# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

# ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Για την απόκτηση διδακτορικού διπλώματος*
*του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών*


**ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΑΓΚΙΝΗΣ**


*Μεθοδολογικό πλαίσιο αξιοπιστίας και αποδοτικότητας θαλασσίων κατασκευών για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*

*Συμβουλευτική Επιτροπή:*
***Νικητάκος Νικήτας***
*Καθηγητής*
*Τμήμα Ναυτιλίας και*
*Επιχειρηματικών Υπηρεσιών*
*Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Πλατής Αγάπιος***
*Καθηγητής*
*Τμήμα Μηχανικών*
*Οικονομίας και Διοίκησης*
*του Πανεπιστημίου Αιγαίου*

***Δούνιας Γεώργιος***
*Καθηγητής*
*Τμήμα Μηχανικών*
*Οικονομίας και Διοίκησης*
*του Πανεπιστημίου Αιγαίου*

*Επταμελής Επιτροπή:*

***Νικήτας Νικητάκος***
***Καθηγητής***
*Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών*
*Υπηρεσιών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου*
*(επιβλέπων)*

***Αγάπιος Πλατής***
***Καθηγητής***
*Τμημα Μηχανικων Οικονομιας και Διοικησης,*
*Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Γεώργιος Δούνιας***
*Καθηγητής,*
*Τμημα Μηχανικων Οικονομιας και Διοικησης,*
*Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Ιωάννης Καρκαζής***
***Καθηγητής***
*Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών*
*Υπηρεσιών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Θεόδωρος Λίλας***
***Επίκουρος Καθηγητής***
*Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών*
*Υπηρεσιών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Αννα – Μαρία Κοτρικλα***
***Επίκουρη Καθηγήτρια***
*Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών*
*Υπηρεσιών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου*

***Νικόλαος Ζάχαρης***
***Καθηγητής***
*Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και*
*Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής*

*ΧΙΟΣ, Οκτώβρης 2018*

*Στη σύντροφο μου Λιάνα*

*και στα παιδιά μου Κορίνα και Παναγιώτη*

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΔΟΙΗΚΗΣΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

*Μεθοδολογικό πλαίσιο αξιοπιστίας και αποδοτικότητας θαλασσίων κατασκευών για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*

***Ιωάννης Δάγκινης***

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου

**Επιβλέπων Διατριβής**…… *Νικήτας Νικητάκος, Καθηγητής*

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Με την ολοκλήρωση της, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όσους στάθηκαν δίπλα μου σ' αυτή την προσπάθεια, και ιδιαίτερα να αναφερθώ σε όσους με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της έρευνας μου, και σε όσους με εμψύχωναν στην μακρά πορεία της επίτευξης του στόχου αυτού.

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου καθηγητή Νικήτα Νικητάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα άμεσα σχετικό με τα ερευνητικά μου ενδιαφέροντα, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την καθοδήγηση μέσα από τις σημαντικές υποδείξεις και διορθώσεις του, απαραίτητες στην επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής. Επίσης, τον καθηγητή Αγάπιο Πλάτή και τον καθηγητή Γεώργιο Δούνια για την χρήσιμες παρατηρήσεις τους στην ολοκλήρωση της.

Τον καθηγητή Ιωάννη Καρκαζή για τις χρήσιμες συμβουλές του, τον επικ. καθηγητή Θεόδωρο Λίλα, για τις πολύ χρήσιμες υποδείξεις του σε θέματα τεχνολογίας και την επικ. καθηγήτρια Άννα-Μαρία Κοτρίκλα για θέματα σχετικά με το περιβάλλον. Ένα θερμό ευχαριστώ στους φίλους, διδάκτορα Δημήτρη Παπαχρήστο για τις πολύτιμες προτάσεις του στη διαχείριση του υλικού, το Μιχάλη Μεταξά για τις φιλολογικές πινελιές και τους Στέλιο Κοκολιά και Παναγιώτη Σαμαρά για τη συμπαράσταση.

