστερη προτιμώμενη εναλλακτική.

Η τομή των προηγούμενων διατάξεων, η οποία θεωρείται ολοκληρωμένη, είναι μια μερική διάταξη η οποία γίνεται ακολουθώντας τους παρακάτω κανόνες

Αν το  $A_i$  προτιμάται έναντι του  $A_k$  και στις δύο διατάξεις τότε προτιμάται και στην τελική διάταξη

Αν τα  $A_i$  και  $A_k$  είναι αδιάφορα σε μία από τις δύο διατάξεις, ενώ το  $A_i$  προτιμάται έναντι του  $A_k$  στην άλλη διάταξη τότε το  $A_i$  προτιμάται έναντι του  $A_k$  και στην τελική διάταξη

Αν το  $A_i$  προτιμάται έναντι του  $A_k$  σε μία από τις δύο διατάξεις ενώ το  $A_k$  προτιμάται έναντι του  $A_i$  στην άλλη διάταξη τότε τα  $A_i$  και  $A_k$  είναι μη συγκρίσιμα στην τελική διάταξη [66]

### **ELECTRE IV**

Το όνομα ELECTRE IV ήταν ένα ανεπίσημο όνομα για την ELECTRE I με κατώφλι-βέτο. Το νέο εργαλείο που εισήχθη ήταν το κατώφλι-βέτο  $u_j$ , το οποίο λειτουργεί ως ένα άνω όριο. Ανάμεσα στις 2 αυτές μεθόδους υπάρχουν μικρές διαφορές. Η μόνη ουσιαστική διαφορά που αναφέρεται στη συνθήκη συσχέτισης, η οποία στην νέα μέθοδο λέγεται συνθήκη χωρίς βέτο, είναι η ακόλουθη [65]

$$g_j(a) + u_j(g_j(a)) \geq g_j(b)$$

### **ELECTRE IS**

Η κύρια ιδέα της ELECTRE IS είναι η χρήση του ψευδο-κριτηρίου αντί για αληθή κριτήρια. Η διαδικασία που χρησιμοποιεί είναι η ακόλουθη [65]

Συνθήκη συσχέτισης

Όταν  $aSb$

$$J^S = \{j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) \geq g_j(b)\}$$

Όταν  $bQa$

$$J^S = \{j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) < g_j(a) \leq g_j(b) + p_j(g_j(b))\}$$

Η συνθήκη συσχέτισης είναι [65]

$$C(aSb) = \sum_{j \in J^S} w_j + \sum_{j \in J^Q} \varphi_j w_j \geq s$$

$$\text{Όπου } \varphi_j = \frac{g_j(a) + p_j(g_j(a)) - g_j(b)}{p_j(g_j(a)) - q_j(g_j(a))}$$

Συνθήκη χωρίς βέτο

$$g_j(a) + u_j(g_j(a)) \geq g_j(b) + q_j(g_j(b))n_j$$

$$\text{Όπου } n_j = \frac{1 - c(aSb) - w_j}{1 - s - w_j}$$

### **ELECTRE TRI**

Στην ELECTRE TRI όλες οι εναλλακτικές ταξινομούνται σε κατηγορίες. Κάθε κατηγορία χαρακτηρίζεται από ένα ανώτατο και ένα κατώτατο όριο. Θεωρούμε ότι το  $b_h$  είναι το ανώτερο όριο της κατηγορίας  $C_h$  και το κατώτερο όριο της κατηγορίας  $C_{h+1}$ . Η εναλλακτική  $a$  και το όριο  $b_h$  έχουν την ακόλουθη συσχέτιση [65]

- $aIb_h$  αν  $aSb_h$  και  $b_hSa$
- $aPb_h$  αν  $aSb_h$  και όχι  $b_hSa$
- $b_hPa$  αν όχι  $aSb_h$  και  $b_hSa$
- $aRb_h$  αν όχι  $aSb_h$  και όχι  $b_hSa$

### **5.2.4.2 PROMETHEE**

Η PROMETHEE, οικογένεια των μεθόδων υπεροχής, συμπεριλαμβανομένης της PROMETHEE I για τη μερική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων και η PROMETHEE II για πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, αναπτύχθηκαν από τον Brans και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1982 σε ένα συνέδριο που διοργανώθηκε από τους Nadeau και Landry στο Πανεπιστήμιο Laval, Quebec του Καναδά.[66]

Το πρώτο βήμα της μεθόδου PROMETHEE περιλαμβάνει τη δομή μιας προτιμώμενης λειτουργίας για κάθε κριτήριο. Δεδομένου ότι η λειτουργία προτίμησης αντανάκλα τις ποιοτικές πληροφορίες του κάθε παράγοντα είναι δυνατό να αλλάξει η λειτουργία προτίμησης όταν αλλάζουν οι προτιμήσεις του παράγοντα. Το δεύτερο στάδιο αφορά τη σύγκριση μεταξύ των προτεινόμενων εναλλακτικών λύσεων σε ζευγάρια με την προτιμώμενη λειτουργία. Ως τρίτο βήμα, τα αποτελέσματα αυτών των συγκρίσεων παρουσιάζονται σε πίνακα αξιολόγησης ως οι εκτιμώμενες τιμές του κάθε κριτηρίου για κάθε εναλλακτική λύση. Το τέταρτο βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των κατωφλίων και τον υπολογισμό των προτιμώμενων λειτουργιών για κάθε παράγοντα. Στο στάδιο αυτό η ανάλυση



αντανακλά τις προτιμήσεις και τους περιορισμούς του κάθε παράγοντα σε ποσοτική μορφή. Σε αυτό το σημείο η κατάταξη γίνεται σε δύο στάδια: Το πέμπτο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE I για τη μερική κατάταξη και μετά το έκτο βήμα περιλαμβάνει την μέθοδο PROMETHEE II για την πλήρη ιεράρχηση των εναλλακτικών λύσεων. [64]

Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι στο τελικό βήμα συνήθως πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας των συντελεστών στάθμισης, έτσι ώστε να αξιολογηθεί το πώς οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις κατατάσσονται κάτω από διαφορετικά βάρη.

Υποθέτουμε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα:

$\{f_1(a), f_2(a) \dots f_h(a) \dots f_k(a) \mid a \in K\}$  όπου:

$K$  ένα πεπερασμένο σύνολο από πιθανές εναλλακτικές

$f_h(a)$ ,  $h = 1, 2, \dots, k$ , η τιμή της εναλλακτικής  $a$  του κριτηρίου  $h$

Στην ιδανική περίπτωση, ο φορέας λήψης αποφάσεων ενδιαφέρεται να βρει μια βέλτιστη εναλλακτική  $\hat{a}$  η οποία επικρατεί των άλλων εναλλακτικών έτσι ώστε  $f_h(\hat{a}) \geq f_h(a) \forall a \in K, \forall h$  [66]

Γενικά, αυτή η βέλτιστη λύση δεν υπάρχει, και μάλιστα οι σχέσεις κυριαρχίας μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων ορίζονται ως:

Το  $a$  κυριαρχεί του  $b$  αν  $f_h(a) \geq f_h(b)$ ,  $\forall h \in \{1, 2, \dots, k\}$ . Οι μέθοδοι υπεροχής όπως η PROMETHEE προσπαθούν να εμπλουτίσουν την σχέση κυριαρχίας μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων.

Λαμβάνοντας υπόψη δύο εναλλακτικές λύσεις  $a$  και  $b$ , η δομή προτίμησης μπορεί να οριστεί ως:

$$\begin{cases} aPb \text{ ανν } f_h(a) > f_h(b) \\ alb \text{ ανν } f_h(a) = f_h(b) \end{cases}$$

Όπου  $aPb$  σημαίνει ότι η εναλλακτική  $a$  προτιμάται έναντι της εναλλακτικής  $b$  αν η εναλλακτική  $a$  έχει καλύτερες επιδόσεις από την εναλλακτική  $b$  όσον αφορά το κριτήριο  $h$ , και  $alb$  σημαίνει ότι οι εναλλακτικές  $a$  και  $b$  είναι αδιάφορες σε σχέση με το κριτήριο  $h$ . [66]

Η μέθοδος PROMETHEE δίνει μια αριθμητική τιμή μεταξύ 0 και 1 στη σχέση προτίμησης της παραπάνω εξίσωσης με την εισαγωγή του δείκτη προτίμησης  $P(a, b)$  τέτοιο ώστε:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{αν } f_h(a) \leq f_h(b) \\ p[f_h(a), f_h(b)] & \text{αν } f_h(a) > f_h(b) \end{cases}$$

Όπου  $0 < p[f_h(a), f_h(b)] \leq 1$

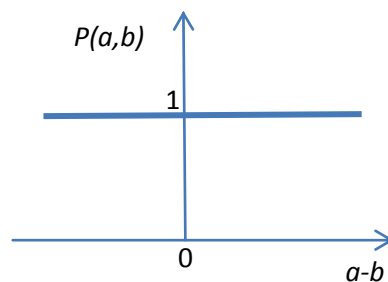
Για πρακτικούς λόγους υποθέτουμε ότι  $p[f_h(a), f_h(b)] = p[f_h(a) - f_h(b)]$  [66]

Οι Brans και Vincke αναγνώρισαν 6 τύπους κριτηρίων προτίμησης που είναι πιο κοινοί σε πραγματικές μελέτες περιπτώσεων. Αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

### 1.Σύνηθες κριτήριο

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{αν } a = b \\ 1 & \text{αν } a \neq b \end{cases}$$

Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει αδιαφορία μεταξύ των εναλλακτικών  $a$  και  $b$  μόνο αν  $f(a) = f(b)$ . Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει προτίμηση για την εναλλακτική που έχει την μεγαλύτερη τιμή. [64]

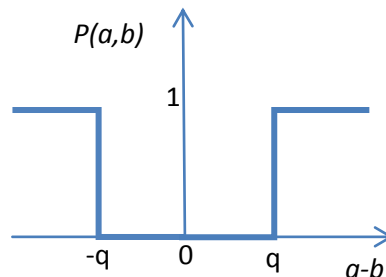


Σχήμα 5.1

### 2.Σχεδόν κριτήριο

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{αν } -q \leq a - b \leq q \\ 1 & \text{αν } a - b < -q \text{ ή } a - b > q \end{cases}$$

Στο κριτήριο αυτό υπάρχει αδιαφορία όταν η διαφορά μεταξύ των εναλλακτικών δεν ξεπερνά ένα κατώφλι αδιαφορίας. [64]

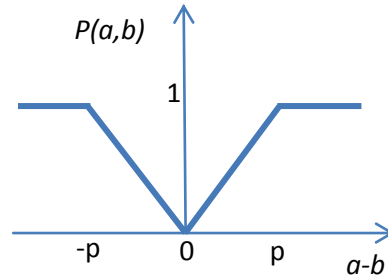


Σχήμα 5.2

### 3.Κριτήριο γραμμικής προτίμησης

$$P(a, b) = \begin{cases} \frac{a-b}{p} & \text{αν } -p \leq a - b \leq p \\ 1 & \text{αν } a - b < -p \text{ ή } a - b > p \end{cases}$$

Όσο το  $a-b$  είναι μικρότερο του  $p$  (κατώφλι προτίμησης) η προτίμηση αυξάνεται γραμμικά με τον παράγοντα  $a-b$ . Αν το  $a-b$  γίνει μεγαλύτερο του  $p$  έχουμε τότε μια καθαρή προτίμηση. [64]

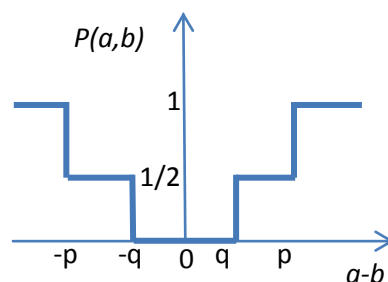


Σχήμα 5.3

#### 4.Κριτήριο επιπέδου

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{αν } |a - b| \leq q \\ \frac{1}{2} & \text{αν } q < |a - b| \leq p \\ 1 & \text{αν } |a - b| > p \end{cases}$$

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ταυτόχρονα ένα κατώφλι αδιαφορίας και ένα κατώφλι προτίμησης. Αν το  $a-b$  βρίσκεται ανάμεσα στα 2 κατώφλια υπάρχει μια ασθενής προτίμηση. [64]

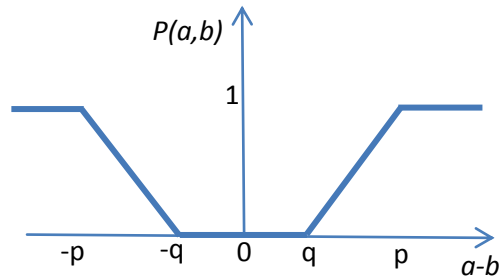


Σχήμα 5.4

#### 5.Κριτήριο γραμμικής προτίμησης και περιοχής αδιαφορίας

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{αν } |a - b| \leq q \\ (|a - b| - q)/(p - q) & \text{αν } q < |a - b| \leq p \\ 1 & \text{αν } |a - b| > p \end{cases}$$

Σε αυτήν την περίπτωση η απόφαση λαμβάνεται θεωρώντας ότι η προτίμηση αυξάνεται γραμμικά από αδιαφορία έως καθαρή προτίμηση στην περιοχή ανάμεσα στα κατώφλια  $p$  και  $q$ . [64]

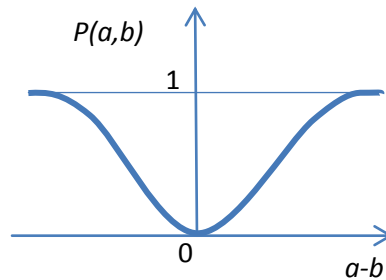


Σχήμα 5.5

### 6.Κριτήριο του Gauss

$$P(a,b) = 1 - \exp(-(a-b)^2/2\sigma^2) \quad [67]$$

Στην περίπτωση αυτή πρέπει μόνο να υπολογιστεί η μεταβλητή  $\sigma$ , η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την θεωρία της κανονικής κατανομής.



Σχήμα 5.6

Τέλος ο γενικός δείκτης προτίμησης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\pi(a,b) = \sum_{k=1}^n w_k * P(a,b)$$

Όπου το  $w_k$  είναι το βάρος του κάθε κριτηρίου.

Επίσης υπολογίζονται και τα παρακάτω μεγέθη:

$$\text{Ροή εξόδου: } \Phi^+(a) = \sum_{b \in K} \Pi(a,b)$$

$$\text{Ροή εισόδου: } \Phi^-(a) = \sum_{b \in K} \Pi(b,a)$$

$$\text{Καθαρή ροή: } \Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

Στην PROMETHEE I οι παραπάνω ροές χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη δύο κατατάξεων. [67]

Η πρώτη κατάταξη  $Z_1$  αναπτύσσεται βάσει των ροών εξόδου έτσι ώστε:

$$aP_1b \leftrightarrow \varphi^-(a) < \varphi^-(b)$$

$$aI_1b \leftrightarrow \varphi^-(a) = \varphi^-(b)$$

Η δεύτερη κατάταξη  $Z_2$  αναπτύσσεται βάσει των ροών εξόδου έτσι ώστε:

$$aP_2b \leftrightarrow \varphi^+(a) < \varphi^+(b)$$

$$aI_2b \leftrightarrow \varphi^+(a) = \varphi^+(b)$$

Η τελική κατάταξη προκύπτει ως η τομή των δύο κατατάξεων ως εξής:

$$(aI_1b) \wedge (aP_2b)$$

$$aPb \leftrightarrow (aP_1b) \wedge (aI_2b)$$

$$(aP_1b) \wedge (aP_2b)$$

$$aIb \leftrightarrow (aI_1b) \wedge (aI_2b)$$

$aRb \leftrightarrow$  σε διαφορετική περίπτωση

Στην PROMETHEE II, αντίθετα, υπάρχει μόνο μία κατάταξη για τις εναλλακτικές, η οποία γίνεται με βάση τις συνολικές τους ροές και η οποία είναι πλήρης (δηλαδή δεν λαμβάνουμε υπόψη τη σχέση ασυγκρισιμότητας). Αυτή η κατάταξη ορίζεται ως εξής: [67]

$$aPb \leftrightarrow \varphi(a) > \varphi(b)$$

$$aIb \leftrightarrow \varphi(a) = \varphi(b)$$

### 5.2.5 Εφαρμογές Πολυκριτηριακών Μεθόδων

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές εφαρμογές των πολυκριτηριακών μεθόδων σε διάφορα προβλήματα λήψης απόφασης. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικές από τις εφαρμογές αυτές. [63]

**Πίνακας 5.1:** Εφαρμογές Πολυκριτηριακών Μεθόδων

Μελέτη	Αντικείμενο	Πολυκριτηριακή Μέθοδος	Πεδίο Έρευνας
Ghafghazi et al. (2010)	Πολυκριτηριακή προσέγγιση για την αξιολόγηση συστημάτων θέρμανσης	PROMETHEE	Applied Energy

Maher et al. (1995)	Πλάνο σχεδίασης των αποθεμάτων νερού στην Μέση Ανατολή	PROMETHEE	European Journal of Operational Research
Tsoutsos et al. (2009)	Σχέδιο δράσης για βιώσιμη ενέργεια χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακή αξιολόγηση. Εφαρμογή στο νησί της Κρήτης	PROMETHEE	Energy Policy
Diakoulaki et al. (2007)	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση και ανάλυση κόστους οφέλους εναλλακτικών σεναρίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα	PROMETHEE	Renewable and Sustainable Energy Reviews
Beynona et al. (2008)	Βελτίωση των χημικών εκπομπών των οχημάτων	PROMETHEE	Omega
Cavallaro 2009	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση για τις τεχνολογίες των ηλιακών θερμικών μονάδων	PROMETHEE	Renewable Energy
Nikolić et al. (2010)	Πολυκριτηριακή ανάλυση της μόλυνσης του αέρα με SO <sub>2</sub> και PM10 στις αστικές περιοχές της Σερβίας	PROMETHEE	Water Air Soil Pollution
Özkan et al. (2011)	Εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE για συστήματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων	ELECTRE	Applied Sciences and Engineering
Haurant et al. (2011)	Πολυκριτηριακή επιλογή για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε αγροτικές περιοχές στο νησί της Κορσικής	ELECTRE	Energy Policy
Georgopoulou et al. (1996)	Πολυκριτηριακή προσέγγιση για προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού.	ELECTRE	European Journal of Operational Research
Papadopoulos et al. (2008)	Εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθόδου ELECTRE στην βελτιστοποίηση αποκεντρωμένων συστημάτων ενέργειας	ELECTRE	Omega
Gil-de-Castro et al. (2010)	Το πρόβλημα της βιώσιμης ανάπτυξης λύνεται με την βοήθεια πολυκριτηριακών μεθόδων.	ELECTRE	Modern Electric Power Systems
Zhang et al. (2005)	Βοήθεια στην λήψη αποφάσεων για συστήματα διανομής ενέργειας χρησιμοποιώντας την μέθοδο ELECTRE	ELECTRE	Energy Policy

Jaimes-Lopez et al. (2007)	Αξιολόγηση εκπομπών καυσαερίου οχημάτων χρησιμοποιώντας την μέθοδο ELECTRE	ELECTRE	Energy Policy
Thiel et al. (2001)	Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων για τον σχεδιασμό συστημάτων θέρμανσης σε μουσεία	ELECTRE	INFORMATICA
Dytczak et al. (2006)	Οφέλη και κόστη από την επιλογή καυσίμων σε συστήματα θέρμανσης	AHP	Applied Sciences and Engineering
Barin et al. (2011)	Πολυκριτηριακή ανάλυση για επιλογή αποθήκευσης ενέργειας	AHP	Energy and Power Engineering
Garfi et al. (2011)	Πολυκριτηριακή ανάλυση για την βελτίωση στρατηγικής περιβαλλοντικής αξιολόγησης υδάτινων προγραμμάτων στην Βραζιλία	AHP	Journal of Environmental Management
Kaya et al. (2010)	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση για σχεδιασμό πλάνου ανανεώσιμης ενέργειας	AHP	Energy
Karagiannidis et al. (2010)	Πολυκριτηριακή αξιολόγηση για την θερμική επεξεργασία μολυσματικών αποβλήτων νοσοκομείων	AHP	Waste Management
Nigim et al. (2004)	Πολυκριτηριακά εργαλεία αξιολόγησης για την βοήθεια κοινοτήτων στην ιεράρχηση πηγών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	AHP	Renewable Energy
Kahraman et al. (2010)	Ασαφής πολυκριτηριακή μεθοδολογία για επιλογή εναλλακτικών μορφών ενέργειας	Fuzzy AHP	Expert Systems with Applications
Shen et al. (2010)	Αξιολόγηση της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σύμφωνα με τους κανονισμούς της πολιτικής και της τεχνολογίας	Fuzzy AHP	Energy Policy
Gumus. (2009)	Αξιολόγηση των επικίνδυνων αποβλήτων μεταφορών	Fuzzy AHP	Expert Systems with Applications

Pires et al. (2011)	Αξιολόγηση της βιώσιμης ανάπτυξης των συστημάτων στερεών αποβλήτων στην Πορτογαλία	AHP	Resources, Conservation and Recycling
Onut et al. (2008)	Επιλογή τοποθεσίας μεταφόρτωσης	AHP	Waste Management
Kailiponi. (2010)	Ανάλυση αποφάσεων εκκένωσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο MAUT	MAUT	Procedia Engineering
Kim et al. (2009)	Προσέγγιση με την μέθοδο MAUT για την επιλογή σεναρίου αποσυναρμολόγησης θερμικής στήλης	MAUT	Annals of Nuclear Energy
Canbolat et al. (2007)	Επιλογή χώρας για παγκόσμια μονάδα παραγωγής	MAUT	Omega

### 5.3 Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων ELECTRE I

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων για την επιλογή της πλέον κατάλληλης χώρας υποδοχής για την υλοποίηση του υβριδικού πακέτου. Χρησιμοποιήθηκε η πολυκριτηριακή μέθοδος ELECTRE I, για το σύνολο των 27 χωρών της Υποσαχάριας Αφρικής.