Κλείνοντας, όλα τα ευχαριστώ στην σύντροφο μου Λιάνα, την κόρη μου Κορίνα και το γιο μου Παναγιώτη, για την κατανόηση που δείχνουν, την υπομονή και την υποστήριξή τους σε όλες μου τις προσπάθειες, μια εκ των οποίων ήταν η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

## Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή με τις μελλοντικές συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει, η προστασία του περιβάλλοντος που απειλείται και η ορθολογική διαχείριση των ενεργειακών πόρων λόγω της μείωσης των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων, αποτελούν πεδία που παρουσιάζουν διεθνώς ενδιαφέρον και τίθενται στόχοι που απαιτείται να επιτευχθούν. Σε ένα μεγάλο μέρος της πραγματοποίησης αυτών των στόχων συμβάλουν οι νέες τεχνολογίες και τα καινοτόμα συστήματα που αξιοποιούν το τεράστιο δυναμικών των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και σκοπό έχουν να συμβάλουν στις προσπάθειες για βιώσιμη ανάπτυξη.

Οι τεχνολογίες αυτές και ειδικότερα όσες αναπτύσσονται για την αξιοποίηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού και της ενέργειας των κυμάτων αποτελούν το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, κρίθηκε ιδιαίτερα σημαντικό να διερευνηθεί διότι η ανάπτυξή τους καθώς και η λειτουργία τους υπόκειται σε αβεβαιότητα και παρουσιάζονται προβληματισμοί που αποτελούν πολύπλοκα και πολυδιάστατα ζητήματα. Τα ζητήματα αυτά σχετίζονται με την αξιοπιστία κατά την ανάπτυξη των συστημάτων, την αποδοτικότητα , την επίδραση στο περιβάλλον, την ασφάλεια και την αποδοχή από το κοινωνικό σύνολο, που θα πρέπει να αξιολογηθούν με αντίστοιχα κριτήρια που περιλαμβάνουν τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση και το μετασχηματισμό εργαλείων που διατίθενται στο θεωρητικό υπόβαθρο της αξιοπιστίας και των πολυκριτηρικών μεθόδων, τα οποία δεν έχουν αξιοποιηθεί για τη διερεύνηση των υπεράκτιων κατασκευών. Επομένως, εξετάζοντας το επιστημονικό πεδίο αξιολόγησης της αξιοπιστίας και πολυκριτηριακής ανάλυσης, επιλέχθηκαν τα εργαλεία FMEA, AHP, TOPSIS καθώς και οι συνδυασμοί τους με τροποποιήσεις και βελτιώσεις, ώστε να εφαρμοστούν κατάλληλα σε ένα δομημένο μεθοδολογικό πλαίσιο και να αποτελέσουν τη βάση της υλοποίησης της προτεινόμενης εργαλειοθήκης. Η εργαλειοθήκη, έχει την ικανότητα να μοντελοποιήσει, να αξιολογήσει και να βελτιστοποιήσει υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης του δυναμικού των ΑΠΕ, λαμβάνοντας υπόψη ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία, σχετικά με τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις.

Η συμβολή της παρούσας διατριβής είναι ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την αναγνώριση όλων παραμέτρων του προβλήματος, την εμπεριστατωμένη ανάλυση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων και τελικά την διαμόρφωση ενός διαφανούς και συνεπούς εργαλείου

υποστήριξης των αποφασιζόντων. Συνοψίζοντας, η ανάπτυξη της προτεινόμενης εργαλειοθήκης αποκτά σημαντική αξία διότι συμβάλει με την εισαγωγή νέων εργαλείων στην αξιολόγηση υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ και υποστηρίζει την ανάλυση στην λήψη αποφάσεων καθώς και τελικών προτάσεων με βάση τα χαρακτηριστικά των εμπλεκομένων και των υπεράκτιων κατασκευών.

***Λέξεις Κλειδιά:*** *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Υποστήριξη Αποφάσεων, Πολυκριτηριακή Ανάλυση, Υπεράκτιες κατασκευές, Κυματική ενέργεια, Αξιοπιστία υπεράκτιων συστημάτων.*

**Abstract**

The climate change, with future consequences which may cause, the threat of environment which must protected, and due to the reduction of conventional fuel energy reserves the rational management of energy resources, are areas of international interest where set goals that must be achieved. To those objectives achievement and to exploit the enormous potential of Renewable Energy Sources (RES) new technologies contribute.