#### 5.3.1 Συλλογή στοιχείων 27 χωρών

Έγινε έρευνα και συλλογή στοιχείων, με την βοήθεια ηλεκτρονικής αναζήτησης, σχετικά με την ενεργειακή κατάσταση της Αφρικής. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούν την ενεργειακή κατανάλωση, τις υπάρχουσες ανάγκες και ενεργειακές υποδομές, δημογραφικά στοιχεία, ενεργειακή απόδοση χωρών, δυνατότητα επενδύσεων, τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν, τις δυνατότητες ανάπτυξης της Αφρικής όσον αφορά στον ενεργειακό τομέα της και κατά πόσον οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν συμβάλλουν στην υψηλή απόδοση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνεται το σύνολο των στοιχείων που συλλέχθηκαν για τις 27 αυτές χώρες. [37],[38],[39],[40],[41],[42],[43],[44],[45],[46],[47],[48]



Πίνακας 5.2: Στοιχεία χωρών (Δημογραφικά μέρος 1)

Χώρες / Κριτήρια	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Πληθυσμός (millions)	Πυκνότητα Πληθυσμού (/km <sup>2</sup> )	Ποσοστό Ηλεκτρο-δότησης (%)	Πληθυσμός χωρίς ηλεκτρισμό (millions)
Angola	1,246,700	21.256	17.05	26.2	15.687
Benin	110,000	9.742	88.56	24.8	7.326
Botswana	600,370	2.096	3.49	45.4	1.144
Cameroon	475,440	21.331	44.87	48.7	10.943
Central African Republic	622,984	5.217	8.37	29	3.704
Dem. Rep. of the Congo	2,345,410	74.618	31.81	11.1	66.335
Republic of the Congo	342,000	4.525	13.23	37.1	2.846
Ethiopia	1,127,127	86.565	76.80	17	71.849
Gabon	267,667	2.204	8.23	36.7	1.395
Ghana	239,460	26.441	110.42	60.5	10.444
Ivory Coast	322,460	23.919	74.18	47.3	12.605
Kenya	582,650	43.291	74.30	16.1	36.321
Madagascar	587,041	21.852	37.22	19	17.700
Malawi	118,480	15.316	129.27	9	13.938
Mali	1,240,000	16.678	13.45	16.6	13.909
Mozambique	801,590	24.491	30.55	11.7	21.626
Namibia	825,418	2.170	2.63	34	1.432
Niger	1,267,000	17.493	13.81	29	12.420
Nigeria	923,768	177.096	191.71	50.6	87.485
Senegal	196,190	13.567	69.15	42	7.869
South Africa	1,219,912	52.982	43.43	75	13.246
South Sudan	619,745	10.334	16.67	17	8.577
Sudan	1,861,484	35.150	18.88	35.9	22.531
Tanzania	945,203	45.950	48.61	13.9	39.563
Uganda	236,040	35.363	149.82	9	32.180
Zambia	752,618	14.129	18.77	18.8	11.473
Zimbabwe	390,757	13.098	33.52	41.5	7.662

Πίνακας 5.3: Στοιχεία χωρών (Δημογραφικά μέρος 2)

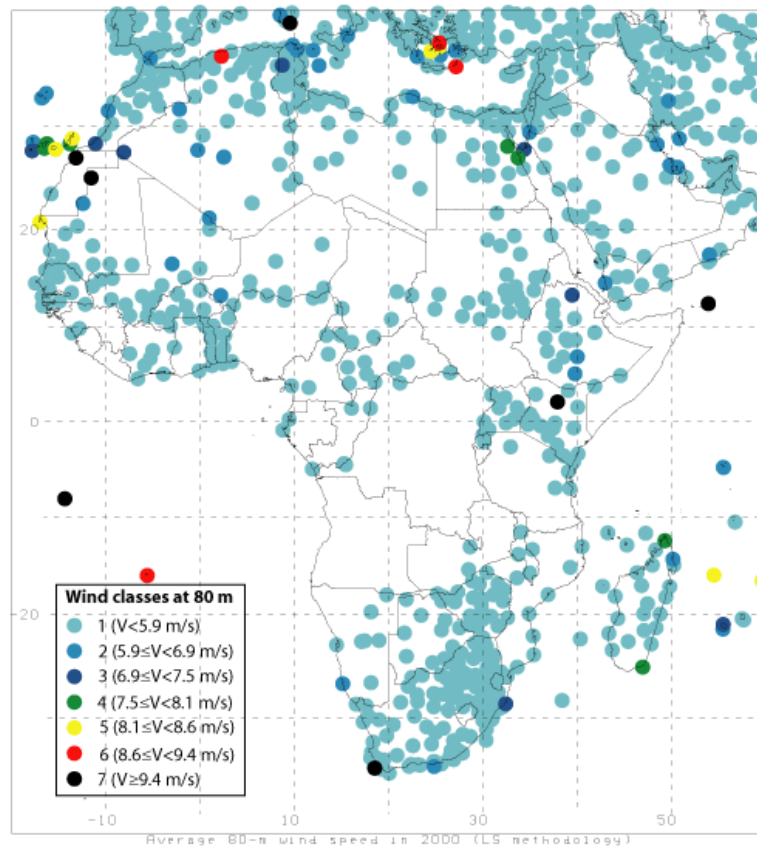
Χώρες / Κριτήρια	Κατανάλωση ηλ. ενέργειας (kWh per capita)	GDP per capita (\$)	Real GDP growth rate (%)	Ιδιωτικές επενδύσεις στην ενέργεια (\$)	Πληθωρι- σμός (2012- 2013) (%)
Angola	242	8,200	8.93	120M	9.77
Benin	74	1,500	3.63	591M	4.32
Botswana	1617	14,000	2.85	104M	7.06
Cameroon	258	2,366	3.73	342M	2.23
Central African Republic	25	800	4.1	0	5.50
Dem. Rep. of the Congo	101	369	7.1	0	13.80
Republic of the Congo	143	4,667	3.8	325M	3.50
Ethiopia	52	1,191	10.42	4M	17.27
Gabon	972	16,548	4.23	0	1.36
Ghana	299	3,305	8.51	500M	10.19
Ivory Coast	218	1,727	2.53	5.5M	2.06
Kenya	155	1,802	4.09	319.7M	8.17
Madagascar	50	955	2.27	17.8M	5.93
Malawi	116	858	7.08	0	24.47
Mali	40	1,100	3.37	0	2.76
Mozambique	433	1,169	6.95	5.8M	3.93
Namibia	1549	7,772	4.43	1M	6.32
Niger	46	815	5.58	0	1.17
Nigeria	135	2,720	7.00	240M	10.59
Senegal	187	2,027	3.41	22M	1.12
South Africa	4803	11,375	2.35	6M	5.74
South Sudan	134	1,006	-11.35	0	31.96
Sudan	134	2,545	3.96	0	36.19
Tanzania	78	1,567	7.02	134.1M	12.61
Uganda	66	1,415	5.76	30M	10.19
Zambia	770	1,500	6.59	230M	6.73
Zimbabwe	983	559	0.73	600M	3.02

**Πίνακας 5.4:** Στοιχεία χωρών (Θερμοκρασία, Ηλιακή ακτινοβολία)

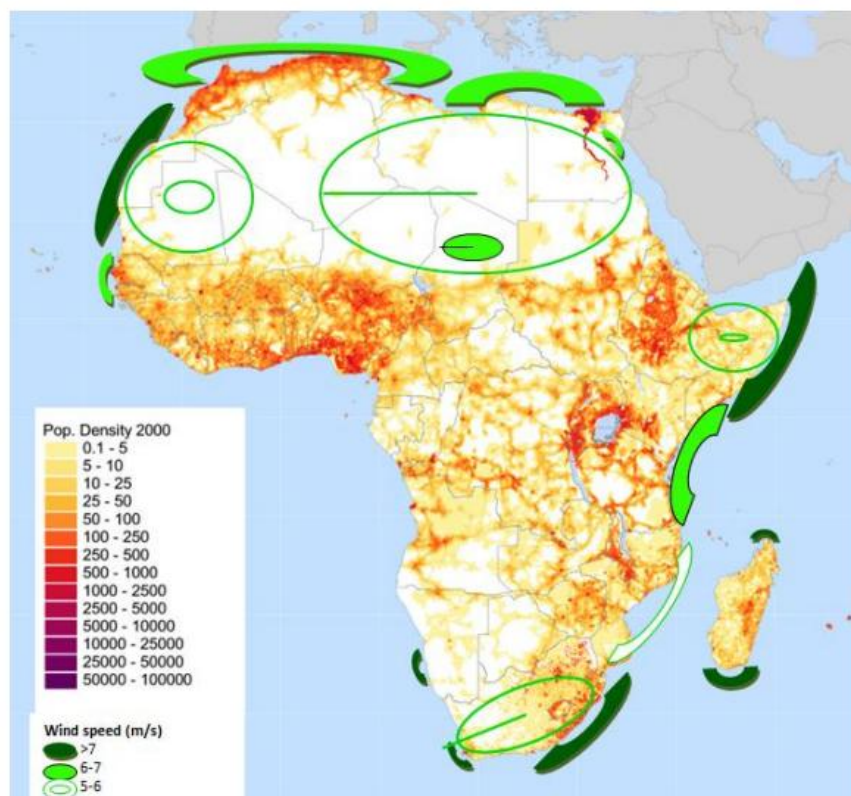
Χώρες / Κριτήρια	Μέση θερμοκρασία (C°)	Ελαχιστη θερμοκρασία (C°)	Μεγιστη θερμοκρασία (C°)	Μέση ηλιφάνεια ώρες/μέρα	Em: Μέσος ετήσιος παραγόμενος ηλεκτρισμός 1kWp σύστημα (kWh)
Angola	21.5	7.0	35.0	7.3	1740
Benin	27.3	17.0	38.0	6.0	1404
Botswana	20.7	4.0	35.0	9.5	1644
Cameroon	24.7	13.0	41.0	5.9	1608
Central African Republic	26.5	15.0	40.0	7.0	1572
Democr. Rep. of the Congo	25.0	15.0	34.0	5.8	1404
Republic of the Congo	25.0	19.0	32.0	5.0	1404
Ethiopia	20.3	17.0	34.0	6.8	1788
Gabon	25.3	17.0	32.0	6.0	1260
Ghana	26.0	20.0	37.0	6.0	1392
Ivory Coast	26.3	15.0	35.0	8.0	1308
Kenya	23.4	9.0	38.0	12.2	1656
Madagascar	22.5	10.0	32.0	12.1	1728
Malawi	22.2	10.0	32.0	11.9	1716
Mali	28.4	12.0	42.0	12.2	1296
Mozambique	24.6	14.0	31.0	7.8	1536
Namibia	19.4	5.0	35.0	9.3	1872
Niger	27.2	10.0	42.0	8.5	1716
Nigeria	25.7	13.0	40.0	7.4	1416
Senegal	27.5	11.0	41.0	8.5	1452
South Africa	18.6	4.0	28.0	8.1	1788
South Sudan	26.5	12.0	39.0	7.7	1536
Sudan	27.3	16.0	44.0	9.4	1716
Tanzania	22.9	14.0	32.0	7.4	1788
Uganda	22.1	16.0	27.0	6.7	1668
Zambia	21.9	8.0	34.0	7.4	1644
Zimbabwe	21.8	5.0	29.0	7.6	1620

Πίνακας 5.5: Στοιχεία χωρών (Άνεμος)

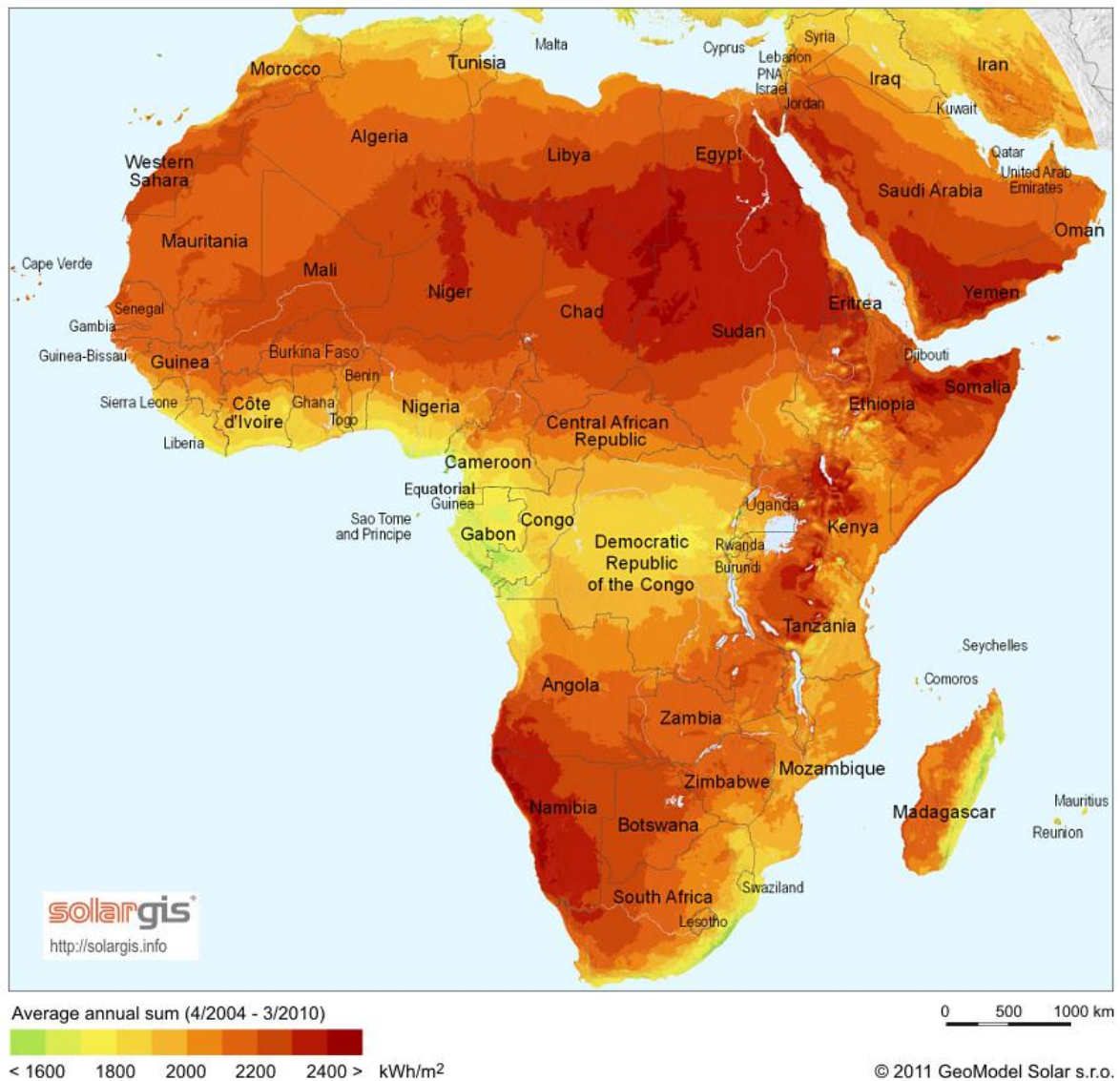
Χώρες / Κριτήρια	Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μέγιστη ταχύτητα ανέμου (m/s)	Περιοχή μέγιστης ταχύτητας ανέμου
Angola	4.7	6.1	Huambo
Benin	3.5	4.0	Cotonu
Botswana	4.1	4.5	Gaborone
Cameroon	3.2	5.0	N'Djamena
Central African Republic	3.5	4.3	N'Dele
Democr. Rep. of the Congo	3.4	5.4	Mbuji-Mayi
Republic of the Congo	2.4	3.7	Pointe-Noir
Ethiopia	4.5	5.1	Mek'ele
Gabon	2.3	3.4	Tchibanga
Ghana	3.2	3.9	Accra
Ivory Coast	2.9	4.0	San-Pedro
Kenya	4.5	5.1	Mombasa
Madagascar	5.6	7.1	Antseranana
Malawi	4.9	4.9	Lilongwe
Mali	4.3	5.2	Tombouctou
Mozambique	4.2	5.8	Mocimboa da Praia
Namibia	5.3	6.3	Luderitz
Niger	4.9	5.8	Agadez
Nigeria	3.6	5.0	Maiduguri
Senegal	4.7	5.6	Dakar
South Africa	5.6	7.1	East London
South Sudan	3.3	4.0	Yambio
Sudan	4.8	5.2	Khartoom
Tanzania	5.3	6.2	Mtwara
Uganda	4.1	4.9	Kampala
Zambia	4.1	5.7	Kaoma
Zimbabwe	4.4	4.5	Harare



Σχήμα 5.7: Χάρτης μέσης ταχύτητας ανέμου στην Αφρική



Σχήμα 5.8: Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Αφρική



Σχήμα 5.9: Χάρτης ηλιακής ακτινοβολίας στην Αφρική

### 5.3.2 Επιλογή, στάθμιση και κανονικοποίηση καταλλήλων κριτηρίων

Αφού συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία για τις χώρες αυτές, η επόμενη φάση ήταν να αξιολογηθούν ως προς την χρησιμότητα τους για την βέλτιστη επιλογή χώρας όσον αφορά την ανάπτυξη υβριδικών αυτόνομων συστημάτων ενέργειας. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν φαίνονται στον πίνακα 5.6.

**Πίνακας 5.6:** Κριτήρια πολυκριτηριακής αξιολόγησης

Ποσοστό Ηλεκτροδότησης (%)	C1
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh per capita)	C2
GDP per capita (\$)	C3
Ιδιωτικές επενδύσεις στην ενέργεια (\$)	C4
Πληθωρισμός (2012-2013) (%)	C5
Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	C6
Em: Μέσος ετήσιος παραγόμενος ηλεκτρισμός 1kWp σύστημα (kWh)	C7
Μέγιστη θερμοκρασία (C°)	C8

Ο λόγος που χρειάστηκε και η μέγιστη θερμοκρασία, είναι γιατί η απόδοση των συσσωρευτών και φωτοβολταϊκών πάνελ είναι αντιστρόφως ανάλογη με την θερμοκρασία. Οπότε σε υψηλή θερμοκρασία οι συσσωρευτές έχουν μειωμένη χωρητικότητα και τα πάνελ μειωμένη απόδοση, γι αυτό το λόγο αποφεύγεται η χρήση τους σε ερήμους.

Στη συνέχεια έγινε η κατηγοριοποίηση των κριτηρίων:

- Ποσοτικά κριτήρια: C1, C2, C6, C7, C8
- Ποιοτικά κριτήρια: C3, C4, C5
- Αύξοντα κριτήρια: C2, C3, C4, C6, C7
- Φθίνοντα κριτήρια: C1, C5, C8

Με τον όρο φθίνον κριτήριο συνεπάγεται ότι το κριτήριο θα πάρει καλύτερη βαθμολογία όσο μικρότερη τιμή έχει και για το αύξον καλύτερη βαθμολογία όσο μεγαλύτερη τιμή έχει.

Το σύνολο κριτηρίων C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 και C8 αποτελεί μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων, διότι ικανοποιεί τις ιδιότητες της μονοτονίας, της επάρκειας και του μη πλεονασμού.

- Μονοτονία: Εάν δύο χώρες έχουν την ίδια βαθμολογία σε όλα τα κριτήρια εκτός από ένα, τότε πράγματι θεωρείται προτιμότερη μεταξύ των δύο εναλλακτικών η χώρα με τη μεγαλύτερη βαθμολογία σε αυτό το εναπομείναν κριτήριο.
- Επάρκεια: Εάν δύο χώρες έχουν λάβει σε όλα τα κριτήρια την ίδια βαθμολογία, τότε αποτελούν ισοδύναμες εναλλακτικές.
- Μη πλεονασμός: Η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με το κατά πόσο υπάρχει υπερκάλυψη μεταξύ των κριτηρίων. Στο εν λόγω σύνολο C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 και C8 κανένα κριτήριο δεν εμπεριέχεται μέσα σε κάποιο άλλο.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μέθοδος στάθμισης κριτηρίων "Μέθοδος του πλέγματος αντίστασης στην αλλαγή". είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος στάθμισης κριτηρίων. Τα πλεονεκτήματα αυτής είναι τα εξής:

- Είναι σχετικά απλή και εύκολα κατανοητή από τους εμπλεκόμενους στη διαδικασία της απόφασης.
- Εδράζει τη βάση της στην ανθρώπινη ψυχολογία και στον τρόπο με τον οποίο το άτομο διατυπώνει τις προτιμήσεις του.
- Τα βάρη που προκύπτουν συνδέονται και αντανακλούν ευθέως στη σημαντικότητα που αντιλαμβάνεται ο αποφασίζων για κάθε κριτήριο.
- Έχει εφαρμοστεί σε πλήθος πραγματικών εφαρμογών.

Ο τρόπος διεξαγωγής της είναι ο εξής:

Σε κάθε στήλη συμπληρώνεται "X" σε κάθε κελί στο οποίο, το κριτήριο στήλης είναι πιο σημαντικό από το κριτήριο γραμμής. Συμπληρώνεται με "I" αν τα κριτήρια αυτά είναι ισοδύναμα και τέλος αφήνεται κενό αν το κριτήριο της γραμμής είναι πιο σημαντικό από της στήλης.

Στη συνέχεια αθροίζουμε για κάθε κριτήριο τα κενά κελιά της γραμμής του και τα "X" για την αντίστοιχη στήλη του. Το άθροισμα αυτό στη συνέχεια διαιρείται με το άθροισμα όλων το συνόλων για να βγει το βάρος του κάθε κριτηρίου.

Στον πίνακα 5.7 θα γίνει η εφαρμογή την μεθόδου του πλέγματος αντίστασης στην αλλαγή και φαίνεται παρακάτω.



**Πίνακας 5.7:** Υπολογισμός βαρών κριτηρίων με τη μέθοδο του πλέγματος αντίστασης στην αλλαγή

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Κενά	X	Σύνολο	Βάρη
C1									7	0	7	0.26
C2						X	X	X	3	0	3	0.11
C3				X		X	X	X	1	0	1	0.04
C4					X	X	X	X	0	1	1	0.04
C5						X	X	X	0	1	1	0.04
C6							I		1	4	5	0.19
C7									1	4	5	0.19
C8									0	4	4	0.15
										ΣΥΝ.	27	1.00

Η επίλυση του προβλήματος απαιτεί την έκφραση κάθε κριτηρίου σε κοινή κλίμακα αναφοράς. Η αναγωγή των επιμέρους τιμών των κριτηρίων έγινε σε μία κλίμακα βαθμολόγησης από το 1 έως το 7. Ανάλογα το αν κάποιο κριτήριο είναι φθίνον ή αύξον θα αντιστοιχηθεί και η τιμή του με μία βαθμολογία.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η κανονικοποιημένη βαθμολογία των 27 χωρών ως προς τα κριτήρια C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 και C8.

Στους πίνακες 5.8, 5.9 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 και 5.15 φαίνεται η κανονικοποιημένη βαθμολογία για κάθε κριτήριο.

Ο πίνακας 5.16 είναι ο συγκεντρωτικός με όλες της βαθμολογίες κανονικοποιημένες ώστε στη συνέχεια να κατασκευαστούν οι πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας για την ELECTRE I.

**Πίνακας 5.8:** Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C1

Χώρες / Κριτήριο	C1 Ποσοστό Ηλεκτροδότησης (%)	Βαθμολογία
Angola	26.2	6
Benin	24.8	6
Botswana	45.4	4
Cameroon	48.7	3
Central African Republic	29	5
Democr. Rep. of the Congo	11.1	7
Republic of the Congo	37.1	5
Ethiopia	17	7
Gabon	36.7	5
Ghana	60.5	2
Ivory Coast	47.3	3
Kenya	16.1	7
Madagascar	19	6
Malawi	9	7
Mali	16.6	7
Mozambique	11.7	7
Namibia	34	5
Niger	29	5
Nigeria	50.6	3
Senegal	42	4
South Africa	75	1
South Sudan	17	7
Sudan	35.9	5
Tanzania	13.9	7
Uganda	9	7
Zambia	18.8	6
Zimbabwe	41.5	4

9 - 18.43	7
18.44 - 27.86	6
27.87 - 37.29	5
37.3 - 46.72	4
46.73 - 56.15	3
56.16 - 65.58	2
65.59 - 75.01	1

**Πίνακας 5.9:** Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C2

Χώρες / Κριτήριο	C2 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh per capita)	Βαθμολογία
Angola	242	3
Benin	74	1
Botswana	1617	6
Cameroon	258	4
Central African Republic	25	1
Democr. Rep. of the Congo	101	2
Republic of the Congo	143	2
Ethiopia	52	1
Gabon	972	5
Ghana	299	4
Ivory Coast	218	3
Kenya	155	3
Madagascar	50	1
Malawi	116	2
Mali	40	1
Mozambique	433	4
Namibia	1549	6
Niger	46	1
Nigeria	135	2
Senegal	187	3
South Africa	4803	7
South Sudan	134	2
Sudan	134	2
Tanzania	78	2
Uganda	66	1
Zambia	770	5
Zimbabwe	983	5

25 - 74	1
75 - 149	2
150-249	3
250 - 499	4
500 - 999	5
1000 - 1999	6
2000 - 4803	7

**Πίνακας 5.10:** Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C3

Χώρες / Κριτήριο	C3 GDP per capita (\$)	Βαθμολογία
Angola	8,200	6
Benin	1,500	3
Botswana	14,000	7
Cameroon	2,366	5
Central African Republic	800	2
Democr. Rep. of the Congo	369	1
Republic of the Congo	4,667	5
Ethiopia	1,191	2
Gabon	16,548	7
Ghana	3,305	5
Ivory Coast	1,727	4
Kenya	1,802	4
Madagascar	955	2
Malawi	858	2
Mali	1,100	2
Mozambique	1,169	2
Namibia	7,772	6
Niger	815	2
Nigeria	2,720	5
Senegal	2,027	5
South Africa	11,375	7
South Sudan	1,006	2
Sudan	2,545	5
Tanzania	1,567	3
Uganda	1,415	3
Zambia	1,500	3
Zimbabwe	559	1

369 - 799	1
800 - 1199	2
1200 - 1599	3
1600 - 1999	4
2000 - 4999	5
5000 - 9999	6
10000 - 16548	7

**Πίνακας 5.11:** Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C4

Χώρες / Κριτήριο	C4 Ιδιωτικές επενδύσεις στην ενέργεια (\$)	Βαθμολογία
Angola	120.00	3
Benin	591.00	7
Botswana	104.00	3
Cameroon	342.00	5
Central African Republic	0.00	1
Democr. Rep. of the Congo	0.00	1
Republic of the Congo	325.00	5
Ethiopia	4.00	1
Gabon	0.00	1
Ghana	500.00	7
Ivory Coast	5.50	1
Kenya	319.70	5
Madagascar	17.80	1
Malawi	0.00	1
Mali	0.00	1
Mozambique	5.80	1
Namibia	1.00	1
Niger	0.00	1
Nigeria	240.00	4
Senegal	22.00	1
South Africa	6.00	1
South Sudan	0.00	1
Sudan	0.00	1
Tanzania	134.10	3
Uganda	30.00	1
Zambia	230.00	4
Zimbabwe	600.00	7

0 - 49	1
50 - 99	2
100 - 199	3
200 - 299	4
300 - 399	5
400 - 499	6
500 - 600	7

Πίνακας 5.12: Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C5

Χώρες / Κριτήριο	C5 Πληθωρισμός (2012-2013) (%)	Βαθμολογία
Angola	9.77	6
Benin	4.32	7
Botswana	7.06	6
Cameroon	2.23	7
Central African Republic	5.50	6
Democr. Rep. of the Congo	13.80	5
Republic of the Congo	3.50	7
Ethiopia	17.27	4
Gabon	1.36	7
Ghana	10.19	5
Ivory Coast	2.06	7
Kenya	8.17	6
Madagascar	5.93	6
Malawi	24.47	3
Mali	2.76	7
Mozambique	3.93	7
Namibia	6.32	6
Niger	1.17	7
Nigeria	10.59	5
Senegal	1.12	7
South Africa	5.74	6
South Sudan	31.96	1
Sudan	36.19	1
Tanzania	12.61	5
Uganda	10.19	5
Zambia	6.73	6
Zimbabwe	3.02	7

0 - 4.99	7
5.00 - 9.99	6
10.00 - 14.99	5
15.00 - 19.99	4
20.00 - 24.99	3
25.00 - 29.99	2
30.00 - 38.00	1