The technologies, and particularly these which are developed for the exploitation of offshore wind potential and for wave energy, constitute to the researching subject of this thesis. The development of these technologies has been particularly important to be explored because their development and operation is subject to uncertainty and concerns are presented which are synthesizes complex and multidimensional issues. These issues relate to reliability in system development, efficiency, environmental impact, safety and the social acceptance, which should be evaluated with corresponding technological, economic, environmental and social criteria.

The research was carried out by utilizing and transforming tools available in the theoretical background of reliability and multicriteria methods, which have not been exploited for exploration of offshore structures. Therefore, by examining the scientific scope of reliability assessment and multicriteria analysis, the FMEA, AHP, TOPSIS tools are chosen as well as their combinations with modifications and improvements in order to be properly implemented in a structured methodological framework and provide the basis for the implementation of the proposed toolbox. The Toolbox can model, evaluate and optimize offshore RES utilization structures, considering qualitative and quantitative data of available alternatives.

The contribution of this thesis is a methodological framework for the identification of all the parameters of the problem, the thorough analysis of the interactions between them and finally the formation of a transparent and consistent tool for supporting the decision makers. In summary, the development of the proposed toolbox is valuable, because it contributes to the introduction of new tools in assessments of offshore RES systems and enhances analysis in decision making as well as the final proposals based on the characteristics of the involved and offshore constructions.

***Keywords: :*** *Renewable Energy Sources, Decision Making, Multi Criteria Analysis, Offshore Structures, Wave Energy Converter, Reliability of Offshore Stuctures.*

# Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες ..... 7

Περίληψη ..... 9

Abstract ..... 11

Πίνακας Περιεχομένων ..... 13

Ευρετήριο πινάκων ..... 17

Ευρετήριο Εικόνων ..... 18

Ευρετήριο Διαγραμμάτων ..... 18

Ευρετήριο Σχημάτων ..... 19

Συντομογραφίες ..... 21

Κεφάλαιο 1 ..... 23
1.1 Ερευνητικό πρόβλημα ..... 23
1.2 Σημαντικότητα της έρευνας ..... 26
1.3 Γενικό πλαίσιο της διατριβής ..... 27
1.4 Κίνητρα και ερευνητικό κενό ..... 30
1.5 Σκοπός και Στόχοι ..... 32
1.6 Συνεισφορά ..... 33
1.7 Διάρθρωση της διατριβής ..... 35

Κεφάλαιο 2 ..... 38
2.1 Εισαγωγή ..... 38
2.2 Κίνδυνος ..... 38
2.3 Αξιολόγηση (Assessment) ..... 47
2.4 Λήψη Αποφάσεων (Decision Making) ..... 51
2.5 Επικινδυνότητα και Αξιοπιστία ..... 53
2.6 Ανάλυση Κινδύνων (Risk analysis) και Εκτίμηση επικινδυνότητας (Risk assessment) ..... 54
2.7 Ανάλυση κίνδυνου, Εκτίμηση αβεβαιότητας συστημάτων ..... 61
2.8 Αξιοπιστία Συστημάτων σε Υπεράκτιες Κατασκευές ..... 68
2.8.1 Τυχαίες και Συνεχείς Μεταβλητές ..... 70

2.8.2 Συμβάντα και διαθεσιμότητα ΣΑΔ-ΑΠΕ ..... 72
2.8.3 Διαγράμματα Μπλοκ Αξιοπιστίας ..... 74
2.9 Μεθοδολογίες αξιολόγησης Κινδύνων ..... 76
2.10 Σύνοψη ..... 78