Πίνακας 5.13: Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C6

Χώρες / Κριτήριο	C6 Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	Βαθμολογία
Angola	4.7	5
Benin	3.5	3
Botswana	4.1	4
Cameroon	3.2	2
Central African Republic	3.5	3
Democr. Rep. of the Congo	3.4	3
Republic of the Congo	2.4	1
Ethiopia	4.5	5
Gabon	2.3	1
Ghana	3.2	2
Ivory Coast	2.9	2
Kenya	4.5	5
Madagascar	5.6	7
Malawi	4.9	6
Mali	4.3	5
Mozambique	4.2	4
Namibia	5.3	6
Niger	4.9	6
Nigeria	3.6	3
Senegal	4.7	5
South Africa	5.6	7
South Sudan	3.3	2
Sudan	4.8	5
Tanzania	5.3	7
Uganda	4.1	4
Zambia	4.1	4
Zimbabwe	4.4	5

2.3 - 2.7	1
2.8 - 3.2	2
3.3 - 3.7	3
3.8 - 4.2	4
4.3 - 4.7	5
4.8 - 5.2	6
5.3 - 5.7	7

**Πίνακας 5.14:** Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C7

Χώρες / Κριτήριο	C7 Em: Μέσος ετήσιος παραγόμενος ηλεκτρισμός 1kWp σύστημα (kWh)	Βαθμολογία
Angola	1740	6
Benin	1404	2
Botswana	1644	5
Cameroon	1608	4
Central African Republic	1572	4
Democr. Rep. of the Congo	1404	2
Republic of the Congo	1404	2
Ethiopia	1788	7
Gabon	1260	1
Ghana	1392	2
Ivory Coast	1308	1
Kenya	1656	5
Madagascar	1728	6
Malawi	1716	6
Mali	1296	1
Mozambique	1536	4
Namibia	1872	7
Niger	1716	6
Nigeria	1416	2
Senegal	1452	3
South Africa	1788	7
South Sudan	1536	4
Sudan	1716	6
Tanzania	1788	7
Uganda	1668	5
Zambia	1644	5
Zimbabwe	1620	5

1260 - 1346	1
1346 - 1433	2
1434 - 1520	3
1521 - 1608	4
1609 - 1696	5
1697 - 1784	6
1785 - 1872	7



Πίνακας 5.15: Κανονικοποιημένη βαθμολογία για το κριτήριο C8

Χώρες / Κριτήριο	C8 Μέγιστη θερμοκρασία (C°)	Βαθμολογία
Angola	35	5
Benin	38	5
Botswana	35	5
Cameroon	41	4
Central African Republic	40	4
Democr. Rep. of the Congo	34	6
Republic of the Congo	32	6
Ethiopia	34	6
Gabon	32	6
Ghana	37	5
Ivory Coast	35	5
Kenya	38	5
Madagascar	32	6
Malawi	32	6
Mali	42	4
Mozambique	31	6
Namibia	35	5
Niger	42	4
Nigeria	40	4
Senegal	41	4
South Africa	28	7
South Sudan	39	5
Sudan	44	4
Tanzania	32	6
Uganda	27	7
Zambia	34	6
Zimbabwe	29	7

25 - 29.9	7
30 - 34.5	6
35 - 39.9	5
40 - 44.9	4
45 - 49.9	3
50 - 54.9	2
55 - 60	1

**Πίνακας 5.16:** Συγκεντρωτικός κανονικοποιημένων βαθμολογιών χωρών για τα 8 κριτήρια

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Αρίθμηση χωρών	Βάρη	0.26	0.10	0.04	0.04	0.04	0.19	0.19	0.14
1	Angola	6	3	6	3	6	5	6	5
2	Benin	6	1	3	7	7	3	2	5
3	Botswana	4	6	7	3	6	4	5	5
4	Cameroon	3	4	5	5	7	2	4	4
5	Central African Republic	5	1	2	1	6	3	4	4
6	Democr. Rep. of the Congo	7	2	1	1	5	3	2	6
7	Republic of the Congo	5	2	5	5	7	1	2	6
8	Ethiopia	7	1	2	1	4	5	7	6
9	Gabon	5	5	7	1	7	1	1	6
10	Ghana	2	4	5	7	5	2	2	5
11	Ivory Coast	3	3	4	1	7	2	1	5
12	Kenya	7	3	4	5	6	5	5	5
13	Madagascar	6	1	2	1	6	7	6	6
14	Malawi	7	2	2	1	3	6	6	6
15	Mali	7	1	2	1	7	5	1	4
16	Mozambique	7	4	2	1	7	4	4	6
17	Namibia	5	6	6	1	6	6	7	5
18	Niger	5	1	2	1	7	6	6	4
19	Nigeria	3	2	5	4	5	3	2	4
20	Senegal	4	3	5	1	7	5	3	4
21	South Africa	1	7	7	1	6	7	7	7
22	South Sudan	7	2	2	1	1	2	4	5
23	Sudan	5	2	5	1	1	5	6	4
24	Tanzania	7	2	3	3	5	7	7	6
25	Uganda	7	1	3	1	5	4	5	7
26	Zambia	6	5	3	4	6	4	5	6
27	Zimbabwe	4	5	1	7	7	5	5	7

### 5.3.3 Πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 5.16 υπολογίστηκε για κάθε ζεύγος δυνατών επιλογών (a,b) ο δείκτης συμφωνίας  $C(a,b)$ , ο οποίος εκφράζει το ποσοστό των κριτηρίων που συμφωνούν ότι η «α» εναλλακτική επικρατεί της «β», βάσει του τύπου:

$$C(a,b) = \frac{1}{W} \sum_{g_j(a) \geq g_j(b)} w_j$$

Όπου:  $0 \leq C \leq 1$

$w_j$  το βάρος του  $C_j$  κριτηρίου

$$W = \sum_{j=1}^n w_j = 10 \text{ το άθροισμα των βαρών}$$

$g_j(i)$  η βαθμολογία της  $i$ -οστής εναλλακτικής στο  $C_j$  κριτήριο

Έτσι προκύπτει ο πίνακας συμφωνίας και φαίνεται στον πίνακα 5.17.

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται ο δείκτης ασυμφωνίας  $D$ , βάσει του τύπου:

$$D(a,b) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b) \geq g_j(a) \\ \frac{1}{\delta} \max_j (g_j(b) - g_j(a)) & \text{if } g_j(b) < g_j(a) \end{cases}$$

Όπου:  $0 \leq D \leq 1$

$g_j(i)$  η βαθμολογία της  $i$ -οστής εναλλακτικής στο  $C_j$  κριτήριο

$\delta = \max_{c,d,j} (g_j(c) - g_j(d)) = 7 - 1 = 6$  η μέγιστη διαφορά βαθμολογίας μεταξύ δύο οποιωνδήποτε εναλλακτικών «c» και «d» ως προς ένα οποιοδήποτε κριτήριο  $j$

Έτσι προκύπτει ο πίνακας ασυμφωνίας και φαίνεται στον πίνακα 5.18

Πίνακας 5.17: Πίνακας συμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	1.00	0.92	0.86	0.82	1.00	0.60	0.78	0.41	0.64	0.90	0.92	0.74	0.67	0.41	0.66	0.42	0.52	0.73	1.00	0.92	0.34	0.74	1.00	0.22	0.60	0.76	0.68
2	0.48	1.00	0.48	0.67	0.81	0.50	0.72	0.22	0.72	0.86	0.86	0.22	0.48	0.12	0.55	0.12	0.48	0.62	0.86	0.48	0.34	0.45	0.48	0.12	0.22	0.38	0.38
3	0.36	0.66	1.00	0.92	0.74	0.60	0.52	0.22	0.52	1.00	0.92	0.55	0.22	0.22	0.47	0.52	0.36	0.28	1.00	0.73	0.38	0.74	0.36	0.22	0.60	0.60	0.59
4	0.18	0.41	0.08	1.00	0.55	0.41	0.60	0.22	0.46	0.86	0.86	0.22	0.22	0.22	0.55	0.41	0.08	0.36	0.81	0.55	0.34	0.60	0.36	0.22	0.22	0.12	0.12
5	0.08	0.48	0.34	0.78	1.00	0.50	0.64	0.22	0.64	0.72	0.64	0.08	0.22	0.12	0.47	0.23	0.34	0.54	0.86	0.59	0.34	0.50	0.48	0.08	0.18	0.08	0.30
6	0.40	0.88	0.40	0.59	0.69	1.00	0.88	0.58	0.78	0.86	0.78	0.40	0.50	0.58	0.69	0.40	0.40	0.50	0.96	0.40	0.26	0.77	0.58	0.58	0.44	0.40	0.30
7	0.22	0.55	0.48	0.52	0.62	0.55	1.00	0.36	0.86	0.71	0.71	0.26	0.36	0.36	0.55	0.26	0.48	0.62	0.81	0.52	0.34	0.36	0.62	0.36	0.22	0.26	0.38
8	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.82	0.78	1.00	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.71	0.92	0.82	0.59	0.73	0.78	0.78	0.45	0.90	0.86	0.59	0.74	0.78	0.68
9	0.36	0.36	0.52	0.62	0.62	0.36	0.81	0.36	1.00	0.62	0.81	0.36	0.36	0.36	0.55	0.36	0.52	0.62	0.62	0.62	0.38	0.36	0.62	0.36	0.22	0.36	0.48
10	0.24	0.47	0.14	0.47	0.28	0.41	0.52	0.22	0.38	1.00	0.66	0.28	0.14	0.22	0.47	0.14	0.14	0.28	0.55	0.28	0.26	0.55	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04
11	0.32	0.36	0.22	0.67	0.36	0.22	0.37	0.22	0.46	0.67	1.00	0.36	0.22	0.22	0.55	0.12	0.22	0.36	0.58	0.32	0.34	0.55	0.32	0.22	0.22	0.12	0.12
12	0.77	0.92	0.86	0.78	1.00	0.86	0.74	0.67	0.64	0.86	0.92	1.00	0.48	0.48	0.92	0.68	0.48	0.54	0.96	0.88	0.34	1.00	0.77	0.48	0.86	0.76	0.68
13	0.86	0.88	0.86	0.78	1.00	0.64	0.78	0.55	0.78	0.86	0.78	0.60	1.00	0.64	0.66	0.56	0.67	0.92	0.86	0.78	0.53	0.64	0.86	0.41	0.56	0.86	0.68
14	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.92	0.88	0.73	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	1.00	0.92	0.82	0.59	0.92	0.88	0.78	0.26	1.00	0.96	0.50	0.74	0.78	0.68
15	0.53	0.63	0.53	0.67	0.81	0.57	0.53	0.67	0.72	0.53	0.72	0.53	0.48	0.38	1.00	0.57	0.34	0.62	0.67	0.67	0.34	0.57	0.67	0.34	0.63	0.53	0.57
16	0.58	0.96	0.67	0.96	1.00	1.00	0.96	0.62	0.86	0.96	0.96	0.58	0.62	0.62	0.81	1.00	0.48	0.62	0.96	0.77	0.34	1.00	0.58	0.58	0.63	0.67	0.38
17	0.74	0.66	0.96	0.92	1.00	0.60	0.78	0.60	0.74	1.00	0.92	0.74	0.41	0.60	0.66	0.52	1.00	0.92	1.00	0.92	0.53	0.74	1.00	0.41	0.60	0.60	0.78
18	0.46	0.56	0.72	0.86	1.00	0.50	0.72	0.41	0.72	0.72	0.72	0.46	0.41	0.50	0.74	0.50	0.53	1.00	0.86	0.86	0.34	0.50	0.86	0.08	0.56	0.46	0.76
19	0.00	0.52	0.00	0.63	0.47	0.60	0.52	0.22	0.38	0.76	0.68	0.04	0.14	0.22	0.47	0.04	0.00	0.28	1.00	0.18	0.26	0.41	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04
20	0.37	0.60	0.53	0.71	0.55	0.60	0.60	0.41	0.46	0.76	0.86	0.41	0.22	0.22	0.74	0.31	0.08	0.36	1.00	1.00	0.34	0.41	0.55	0.22	0.41	0.31	0.57
21	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.66	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	1.00	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.66
22	0.40	0.69	0.40	0.78	0.73	0.59	0.74	0.40	0.64	0.78	0.78	0.40	0.40	0.40	0.73	0.49	0.40	0.54	0.69	0.59	0.26	1.00	0.58	0.36	0.36	0.26	0.30
23	0.38	0.52	0.64	0.82	0.92	0.52	0.78	0.33	0.64	0.68	0.68	0.42	0.33	0.33	0.66	0.42	0.26	0.73	0.92	0.82	0.26	0.60	1.00	0.14	0.52	0.42	0.68
24	0.78	0.92	0.78	0.78	0.92	1.00	0.88	1.00	0.78	0.86	0.78	0.78	0.92	1.00	0.92	0.82	0.78	0.92	0.96	0.78	0.64	1.00	0.96	1.00	0.86	0.82	0.68
25	0.40	0.92	0.78	0.78	0.92	0.90	0.78	0.62	0.78	0.86	0.78	0.59	0.54	0.52	0.73	0.82	0.40	0.54	0.86	0.59	0.40	0.90	0.48	0.52	1.00	0.82	0.63
26	0.58	0.92	0.86	0.88	1.00	0.74	0.88	0.36	0.88	0.96	0.88	0.51	0.62	0.36	0.47	0.66	0.48	0.54	0.96	0.69	0.34	0.74	0.58	0.36	0.60	1.00	0.59
27	0.51	0.70	0.86	0.96	0.70	0.74	0.70	0.51	0.70	0.96	0.96	0.70	0.32	0.32	0.70	0.70	0.22	0.32	0.96	0.96	0.48	0.70	0.51	0.32	0.70	0.70	1.00

Πίνακας 5.18: Πίνακας ασυμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.00	0.67	0.50	0.33	0.00	0.17	0.33	0.17	0.33	0.67	0.17	0.33	0.33	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.17	0.00	0.33	0.33	0.33	0.67
2	0.67	0.00	0.83	0.50	0.33	0.17	0.33	0.83	0.67	0.50	0.33	0.50	0.67	0.67	0.33	0.50	0.83	0.67	0.33	0.33	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.67	0.67
3	0.33	0.67	0.00	0.33	0.17	0.50	0.33	0.50	0.17	0.67	0.17	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50	0.50	0.17	0.50	0.50	0.33	0.67
4	0.50	0.50	0.33	0.00	0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.17	0.67	0.83	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.17	0.50	0.83	0.67	0.50	0.83	0.67	0.50	0.50
5	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.33	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.67	0.50	0.67	1.00
6	0.83	1.00	1.00	0.67	0.33	0.00	0.67	0.83	1.00	1.00	0.50	0.67	0.67	0.67	0.33	0.33	0.83	0.67	0.67	0.67	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.50	1.00
7	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.00	0.83	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.83	0.83	0.33	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	1.00	0.50	0.67
8	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.17	0.67	0.00	0.83	1.00	0.50	0.67	0.33	0.17	0.50	0.50	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
9	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.00	1.00	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	1.00	0.83	0.50	0.67	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
10	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50	0.00	0.33	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.67	0.17	0.50	0.83	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	0.50
11	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.67	0.67	1.00	0.50	1.00	0.00	0.67	0.83	0.83	0.83	0.67	0.67	1.00	0.83	0.50	0.50	1.00	0.67	0.83	1.00	0.67	1.00
12	0.33	0.33	0.50	0.17	0.00	0.17	0.17	0.33	0.50	0.33	0.17	0.00	0.33	0.17	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.67	0.00	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33
13	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.17	0.67	0.17	0.83	1.00	0.33	0.67	0.00	0.17	0.17	0.50	0.83	0.17	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
14	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	0.17	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.00	0.67	0.67	0.67	0.67	0.50	0.67	0.83	0.00	0.50	0.33	0.33	0.50	1.00
15	0.83	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.33	0.67	0.83	0.83	0.00	0.50	1.00	0.83	0.50	0.50	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
16	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.00	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.17	0.00	0.67	0.33	0.50	0.50	0.83	0.00	0.50	0.50	0.17	0.50	1.00
17	0.33	1.00	0.33	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.17	1.00	0.17	0.67	0.17	0.33	0.33	0.33	0.00	0.17	0.50	0.17	0.33	0.33	0.00	0.33	0.33	0.50	1.00
18	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.83	1.00	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.50	0.83	0.00	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.33	0.50	0.67	1.00
19	0.67	0.50	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.83	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.83	0.67	0.00	0.33	0.83	0.67	0.83	0.67	0.50	0.50
20	0.50	1.00	0.50	0.67	0.17	0.50	0.67	0.67	0.33	1.00	0.17	0.67	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	0.00	0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	1.00
21	0.83	1.00	0.50	0.67	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.33	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.67	0.67	0.50	0.50	0.00	1.00	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00
22	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.00	0.50	0.83	0.67	0.83	1.00
23	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.33	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.33	0.00	0.67	0.67	0.83	1.00
24	0.50	0.67	0.67	0.33	0.17	0.00	0.33	0.00	0.67	0.67	0.33	0.33	0.17	0.00	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.83	0.00	0.33	0.00	0.17	0.50	0.67
25	0.50	1.00	0.83	0.67	0.17	0.17	0.67	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.33	0.50	0.83	0.33	0.50	0.33	1.00	0.17	0.33	0.50	0.00	0.67	1.00
26	0.50	0.50	0.67	0.33	0.00	0.17	0.33	0.33	0.67	0.50	0.17	0.17	0.50	0.33	0.17	0.17	0.50	0.33	0.33	0.33	0.67	0.17	0.33	0.50	0.17	0.00	0.50
27	0.83	0.33	1.00	0.67	0.17	0.50	0.67	0.50	1.00	0.67	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.83	0.17	0.67	0.67	1.00	0.50	0.67	0.50	0.50	0.33	0.00

### 5.3.4 Κατασκευή πυρήνα

Η μέθοδος ELECTRE I πραγματοποιεί ανά ζεύγη συγκρίσεις των δεικτών συμφωνίας  $C(a,b)$  και των δεικτών ασυμφωνίας  $D(a,b)$  προκειμένου να διαμορφώσει σχέσεις επικράτησης μεταξύ των δυνατών λύσεων του προβλήματος. Οι σχέσεις επικράτησης έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$aSb \Leftrightarrow C(a,b) \geq \hat{c} \text{ και } D(a,b) \leq \hat{d}$$

Όπου:  $S$  το σύμβολο της επικράτησης

$\hat{c}$  το κατώφλι συμφωνίας

$\hat{d}$  το κατώφλι ασυμφωνίας

Σκοπός είναι η παραγωγή ενός πυρήνα επιλογών  $\Pi$ , όπου για κάθε επιλογή  $b \notin \Pi$  υπάρχει μια επιλογή  $a \in \Pi$ , ώστε να ισχύει  $aSb$ . Επομένως, για κάθε συνδυασμό  $\hat{c}, \hat{d}$  το σύνολο των επιλογών που επικρατούν έναντι κάποιας άλλης ή δε συμμετέχουν σε καμία σχέση επικράτησης αποτελεί τον εκάστοτε πυρήνα. Μειώνοντας τις τιμές του  $\hat{c}$  και αυξάνοντας τις τιμές του  $\hat{d}$  μειώνεται ο αριθμός των στοιχείων του πυρήνα και προσδιορίζεται τελικά η καλύτερη λύση, όταν καταλήξουμε σε πυρήνα με ένα μόνο στοιχείο.

Η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής με χρήση της μεθόδου ELECTRE I θεωρείται αξιόπιστη, όταν  $\hat{c} \geq 0.65$  και  $\hat{d} \leq 0.35$ .

- Πρώτη επανάληψη  $\hat{c} = 1$  και  $\hat{d} = 0$

Οι υπεροχές είναι:

P1 **S** {P5,P23}

P12 **S** {P5,P22}

P13 **S** {P5}

P14 **S** {P22}

P16 **S** {P5,P6,P22}

P17 **S** {P5,P23}

P18 **S** {P5}

P24 **S** {P6,P8,P14,P22}

P26 **S** {P5}

Άρα ο πυρήνας είναι:

$\Pi = \{P1, P2, P3, P4, P7, P9, P10, P11, P12, P13, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P24, P25, P26, P27\}$

Επιλογές που απορρίφθηκαν σε αυτή την επανάληψη:

$S1 = \{P5, P6, P8, P14, P22, P23\}$

Επιλογές που έχουν απορριφθεί:

$S = \{P5, P6, P8, P14, P22, P23\}$

- Δεύτερη επανάληψη  $\hat{c} = 0,9$  και  $\hat{d} = 0,17$

Οι υπεροχές είναι:

$$\begin{array}{lll} P1 \mathbf{S} \{P11,P19,P20\} & P3 \mathbf{S} \{P11,P19\} & P12 \mathbf{S} \{P11,P15,P19\} \\ P13 \mathbf{S} \{P18\} & P17 \mathbf{S} \{P11,P18,P20\} & P24 \mathbf{S} \{P13\} \end{array}$$

Άρα ο πυρήνας είναι:

$$\Pi = \{P1,P2,P3,P4,P7,P9,P10,P12,P16,P17,P21,P24,P25,P26,P27\}$$

Επιλογές που απορρίφθηκαν σε αυτή την επανάληψη:

$$S2 = \{P11,P13,P15,P18,P19,P20\}$$

Επιλογές που έχουν απορριφθεί:

$$S = \{P5,P6,P8,P11,P13,P14,P15,P18,P19,P20,P22,P23\}$$

- Τρίτη επανάληψη  $\hat{c} = 0,7$  και  $\hat{d} = 0,33$

Οι υπεροχές είναι:

$$\begin{array}{lll} P1 \mathbf{S} \{P4,P7,P12,P26\} & P2 \mathbf{S} \{P7\} & P3 \mathbf{S} \{P4\} \\ P4 \mathbf{S} \{P10\} & P7 \mathbf{S} \{P10\} & P17 \mathbf{S} \{P1,P3,P9\} \\ P26 \mathbf{S} \{P4,P7\} & P27 \mathbf{S} \{P2,P26\} & P24 \mathbf{S} \{P4,P7,P12,P16,P25\} \\ P12 \mathbf{S} \{P1,P2,P4,P7,P10,P25,P26\} & & \end{array}$$

Άρα ο πυρήνας είναι:

$$\Pi = \{P17,P21,P24,P27\}$$

Επιλογές που απορρίφθηκαν σε αυτή την επανάληψη:

$$S3 = \{P1,P2,P3,P4,P7,P9,P10,P12,P16,P25,P26\}$$

Επιλογές που έχουν απορριφθεί:

$$S = \{P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14,P15,P16,P18,P19,P20, \\ P22,P23,P25,P26\}$$

Οι επαναλήψεις για τον πυρήνα φαίνονται στους πίνακες 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24.