Κεφάλαιο 3 ..... 79
3.1 Εισαγωγή ..... 79
3.2 Μέθοδοι και Συστήματα Λήψης Αποφάσεων ..... 79
3.2.1 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων ..... 82
3.2.2 Λήπτης αποφάσεων (Decision Maker - DM) ..... 84
3.2.3 Εναλλακτικές λύσεις (Alternatives) ..... 84
3.2.4 Κριτήρια (Criteria) ..... 85
3.2.5 Μήτρα (πίνακας) αποφάσεων (Decision Matrix) ..... 86
3.3 Ταξινόμηση των προβλημάτων και μεθόδων MCDM ..... 86
3.4 Ταξινόμηση MCDM βάσει του πεδίου ερευνητικών προβλημάτων ..... 89
3.4.1 Αιτιολόγηση χρήσης MCDM ..... 91
3.5 Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτήριων (MCDMs) ..... 93
3.6 Εφαρμογές μεθόδων λήψης απόφασης στον ενεργειακό τομέα και τις ΑΠΕ ..... 105
3.6.1 Εφαρμογές σε υπεράκτια Συστήματα ..... 108
3.7 Οφέλη και Περιορισμοί των Μεθόδων και Συστημάτων Λήψης Αποφάσεων με Πολλαπλά Κριτήρια ..... 112
3.8 Σύνοψη ..... 115

Κεφάλαιο 4 ..... 117
4.1 Εισαγωγή ..... 117
4.2 Το σύγχρονο περιβάλλον του ενεργειακού τομέα ..... 118
4.3 Υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΥΔΑ-ΑΠΕ) ..... 125
4.3.1 Πλωτές ή Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες (Offshore Wind Turbines) ..... 126
4.3.2 Συστήματα Αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας (Wave Energy Converters) ..... 133
4.3.3 Υβριδικά συστήματα αιολικής και κυματικής ενέργειας (Combined Wave- and Wind-Power Devices) 141
4.4 Συμπεράσματα ..... 143

Κεφάλαιο 5 ..... 145
5.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο, Εισαγωγή ..... 145

5.2 Καθορισμός Προβλήματος και η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων ..... 146
5.3 Η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων ..... 148
5.4 Κριτήρια Αξιολόγησης ..... 152
5.4.1 Τεχνολογία και παράγοντες αειφορίας ..... 153
5.4.2 Το Περιβαλλοντικό κριτήριο ..... 154
5.4.3 Το Οικονομικό κριτήριο ..... 155
5.4.4 Το κοινωνικό κριτήριο ..... 156
5.5 Εργαλεία Αξιολόγησης ..... 157
5.6 Πλαίσιο Ανάλυσης Αξιοπιστίας ..... 159
5.6.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) ..... 160
5.7 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων ..... 165
5.7.1 Analytic Hierarchy Process, AHP ..... 166
5.7.2 TOPSIS ..... 172
5.8 Ο προσδιορισμός στάθμισης-βαρύτητας στις MCDM ..... 175
5.9 Σύνοψη ..... 177

Κεφάλαιο 6 ..... 179
6.1 Πλαίσιο Αξιολόγησης Συστημάτων ΑΠΕ, Εισαγωγή ..... 179
6.2 Ανασκόπηση υφιστάμενων πλαισίων ..... 180
6.3 Σχεδιασμός Πλαισίου ..... 184
6.4 Δοκιμές –Βελτιώσεις ..... 191
6.4.1 Διερεύνηση αξιοπιστίας σε εγκατεστημένα συστήματα ..... 191
6.4.2 Διερεύνηση αξιοπιστίας με FMEA ..... 196
6.4.3 Αξιολόγηση αξιοπιστίας υπό μεταβλητές περιβαλλοντικές συνθήκες ..... 205
6.5 Εισαγωγή Πολυκριτηριακών Μεθόδων στην ΕΜΣΑ ..... 209
6.6 Διεργασίες στη Λήψη Αποφάσεων για υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης ΑΠΕ ..... 211
6.6.1 Επιλογή των Κριτηρίων ..... 211
6.6.2 Τεκμηρίωση Κριτηρίων Επιλογής ..... 213
6.6.3 Εμπλεκόμενοι στη λήψη αποφάσεων ..... 218
6.7 Εφαρμογές πολυκριτηριακών μεθόδων σε Υπεράκτια συστήματα ..... 220
6.7.1 Περιοχή μελέτης πρώτου επιπέδου της ΕΜΣΑ σε νέα συστήματα ..... 220
6.7.1.1 Αξιολόγηση τεχνολογιών υπεράκτιων πλωτών κατασκευών με πολυκριτηριακές μεθόδους 221