Πίνακας 5.19: Επανάληψη πρώτη, πίνακας συμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.92	0.86	0.82	1.00	0.60	0.78	0.41	0.64	0.90	0.92	0.74	0.67	0.41	0.66	0.42	0.52	0.73	1.00	0.92	0.34	0.74	1.00	0.22	0.60	0.76	0.68	
2	0.48	0.48	0.67	0.81	0.50	0.72	0.22	0.72	0.86	0.86	0.22	0.48	0.12	0.55	0.12	0.48	0.62	0.86	0.48	0.34	0.45	0.48	0.12	0.22	0.38	0.38	
3	0.36	0.66	0.92	0.74	0.60	0.52	0.22	0.52	1.00	0.92	0.55	0.22	0.22	0.47	0.52	0.36	0.28	1.00	0.73	0.38	0.74	0.36	0.22	0.60	0.60	0.59	
4	0.18	0.41	0.08	0.55	0.41	0.60	0.22	0.46	0.86	0.86	0.22	0.22	0.22	0.55	0.41	0.08	0.36	0.81	0.55	0.34	0.60	0.36	0.22	0.22	0.12	0.12	
5	0.08	0.48	0.34	0.78	0.50	0.64	0.22	0.64	0.72	0.64	0.08	0.22	0.12	0.47	0.23	0.34	0.54	0.86	0.59	0.34	0.50	0.48	0.08	0.18	0.08	0.30	
6	0.40	0.88	0.40	0.59	0.69	0.88	0.58	0.78	0.86	0.78	0.40	0.50	0.58	0.69	0.40	0.40	0.50	0.96	0.40	0.26	0.77	0.58	0.58	0.44	0.40	0.30	
7	0.22	0.55	0.48	0.52	0.62	0.55	0.36	0.86	0.71	0.71	0.26	0.36	0.36	0.55	0.26	0.48	0.62	0.81	0.52	0.34	0.36	0.62	0.36	0.22	0.26	0.38	
8	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.82	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.71	0.92	0.82	0.59	0.73	0.78	0.78	0.45	0.90	0.86	0.59	0.74	0.78	0.68	
9	0.36	0.36	0.52	0.62	0.62	0.36	0.81	0.36	0.62	0.81	0.36	0.36	0.36	0.55	0.36	0.52	0.62	0.62	0.62	0.38	0.36	0.62	0.36	0.22	0.36	0.48	
10	0.24	0.47	0.14	0.47	0.28	0.41	0.52	0.22	0.38	0.66	0.28	0.14	0.22	0.47	0.14	0.14	0.28	0.55	0.28	0.26	0.55	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04	
11	0.32	0.36	0.22	0.67	0.36	0.22	0.37	0.22	0.46	0.67	0.36	0.22	0.22	0.55	0.12	0.22	0.36	0.58	0.32	0.34	0.55	0.32	0.22	0.22	0.12	0.12	
12	0.77	0.92	0.86	0.78	1.00	0.86	0.74	0.67	0.64	0.86	0.92	0.48	0.48	0.92	0.68	0.48	0.54	0.96	0.88	0.34	1.00	0.77	0.48	0.86	0.76	0.68	
13	0.86	0.88	0.86	0.78	1.00	0.64	0.78	0.55	0.78	0.86	0.78	0.60	0.64	0.66	0.56	0.67	0.92	0.86	0.78	0.53	0.64	0.86	0.41	0.56	0.86	0.68	
14	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.92	0.88	0.73	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.92	0.82	0.59	0.92	0.88	0.78	0.26	1.00	0.96	0.50	0.74	0.78	0.68	
15	0.53	0.63	0.53	0.67	0.81	0.57	0.53	0.67	0.72	0.53	0.72	0.53	0.48	0.38	0.57	0.34	0.62	0.67	0.67	0.34	0.57	0.67	0.34	0.63	0.63	0.57	
16	0.58	0.96	0.67	0.96	1.00	0.96	0.96	0.62	0.86	0.96	0.96	0.58	0.62	0.62	0.81	0.48	0.62	0.96	0.77	0.34	1.00	0.58	0.58	0.63	0.67	0.38	
17	0.74	0.66	0.96	0.92	1.00	0.60	0.78	0.60	0.74	1.00	0.92	0.74	0.41	0.60	0.66	0.52	0.92	1.00	0.92	0.53	0.74	1.00	0.41	0.60	0.60	0.78	
18	0.46	0.56	0.72	0.86	1.00	0.50	0.72	0.41	0.72	0.72	0.72	0.46	0.41	0.50	0.74	0.50	0.53	0.86	0.86	0.34	0.50	0.86	0.08	0.56	0.46	0.76	
19	0.00	0.52	0.00	0.63	0.47	0.60	0.52	0.22	0.38	0.76	0.68	0.04	0.14	0.22	0.47	0.04	0.00	0.28	0.18	0.26	0.41	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04	
20	0.37	0.60	0.53	0.71	0.55	0.60	0.60	0.41	0.46	0.76	0.86	0.41	0.22	0.22	0.74	0.31	0.08	0.36	1.00	0.34	0.41	0.55	0.22	0.41	0.31	0.57	
21	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.66	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.66	0.66
22	0.40	0.69	0.40	0.78	0.73	0.59	0.74	0.40	0.64	0.78	0.78	0.40	0.40	0.40	0.73	0.49	0.40	0.54	0.69	0.59	0.26	0.58	0.36	0.36	0.26	0.30	
23	0.38	0.52	0.64	0.82	0.92	0.52	0.78	0.33	0.64	0.68	0.68	0.42	0.33	0.33	0.66	0.42	0.26	0.73	0.92	0.82	0.26	0.60	0.14	0.52	0.42	0.68	
24	0.78	0.92	0.78	0.78	0.92	1.00	0.88	1.00	0.78	0.86	0.78	0.78	0.92	1.00	0.92	0.82	0.78	0.92	0.96	0.78	0.64	1.00	0.96	0.86	0.82	0.68	
25	0.40	0.92	0.78	0.78	0.92	0.90	0.78	0.62	0.78	0.86	0.78	0.59	0.54	0.52	0.73	0.82	0.40	0.54	0.86	0.59	0.40	0.90	0.48	0.52	0.82	0.63	
26	0.58	0.92	0.86	0.88	1.00	0.74	0.88	0.36	0.88	0.96	0.88	0.51	0.62	0.36	0.47	0.66	0.48	0.54	0.96	0.69	0.34	0.74	0.58	0.36	0.60	0.59	
27	0.51	0.70	0.86	0.96	0.70	0.74	0.70	0.51	0.70	0.96	0.96	0.70	0.32	0.32	0.70	0.70	0.22	0.32	0.96	0.96	0.48	0.70	0.51	0.32	0.70	0.70	



Πίνακας 5.20: Επανάληψη πρώτη, πίνακας ασυμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1		0.67	0.50	0.33	0.00	0.17	0.33	0.17	0.33	0.67	0.17	0.33	0.33	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.17	0.00	0.33	0.33	0.33	0.67
2	0.67		0.83	0.50	0.33	0.17	0.33	0.83	0.67	0.50	0.33	0.50	0.67	0.33	0.50	0.83	0.67	0.33	0.33	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.67	0.67	
3	0.33	0.67		0.33	0.17	0.50	0.33	0.50	0.17	0.67	0.17	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50	0.50	0.17	0.50	0.50	0.33	0.67
4	0.50	0.50	0.33		0.33	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.17	0.67	0.83	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.17	0.50	0.83	0.67	0.50	0.83	0.67	0.50	0.50
5	0.67	1.00	0.83	0.67		0.33	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.67	0.50	0.67	1.00	
6	0.83	1.00	1.00	0.67	0.33		0.67	0.83	1.00	0.83	1.00	0.50	0.67	0.67	0.33	0.33	0.83	0.67	0.67	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.50	1.00	
7	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33		0.83	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.83	0.83	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	1.00	0.50	0.50	0.67
8	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.17	0.67		0.83	1.00	0.50	0.67	0.33	0.17	0.50	0.50	0.83	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00	
9	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00		1.00	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	1.00	0.83	0.50	0.67	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	1.00	
10	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50		0.33	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.67	0.17	0.50	0.83	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	0.50
11	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.67	0.67	1.00	0.50	1.00		0.67	0.83	0.83	0.67	0.67	1.00	0.83	0.50	0.50	1.00	0.67	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
12	0.33	0.33	0.50	0.17	0.00	0.17	0.17	0.33	0.50	0.33	0.17		0.33	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.00	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33
13	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.17	0.67	0.17	0.83	1.00	0.33	0.67		0.17	0.17	0.50	0.83	0.17	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
14	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	0.17	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50		0.67	0.67	0.67	0.67	0.50	0.67	0.83	0.00	0.50	0.33	0.33	0.50	1.00
15	0.83	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.33	0.67	0.83	0.83		0.50	1.00	0.83	0.50	0.50	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
16	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.00	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.17		0.67	0.33	0.50	0.50	0.83	0.00	0.50	0.50	0.17	0.50	1.00
17	0.33	1.00	0.33	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.17	1.00	0.17	0.67	0.17	0.33	0.33	0.33		0.17	0.50	0.17	0.33	0.33	0.00	0.33	0.33	0.50	1.00
18	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.83	1.00	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.50	0.83		0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.33	0.50	0.67	1.00
19	0.67	0.50	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.83	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.83	0.67		0.33	0.83	0.67	0.67	0.83	0.67	0.50	0.50
20	0.50	1.00	0.50	0.67	0.17	0.50	0.67	0.67	0.33	1.00	0.17	0.67	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50		0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	1.00
21	0.83	1.00	0.50	0.67	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.33	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.67	0.67	0.50	0.50		1.00	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00
22	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83		0.50	0.83	0.67	0.83	1.00
23	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.33	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.33		0.67	0.67	0.83	1.00
24	0.50	0.67	0.67	0.33	0.17	0.00	0.33	0.00	0.67	0.67	0.33	0.33	0.17	0.00	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.83	0.00	0.33		0.17	0.50	0.67
25	0.50	1.00	0.83	0.67	0.17	0.17	0.67	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.33	0.50	0.83	0.33	0.50	0.33	1.00	0.17	0.33	0.50		0.67	1.00
26	0.50	0.50	0.67	0.33	0.00	0.17	0.33	0.33	0.67	0.50	0.17	0.17	0.50	0.33	0.17	0.17	0.50	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	0.17	0.33	0.50		0.50
27	0.83	0.33	1.00	0.67	0.17	0.50	0.67	0.50	1.00	0.67	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.83	0.17	0.67	1.00	0.67	1.00	0.50	0.67	0.50	0.50	0.33

Πίνακας 5.21: Επανάληψη δεύτερη, πίνακας συμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.92	0.86	0.82	1.00	0.60	0.78	0.41	0.64	0.90	0.92	0.74	0.67	0.41	0.66	0.42	0.52	0.73	1.00	0.92	0.34	0.74	1.00	0.22	0.60	0.76	0.68	
2	0.48	0.48	0.67	0.81	0.50	0.72	0.22	0.72	0.86	0.86	0.22	0.48	0.12	0.55	0.12	0.48	0.62	0.86	0.48	0.34	0.45	0.48	0.12	0.22	0.38	0.38	
3	0.36	0.66	0.92	0.74	0.60	0.52	0.22	0.52	1.00	0.92	0.55	0.22	0.22	0.47	0.52	0.36	0.28	1.00	0.73	0.38	0.74	0.36	0.22	0.60	0.60	0.59	
4	0.18	0.41	0.08	0.55	0.41	0.60	0.22	0.46	0.86	0.86	0.22	0.22	0.22	0.55	0.41	0.08	0.36	0.81	0.55	0.34	0.60	0.36	0.22	0.22	0.12	0.12	
5	0.08	0.48	0.34	0.50	0.41	0.64	0.22	0.64	0.72	0.64	0.08	0.22	0.12	0.47	0.23	0.34	0.54	0.86	0.59	0.34	0.50	0.48	0.08	0.18	0.08	0.30	
6	0.40	0.88	0.40	0.69	0.59	0.88	0.58	0.78	0.86	0.78	0.40	0.50	0.58	0.69	0.40	0.40	0.50	0.96	0.40	0.26	0.77	0.58	0.58	0.44	0.40	0.30	
7	0.22	0.55	0.48	0.62	0.55	0.78	0.36	0.86	0.71	0.71	0.26	0.36	0.36	0.55	0.26	0.48	0.62	0.81	0.52	0.34	0.36	0.62	0.36	0.22	0.26	0.38	
8	0.78	0.88	0.78	0.92	0.82	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.71	0.92	0.82	0.59	0.73	0.78	0.78	0.45	0.90	0.86	0.59	0.74	0.78	0.68	
9	0.36	0.36	0.52	0.62	0.36	0.81	0.36	0.62	0.81	0.36	0.36	0.60	0.36	0.55	0.36	0.52	0.62	0.62	0.62	0.38	0.36	0.62	0.36	0.22	0.36	0.48	
10	0.24	0.47	0.14	0.28	0.41	0.52	0.22	0.38	0.66	0.28	0.14	0.22	0.22	0.47	0.14	0.14	0.28	0.55	0.28	0.26	0.55	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04	
11	0.32	0.36	0.22	0.36	0.22	0.37	0.22	0.46	0.67	0.67	0.36	0.22	0.22	0.55	0.12	0.22	0.36	0.58	0.32	0.34	0.55	0.32	0.22	0.22	0.12	0.12	
12	0.77	0.92	0.86	1.00	0.86	0.74	0.67	0.64	0.86	0.92	0.48	0.48	0.48	0.92	0.68	0.48	0.54	0.96	0.88	0.34	1.00	0.77	0.48	0.86	0.76	0.68	
13	0.86	0.88	0.86	1.00	0.64	0.78	0.55	0.78	0.86	0.78	0.60	0.60	0.64	0.66	0.56	0.67	0.92	0.86	0.78	0.53	0.64	0.86	0.41	0.56	0.86	0.68	
14	0.78	0.88	0.78	0.92	0.92	0.88	0.73	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.73	0.92	0.82	0.59	0.92	0.88	0.78	0.26	1.00	0.96	0.50	0.74	0.78	0.68	
15	0.53	0.63	0.53	0.81	0.57	0.53	0.67	0.72	0.53	0.72	0.53	0.48	0.38	0.57	0.34	0.62	0.62	0.67	0.67	0.34	0.57	0.67	0.34	0.63	0.53	0.57	
16	0.58	0.96	0.67	1.00	1.00	0.96	0.62	0.86	0.96	0.96	0.58	0.62	0.62	0.81	0.48	0.48	0.62	0.96	0.77	0.34	1.00	0.58	0.58	0.63	0.67	0.38	
17	0.74	0.66	0.96	1.00	0.60	0.78	0.60	0.74	1.00	0.92	0.74	0.41	0.60	0.66	0.52	0.53	0.92	1.00	0.92	0.53	0.74	1.00	0.41	0.60	0.60	0.78	
18	0.46	0.56	0.72	1.00	0.50	0.72	0.41	0.72	0.72	0.72	0.46	0.41	0.50	0.74	0.50	0.53	0.86	0.86	0.34	0.50	0.86	0.50	0.86	0.56	0.46	0.76	
19	0.00	0.52	0.00	0.47	0.60	0.52	0.22	0.38	0.76	0.68	0.04	0.14	0.22	0.47	0.04	0.00	0.28	0.18	0.26	0.18	0.26	0.41	0.36	0.22	0.22	0.04	
20	0.37	0.60	0.53	0.55	0.60	0.60	0.41	0.46	0.76	0.86	0.41	0.22	0.22	0.74	0.31	0.08	0.36	1.00	0.34	0.34	0.41	0.55	0.22	0.41	0.31	0.57	
21	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.66	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.66	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.66	
22	0.40	0.69	0.40	0.73	0.59	0.74	0.40	0.64	0.78	0.78	0.40	0.40	0.40	0.73	0.49	0.40	0.54	0.69	0.59	0.26	0.58	0.58	0.36	0.36	0.26	0.30	
23	0.38	0.52	0.64	0.92	0.52	0.78	0.33	0.64	0.68	0.68	0.42	0.33	0.33	0.66	0.42	0.26	0.73	0.92	0.82	0.26	0.60	0.60	0.14	0.52	0.42	0.68	
24	0.78	0.92	0.78	0.92	1.00	0.88	1.00	0.78	0.86	0.78	0.78	0.92	1.00	0.92	0.82	0.78	0.92	0.96	0.78	0.64	1.00	0.96	0.86	0.82	0.68		
25	0.40	0.92	0.78	0.92	0.90	0.78	0.62	0.78	0.86	0.78	0.59	0.54	0.52	0.73	0.82	0.40	0.54	0.86	0.59	0.40	0.90	0.48	0.52	0.82	0.63		
26	0.58	0.92	0.86	1.00	0.74	0.88	0.36	0.88	0.96	0.88	0.51	0.62	0.36	0.47	0.66	0.48	0.54	0.96	0.69	0.34	0.7	0.58	0.36	0.60	0.59		
27	0.51	0.70	0.86	0.70	0.74	0.70	0.51	0.70	0.96	0.96	0.70	0.32	0.32	0.70	0.70	0.22	0.32	0.96	0.96	0.48	0.70	0.51	0.32	0.70	0.70		

Πίνακας 5.22: Επανάληψη δεύτερη, πίνακας ασυμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.67	0.50	0.33	0.00	0.17	0.33	0.17	0.33	0.67	0.17	0.33	0.33	0.33	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.17	0.00	0.33	0.33	0.33	0.67
2	0.67	0.83	0.50	0.33	0.17	0.33	0.33	0.83	0.67	0.50	0.33	0.50	0.67	0.67	0.33	0.50	0.83	0.67	0.33	0.33	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.67	0.67
3	0.33	0.67	0.83	0.50	0.17	0.33	0.33	0.50	0.17	0.67	0.17	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50	0.50	0.17	0.50	0.50	0.33	0.67
4	0.50	0.50	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.17	0.67	0.83	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.17	0.50	0.83	0.67	0.50	0.83	0.67	0.50	0.50
5	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.67	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.67	0.50	0.67	1.00
6	0.83	1.00	1.00	0.67	0.33	0.67	0.67	0.83	1.00	1.00	0.50	0.67	0.67	0.67	0.33	0.33	0.83	0.67	0.67	0.67	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.50	1.00
7	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33	0.83	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.83	0.83	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	1.00	0.50	0.50	0.67
8	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.17	0.67	0.83	1.00	0.50	0.50	0.67	0.67	0.33	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
9	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	1.00	0.83	0.50	0.67	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
10	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50	0.83	0.33	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.67	0.67	0.17	0.50	0.83	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	0.50
11	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.67	0.67	1.00	0.50	1.00	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	1.00	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.67	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
12	0.33	0.33	0.50	0.17	0.00	0.17	0.17	0.33	0.50	0.33	0.17	0.83	0.33	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.00	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33
13	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.17	0.67	0.17	0.83	1.00	0.33	0.67	0.67	0.17	0.17	0.50	0.83	0.17	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
14	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	0.17	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.50	0.67	0.67	0.67	0.67	0.50	0.67	0.83	0.00	0.50	0.33	0.33	0.50	1.00
15	0.83	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.33	0.67	0.83	0.83	0.50	1.00	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
16	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.00	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.17	0.67	0.33	0.50	0.50	0.50	0.83	0.00	0.50	0.50	0.17	0.50	1.00
17	0.33	1.00	0.33	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.17	1.00	0.17	0.67	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33	0.17	0.50	0.17	0.33	0.33	0.00	0.33	0.33	0.50	1.00
18	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.83	1.00	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.50	0.83	0.83	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.33	0.50	0.67	1.00
19	0.67	0.50	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.83	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.83	0.67	0.83	0.33	0.83	0.67	0.67	0.83	0.67	0.50	0.50
20	0.50	1.00	0.50	0.67	0.17	0.50	0.67	0.67	0.33	1.00	0.17	0.67	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	1.00
21	0.83	1.00	0.50	0.67	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.33	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.67	0.67	0.50	0.50	0.83	1.00	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00
22	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.50	0.50	0.83	0.67	0.83	1.00
23	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.33	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.33	0.33	0.67	0.67	0.83	1.00
24	0.50	0.67	0.67	0.33	0.17	0.00	0.33	0.00	0.67	0.67	0.33	0.33	0.17	0.00	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.83	0.00	0.33	0.17	0.50	0.67	1.00
25	0.50	1.00	0.83	0.67	0.17	0.17	0.67	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.33	0.50	0.83	0.33	0.50	0.33	1.00	0.17	0.33	0.50	0.67	0.67	1.00
26	0.50	0.50	0.67	0.33	0.00	0.17	0.33	0.33	0.67	0.50	0.17	0.17	0.50	0.33	0.17	0.17	0.50	0.33	0.33	0.33	0.67	0.17	0.33	0.50	0.17	0.67	1.00
27	0.83	0.33	1.00	0.67	0.17	0.50	0.67	0.50	1.00	0.67	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.83	0.17	0.67	0.67	1.00	0.50	0.67	0.50	0.50	0.33	0.33

Πίνακας 5.23: Επανάληψη τρίτη, πίνακας συμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1		0.92	0.86	0.82	1.00	0.60	0.78	0.41	0.64	0.90	0.92	0.74	0.67	0.41	0.66	0.42	0.52	0.73	1.00	0.92	0.34	0.74	1.00	0.22	0.60	0.76	0.68
2	0.48		0.48	0.67	0.81	0.50	0.72	0.22	0.72	0.86	0.86	0.22	0.48	0.12	0.55	0.12	0.48	0.62	0.86	0.48	0.34	0.45	0.48	0.12	0.22	0.38	0.38
3	0.36	0.66		0.92	0.74	0.60	0.52	0.22	0.52	1.00	0.92	0.55	0.22	0.22	0.47	0.52	0.36	0.28	1.00	0.73	0.38	0.74	0.36	0.22	0.60	0.60	0.59
4	0.18	0.41	0.08		0.55	0.41	0.60	0.22	0.46	0.86	0.86	0.22	0.22	0.22	0.55	0.41	0.08	0.36	0.81	0.55	0.34	0.60	0.36	0.22	0.22	0.12	0.12
5	0.08	0.48	0.34	0.78		0.50	0.64	0.22	0.64	0.72	0.64	0.08	0.22	0.12	0.47	0.23	0.34	0.54	0.86	0.59	0.34	0.50	0.48	0.08	0.18	0.08	0.30
6	0.40	0.88	0.40	0.59	0.69		0.88	0.58	0.78	0.86	0.78	0.40	0.50	0.58	0.69	0.40	0.40	0.50	0.96	0.40	0.26	0.77	0.58	0.58	0.44	0.40	0.30
7	0.22	0.55	0.48	0.52	0.62	0.55		0.36	0.86	0.71	0.71	0.26	0.36	0.36	0.55	0.26	0.48	0.62	0.81	0.52	0.34	0.36	0.62	0.36	0.22	0.26	0.38
8	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.82	0.78		0.78	0.78	0.78	0.78	0.73	0.71	0.92	0.82	0.59	0.73	0.78	0.78	0.45	0.90	0.86	0.59	0.74	0.78	0.68
9	0.36	0.36	0.52	0.62	0.62	0.36	0.81	0.36		0.62	0.81	0.36	0.36	0.36	0.55	0.36	0.52	0.62	0.62	0.62	0.38	0.36	0.62	0.36	0.22	0.36	0.48
10	0.24	0.47	0.14	0.47	0.28	0.41	0.52	0.22	0.38		0.66	0.28	0.14	0.22	0.47	0.14	0.14	0.28	0.55	0.28	0.26	0.55	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04
11	0.32	0.36	0.22	0.67	0.36	0.22	0.37	0.22	0.46	0.67		0.36	0.22	0.22	0.55	0.12	0.22	0.36	0.58	0.32	0.34	0.55	0.32	0.22	0.22	0.12	0.12
12	0.77	0.92	0.86	0.78	1.00	0.86	0.74	0.67	0.64	0.86	0.92		0.48	0.48	0.92	0.68	0.48	0.54	0.96	0.88	0.34	1.00	0.77	0.48	0.86	0.76	0.68
13	0.86	0.88	0.86	0.78	1.00	0.64	0.78	0.55	0.78	0.86	0.78	0.60		0.64	0.66	0.56	0.67	0.92	0.86	0.78	0.53	0.64	0.86	0.41	0.56	0.86	0.68
14	0.78	0.88	0.78	0.78	0.92	0.92	0.88	0.73	0.78	0.78	0.78	0.78	0.73		0.92	0.82	0.59	0.92	0.88	0.78	0.26	1.00	0.96	0.50	0.74	0.78	0.68
15	0.53	0.63	0.53	0.67	0.81	0.57	0.53	0.67	0.72	0.53	0.72	0.53	0.48	0.38		0.57	0.34	0.62	0.67	0.67	0.34	0.57	0.67	0.34	0.63	0.53	0.57
16	0.58	0.96	0.67	0.96	1.00	1.00	0.96	0.62	0.86	0.96	0.96	0.58	0.62	0.62	0.81		0.48	0.62	0.96	0.77	0.34	1.00	0.58	0.58	0.63	0.67	0.38
17	0.74	0.66	0.96	0.92	1.00	0.60	0.78	0.60	0.74	1.00	0.92	0.74	0.41	0.60	0.66	0.52		0.92	1.00	0.92	0.53	0.74	1.00	0.41	0.60	0.60	0.78
18	0.46	0.56	0.72	0.86	1.00	0.50	0.72	0.41	0.72	0.72	0.72	0.46	0.41	0.50	0.74	0.50	0.53		0.86	0.86	0.34	0.50	0.86	0.08	0.56	0.46	0.76
19	0.00	0.52	0.00	0.63	0.47	0.60	0.52	0.22	0.38	0.76	0.68	0.04	0.14	0.22	0.47	0.04	0.00	0.28		0.18	0.26	0.41	0.36	0.22	0.22	0.04	0.04
20	0.37	0.60	0.53	0.71	0.55	0.60	0.60	0.41	0.46	0.76	0.86	0.41	0.22	0.22	0.74	0.31	0.08	0.36	1.00		0.34	0.41	0.55	0.22	0.41	0.31	0.57
21	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66	0.74	0.74	0.74	0.66	0.66	0.74	0.66	0.74	0.66		0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.66
22	0.40	0.69	0.40	0.78	0.73	0.59	0.74	0.40	0.64	0.78	0.78	0.40	0.40	0.40	0.73	0.49	0.40	0.54	0.69	0.59	0.26		0.58	0.36	0.36	0.26	0.30
23	0.38	0.52	0.64	0.82	0.92	0.52	0.78	0.33	0.64	0.68	0.68	0.42	0.33	0.33	0.66	0.42	0.26	0.73	0.92	0.82	0.26	0.60		0.14	0.52	0.42	0.68
24	0.78	0.92	0.78	0.78	0.92	1.00	0.88	1.00	0.78	0.86	0.78	0.78	0.92	1.00	0.92	0.82	0.78	0.92	0.96	0.78	0.64	1.00	0.96		0.86	0.82	0.68
25	0.40	0.92	0.78	0.78	0.92	0.90	0.78	0.62	0.78	0.86	0.78	0.59	0.54	0.52	0.73	0.82	0.40	0.54	0.86	0.59	0.40	0.90	0.48	0.52		0.82	0.63
26	0.58	0.92	0.86	0.88	1.00	0.74	0.88	0.36	0.88	0.96	0.88	0.51	0.62	0.36	0.47	0.66	0.48	0.54	0.96	0.69	0.34	0.7	0.58	0.36	0.60		0.59
27	0.51	0.70	0.86	0.96	0.70	0.74	0.70	0.51	0.70	0.96	0.96	0.70	0.32	0.32	0.70	0.70	0.22	0.32	0.96	0.96	0.48	0.70	0.51	0.32	0.70	0.70	0.70