6.7.1.2 Διερεύνηση με τη μεθοδολογία AHP και καθορισμός κριτηρίων ..... 222
6.7.1.2 Αξιολόγηση συνδυασμού συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών με TOPSIS ..... 228
6.7.1.3 Ανάλυση δεδομένων στην εφαρμογή της TOPSIS ..... 230
6.7.2 Περιοχή μελέτης δεύτερου επιπέδου της ΕΜΣΑ ..... 235
6.7.2.1 Βελτίωση της ασφάλειας βάση στρατηγικών συντήρησης εξοπλισμού με εφαρμογή AHP 236
6.7.2.2 Υβριδική ανάλυση για την ενίσχυση στη λήψη αποφάσεων με σύνθεση πολυκριτηριακών μεθοδολογιών ..... 248
6.7.2.3 Πρόληψη λειτουργικών βλαβών σε υπεράκτια συστήματα με συνδυασμό MCDM & FMEA 253
6.7.2.4 Αξιολόγηση αξιοπιστίας υπεράκτιας πλατφόρμας ΑΠΕ με TOPSIS και FMEA ..... 262
6.8. Τελικό Πλαίσιο Αξιολόγησης ..... 267
6.9 Σύνοψη ..... 272
Κεφάλαιο 7 ..... 274
7.1 Συμπεράσματα ..... 274
7.2 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα ..... 282
Παραρτήματα ..... 284
Παραρτημα 1 ..... 284
Παράρτημα 2 ..... 294
Βιβλιογραφία ..... 298

**Ευρετήριο πινάκων**

Πίνακας 2.1 Διαφοροποίηση Ποσοτικής - Ποιοτικής ανάλυσης. ..... 61
Πίνακας 2.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνου και εφαρμοσημότητα. ..... 77
Πίνακας 3.1 Πολυκριτηριακή ανάλυση και σχετικές ερευνητικές περιοχές. ..... 81
Πίνακας 3.2 Προβλήματα MCDM αποφάσεων και μέθοδοι ..... 90
Πίνακας 3.3 Περίληψη των MCDM ..... 101
Πίνακας 4.1 Βασικές τάσεις για την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην ευρωπαϊκή βιομηχανία. ..... 122
Πίνακας 5.1 Κριτήρια και περιοχές διερεύνησης κριτηρίων ..... 150
Πίνακας 5.1 Ακέραιες τιμές και ερμηνεία ..... 169
Πίνακας 5.2 Τιμές Δείκτη Τυχαίας Συνέπειας RI για διαφορετικές τιμές n. ..... 171
Πίνακας 6.1 Συνολικός Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN) σε απλό σύστημα αφαλάτωσης χωρίς ελεγκτικούς μηχανισμούς. ..... 201
Πίνακας 6.2 Συνολικός Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN) στο αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης με ελεγκτικούς μηχανισμούς. ..... 202
Πίνακας 6.3 Κλίμακα που χρησιμοποιείται για συγκρίσεις ανά ζεύγη. ..... 226
Πίνακας 6.4 Τιμές για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. ..... 227
Πίνακας 6.5 Κλίμακα τιμών βαθμολογίας δεδομένων. ..... 231
Πίνακας 6.6 Μήτρα αποφάσεων με στάθμιση των κριτηρίων σε σχέση με κάθε εναλλακτική λύση. ..... 232
Πίνακας 6.7 Κανονικοποιημένα βάρη σχετικά με τη στάθμιση των εμπειρογνωμόνων για κάθε κριτήριο. ..... 232
Πίνακας 6.8 Κανονικοποιημένη μήτρα αποφάσεων. ..... 233
Πίνακας 6.9 Προσδιορισμός θετικής ιδανικής λύσης. ..... 233
Πίνακας 6.10 Προσδιορισμός της αρνητικής ιδανικής λύσης. ..... 234
Πίνακας 6.11 Σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση. ..... 234
Πίνακας 6.12 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της λειτουργικότητας. ..... 244
Πίνακας 6.13 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της επιλογής προσωπικού. ..... 245
Πίνακας 6.14 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της ανάλυσης των απαιτήσεων συντήρησης. ..... 245
Πίνακας 6.15 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της τεχνολογίας συντήρησης. ..... 246
Πίνακας 6.16 Αποτελέσματα για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης με την ανάπτυξη της AHP. ..... 247
Πίνακας 6.17 Συγκρίσεις α να ζεύη για Επιλογή στρατηγικής συντήρησης. ..... 250
Πίνακας 6.18 Αποτελέσματα για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης με την ανάπτυξη της AHP ..... 251
Πίνακας 6.19 Ομαλοποιημένος πίνακας αποφάσεων με TOPSIS. ..... 251
Πίνακας 6.20 Μέτρο διαχωρισμού από θετική και αρνητική ιδανική λύση ..... 252
Πίνακας 6.21 Σχετική εγγύτητα και κατάταξη των στρατηγικών συντήρησης εξοπλισμού. ..... 252
Πίνακας 6.22 *FMEA* και τροποποιημένο *rpn*. ..... 255

Πίνακας 6.23 Κατάταξη αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της σύνθεσης της AHP με την εισαγωγή στην αξιολόγηση τα δεδομένα που προέκυψαν από την τροποποιημένη FMEA στο πρόβλημα λήψης αποφάσεως. ..... 261
Πίνακας 6.24 Κατάταξη ανίχνευσης. ..... 264
Πίνακας 6.25 Αιτίες βλαβών. ..... 264
Πίνακας 6.26 Αριθμοί προτεραιότητας κινδύνου (RPN) από την εφαρμογή της FMEA. ..... 265
Πίνακας 6.27 Σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση……266

**Ευρετήριο Εικόνων**

Εικόνα 4.1 Νέες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανά τομέα παγκοσμίως, το 2014 ..... 119
Εικόνα 4.2 Έκθεση ενεργειακού σχεδιασμού :100% Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2050. ..... 121
Εικόνα 4.3 Εξαρτήματα ανεμογεννήτριας και όψη των στοιχείων του κιβωτίου μετάδοσης της κινήσεως. ..... 127
Εικόνα 4.4 Τύποι εγκατάστασης ανεμογεννητριών στη θάλασσα.. ..... 128
ικόνα 4.5 Τυπικές Πλωτές πλατφόρμες με αρχές στατικής ευστάθειας. . ..... 129
Εικόνα 4.6 Κατασκευή του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού ..... 132
Εικόνα 4.7 Σχηματισμός των κυμάτων ..... 133
Εικόνα 4.8 Παραδείγματα κατασκευών μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων WECs ..... 136
Εικόνα 4.9 Τεχνολογίες (α) Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος, (β) Υπέρβασης/Υπερύψωσης, (γ) Κατακόρυφης Ταλάντωσης, (δ) Αρθρώσεων, (ε) Οριζόντιας Κίνησης. ..... 140

**Ευρετήριο Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 2.1 Οι τέσσερις διαστάσεις του κινδύνου ..... 43
Διάγραμμα 2.2 Συσχέτιση Κινδύνου – Κόστους. ..... 44
Διάγραμμα 2.3 Διαχωρισμός κινδύνων κατά φύση και προέλευση. ..... 45
Διάγραμμα 2.4 Συμβολή της εκτίμησης των κινδύνων στη διαδικασία διαχείρισης των κινδύνων ..... 56
Διάγραμμα 2.5 Στοιχεία λήψης αποφάσεων για κατασκευές ..... 62
Διάγραμμα 2.6 Εκτίμηση της αβεβαιότητας σε υπολογιστικά μοντέλα ..... 65
Διάγραμμα 2.7 Σύγκριση διαγραμμάτων όμοιων δεδομένων συμβάντων ..... 71
Διάγραμμα 2.8 Συνολικές τάσεις ρυθμού βλαβών σε χερσαίες ανεμογεννήτριες για την περίοδο 1987 – 2000..... 73
Διάγραμμα 2.9 Αναπαράσταση υπο-συνδεσμολογιών σε ένα διάγραμμα μπλοκ αξιοπιστίας..... 75
Διάγραμμα 3.1 Διεργασία των αναλύσεων MCDM. ..... 104
Διάγραμμα 4.1 Ονομαστική ισχύς σε σχέση με το βάθος του νερού για τις διάφορες κατασκευές ανεμογεννητριών..... 131