Πίνακας 5.24: Επανάληψη τρίτη, πίνακας ασυμφωνίας

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.67	0.50	0.33	0.00	0.17	0.33	0.17	0.33	0.67	0.17	0.33	0.33	0.17	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.17	0.67	0.17	0.00	0.33	0.33	0.33	0.67
2	0.67	0.83	0.50	0.33	0.17	0.33	0.33	0.83	0.67	0.50	0.33	0.50	0.67	0.67	0.33	0.50	0.83	0.67	0.33	0.33	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.67	0.67
3	0.33	0.67	0.33	0.17	0.50	0.33	0.33	0.50	0.17	0.67	0.17	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.33	0.33	0.17	0.17	0.50	0.50	0.17	0.50	0.50	0.33	0.67
4	0.50	0.50	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.17	0.67	0.83	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.17	0.50	0.83	0.67	0.50	0.83	0.67	0.50	0.50
5	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.33	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.33	0.50	0.67	0.50	0.67	1.00
6	0.83	1.00	1.00	0.67	0.33	0.33	0.67	0.83	1.00	1.00	0.50	0.67	0.67	0.67	0.33	0.33	0.83	0.67	0.67	0.67	1.00	0.33	0.67	0.83	0.50	0.50	1.00
7	0.67	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33	0.83	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.83	0.83	0.33	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	1.00	0.50	0.50
8	0.67	1.00	0.83	0.67	0.33	0.17	0.67	0.83	1.00	0.50	0.50	0.67	0.33	0.17	0.50	0.50	0.83	0.50	0.50	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
9	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.17	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	1.00	0.83	0.50	0.67	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
10	0.67	0.67	0.50	0.33	0.50	0.83	0.50	0.83	0.50	0.83	0.33	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.67	0.17	0.50	0.83	0.83	0.67	0.83	0.83	0.67	0.50
11	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.67	0.67	1.00	0.50	1.00	0.67	0.67	0.83	0.83	0.67	0.67	1.00	0.83	0.50	0.50	1.00	0.67	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
12	0.33	0.33	0.50	0.17	0.00	0.17	0.17	0.33	0.50	0.33	0.17	0.67	0.33	0.17	0.17	0.17	0.17	0.50	0.17	0.17	0.67	0.00	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33
13	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.17	0.67	0.17	0.83	1.00	0.33	0.67	0.17	0.17	0.17	0.50	0.83	0.83	0.17	0.50	1.00	0.17	0.50	0.33	0.17	0.67	1.00
14	0.67	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	0.17	0.83	1.00	0.67	0.67	0.50	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.50	0.67	0.83	0.00	0.50	0.33	0.33	0.33	0.50
15	0.83	1.00	0.83	0.67	0.50	0.33	0.67	1.00	0.83	1.00	0.33	0.67	0.83	0.83	0.83	0.50	1.00	1.00	0.83	0.50	1.00	0.50	0.83	1.00	0.67	0.67	1.00
16	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.00	0.67	0.50	0.83	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.17	0.67	0.67	0.67	0.33	0.50	0.50	0.83	0.00	0.50	0.50	0.17	0.50
17	0.33	1.00	0.33	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.17	1.00	0.17	0.67	0.17	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.17	0.50	0.17	0.33	0.33	0.00	0.33	0.33	0.50
18	0.67	1.00	0.83	0.67	0.00	0.33	0.67	0.33	0.83	1.00	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.50	0.83	0.83	0.33	0.50	1.00	0.33	0.50	0.33	0.50	0.67	1.00
19	0.67	0.50	0.67	0.33	0.33	0.67	0.33	0.83	0.50	0.50	0.33	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.83	0.83	0.67	0.33	0.83	0.67	0.67	0.83	0.67	0.50	0.50
20	0.50	1.00	0.50	0.67	0.17	0.50	0.67	0.67	0.33	1.00	0.17	0.67	0.50	0.50	0.50	0.50	0.67	0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	0.67	0.50	0.50	1.00
21	0.83	1.00	0.50	0.67	0.67	1.00	0.67	1.00	0.67	1.00	0.33	1.00	0.83	1.00	1.00	1.00	0.67	0.67	0.50	0.50	0.67	1.00	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00
22	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.67	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.50	0.83	0.83	0.67	0.83	1.00
23	0.83	1.00	0.83	1.00	0.83	0.67	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.83	0.83	0.33	1.00	1.00	0.83	1.00	0.67	1.00	0.83	0.33	0.67	0.67	0.67	0.83	1.00
24	0.50	0.67	0.67	0.33	0.17	0.00	0.33	0.00	0.67	0.67	0.33	0.33	0.17	0.00	0.33	0.33	0.67	0.67	0.33	0.33	0.83	0.00	0.33	0.17	0.17	0.50	0.67
25	0.50	1.00	0.83	0.67	0.17	0.17	0.67	0.33	0.67	1.00	0.33	0.67	0.50	0.33	0.33	0.50	0.83	0.83	0.33	0.50	0.33	1.00	0.17	0.33	0.50	0.67	1.00
26	0.50	0.50	0.67	0.33	0.00	0.17	0.33	0.33	0.67	0.50	0.17	0.17	0.50	0.33	0.17	0.17	0.50	0.50	0.33	0.33	0.33	0.67	0.17	0.33	0.50	0.17	0.50
27	0.83	0.33	1.00	0.67	0.17	0.50	0.67	0.50	1.00	0.67	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50	0.83	0.83	0.17	0.67	1.00	0.50	0.67	0.50	0.50	0.33	0.33

Η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής με χρήση της μεθόδου ELECTRE I θεωρείται αξιόπιστη, όταν  $\hat{c} \geq 0.65$  και  $\hat{d} \leq 0.35$ .

Καταλήξαμε στον πυρήνα  $\Pi = \{P17, P21, P24, P27\}$  στην τρίτη επανάληψη με ικανοποιητικές τιμές για το κατώφλι συμφωνίας  $\hat{c} = 0,7$  και για το κατώφλι ασυμφωνίας  $\hat{d} = 0,33$ .

Αν προχωρούσαμε σε τέταρτη επανάληψη θα είχαμε  $\Pi = \{P17, P24, P27\}$ , αφού P17 S P21 και  $\hat{c} = 0,53$ ,  $\hat{d} = 0,33$ . Κάτι το οποίο βγαίνει εκτός ορίων αξιόπιστης λύσης με την μέθοδο ELECTRE I.

Οπότε με 4 χώρες σαν βέλτιστες επιλογές, επιλέχθηκε η χρήση της μεθόδου MAUT, για να συνεχιστεί πολυκριτηριακή αξιολόγηση μετά της ELECTRE I. Θα την τροφοδοτήσουμε με τα δεδομένα των τεσσάρων χωρών αυτών και σας αποτέλεσμα θα πάρουμε την σειρά κατάταξης προτίμησης βέλτιστης επιλογής.

### 5.3.5 MAUT

Η διαδικασία της μεθόδου MAUT παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.2.2.2.

**Πίνακας 5.25:** Τα δεδομένα των χωρών αυτών για τα κριτήρια C1-C8

Χώρες/Κριτήρια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<b>Βάρη</b>	0.26	0.10	0.04	0.04	0.04	0.19	0.19	0.14
Namibia (17)	5	6	6	1	6	6	7	5
South Africa (21)	1	7	7	7	6	7	7	7
Tanzania (24)	7	2	3	3	5	7	7	6
Zimbabwe (27)	4	5	1	7	7	5	5	7
<b>Max</b>	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
<b>Min</b>	1.00	2.00	1.00	1.00	5.00	5.00	5.00	5.00

**Πίνακας 5.26:** Ενδιάμεσο στάδιο MAUT

Χώρες/Κριτήρια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Namibia	0.67	0.80	0.83	0.00	0.50	0.50	1.00	0.00
South Africa	0.00	1.00	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00
Tanzania	1.00	0.00	0.33	0.33	0.00	1.00	1.00	0.50
Zimbabwe	0.50	0.60	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00

**Πίνακας 5.27:** Αποτελέσματα MAUT

Χώρες	Βαθμός χρησιμότητας
Namibia	59.2%
South Africa	72.0%
Tanzania	73.7%
Zimbabwe	41.0%

**Πίνακας 5.28:** Τελική κατάταξη

A.A.	Τελική κατάταξη	Βαθμός χρησιμότητας
1	Tanzania	73.7%
2	South Africa	72.0%
3	Namibia	59.2%
4	Zimbabwe	41.0%

Βέλτιστη επιλογή αναδεικνύεται η Τανζανία, μετά την χρήση των πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων ELECTRE I και MAUT.

## 5.4 Εφαρμογή Πολυκριτηριακής Μεθόδου Υποστήριξης Αποφάσεων MAUT

Μετά την εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE I και MAUT στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα εφαρμόσουμε και για 27 χώρες αυτή τη φορά την μέθοδο MAUT, για να διασταυρώσουμε το αποτέλεσμα μόνο με μία μέθοδο αυτή τη φορά.

Η διαδικασία της μεθόδου MAUT παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.2.2.2.

**Πίνακας 5.29:** Τα δεδομένα των χωρών αυτών για τα κριτήρια C1-C8

Χώρες/Κριτήρια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Βάρη	26.0%	10.0%	4.0%	4.0%	4.0%	19.0%	19.0%	14.0%
Angola	6	3	6	3	6	5	6	5
Benin	6	1	3	7	7	3	2	5
Botswana	4	6	7	3	6	4	5	5
Cameroon	3	4	5	5	7	2	4	4
Central African Republic	5	1	2	1	6	3	4	4
Dem. Rep. of the Congo	7	2	1	1	5	3	2	6
Republic of the Congo	5	2	5	5	7	1	2	6
Ethiopia	7	1	2	1	4	5	7	6
Gabon	5	5	7	1	7	1	1	6
Ghana	2	4	5	7	5	2	2	5
Ivory Coast	3	3	4	1	7	2	1	5
Kenya	7	3	4	5	6	5	5	5
Madagascar	6	1	2	1	6	7	6	6
Malawi	7	2	2	1	3	6	6	6
Mali	7	1	2	1	7	5	1	4
Mozambique	7	4	2	1	7	4	4	6
Namibia	5	6	6	1	6	6	7	5
Niger	5	1	2	1	7	6	6	4
Nigeria	3	2	5	4	5	3	2	4
Senegal	4	3	5	1	7	5	3	4
South Africa	1	7	7	1	6	7	7	7
South Sudan	7	2	2	1	1	2	4	5
Sudan	5	2	5	1	1	5	6	4
Tanzania	7	2	3	3	5	7	7	6
Uganda	7	1	3	1	5	4	5	7
Zambia	6	5	3	4	6	4	5	6
Zimbabwe	4	5	1	7	7	5	5	7
Max	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Min	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00



Πίνακας 5.30: Ενδιάμεσο στάδιο MAUT

Χώρες/Κριτήρια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Angola	0.83	0.33	0.83	0.33	0.83	0.67	0.83	0.33
Benin	0.83	0.00	0.33	1.00	1.00	0.33	0.17	0.33
Botswana	0.50	0.83	1.00	0.33	0.83	0.50	0.67	0.33
Cameroon	0.33	0.50	0.67	0.67	1.00	0.17	0.50	0.00
Central African Republic	0.67	0.00	0.17	0.00	0.83	0.33	0.50	0.00
Dem. Rep. of the Congo	1.00	0.17	0.00	0.00	0.67	0.33	0.17	0.67
Republic of the Congo	0.67	0.17	0.67	0.67	1.00	0.00	0.17	0.67
Ethiopia	1.00	0.00	0.17	0.00	0.50	0.67	1.00	0.67
Gabon	0.67	0.67	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.67
Ghana	0.17	0.50	0.67	1.00	0.67	0.17	0.17	0.33
Ivory Coast	0.33	0.33	0.50	0.00	1.00	0.17	0.00	0.33
Kenya	1.00	0.33	0.50	0.67	0.83	0.67	0.67	0.33
Madagascar	0.83	0.00	0.17	0.00	0.83	1.00	0.83	0.67
Malawi	1.00	0.17	0.17	0.00	0.33	0.83	0.83	0.67
Mali	1.00	0.00	0.17	0.00	1.00	0.67	0.00	0.00
Mozambique	1.00	0.50	0.17	0.00	1.00	0.50	0.50	0.67
Namibia	0.67	0.83	0.83	0.00	0.83	0.83	1.00	0.33
Niger	0.67	0.00	0.17	0.00	1.00	0.83	0.83	0.00
Nigeria	0.33	0.17	0.67	0.50	0.67	0.33	0.17	0.00
Senegal	0.50	0.33	0.67	0.00	1.00	0.67	0.33	0.00
South Africa	0.00	1.00	1.00	0.00	0.83	1.00	1.00	1.00
South Sudan	1.00	0.17	0.17	0.00	0.00	0.17	0.50	0.33
Sudan	0.67	0.17	0.67	0.00	0.00	0.67	0.83	0.00
Tanzania	1.00	0.17	0.33	0.33	0.67	1.00	1.00	0.67
Uganda	1.00	0.00	0.33	0.00	0.67	0.50	0.67	1.00
Zambia	0.83	0.67	0.33	0.50	0.83	0.50	0.67	0.67
Zimbabwe	0.50	0.67	0.00	1.00	1.00	0.67	0.67	1.00

**Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα MAUT**

<b>Χώρες</b>	<b>Βαθμός χρησιμότητας</b>
Angola	66.2%
Benin	45.2%
Botswana	56.8%
Cameroon	35.7%
Central African Republic	37.2%
Dem. Rep. of the Congo	49.2%
Republic of the Congo	40.8%
Ethiopia	69.7%
Gabon	41.3%
Ghana	29.7%
Ivory Coast	25.8%
Kenya	67.3%
Madagascar	69.8%
Malawi	70.7%
Mali	43.3%
Mozambique	64.0%
Namibia	71.8%
Niger	53.7%
Nigeria	27.2%
Senegal	42.0%
South Africa	69.3%
South Sudan	45.7%
Sudan	50.2%
Tanzania	80.3%
Uganda	66.2%
Zambia	66.5%
Zimbabwe	67.0%

**Πίνακας 5.32:** Τελική κατάταξη

<b>A.A.</b>	<b>Τελική κατάταξη</b>	<b>Βαθμός χρησιμότητας</b>
1	Tanzania	80.3%
2	Namibia	71.8%
3	Malawi	70.7%
4	Madagascar	69.8%
5	Ethiopia	69.7%
6	South Africa	69.3%
7	Kenya	67.3%
8	Zimbabwe	67.0%
9	Zambia	66.5%
10	Uganda	66.2%
11	Angola	66.2%
12	Mozambique	64.0%
13	Botswana	56.8%
14	Niger	53.7%
15	Sudan	50.2%
16	Dem. Rep. of the Congo	49.2%
17	South Sudan	45.7%
18	Benin	45.2%
19	Mali	43.3%
20	Senegal	42.0%
21	Gabon	41.3%
22	Republic of the Congo	40.8%
23	Central African Republic	37.2%
24	Cameroon	35.7%
25	Ghana	29.7%
26	Nigeria	27.2%
27	Ivory Coast	25.8%

Βέλτιστη επιλογή αναδεικνύεται η Τανζανία, μετά την χρήση της πολυκριτηριακής μεθόδου υποστήριξης αποφάσεων MAUT.

## 5.5 Υποστήριξη Απόφασης

Μετά την εφαρμογή των μεθόδων ELECTRE I και MAUT στο προηγούμενο κεφάλαιο, καταλήξαμε σαν βέλτιστη επιλογή την Τανζανία. Μετά την εφαρμογή της μεθόδου MAUT, καταλήξαμε ξανά σαν βέλτιστη επιλογή την Τανζανία.

Κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, γιατί μετά την ELECTRE I καταλήξαμε σε ένα σύνολο τεσσάρων χωρών με ικανοποιητικές τιμές για το κατώφλι συμφωνίας  $\hat{c} = 0,7$  και για το κατώφλι ασυμφωνίας  $\hat{d} = 0,33$  (συνθήκη  $\hat{c} \geq 0,65$  και  $\hat{d} \leq 0,35$ ) και η μέθοδος MAUT της κατέταξε σε σειρά με βάση τον βαθμό χρησιμότητας τους, δηλαδή τις 4 χώρες αυτές σε φθίνουσα σειρά βέλτιστης λύσης.

Μετά την εφαρμογή μόνο της MAUT και στις 27 χώρες, παρατηρούμε ότι οι 4 βέλτιστες λύσεις της ELECTRE I βρίσκονται οι δύο πρώτες και οι άλλες δύο μέσα στις πρώτες 8, στην τελική κατάταξη μετά εφαρμογή μόνο της μεθόδου MAUT. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί αυτές ήταν οι βέλτιστες λύσεις.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στον βαθμό χρησιμότητας οφείλονται στο ότι στην πρώτη εφαρμογή της MAUT, έγινε κατάταξη ανάμεσα μόνο στις 4 χώρες αυτές και στην δεύτερη περίπτωση ανάμεσα και στις 27 χώρες. Οπότε σε κάθε κριτήριο την δεύτερη φορά η ελάχιστη τιμή είχε τιμή 1, ενώ στην πρώτη εφαρμογή η ελάχιστη τιμή κυμαινόταν από 1 έως 5 και αυτό γιατί είχαν μείνει μόνο 4 χώρες ως πιθανές βέλτιστες.

Η Τανζανία είναι η βέλτιστη επιλογή γιατί μόνο αυτή και Νότιος Αφρική είχαν και στον "Μέσο ετήσιο παραγόμενο ηλεκτρισμό" και στη "Μέση ταχύτητα ανέμου" βαθμολογία 7, αλλά στο ποσοστό ηλεκτροδότησης η Νότιος Αφρική είχε βαθμό 1 και η Τανζανία 7. Γι αυτό σωστά οι μέθοδοι και τις δύο φορές έδωσαν σαν βέλτιστη λύση την Τανζανία.

Αυτό είναι ένα μεγάλο κενό για την Τανζανία, γιατί υπάρχει 13,9% πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ μπορεί να παράγει αξιόλογα ποσά ηλιακής και αιολικής ενέργειας, τα οποία θα μπορούσαν να λύσουν το πρόβλημα της έλλειψης ηλεκτροδότησης, καθώς επίσης θα μπορούσε να αναπτυχθεί και η οικονομία της χώρας αξιοποιώντας τους πόρους αυτούς.

---

***Κεφάλαιο 6. Μελέτη Αυτόνομων Υβριδικών  
Συστημάτων, Φωτοβολταϊκής και Αιολικής  
Ενέργειας***

---



## 6.1 Εισαγωγή

Από το προηγούμενο κεφάλαιο επιλέχθηκε η Τανζανία ως η καταλληλότερη χώρα στην Υποσαχάρια Αφρική, για την πραγματοποίηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων φωτοβολταϊκής και αιολικής ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την μελέτη δύο αυτόνομων υβριδικών συστημάτων. Το πρώτο θα είναι για οικισμό αγροτικής περιοχής και το δεύτερο για σπίτι αστικής περιοχής. Η ενέργεια θα παράγεται από φωτοβολταϊκό σύστημα και ανεμογεννήτρια και θα αποθηκεύεται σε συσσωρευτές.



**Σχήμα 6.1:** Αριστερά: Ενδεικτικό αυτόνομο υβριδικό σύστημα, με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Δεξιά: Τυπικές κατοικίες στην Τανζανία.

## 6.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος Αγροτικής Περιοχής

Στις αγροτικές περιοχές της Τανζανίας, η κατανάλωση ρεύματος είναι πάρα πολύ μικρή 92kWh το χρόνο κατ' άτομο. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε η μελέτη συστήματος για 12 σπίτια. Σε κάθε σπίτι κατοικούν κατά μέσο όρο  $4,8 \approx 5$  άνθρωποι, οπότε η κατανάλωση θα είναι  $92 * 2,5 * 12 = 2760kWh$  το χρόνο, 230kWh μηνιαίως και 7,56 kWh ημερησίως.

## 6.2.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το PVGIS για την Τανζανία είναι τα εξής: [48]

- Φωτοβολταϊκή απόδοση

Ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος: 1.0 kW (κρυσταλλικού πυριτίου)

Εκτιμώμενες απώλειες λόγω θερμοκρασίας και χαμηλής ακτινοβολίας: 12,2% (χρησιμοποιώντας την τοπική θερμοκρασία περιβάλλοντος)

Εκτιμώμενη απώλεια λόγω γωνιακής ανάκλασης: 3,0%

Άλλες ζημιές (καλώδια, inverter κλπ): 14.0%

Συνδυασμένες απώλειες του συστήματος PV: 26.8%

Κλίση των πάνελ: 9°

Προσανατολισμός (αζιμούθιο) των ενοτήτων: -176°

- Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία

Η βέλτιστη κλίση πάνελ είναι: 9°

Ετήσιο έλλειμμα ακτινοβολίας λόγω σκίασης (οριζόντια): 0.1%

Φωτοβολταϊκό σύστημα σταθερής γωνίας

**Πίνακας 6.1:** Φωτοβολταϊκή απόδοση

Μήνας	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
<b>Ιαν</b>	4.17	129	5.74	178
<b>Φεβ</b>	4.44	124	6.12	171
<b>Μαρ</b>	4.77	148	6.57	204
<b>Απρ</b>	4.75	142	6.51	195
<b>Μαϊ</b>	4.64	144	6.31	196
<b>Ιουν</b>	5.09	153	6.83	205
<b>Ιουλ</b>	5.40	167	7.27	225
<b>Αυγ</b>	5.53	172	7.54	234
<b>Σεπ</b>	5.54	166	7.64	229
<b>Οκτ</b>	5.33	165	7.41	230
<b>Νοε</b>	4.79	144	6.67	200
<b>Δεκ</b>	4.39	136	6.06	188
<b>ΜΟ Χρόνου</b>	4.90	149	6.73	205

**Πίνακας 6.2:** Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία

Μήνας	$H_h$	$H_{opt}$	$H_{(30)}$	$DNI$	$I_{opt}$
<b>Ιαν</b>	6110	5740	4620	5370	-25
<b>Φεβ</b>	6350	6100	5230	5570	-13
<b>Μαρ</b>	6570	6520	6050	6140	4
<b>Απρ</b>	6250	6430	6500	6140	22
<b>Μαϊ</b>	5850	6210	6710	6210	33
<b>Ιουν</b>	6180	6710	7520	7700	39
<b>Ιουλ</b>	6600	7130	7920	8510	37
<b>Αυγ</b>	7080	7430	7770	8580	27
<b>Σεπ</b>	7510	7560	7220	8510	11
<b>Οκτ</b>	7610	7370	6400	8200	-7
<b>Νοε</b>	7100	6670	5340	7220	-22
<b>Δεκ</b>	6540	6070	4710	6260	-29
<b>ΜΟ Χρόνου</b>	6650	6670	6340	7040	9



Όπου:

$E_d$ : Μέση ημερήσια παραγωγή ηλ. ενέργειας από το συγκεκριμένο σύστημα (kWh)

$E_m$ : Μέση μηνιαία παραγωγή ηλ. ενέργειας από το συγκεκριμένο σύστημα (kWh)

$H_d$ : Μέσο ημερήσιο ποσό συνολικής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο που προσπίπτει στα πάνελ του συγκεκριμένου συστήματος ( $\text{kWh} / \text{m}^2$ )

$H_m$ : Μέσο ποσό της συνολικής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο που προσπίπτει στα πάνελ του συγκεκριμένου συστήματος ( $\text{kWh} / \text{m}^2$ )

$H_h$ : Ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο ( $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$ )

$H_{opt}$ : Ακτινοβολία σε κεκλιμένο βέλτιστο επίπεδο ( $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$ )

$H_{(30)}$ : Ακτινοβολία στο επίπεδο σε γωνία:  $30^\circ$  ( $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$ )

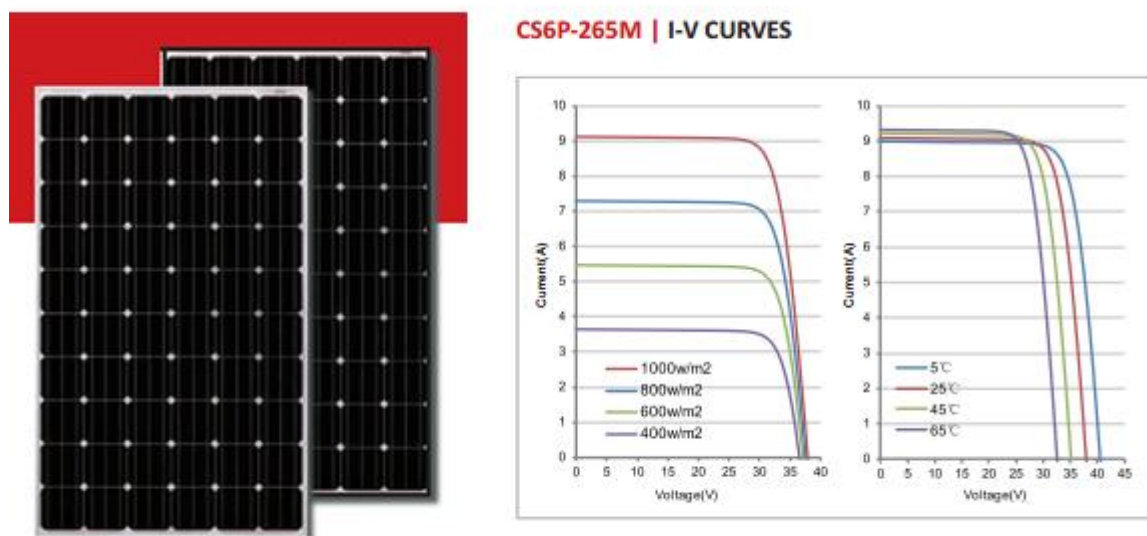
DNI: Άμεση κανονική ακτινοβολία ( $\text{Wh}/\text{m}^2/\text{ημέρα}$ )

$I_{opt}$ : Βέλτιστη κλίση (μοίρες).

## 6.2.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος

### 6.2.2.1 Επιλογή Φωτοβολταϊκών πλαισίων

Επιλέχθηκε η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων Γερμανικής προέλευσης Canadian Solar CS6P 255W<sub>p</sub>. Με τα δεδομένα αυτού θα υπολογίσουμε την ισχύ αιχμής, των αριθμό των πάνελ και τις υπόλοιπες τιμές που θα χρειαστούμε. [49], [50]



Σχήμα 6.2: Αριστερά: Φωτοβολταϊκά πάνελ Canadian Solar CS6P 255W<sub>p</sub>. Δεξιά:  
Διαγράμματα Ρεύματος-Τάσης των πάνελ.

Πίνακας 6.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές φωτοβολταϊκών πάνελ  
Canadian Solar CS6P 255W<sub>p</sub>.

#### ELECTRICAL DATA | STC

Electrical Data	CS6P-255M	CS6P-260M	CS6P-265M	CS6P-270M
Nominal Maximum Power (P <sub>max</sub> )	255 W	260 W	265 W	270 W
Optimum Operating Voltage (V <sub>mp</sub> )	30.5 V	30.7 V	30.9 V	31.1 V
Optimum Operating Current (I <sub>mp</sub> )	8.35 A	8.48 A	8.61 A	8.67 A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	37.7 V	37.8 V	37.9 V	38.2 V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.87 A	8.99 A	9.11 A	9.19 A
Module Efficiency	15.85 %	16.16 %	16.47 %	16.79 %
Operating Temperature	-40 °C~+85 °C			
Maximum System Voltage	1000V (IEC) / 1000V (UL) / 600V (UL)			
Maximum Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0~+5 W			

\*Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

#### ELECTRICAL DATA | NOCT

Electrical Data	CS6P-255M	CS6P-260M	CS6P-265M	CS6P-270M
Nominal Maximum Power (P <sub>max</sub> )	184 W	188 W	191 W	195 W
Optimum Operating Voltage (V <sub>mp</sub> )	27.8 V	28.0 V	28.2 V	28.4 V
Optimum Operating Current (I <sub>mp</sub> )	6.62 A	6.70 A	6.79 A	6.87 A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	34.6 V	34.7 V	34.8 V	35.0 V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	7.18 A	7.28 A	7.37 A	7.44 A

\*Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

#### MODULE | MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline, 6inch
Cell Arrangement	60 (6 x 10)
Dimensions	1638 x 982 x 40mm (64.5 x 38.7 x 1.57in)
Weight	18.5kg (40.8 lbs)
Front Cover	3.2mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
Junction BOX	IP67, 3 diodes
Cable	4mm <sup>2</sup> (IEC)/4mm <sup>2</sup> &12AWG 1000V(UL1000V)/ 12AWG(UL600V), 1000mm
Connectors	MC4 or MC4 comparable
Standard Packaging	24pcs, 504kg (quantity and weight per pallet)
Module Pieces per Container	672pcs (40'HQ)

#### TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (P <sub>max</sub> )	-0.45 %/°C
Temperature Coefficient (V <sub>oc</sub> )	-0.35 %/°C
Temperature Coefficient (I <sub>sc</sub> )	0.060 %/°C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

#### PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Industry leading performance at low irradiation, +96.5% module efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (AM 1.5, 25 °C)

Η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την Τανζανία σε αυτή την κλίση είναι:

$$H_d = 5,74 \text{ kWh/m}^2/\text{ημέρα (Ιανουάριος)}$$

Η ισχύς αιχμής  $P_p$  υβριδικού συστήματος για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μίας ημέρας αυτονομίας είναι:[60]

$$P_p = \frac{E_k * P_{STC} * N}{H_d * \sigma_{ΑΣ} * \sigma_\mu * (N - n)}$$

όπου,

$P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ , ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 7,56 \text{ kWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης.

$H_d = 5,74 \text{ kWh/m}^2/\text{ημέρα}$ , ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{ΑΣ} = 0,8 * \sigma_\theta = 0,7$ , συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα.

Συντελεστής θερμοκρασίας:  $\sigma_\theta = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,45\% = 0,88$

$t_a = 22,5^\circ\text{C}$ , μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα τον Ιανουάριο.

0,45% θερμοκρασιακός συντελεστής φωτοβολταϊκού πάνελ.

$\sigma_\mu = 0,9$ , συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει καλώδια, ελεγκτή φόρτισης και inverter.

$N = 31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς).

$n = 1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας).

Οι παραπάνω τιμές φαίνονται παραπάνω στους πίνακες 6.1, 6.2, 6.3.

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει ότι:

$$P_p = 2,16 \text{ kWp}$$

Άρα, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή  $2,16 \text{ kWp}$  για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των 12 σπιτιών. Η παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια δεν συνυπολογίζεται στην ολική ημερήσια παραγωγή ενέργειας γιατί θα είναι η δευτερεύουσα πηγή, για τυχόν μη επαρκή παραγωγή από το φωτοβολταϊκό σύστημα.[59],[60],[62]

Ο αριθμός πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P_p}{P_{\text{πλαίσιο}}} = 8,46 \approx 9 \text{ πλαίσια}$$

όπου,  $P_{\text{πλαίσιο}} = 255 \text{ Wp}$ .

Για να υπολογιστεί η συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων έπρεπε να οριστεί η μέγιστη τάση  $V_m$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ισχύει:

$$V_m > 1,2 * V_B \Rightarrow V_m > 57,6V$$

όπου,  $V_B = 48V$  η ονομαστική τάση των συσσωρευτών.

Για να ισχύσει ο περιορισμός της τάσης, επιλέχθηκε η δημιουργία 3 παράλληλων κλάδων, ο καθένας εκ των οποίων θα έχει 3 πλαίσια συνδεδεμένα εν σειρά. Με τη χρήση 9 πλαισίων 255 Wp το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά 2,3 kWp.[50]

### 6.2.2.2 Επιλογή Συσσωρευτών

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η χωρητικότητα C των συσσωρευτών. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:[61]

$$C = \frac{n * E_k}{\sigma_\gamma * \sigma_{εκ} * \beta_{εκ} * V_\beta}$$

όπου,

$E_k = 7,56 kWh$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης.

$\sigma_\gamma = 0,98$ , συντελεστής γήρανσης, αυτοεκφόρτισης.

$\sigma_{εκ} = 0,95$ , συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης.

$\beta_{εκ} = 0,8$ , βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1 ημέρα αυτονομίας.

$V_\beta = 48V$ , η ονομαστική τάση των συσσωρευτών

$n = 1$ , ημέρες αυτονομίας.

Οι παραπάνω τιμές φαίνονται στον πίνακα 6.4.

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει ότι:

$$C = 211,47 Ah$$

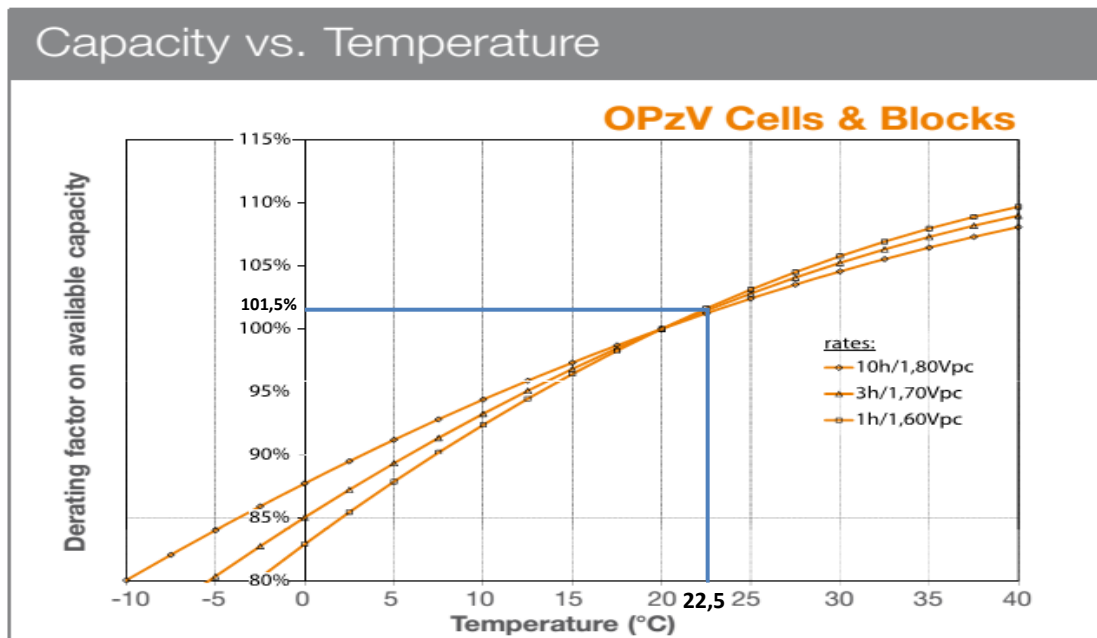
Χρησιμοποιήθηκαν συσσωρευτές της Ελληνικής εταιρίας System Sunlight SA τύπου 2V 4 OPzV200 χωρητικότητας 224Ah σε C10. Τα στοιχεία της φαίνονται παρακάτω.[61]



**Σχήμα 6.3:** Συσσωρευτές System Sunlight SA τύπου 2V 4 OPzV200 χωρητικότητας 224Ah σε C10.

Θα χρειαστούμε 24 συσσωρευτές 2V 4 OPzV200 σε σειρά, για να επιτύχουμε τα  $2V * 24 = 48V$  ονομαστικής τάσης συσσωρευτών. Η χωρητικότητα τους στα C10(Ah) στα 1,8 Vpc (δηλαδή για 10 ώρες φόρτιση) είναι 224 Ah. Η χωρητικότητα τους είναι αρκετή και δεν χρειάζεται να συνδέσουμε κάποιο κλάδο παράλληλα, γιατί  $211,47 \text{ Ah (ζητούμενη χωρητικότητα)} < 225 \text{ Ah (διαθέσιμη χωρητικότητα)}$ . [24]

Όμως η χωρητικότητα του συσσωρευτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω:



**Σχήμα 6.4:** Επιρροή της θερμοκρασίας στους συσσωρευτές της System Sunlight SA.

Οπότε η τελική χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι  $225 * 101,5 = 228,38 \text{ Ah}$ . Η διαφορά αυτή της περισσότερης χωρητικότητας, είναι κάτι που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του υβριδικού συστήματος και για την πλήρη φόρτιση των

## Μελέτη για εφαρμογή αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις Υποσαχάριες χώρες της Αφρικής

μπαταριών θα συμβάλει και η ανεμογεννήτρια κάποιες ώρες της ημέρας, αν χρειαστεί.

Τα στοιχεία των συσσωρευτών φαίνονται στους παρακάτω πίνακες

Type	Positive Plates Number	Number of Poles	Nom. capacity (Ah at 20°C)				Length (mm)	Width (mm)	Height <sub>1</sub> (mm)	Height <sub>2</sub> (mm)	Pole Dist. (mm)	Weight (approx. kg)	Nom. Voltage	Short Circuit Current (A)	Internal Resistance (mOhm)	
			C10 (Ah) 1.80 Vpc	C5 (Ah) 1.75 Vpc	C3 (Ah) 1.75 Vpc	C1 (Ah) 1.75 Vpc										
2V 4 OPzV 200 <sup>1</sup>	4	50	2	224	202	179	124	103	206	355	382	-	20	2	2300	0.88
2V 5 OPzV 250 <sup>1</sup>	5	50	2	280	253	224	155	124	206	355	382	-	24	2	2860	0.71
2V 6 OPzV 300 <sup>1</sup>	6	50	2	336	303	268	185	145	206	355	382	-	28	2	3380	0.60
2V 5 OPzV 350 <sup>1</sup>	5	70	2	405	365	320	212	124	206	471	498	-	31	2	3380	0.60
2V 6 OPzV 420 <sup>1</sup>	6	70	2	486	438	384	252	145	206	471	498	-	37	2	3980	0.51
2V 7 OPzV 490 <sup>1</sup>	7	70	2	567	512	447	292	166	206	471	498	-	42	2	4520	0.45
2V 6 OPzV 600 <sup>1</sup>	6	100	2	690	623	539	330	145	206	646	673	-	50	2	4360	0.47
2V 8 OPzV 800 <sup>1</sup>	8	100	4	920	831	720	445	191	210	646	673	80	68	2	5980	0.34
2V 10 OPzV 1000 <sup>1</sup>	10	100	4	1150	1039	899	554	233	210	646	673	110	82	2	7380	0.28
2V 12 OPzV 1200 <sup>1</sup>	12	100	4	1380	1247	1076	657	275	210	646	673	140	97	2	8640	0.24
2V 12 OPzV 1500 <sup>1</sup>	12	125	4	1620	1470	1275	784	275	210	797	824	140	120	2	9440	0.22
2V 16 OPzV 2000 <sup>1</sup>	16	125	6	2160	1960	1701	1049	399	214	772	799	110	165	2	12680	0.16
2V 20 OPzV 2500 <sup>1</sup>	20	125	8	2700	2452	2130	1322	487	212	772	799	110	200	2	16240	0.13
2V 24 OPzV 3000 <sup>1</sup>	24	125	8	3240	2940	2544	1552	576	212	772	799	140	240	2	18460	0.11

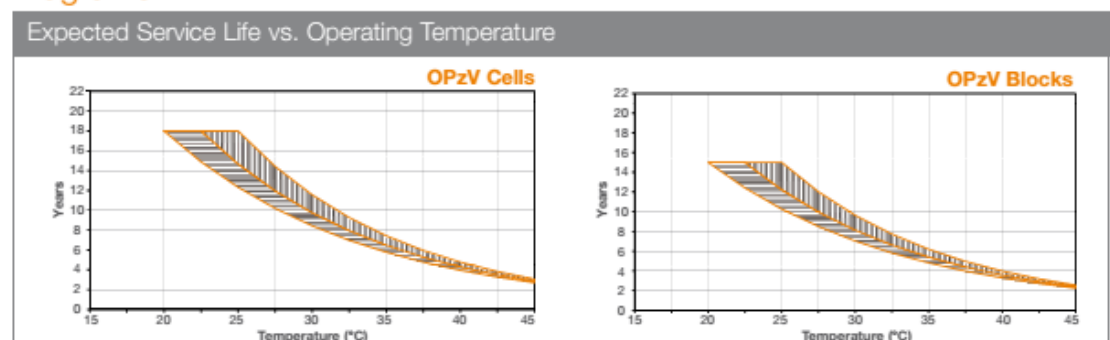
### Charging

<b>Floating voltage set point</b>	2.25 V/cell at 20°C.
<b>Recommended boost charge voltage</b>	2.33 V/cell - 2.40 V/cell at 20°C
<b>Max. charge current</b>	No limit for float voltage applications. The maximum permissible ripple current value is 0.05 I <sub>10</sub> . Under no circumstance this value should exceed 0.1 I <sub>10</sub> .
<b>Max. 60 sec safety current</b>	2500A per pair of poles
<b>Recommended end of discharge voltage</b>	1.60 V/cell for 15 min - 1 hr discharge 1.70 V/cell for 1 hr - 5 hr discharge 1.75 V/cell for 5 hr - 8 hr discharge 1.80 V/cell for 8 hr - 10 hr discharge In the performance tables, the end of discharge voltages extend up to 1.60 V, however it is highly recommended to take into consideration the values above, in order to avoid deep battery discharges.

### Operational Data

<b>Expected service life</b>	18 years for 2V cells and 15 years for 6V & 12V blocks (stand-by float, 20°C).
<b>Maintenance-free</b>	No topping up water during life.
<b>Operating temperature</b>	Recommended 10°C to 30°C. Min: -20°C / Max: 45°C. At very low temperatures (i.e. below 0°C) the acid in the electrolyte may reach a density where it freezes (between -6°C and -13°C for a fully discharged battery).
<b>Storage time</b>	Maximum shelf life up to 6 months at 20°C, 4 months at 30°C or 2 months at 40°C.
<b>Self discharge rate</b>	Approx. 2% per month at 20°C.
<b>Expected number of cycles</b>	The number of such cycles which can be obtained is typically over 2000 at 60% DoD, as dictated by the IEC896-2 (>1000 cycles).

### Diagrams



## Performance Data

Discharge Constant Current at 20°C (Amperes)

End Voltage 1.80 V/cell		10 min	15 min	30 min	45 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	10 h	12 h	20 h
Monoblocks	12V 1 OPzV 50	49.4	45.3	36.6	30.8	26.6	17.5	13.2	10.6	9.0	7.8	6.8	6.1	5.1	4.4	2.8
	12V 2 OPzV 100	98.7	90.7	73.2	61.6	53.2	35.0	26.4	21.3	17.9	15.5	13.7	12.3	10.2	8.7	5.6
	12V 3 OPzV 150	140.6	129.9	106.2	90.0	78.2	51.9	39.3	31.8	26.8	23.2	20.5	18.4	15.3	13.1	8.5
	6V 4 OPzV 200	185.7	172.3	141.9	120.6	105.0	69.8	52.9	42.8	36.1	31.2	27.6	24.8	20.6	17.7	11.4
	6V 5 OPzV 250	227.5	211.4	174.9	149.2	130.1	86.9	65.9	53.4	45.0	39.0	34.5	31.0	25.7	22.1	14.3
	6V 6 OPzV 300	263.3	245.6	204.8	175.7	153.8	103.5	78.7	63.9	53.9	46.8	41.4	37.1	30.9	26.5	17.1
2V Cells	4 OPzV 200	198.9	185.0	152.5	129.3	112.2	74.3	56.3	45.7	38.7	33.6	29.8	26.8	22.4	19.3	12.6
	5 OPzV 250	247.0	229.9	189.7	161.0	139.8	92.8	70.4	57.1	48.3	42.0	37.2	33.5	28.0	24.1	15.7
	6 OPzV 300	293.0	272.9	225.9	192.1	167.1	111.1	84.3	68.5	57.9	50.4	44.7	40.2	33.6	29.0	18.9
	5 OPzV 350	299.7	283.0	242.6	211.7	187.4	128.9	99.2	81.2	69.1	60.3	53.6	48.3	40.5	35.0	22.9
	6 OPzV 420	348.0	334.3	287.3	251.4	223.1	154.0	118.7	97.3	82.8	72.3	64.3	57.9	48.6	42.0	27.5
	7 OPzV 490	393.3	380.5	328.8	288.7	256.9	178.5	137.9	113.2	96.4	84.2	74.9	67.6	56.7	49.0	32.2
	6 OPzV 600	392.4	390.5	351.0	316.1	287.1	208.8	164.4	136.1	116.5	102.0	90.9	82.1	69.0	59.7	39.3
	8 OPzV 800	547.1	537.7	477.1	428.5	388.2	280.6	220.2	182.1	155.6	136.2	121.4	109.6	92.0	79.5	52.3
	10 OPzV 1000	675.7	663.1	591.5	531.8	482.3	349.6	274.7	227.3	194.4	170.2	151.6	136.9	115.0	99.4	65.4
	12 OPzV 1200	788.3	779.8	695.9	627.5	570.7	416.2	328.1	271.8	232.7	203.9	181.8	164.2	138.0	119.4	78.6
	12 OPzV 1500	949.7	936.2	834.9	752.0	682.8	495.7	389.5	321.9	275.1	240.6	214.2	193.2	162.0	139.8	91.4
	16 OPzV 2000	1277.9	1258.9	1120.5	1008.2	914.7	662.6	520.2	429.7	367.0	321.0	285.6	257.6	216.0	186.4	121.8
	20 OPzV 2500	1628.5	1588.9	1419.6	1274.3	1153.8	832.0	652.0	538.0	459.3	401.5	357.2	322.1	270.0	233.0	152.2
	24 OPzV 3000	1856.2	1837.6	1643.8	1484.1	1350.1	985.4	776.2	642.3	549.2	480.7	428.0	386.3	324.0	279.7	183.0

Πίνακας 6.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές των συσσωρευτών της System Sunlight SA.

### 6.2.2.3 Επιλογή Ρυθμιστή φόρτισης

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή φόρτισης. Η τάση του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή τα 48V.

Χρησιμοποιήθηκε ρυθμιστής φόρτισης της Γερμανικής εταιρίας SMA Solar Technology AG τύπου Sunny Island Charger 50 με ονομαστική τάση συσσωρευτή 48V. Τα στοιχεία του φαίνονται στον πίνακα 6.5.[51],[59],[60],[62]



Σχήμα 6.5: Ρυθμιστής φόρτισης SMA Solar Technology AG Sunny Island Charger 50.

Επειδή για τα Φωτοβολταϊκά πάνελ η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι  $V_{OC} = 37,7V$  στους 25°C, για να μην ξεπεραστεί η μέγιστη DC τάση του ρυθμιστή που είναι 140V, συνδέθηκαν τα 9 πάνελ σε τρεις σειρές τριών πάνελ.

$$V_{OC,string} = 3 * 37,7 = 113,1 \leq 140V$$

Οπότε έχουμε 3 string από πάνελ, με 3 πάνελ ανά string. Έπειτα ελέγχθηκε αν ταιριάζουν όλα τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης.

$$I_{TOT} = I_{sc,string} = 3 * 8,87 = 26,61A \leq 40A$$

Επίσης, η μέγιστη συνολική ισχύς που δέχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι

$$P_{TOT,PV} = 9 * 225 = 2025W \leq 2400W$$

$$I_{BATTERY} = \frac{2025W}{48V} = 42,19A \leq 50A$$

Άρα το μέγιστο ρεύμα που θα φορτίζει τους συσσωρευτές είναι αρκετό και μπορεί να αποδοθεί από τον φορτιστή στις μπαταρίες.

**Πίνακας 6.5:** Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές ρυθμιστή φόρτισης Sunny Island Charger 50.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Sunny Island Charger 50
	<b>48 V</b>
<b>Είσοδος (φωτοβολταϊκή γεννήτρια)</b>	
Μέγιστη φωτοβολταϊκή ισχύς	2400 W
Μέγιστη τάση DC	140 V DC
Βέλτιστο εύρος τιμών τάσης MPPT	70 V - 100 V
Αριθμός ανιχνευτών MPP	1
Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα	40 A
<b>Εξοδος (συσσωρευτής)</b>	
Ονομαστική ισχύς DC έως 40 °C	2400 W
Ονομαστική τάση συσσωρευτή	48 V
Εύρος τάσης DC (ρυθμιζόμενο)	36 V - 65 V
Τύπος συσσωρευτή	Συσσωρευτές μολύβδου κλειστού τύπου
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης / Ρεύμα διαρκούς φόρτισης	50 A / 50 A
Ρύθμιση φόρτισης	IUoU
<b>Βαθμός απόδοσης</b>	
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	98 %
Ευρο-ετα	97,3 %
<b>Προστασία συσκευών</b>	
Αντιστροφή πόλων DC	●
Αντοχή σε βραχυκύκλωμα	●
Προστασία υπερφόρτισης	●
Προστασία από υπέρταση και υπόταση	●
Προστασία από υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες	●
<b>Γενικά στοιχεία</b>	
Διαστάσεις (Π / Υ / Β) σε mm	421 / 310 / 143
Βάρος	10 kg
Κατηγορία προστασίας (κατά IEC 60529)	IP65
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-25 °C ... +60 °C
Υγρασία	0 % - 100 %
Ίδια κατανάλωση κατά τη διάρκεια της ημέρας	< 5 W
Ίδια κατανάλωση κατά τη διάρκεια της νύχτας	< 3 W
<b>Εξοπλισμός και λειτουργίες</b>	
Ένδειξη	LED πολλών χρωμάτων
Παράλληλη λειτουργία	έως και 4 συσκευών
Διεπαφή: Sync Bus Piggy-Back	○
Εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας (τύπου KTY)	○
Εγγύηση: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 χρόνια	●/○/○/○/○
Πιστοποιητικά και άδειες	CE
● Βασικός εξοπλισμός ○ Προαιρετικά — Δεν διατίθεται	
Χειρισμός	SIC50-MPT



#### 6.2.2.4 Επιλογή Αυτόνομου Μετατροπέα

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου αυτόνομου μετατροπέα τάσης DC/AC.



**Σχήμα 6.6:** Αυτόνομος μετατροπέας τάσης SMA Solar Technology AG Sunny Island 4548-US.

Η επιλογή του αυτόνομου μετατροπέα, έγινε με ορισμένα σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Από την είσοδο DC (συσσωρευτή) εξετάστηκε η ονομαστική τάση συσσωρευτή 48V, το μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή (όταν λειτουργούν σαν φορτιστές) καθώς και το εύρος τιμών της τάσης. Από την είσοδο AC (γεννήτρια) δόθηκε προσοχή στην τάση και συχνότητα εισόδου (230V, 50Hz) και στο εύρος τιμών τους. Τέλος, από την έξοδο AC (καταναλωτής) εξετάστηκε η ονομαστική τάση και συχνότητα AC (230V, 50Hz), το εύρος τιμών τους, η συνεχής ισχύς AC (είναι η ισχύς με την οποία μπορούν να καλύψουν ένα φορτίο συνεχώς) και η ισχύς υπερφόρτισης (είναι η ισχύς που μπορούν να δώσουν για μικρά χρονικά διαστήματα και απαιτείται για την εκκίνηση των ηλεκτρικών συσκευών)[52],[59],[60],[62]

Χρησιμοποιήθηκε αυτόνομος μετατροπέας τάσης της Γερμανικής εταιρίας SMA Solar Technology AG τύπου Sunny Island 4548-US με ονομαστική τάση συσσωρευτή 48V. Τα στοιχεία του φαίνονται στον πίνακα 6.6.

**Πίνακας 6.6:** Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές αυτόνομου μετατροπέα τάσης Sunny Island 4548-US.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Sunny Island 5048
<b>Εξόδος AC (καταναλωτής)</b>	
Ονομαστική τάση δικτύου / Εύρος τάσης AC	230 V / 202 V - 253 V
Ονομαστική συχνότητα / Εύρος συχνοτήτων (ρυθμιζόμενο)	50 Hz, 60 Hz / 45 Hz ... 65 Hz
Ισχύς AC ( στους 25 °C / στους 45 °C)	5000 W / 4000 W
Ισχύς AC στους 25 °C για 30 λεπτά / 1 λεπτό / 3 δευτερόλεπτα	6500 W / 8400 W / 12000 W
Ονομαστικό ρεύμα / Μέγιστο ρεύμα εξόδου (peak)	21,7 A / 120 A για περ. 60 ms
Συντελεστής παραμόρφωσης τάσης εξόδου / Συντελεστής ισχύος σε ονομαστική ισχύ	3 % / -1 ... +1
<b>Εισόδος AC (γεννήτρια ή δίκτυο)</b>	
Ονομαστική τάση εισόδου / Εύρος τάσης εισόδου AC	230 V / 172,5 V - 264,5 V
Ονομαστική συχνότητα εισόδου / Επιτρεπτό εύρος συχνοτήτων εισόδου	50 Hz, 60 Hz / 40 Hz ... 70 Hz
Μέγιστο ρεύμα εισόδου AC / ρυθμιζόμενο	56 A / 0 A ... 56 A
Μέγιστη ισχύς εισόδου AC	12,8 kW
<b>Εισόδος DC συσσωρευτή</b>	
Ονομαστική τάση εισόδου / Εύρος τάσης DC	48 V / 41 V - 63 V
Μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή / Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης DC	120 A / 100 A
Τύπος συσσωρευτή / Χωρητικότητα συσσωρευτή	Μολύβδου, NiCd / 100 Ah ... 10000 Ah
Ρύθμιση φόρτισης	Διαδικασία φόρτισης IUoU με αυτόματη πλήρη φόρτιση και φόρτιση εξισορρόπησης
<b>Βαθμός απόδοσης / Ιδιοκατανάλωση</b>	
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	95 %
Ιδιοκατανάλωση χωρίς φορτίο / Κατάσταση αναμονής (Standby)	25 W / 4 W
<b>Διατάξεις προστασίας</b>	
Προστασία αντίστροφης πολικότητας DC / Ασφάλεια DC	● / ●
Βραχυκύκλωμα AC / Υπερφόρτιση AC	● / ●
Υπερθέρμανση / Βαθιά εκφόρτιση συσσωρευτή	● / ●
<b>Γενικά χαρακτηριστικά</b>	
Διαστάσεις (Π / Υ / Β)	467 / 612 / 235 mm
Βάρος	63 kg
Εύρος τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας	-25 °C ... +60 °C
<b>Εξοπλισμός / Λειτουργία</b>	
Χερισματός και σθόνη / Ρελέ πολλαπλών λειτουργιών	Εσωτερικά / 2
Κατηγορία προστασίας (κατά το πρότυπο IEC 60529)	Εσωτερική συναρμολόγηση (IP30)
Τριφασικά συστήματα / Παράλληλη σύνδεση	● / ●
Ενσωματωμένη παράκαμψη (bypass) / Λειτουργία πολλαπλών συγκροτημάτων (multicluster)	- / ●
Υπολογισμός κατάστασης φόρτισης / Πλήρης φόρτιση / Φόρτιση εξισορρόπησης	● / ● / ●
Ενσωματωμένο σύστημα ομαλής εκκίνησης / Υποστήριξη γεννήτριας	● / ●
Αισθητήρας θερμοκρασίας συσσωρευτή / Καλώδια επικοινωνίας	● / ●
Εγγύηση (5 / 10 / 15 / 20 / 25 χρόνια)	● / ○ / ○ / ○ / ○
Πιστοποιητικά και άδειες	www.SMA-Solar.com

Η ημερήσια κατανάλωση είναι 7,56kWh, έχει υπολογιστεί η κατανομή ενέργειας για 7 ώρες χρήσης, αλλά ελέγχθηκε στην ακραία περίπτωση των 3 ωρών χρήσης (ελάχιστο), τότε:

$$P_{MAX,ΦΟΡΤΙΟΥ} = 2520W \leq 5000W$$

Για τον συσσωρευτή πρέπει να αντέχει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, τα κελία των συσσωρευτών φορτίζουν σε 10 ώρες.

$$I_{BATTERY} = \frac{228,38Ah}{10h} = 22,84A \leq 120A$$

### 6.2.2.5 Επιλογή Ανεμογεννήτριας

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης ανεμογεννήτριας.

Χρησιμοποιήθηκε ανεμογεννήτρια της Αγγλικής εταιρίας FuturEnergy τύπου FuturEnergy AirForce 1 με ονομαστική ισχύ 1kW (στα 12,5m/s) και τάση εξόδου 48V. Τα στοιχεία της φαίνονται στους πίνακες 6.7, 6.8 και σχήμα 6.8. [50],[53],[54],[55],[56],[57],[58]



Σχήμα 6.7: Ανεμογεννήτριες της FuturEnergy AirForce 1 με ονομαστική ισχύ 1kW.

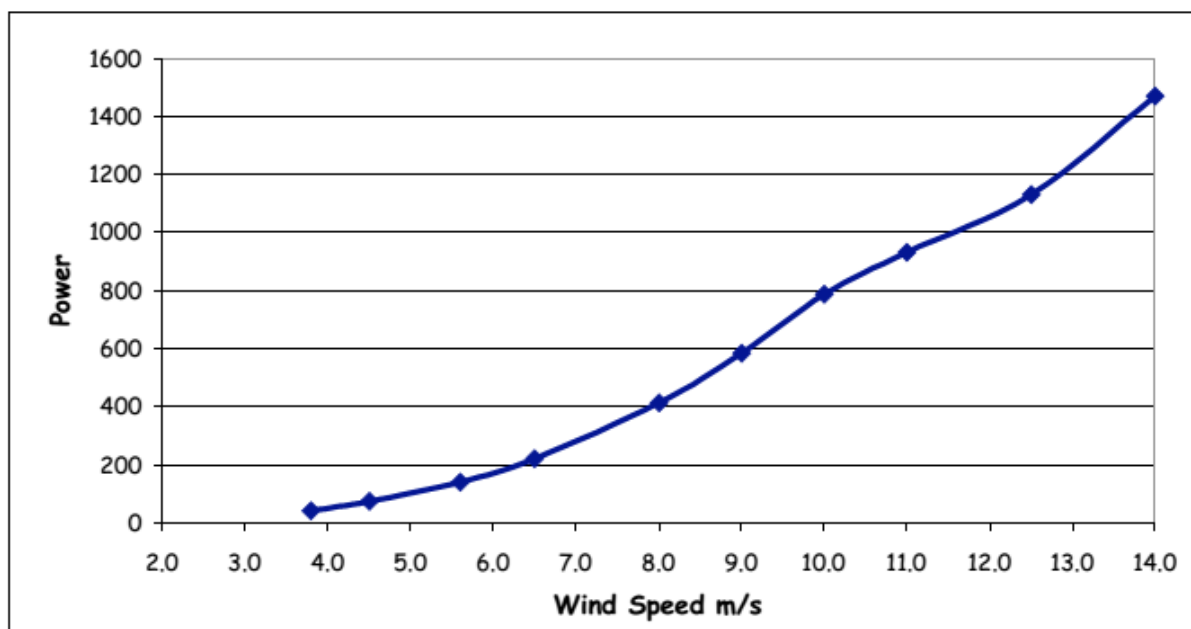
#### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 6.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές ανεμογεννήτριας FuturEnergy AirForce 1 με ονομαστική ισχύ 1kW.

Ονομαστική ισχύς	1.000 W (έκδοση 48 V)
Ταχύτητα έναρξης περιστροφής	2,5 m/s
Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut-in)	3,2 m/s
Ταχύτητα απόδοσης ονομαστικής ισχύος	12,5 m/s
Ταχύτητα επιβίωσης	50 m/s
Διάμετρος ρότορα	1,8 m
Πλήθος πτερυγίων	5 (25° κλίση ανά πτερύγιο)
Είδος γεννήτριας	3φασική μονίμων μαγνητών με ενσωματωμένο ανορθωτή
Βάρος 22 kg	Υαλονήματα (Fiberglass) Βαφή για προστασία σε διάβρωση και UV
Διατομή ιστού ανάρτησης	Φ50 mm
Εκπομπή θορύβου στα 5 m/s	35 dB(a) στα 5 m πίσω από το ρότορα
Εκπομπή θορύβου στα 7 m/s	54 dB(a) στα 5 m πίσω από το ρότορα

**Πίνακας 6.8:** Απόδοση της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την ταχύτητα του άνεμου  
FuturEnergy AirForce 1 με ονομαστική ισχύ 1kW.

Άνεμος (m/s)	Άνεμος (mph)	ΣΑΛ γεννήτριας	Ρεύμα εξόδου (A)	Τάση μπαταρίας (V)	Ισχύς (W)
3,8	8,6	380	0,8	52,0	42
4,5	10,1	400	1,4	53,0	74
5,6	12,6	420	2,6	54,0	140
6,5	14,6	465	4,0	55,0	220
8,0	18,0	480	7,4	56,0	414
9,0	20,3	490	10,4	56,2	584
10,0	22,5	510	14,0	56,3	788
11,0	24,8	520	16,5	56,4	932
12,5	28,1	540	20,0	56,6	1132
14,0	31,5	310	26,0	56,6	1472



**Σχήμα 6.8:** Γραφική παράσταση Παραγόμενης Ισχύς - Ταχύτητα ανέμου της  
ανεμογεννήτριας FuturEnergy AirForce 1 με ονομαστική ισχύ 1kW.

Στην Τανζανία ο άνεμος κινείται με μέσο ετήσιο όρο με 5,3 m/s. Με 24ωρη χρήση η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια μπορεί να παράξει έως και 127 kWh/μήνα. Η χρήση της όμως θα είναι δευτερεύουσας πηγής ενέργειας όταν η συνολική ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι αρκετή για την πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών.

Θα πρέπει να υπάρχει ένας χειροκίνητος διακόπτης ενεργοποίησης (stop switch) και ένας DC απομονωτής.



**Σχήμα 6.9:** Αριστερά: Χειροκίνητος διακόπτης ενεργοποίησης (stop switch).  
Δεξιά: DC απομονωτής.

Αυτοί οι διακόπτες επιτρέπουν στο χρήστη να απομονώσει τη DC τροφοδοσία από φορτίο, να εφαρμόσει ένα ηλεκτρικό "φρένο" στην τουρμπίνα και να απομονώσουν την πλευρά AC του μετατροπέα (εάν είναι συνδεδεμένος). Ο διακόπτης θα πρέπει να τοποθετηθεί κοντά στην κύρια μονάδα του καταναλωτή, μεταξύ ενός 16A ρελέ και του μετατροπέα.

Ο απομονωτής DC και το φρένο πρέπει να συνδέονται με την έξοδο της ανεμογεννήτριας, μεταξύ αυτής και του φορτίου (inverter, μπαταρίες κλπ). Ο κύριος περιστροφικός διακόπτης είναι στα 63A και είναι 4πολικός. Σε αυτή τη λειτουργία, η εσωτερικές συνδέσεις έχουν καλωδιωθεί σε ζεύγη των 2 πόλων, δίνοντας μια τεράστια ικανότητα μεταγωγής 120A. Επίσης, τοποθετημένη μέσα αυτούς τους διακόπτες υπάρχει μια αντίσταση χαμηλής τιμής που εξυπηρετεί ως "φορτίο dump", επιτρέποντας στην γεννήτρια να επιβραδύνει σε ένα ασφαλές επίπεδο πριν από την εφαρμογή μιας άμεσης "βραχυκύκλωσης" στα καλώδια εξόδου της γεννήτριας. [50],[53],[54],[55],[56],[57],[58]

Στη συνέχεια χρειάζεται ένας ρυθμιστής φόρτισης της ίδιας εταιρίας τύπου Xantrex C40.



**Σχήμα 6.10:** Αριστερά: Ρυθμιστής φόρτισης Xantrex C40. Δεξιά: "φορτίο dump"  
(dump load).

Ο ρυθμιστής φόρτισης είναι αντίστοιχος όπως και στο φωτοβολταϊκό σύστημα, αλλά αντίστοιχος για ανεμογεννήτρια. Χρησιμοποιείται σε συστήματα που έχουν μπαταρίες, αυτός ο ρυθμιστής προσφέρει προστασία έναντι υπερφόρτισης, όταν χρησιμοποιείται με τις ανεμογεννήτριες. Ο C40 μπορεί να χειριστεί ρεύματα φόρτισης έως 40A, και είναι κατάλληλος για χρήση σε εφαρμογές που για την φόρτιση των μπαταριών χρειαζόμαστε 48V.

Ο ρυθμιστής φόρτισης της ανεμογεννήτριας έχει 40A μέγιστο ρεύμα φόρτισης οπότε ισχύει ότι ισχύει για τον ρυθμιστή του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η έξοδος του είναι 48V όπως και της ανεμογεννήτριας, οπότε είναι κατάλληλα για την φόρτιση των συσσωρευτών.

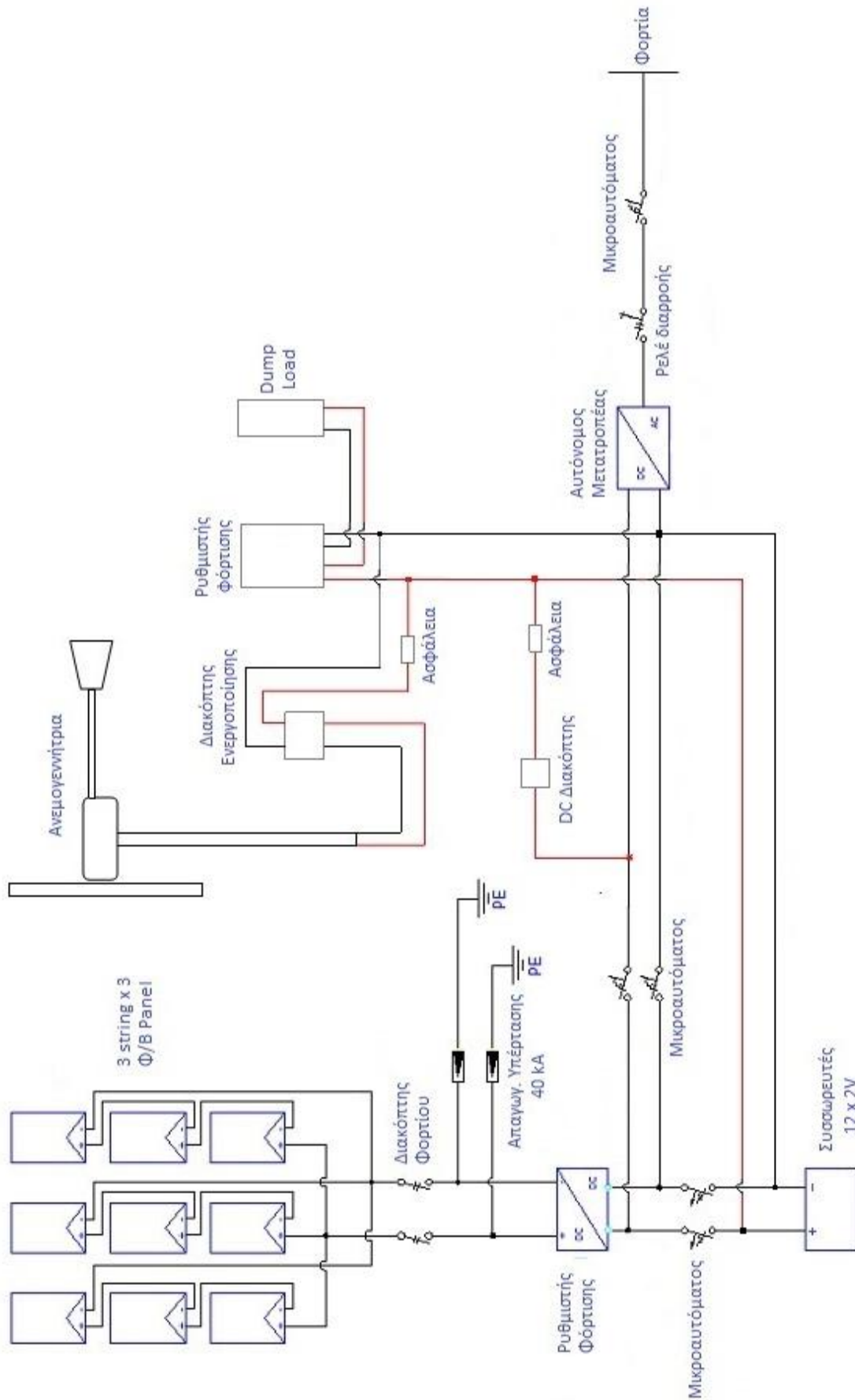
Τέλος με την χρήση του ρυθμιστή φόρτισης Xantrex C4, χρειάζεται και ένα "φορτίο dump".

Τα "φορτία dump" είναι πολύ αποτελεσματικά στοιχεία θέρμανσης αέρα ή νερού. Οι ρυθμιστές φόρτισης C40 χρησιμοποιούνται σε κατάσταση "Load Diversion", δηλαδή εκτρέπουν την περισσευούμενη ισχύ στα "φορτία dump", όταν η συστοιχία των μπαταριών γίνεται πλήρως φορτισμένη. Είναι ζωτικής σημασίας η χρησιμοποίηση ρυθμιστή φόρτισης με "φορτία dump" για να μην προκληθεί ζημιά στις μπαταρίες, ειδικά όταν το σύστημά παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Απαιτούνται δύο "φορτία dump" σε σειρά για 48V συστήματα, για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. [50],[53],[54],[55],[56],[57],[58]

#### **6.2.2.6 Μονογραμμικό Σχέδιο**

Το μονογραμμικό σχέδιο του υβριδικού πακέτου αγροτικής περιοχής για 12 σπίτια στην Τανζανία φαίνεται στο σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11: Μονογραμμικό σχέδιο του υβριδικού πακέτου αγροτικής περιοχής.

### 6.3 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος Αστικής Περιοχής

Στις αστικές περιοχές τις Τανζανίας, η κατανάλωση ρεύματος είναι 357kWh το χρόνο κατ' άτομο. Σε κάθε σπίτι κατοικούν κατά μέσο όρο 4,8≈5 άνθρωποι, οπότε η κατανάλωση θα είναι  $357 * 2,5 = 892,5kWh$  το χρόνο,  $74,38kWh$  μηνιαίως και  $2,45 kWh$  ημερησίως.

#### 6.3.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το PVGIS για την Τανζανία είναι τα εξής είναι τα ίδια που ήταν και για την αγροτική περιοχή και φαίνονται στους πίνακες 6.1 και 6.2.

#### 6.3.2 Υπολογισμός Υβριδικού Συστήματος

##### 6.3.2.1 Επιλογή Φωτοβολταϊκών πλαισίων

Επιλέχθηκε η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων ίδια που ήταν και για την αγροτική περιοχή και φαίνονται στο σχήμα 6.2 και πίνακα 6.3. Με τα δεδομένα αυτών θα υπολογίσουμε την ισχύ αιχμής, των αριθμό των πάνελ και τις υπόλοιπες τιμές που θα χρειαστούμε.

Η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την Τανζανία σε αυτή την κλίση είναι:

$$H_d = 5,74 kWh/m^2/ημέρα \text{ (Ιανουάριος)}$$

Η ισχύς αιχμής  $P_p$  υβριδικού συστήματος για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μίας ημέρας αυτονομίας είναι:

$$P_p = \frac{E_k * P_{STC} * N}{H_d * \sigma_{ΑΣ} * \sigma_{\mu} * (N - n)}$$

όπου,

$P_{STC} = 1 kW/m^2$ , ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 2,45 kWh$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης.

$H_d = 5,74 kWh/m^2/ημέρα$ , ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{ΑΣ} = 0,8 * \sigma_{\theta} = 0,7$ , συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα.

Συντελεστής θερμοκρασίας:  $\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,45\% = 0,88$

$t_a = 22,5^{\circ}C$ , μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα τον Ιανουάριο.



0,45% θερμοκρασιακός συντελεστής φωτοβολταϊκού πάνελ.

$\sigma_{\mu} = 0,9$ , συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει καλώδια, ελεγκτή φόρτισης και inverter.

$N = 31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς).

$n = 1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας).

Οι παραπάνω τιμές φαίνονται στους πίνακες 6.1, 6.2, 6.3.

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει ότι:

$$P_p = 0,78 \text{ kWp}$$

Άρα, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή  $0,78 \text{ kWp}$  για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του σπιτιού. Η παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια θα συνυπολογιστεί στην ολική ημερήσια παραγωγή ενέργειας παρόλο θα είναι η δευτερεύουσα πηγή, αλλά στη συνέχεια θα αποδειχτεί ότι θα χρειαστεί η χρήση της κάποιες ώρες την ημέρας.

Ο αριθμός πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P_p}{P_{\text{πλαίσιο}}} = 3,05 \approx 3 \text{ πλαίσια}$$

όπου,  $P_{\text{πλαίσιο}} = 255 \text{ Wp}$ .

Η μικρή διαφορά που υπάρχει είναι 0,05 του πάνελ. Οπότε

$$\frac{2450 \text{ Wh}}{3,05 \text{ πάνελ}} * 0,05 = 40 \text{ Wh}$$

Άρα από την φωτοβολταϊκή παραγωγή παράγονται  $40 \text{ Wh}$  λιγότερες την ημέρα από ότι πρέπει. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει  $127 \text{ kWh/μήνα} = 4,3 \text{ kWh/ημέρα}$ , άρα είναι το 0,93% της ημερήσιας παραγωγής την ανεμογεννήτριας, οπότε αν λειτουργεί για  $804 \text{ sec} = 13 \text{ min } 24 \text{ sec}$  καλύπτεται η μικρή έλλειψη ενέργειας των φωτοβολταϊκών χωρίς κανένα παραπάνω κόστος, απλά η ανεμογεννήτρια χρειάζεται για περίπου 13,5 λεπτά να δουλεύει σαν κύρια πηγή και μετά τον χρόνο αυτό συνεχίζει να είναι δευτερεύουσα.

Για να υπολογιστεί την συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων έπρεπε να οριστεί η μέγιστη τάση  $V_{m\Sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ισχύει:

$$V_m > 1,2 * V_B \Rightarrow V_m > 57,6 \text{ V}$$

όπου,  $V_B = 48 \text{ V}$  η ονομαστική τάση των συσσωρευτών.

Για να ισχύσει ο περιορισμός της τάσης, επιλέχθηκε η δημιουργία 1 κλάδου, ο οποίος θα έχει 3 πλαίσια συνδεδεμένα εν σειρά. Με τη χρήση 3 πλαισίων 255 Wp το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά 0,765 kWp.

### 6.3.2.2 Επιλογή Συσσωρευτών

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η χωρητικότητα C των συσσωρευτών. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$C = \frac{n * E_k}{\sigma_\gamma * \sigma_{εκ} * \beta_{εκ} * V_\beta}$$

όπου,

$E_k = 2,45 kWh$  , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης.

$\sigma_\gamma = 0,98$  , συντελεστής γήρανσης, αυτοεκφόρτισης.

$\sigma_{εκ} = 0,95$  , συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης.

$\beta_{εκ} = 0,8$  , βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1 ημέρα αυτονομίας.

$V_\beta = 48V$  , η ονομαστική τάση των συσσωρευτών

$n = 1$  , ημέρες αυτονομίας.

Οι παραπάνω τιμές φαίνονται στους πίνακες 6.4

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει ότι:

$$C = 76,64 Ah$$

Χρησιμοποιήθηκαν συσσωρευτές της Ελληνικής εταιρίας System Sunlight SA τύπου 12V 2 OPzV100 χωρητικότητας 102Ah σε C10. Τα στοιχεία της φαίνονται παρακάτω.



**Σχήμα 6.12:** Συσσωρευτές System Sunlight SA 12V 2 OPzV100 χωρητικότητας 102Ah σε C10.

Θα χρειαστούμε 4 συσσωρευτές 12V 2 OPzV100 σε σειρά, για να επιτύχουμε τα  $12V * 4 = 48V$  ονομαστικής τάσης συσσωρευτών. Η χωρητικότητα τους στα C10(Ah) στα 1,8 Vpc (δηλαδή για 10 ώρες φόρτιση) είναι 102 Ah. Η χωρητικότητα τους είναι αρκετή και δεν χρειάζεται να συνδέσουμε κάποιο κλάδο παράλληλα, γιατί  $76,64 \text{ Ah}$  (ζητούμενη χωρητικότητα)  $< 102\text{Ah}$  (διαθέσιμη χωρητικότητα).[24]

Όμως η χωρητικότητα του συσσωρευτή επηρεάζεται από την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4.

Οπότε η τελική χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι  $102 * 101,5 = 103,5\text{Ah}$ . Η διαφορά αυτή της περισσότερης χωρητικότητας, είναι κάτι που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του υβριδικού συστήματος και για την πλήρη φόρτιση των μπαταριών θα συμβάλει και η ανεμογεννήτρια κάποιες ώρες της ημέρας, αν χρειαστεί.

Τα στοιχεία των συσσωρευτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στον πίνακα 6.4.

**Πίνακας 6.9:** Τεχνικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές συσσωρευτή System Sunlight SA 12V 2 OPzV100 χωρητικότητας 102Ah σε C10.

Type	Positive Plates Number		Number of Poles	Nom. capacity (Ah at 20°C)				Length (mm)	Width (mm)	Height <sub>1</sub> (mm)	Height <sub>2</sub> (mm)	Pole Dist. (mm)	Weight (approx kg)	Nom. Voltage	Short Circuit Current (A)	Internal Resistance (mOhm)
	C10 (Ah) 1.80 Vpc	C5 (Ah) 1.75 Vpc		C3 (Ah) 1.75 Vpc	C1 (Ah) 1.75 Vpc											
6V 4 OPzV 200 <sup>2</sup>	4	50	2	206	190	169	117	272	205	332	371	-	48	6	2260	2.70
6V 5 OPzV 250 <sup>2</sup>	5	50	2	257	237	211	146	380	205	332	371	-	63	6	2740	2.22
6V 6 OPzV 300 <sup>2</sup>	6	50	2	309	285	253	173	380	205	332	371	-	70	6	3220	1.89
12V 1 OPzV 50 <sup>2</sup>	1	50	2	51	47	42	30	272	205	332	371	-	43	12	620	19.80
12V 2 OPzV 100 <sup>2</sup>	2	50	2	102	94	84	59	272	205	332	371	-	52	12	1240	9.90
12V 3 OPzV 150 <sup>2</sup>	3	50	2	153	141	126	88	380	205	332	371	-	72	12	1720	7.08

### 6.3.2.3 Επιλογή Ρυθμιστή φόρτισης

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή φόρτισης. Η τάση του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή τα 48V.

Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ρυθμιστής φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε και για την αγροτική περιοχή και τα στοιχεία του φαίνονται στο σχήμα 6.5 και στον πίνακα 6.5.

Επειδή για τα Φωτοβολταϊκά πάνελ η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι  $V_{OC} = 37,7V$  στους 25°C, για να μην ξεπεραστεί η μέγιστη DC τάση του ρυθμιστή που είναι 140V, συνδέθηκαν τα 3 πάνελ σε μία σειρά τριών πάνελ.

$$V_{OC,string} = 3 * 37,7 = 113,1 \leq 140V$$

Οπότε έχουμε 1 string από πάνελ, με 3 πάνελ ανά string. Έπειτα ελέγχθηκε αν ταιριάζουν όλα τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης.

$$I_{TOT} = I_{sc,string} = 3 * 8,87 = 26,61A \leq 40A$$

Επίσης, η μέγιστη συνολική ισχύς που δέχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι

$$P_{TOT,PV} = 3 * 225 = 675W \leq 2400W$$

$$I_{BATTERY} = \frac{675W}{48V} = 14,06A \leq 50A$$

Άρα το μέγιστο ρεύμα που θα φορτίζει τους συσσωρευτές είναι αρκετό και μπορεί να αποδοθεί από τον φορτιστή στις μπαταρίες.

#### 6.3.2.4 Επιλογή Αυτόνομου Μετατροπέα

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του κατάλληλου αυτόνομου μετατροπέα τάσης DC/AC.

Η επιλογή του αυτόνομου μετατροπέα, έγινε με ορισμένα σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Από την είσοδο DC (συσσωρευτή) εξετάστηκε η ονομαστική τάση συσσωρευτή 48V, το μέγιστο ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή (όταν λειτουργούν σαν φορτιστές) καθώς και το εύρος τιμών της τάσης. Από την είσοδο AC (γεννήτρια) δόθηκε προσοχή στην τάση και συχνότητα εισόδου (230V, 50Hz) και στο εύρος τιμών τους. Τέλος, από την έξοδο AC (καταναλωτής) εξετάστηκε η ονομαστική τάση και συχνότητα AC (230V, 50Hz), το εύρος τιμών τους, η συνεχής ισχύς AC (είναι η ισχύς με την οποία μπορούν να καλύψουν ένα φορτίο συνεχώς) και η ισχύς υπερφόρτισης (είναι η ισχύς που μπορούν να δώσουν για μικρά χρονικά διαστήματα και απαιτείται για την εκκίνηση των ηλεκτρικών συσκευών)

Χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ρυθμιστής φόρτισης με ονομαστική τάση συσσωρευτή 48V, που χρησιμοποιήθηκε και για την αγροτική περιοχή και τα στοιχεία του φαίνονται στο σχήμα 6.6 και στον πίνακα 6.6.

Η ημερήσια κατανάλωση είναι 0,78kWh, έχει υπολογιστεί η κατανομή ενέργειας για 7 ώρες χρήσης, αλλά ελέγχθηκε στην ακραία περίπτωση της 1 ώρας χρήσης (ελάχιστο), τότε:

$$P_{MAX,ΦΟΡΤΙΟΥ} = 780W \leq 5000W$$

Ο συσσωρευτής πρέπει να αντέχει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης, τα κελία των συσσωρευτών φορτίζουν σε 10 ώρες.

$$I_{BATTERY} = \frac{103,5Ah}{10h} = 10,35A \leq 120A$$

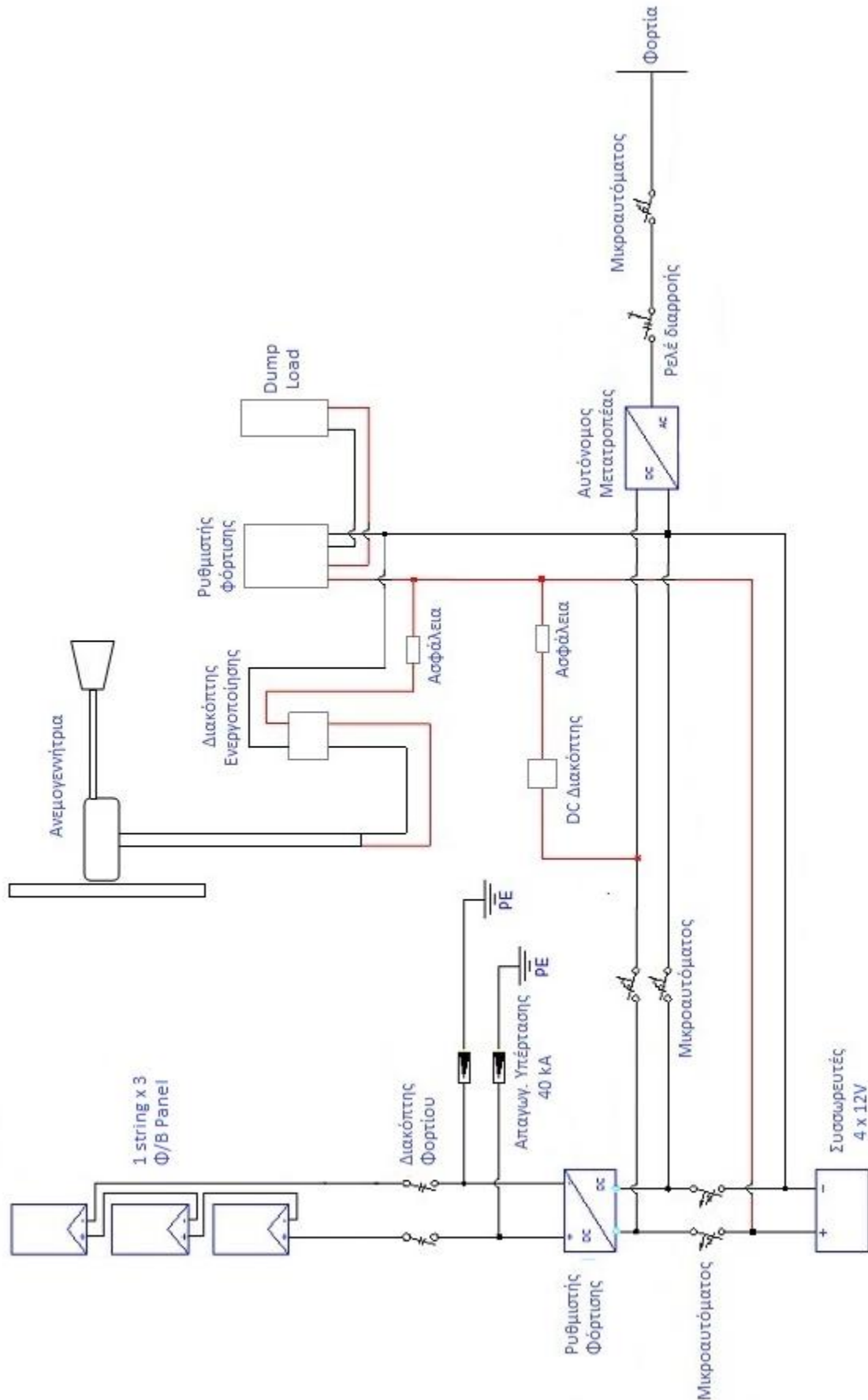
### 6.3.2.5 Επιλογή Ανεμογεννήτριας

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης ανεμογεννήτριας, διακόπτη ενεργοποίησης (stop switch), DC απομονωτή, ρυθμιστή φόρτισης και "φορτίου dump".

Χρησιμοποιήθηκε η ίδια ανεμογεννήτρια, διακόπτης ενεργοποίησης (stop switch), DC απομονωτής, ρυθμιστής φόρτισης και "φορτίο dump", που χρησιμοποιήθηκε και για την αγροτική περιοχή και τα στοιχεία τους φαίνονται αντίστοιχα στα σχήματα 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 και στους πίνακες 6.7 και 6.8.

### 6.3.2.6 Μονογραμμικό Σχέδιο

Το μονογραμμικό σχέδιο του υβριδικού πακέτου αστικής περιοχής για 1 σπίτι στην Τανζανία φαίνεται στο σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13: Μονογραμμικό σχέδιο του υβριδικού πακέτου αστικής περιοχής.

---

## *Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα-Προοπτικές*

---





## 7.1 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται ως ακολούθως:

- Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αειφόρος παραγωγή ενέργειας σε όλη την Υποσαχάρια Αφρική με εκμετάλλευση του πλούσιου ηλιακού και αιολικού της δυναμικού.
- Το υψηλό δυναμικό της Υποσαχάριας Αφρικής σε ΑΠΕ είναι σημαντικός παράγοντας για την ενεργειακή της αυτοτέλεια: Οι ΑΠΕ αποτελούν μια εναλλακτική λύση, η οποία είναι επωφελής για το περιβάλλον και την ίδια την κοινότητα, αλλά και διασφαλίζει την τοπική ενεργειακή προμήθεια. Έτσι, οι ΑΠΕ αποτελούν πολύ σημαντική παράμετρο για την ενεργειακή βιωσιμότητα σε μια κοινότητα. Η ύπαρξη βιώσιμων ενεργειακά ιδεών καθιστά εφικτή την σταδιακή απεξάρτηση των κοινοτήτων από τα συμβατικά καύσιμα
- Τα αναμενόμενα οφέλη από την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος αφορούν τόσο την οικονομία όσο και το ανθρώπινο κεφάλαιο. Πέρα από τα σταθερά έσοδα από την παραγωγή του ρεύματος, θα δοθεί αξία σε περιοχές που ήταν μηδενικής χρησιμότητας, θα δημιουργηθούν πολλές θέσεις εργασίας για τον τοπικό πληθυσμό και κυρίως, μέσω της αναγκαίας κατάρτισης και εξειδίκευσης προσωπικού και της ευαισθητοποίησης των κυβερνήσεων, θα δοθεί ώθηση για τις ΑΠΕ σε μεγάλη κλίμακα στην ευρύτερη περιοχή.
- Ο τομέας της παραγωγής ισχύος από εναλλακτικές μορφές ενέργειας, και ειδικότερα η παραγωγή ισχύος με εκμετάλλευση του ηλιακού και αιολικού δυναμικού, παρουσιάζει μεγάλες προοπτικές στην Υποσαχάρια Αφρική, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης δυναμικού και του κλίματος της περιοχής.
- Η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, αποτελεί οικονομικά και τεχνολογικά εφικτή λύση για την Υποσαχάρια Αφρική με μακροπρόθεσμα οφέλη, ανεξαρτητοποίησης της οικονομίας και ανάπτυξής της.
- Η ενεργειακή αποθήκευση είναι σημαντική για τα ηλεκτρικά συστήματα, δεδομένου ότι επιτρέπει την αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος και βελτιώνει γενικότερα την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του δικτύου. Παράλληλα, διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως στην περίπτωση της Υποσαχάριας Αφρικής, όπου η ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (π.χ. αιολική ενέργεια), η ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης είναι απαραίτητη.
- Όσον αφορά στο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η επιλογή συμμετοχής σε αυτό κάθε τεχνολογίας παροχής ισχύος αποτελεί συνισταμένη αρκετών παραγόντων που απαιτούν προσοχή κατά τον σχεδιασμό. Σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας δύο είναι τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν την

επιτυχία του σχεδιασμού του: το χαμηλό κόστος υλοποίησης και η τεχνική του αξιοπιστία. Από τη μια, μια ενεργειακή επένδυση για να είναι οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει να μπορεί το κόστος αγοράς, εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού να είναι τέτοιο ώστε μέχρι το τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής της επένδυσης, τα κέρδη από αυτήν να έχουν φτάσει σε επίπεδα που ικανοποιούν τον επενδυτή. Εάν ο επενδυτής είναι το ίδιο το κράτος, πρέπει τουλάχιστον το προτεινόμενο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής να είναι οικονομικά πιο συμφέρον έναντι του συμβατικού τρόπου παροχής ισχύος, ή εναλλακτικά, εάν ο επενδυτής είναι ιδιώτης, η πολιτεία θα πρέπει να δίνει κίνητρα για βιώσιμη υλοποίηση της επένδυσης. Από την άλλη, η τεχνική αξιοπιστία της ενεργειακής επένδυσης σχετίζεται με παράγοντες όπως η σωστή συνέργεια μεταξύ των τεχνολογιών ενεργειακής παραγωγής ή/κα αποθήκευσης ενέργειας, η πιθανότητα μη παροχής ισχύος, η μη ικανοποίηση του φορτίου, το ποσοστό ενέργειας που παράγεται αλλά ξεπερνά τις ανάγκες των καταναλώσεων.

- Από την παραπάνω εργασία μπορεί κάποιος πολύ εύκολα να καταλάβει πως η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μονόδρομος, είτε γιατί εξαντλούνται αποθέματα συμβατικών μορφών ενέργειας, είτε γιατί τα τελικά κόστη στη ρύπανση του περιβάλλοντος είναι αναπόφευκτα και μη αναστρέψιμα.

## 7.2 Προοπτικές

Σε αυτή την διπλωματική εργασία, επικεντρώθηκε η έννοια της ενεργειακής βιωσιμότητας στις χώρες της Υποσαχάριας Αφρικής με την χρήση έργων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας. Η κινητοποίηση των τοπικών κοινοτήτων και, κυρίως, των κατοίκων της εκάστοτε κοινότητας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή ενός σχεδίου ενεργειακής βιωσιμότητας. Ο στόχος είναι, όσο είναι δυνατόν, να απεξαρτοποιηθούν σταδιακά οι κοινότητες από τα συμβατικά καύσιμα και να ικανοποιούν τις ανάγκες τους αξιοποιώντας σε μεγάλο βαθμό τις διαθέσιμες ΑΠΕ.

Η χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης για την επιλογή συγκεκριμένων χωρών υποδοχής μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη εφαρμογή. Η μελέτη των κοινωνικών, πολιτικών και οικονομικών χαρακτηριστικών μιας χώρας που θέλει να εισάγει στην περιβαλλοντική της πολιτική νέα εργαλεία θα ήταν το πρώτο βήμα για μία τέτοια προσπάθεια. Εν συνεχεία, με βάση αυτή, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης για ένα πλήθος εργαλείων προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο πακέτο εργαλείων περιβαλλοντικής πολιτικής για τις ανάγκες της χώρας αυτής.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο υλοποίησης του υβριδικού συστήματος ενέργειας φαίνεται ότι το συγκεκριμένο πακέτο μπορεί να υλοποιηθεί τόσο σε μία συστοιχία κατοικιών σε αγροτική περιοχή όσο και σε μία μόνο κατοικία σε αστική περιοχή. Από αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι το πακέτο μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες περιοχές ή χώρες οι οποίες μπορούν να επωφεληθούν από την χρήση των ΑΠΕ που υπάρχουν στην εκάστοτε περιοχή.

Τέλος, το βιοτικό επίπεδο των λαών της Αφρικής είναι πολύ χαμηλό. Στην Υποσαχάρια Αφρική, το 80% των ανθρώπων δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρισμό. Για μαγείρεμα και θέρμανση στηρίζονται σχεδόν αποκλειστικά στην καύση βιομάζας, ξύλου, κάρβουνου και κοπριάς. Οι φτωχοί δαπανούν μέχρι και το ένα τρίτο του εισοδήματός τους για ενέργεια, κυρίως για να μαγειρέψουν φαγητό. Η εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας, ακόμη και σε μικρή κλίμακα, μπορεί να βελτιώσει το βιοτικό επίπεδων των κατοίκων και σταδιακά να συμβάλει στην ευρύτερη οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη των περιοχών.



## Βιβλιογραφία

- [1] "ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ" Δέρβος Θ. Κωνσταντίνος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [2] "Photovoltaic Systems", Klaus Preiser.
- [3] "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [4] "Planning and Installing Photovoltaic Systems- A guide for installers, architects and engineers", second edition, Earthscan.
- [5] "Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία", Κ. Καγκαράκη, εκδόσεις Συμμετρία, 1992.
- [6] "Renewable and Efficient Electric Power Systems", Gilbert M. Masters.
- [7] "Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά", Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών.
- [8] "Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις", Σ. Περδίου, Τεχνική εκδοτική, 2011.
- [9] "Photovoltaics in Buildings", Frierich Sick and Thomas Erge, James & James Ltd, London, 1996.
- [10] "Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ", Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007.
- [11] Σ. Παπαθανασίου, "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας", Σημειώσεις Παραδόσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.
- [12] Γεώργιος Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", Εκδόσεις Συμεών, 2005
- [13] Eric Hau, Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer, 2006
- [14] Μάλτας Ε., 2007,. "Σχεδιασμός και Έλεγχος Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Ηλεκτροπαραγωγής Τύπου Φ/Β, Α/Γ και Θ/Η για την Οικονομικότερη Λειτουργία του". Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή Δ.Π.Θ., Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ξάνθη.
- [15] Βρεττός Ε., 2010. "Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου". Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ, Ιανουάριος, Αθήνα
- [16] Αρκούδης Γ., 2007. "Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ελλάδα." Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Οκτώβριος, Αθήνα.

- [17] HAISHENG CHEN et al, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", Progress in Natural Science, Vol. 19 (2009): 291 -312.
- [18] J.K. KALDELLIS, D. ZAFIRAKIS, K.KAVADIAS, "Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13 (2009): 378-392.
- [19] ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΑΠΑΣΤΑΜΟΥΛΟΣ, "Στρατηγικές διαχείρισης υβριδικού σταθμού με ανεμογεννήτριες και συσσωρευτές σε μη διασυνδεδεμένα νησιά", Ε.Μ.Π. (2008), επιβλέπων Επίκουρος Καθ. Σ. Παπαθανασίου.
- [20] D. BERNDT, "Valve-regulated lead-acid batteries", Journal of Power Sources, Vol. 100 (2001): 29-46.
- [21] ΚΑΠΕ (2001), "Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ".
- [22] K.C. DIVYA, JACOB OSTERGAARD, "Battery energy storage technology for power systems – An overview, Electric Power Systems Research", Vol. 79 (2009):511 -520.
- [23] MARCO SEMADENI, Storage of energy, Overview, Encyclopedia of Energy, Vol.5 (2004):719-738.
- [24] Systems Sunlight SA
- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel\\_cadmium\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_cadmium_battery)
- [27] <http://www.gpina.com/pdf/NiCd.pdf> (Nickel Cadmium Technical book)
- [28] S. DROUILHET, M. SHIRAZI, Wales, Alaska high-penetration wind-diesel hybrid power system – Theory of operation, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (2002)
- [29] JOHN J.C. KOPERA, "Inside the nickel metal hydride battery", Cobasys, 25 June 2004.
- [30] I. HADJIPASCHALIS, A. POULIKKAS, V. EFTHIMIOU, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews", Vol. 13 (2009): 1513-1522.
- [31] ZHAOYIN WEN et al, Research on sodium sulfur battery for energy storage, Solid State Ionics, Vol. 179 (2008): 1697-1701.
- [32] Cook, E (1996) "Man, Energy and Society, San Francisco": W.H. Freeman.
- [33] The Africa Society (March 2008). "Addressing Environmental Problems in Africa"
- [34] [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[35] "Resources For." Fact Sheet: The World Bank and Energy in Africa. The World Bank, 2011. Web. 20 Sept. 2012.

[36] Foster, Vivien, and Cicelia Briceno-Garmendia, eds. Africa's Infrastructure: A Time for Transformation. Rep. Washington DC: Agence Française De Développement, 2010.

[37] <http://www.notsmali.com/Solar-lights/fifth/>

[38] <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>

[39] [http://www.photius.com/rankings/energy/electricity\\_consumption\\_per\\_capita\\_2013\\_0.html](http://www.photius.com/rankings/energy/electricity_consumption_per_capita_2013_0.html)

[40] [http://www.nationmaster.com/graph/ene\\_ele\\_con\\_percap-energy-electricity-consumption-per-capita](http://www.nationmaster.com/graph/ene_ele_con_percap-energy-electricity-consumption-per-capita)

[41] <http://chartsbin.com/view/2625>

[42] <http://www.eia.gov/countries/country-data.cfm?fips=SU&trk=m>

[43] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_countries\\_by\\_real\\_GDP\\_growth\\_rate](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_real_GDP_growth_rate)

[44] <http://www.indexmundi.com/facts/indicators/IE.PPI.ENG.Y.CD/map/africa>

[45] <http://www.climatemps.com/>

[46] <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/africa/wind-africa/index.shtml>

[47] <http://www.tradingeconomics.com/south-africa/inflation-cpi>

[48] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=en>

[49] [http://www.canadiansolar.com/down/en/CS6P-M\\_en.pdf](http://www.canadiansolar.com/down/en/CS6P-M_en.pdf)

[50] <http://www.wholesalesolar.com/hybridsystems.html>

[51] <http://www.sma-hellas.com/el/proionta/metatrapeis-aytonomon-diktyon/sunny-island-charger-50.html>

[52] <http://www.sma-hellas.com/el/proionta/metatrapeis-aytonomon-diktyon/sunny-island-4548-us-6048-us.html>

[53] <http://www.aveco.gr/a/wind/futureenergy/specs>

[54] [http://www.aveco.gr/docs/FE1048U\\_408.pdf](http://www.aveco.gr/docs/FE1048U_408.pdf)

[55] <http://www.aveco.gr/docs/1kwbrochure.pdf>

[56] <http://www.futureenergy.co.uk/turbine.html>

[57] [http://www.futureenergy.co.uk/pdf\\_doc/FE48vSystemwithC40chargerandresistor.pdf](http://www.futureenergy.co.uk/pdf_doc/FE48vSystemwithC40chargerandresistor.pdf)

[58] <http://www.futureenergy.co.uk/1kwtower.html>

[59] "Stand – Alone Photovoltaic Systems handbook of recommended design practices", Sandia National Laboratories, 1995.

[60] "Stand Alone PV System Design".

[61] "Batteries and charge control in stand – alone photovoltaic systems", James P. Dunlop, Florida energy center, 1997.

[62] "Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Αγροκίας" , διπλωματική εργασία της Φ. Μπουγιούκου, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

[63] "Μοντέλα αποφάσεων", Γιάννης Σίσκος, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2008

[64] "Καταγραφή Καλών Πρακτικών για την Αειφόρο Ενέργεια σε Τοπικό και Περιφερειακό επίπεδο", Διπλωματική εργασία Σταυρίδου Αποστολία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2012.

[65] "Πολυκριτηριακά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων", Χάρης Δούκας, Παναγιώτης Ξυδώνας & Γιάννης Ψαρράς, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο 2013-14

[66] Ψαρράς, Ι. (1989). "Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός. Εφαρμογές σε Ενεργειακά Συστήματα". Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων, ΕΜΠ

[67] "Multicriteria Analysis, Applications to Water and Environment Management", Mahdi Zarghami, Ferenc Szidarovszky