Διάγραμμα 5.1 Δομή του προβλήματος απόφασης σε ένα ιεραρχικό μοντέλο στόχων όπου Α οι εναλλακτικές και C τα κριτήρια. ..... 168
Διάγραμμα 6.1 Αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ. ..... 187
Διάγραμμα 6.2 Εφαρμογή τεχνικών αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας με ενοποιημένη πολυκριτηριακή ανάλυση στα πλαίσια της ΕΜΣΑ. ..... 189
Διάγραμμα 6.3 Το λειτουργικό σύστημα της αφαλάτωσης χωρίς αυτοματισμούς ελέγχου. ..... 198
Διάγραμμα 6.4 Το λειτουργικό σύστημα της αφαλάτωσης με την προσθήκη αυτοματισμών ελέγχου. ..... 200
Διάγραμμα 6.5 Προτεινόμενη τροποποίηση στη διεργασία FMEA ..... 206
Διάγραμμα 6.6 Διαδικασίες επιλογής κριτηρίων. ..... 213
Διάγραμμα 6.7 Διαδικασία μοντελοποίησης προβλήματος απόφασης τεσσάρων σταδίων ..... 215
Διάγραμμα 6.8 Ιεραρχική δομή εναλλακτικές και βάρη στην Αξιολόγηση αξιοπιστίας για υπεράκτιες κατασκευές. ..... 226
Διάγραμμα 6.9 Ο στόχος, τα κριτήρια και οι εναλλακτικές λύσεις στην ανάπτυξη του ΑΗΡ... 241
Διάγραμμα 6.10 Τελική κατάταξη για την επιλογή στρατηγικής συντήρησης του συστήματος ηλεκτρικής παραγωγής. ..... 247
Διάγραμμα 6.11 Προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο επιλογής στρατηγικής συντήρησης (ΕΣΣ). . 249
Διάγραμμα 6.12 Σύνθεση ΑΗΡ και εναλλακτικές λύσεις. ..... 257
Διάγραμμα 6.13 Διαμόρφωση κατασκευής του συστήματος αφαλάτωσης ανοικτής θάλασσας με αξιοποίηση δυναμικού ΑΠΕ. ..... 263
Διάγραμμα 6.14 Η εργαλειοθήκης ΕΜΣΑ και τα εργαλεία που αξιοποιούνται στα διάφορα επίπεδα..... 268

**Ευρετήριο Σχημάτων**

Σχήμα 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά του Κινδύνου ..... 40
Σχήμα 2.2 Κατανομή πιθανότητας εμφάνισης γεγονότος (κίνδυνος) . ..... 43
Σχήμα 2.3 Δομή και χαρακτηριστικά κινδύνων. ..... 45
Σχήμα 2.4 Συσχετισμός στοιχείων δομής κινδύνων . ..... 47
Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστικά της λήψης αποφάσεων ..... 52
Σχήμα 6.1 Υποδομή του συστήματος αφαλάτωσης. ..... 194
Σχήμα 6.2 Παράδειγμα μέγιστης και μέσης ταχύτητας ανέμου σε διαστήματα 10 λεπτών για δύο εβδομάδες ..... 208
Σχήμα 6.3 Σύστημα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας. ..... 223
Σχήμα 6.4 Μέση παραγωγή νερού σε ένα μήνα με μετρήσεις κάθε 3 ώρες..... 224

## Συντομογραφίες

AHP: Analytic Hierarchy Process

CI: Consistency Index

CR: Consistency Ratio

DM: Decision Maker

ELECTRE: ELimination Et Choix Traduisant la REalité

FMEA: Failure Modes and Effect Analysis

GDM: Group Decision Making

GP: Goal Programming

MADM: Multi-Attribute Decision Making

MAUT: Multi-Attribute Value Theory

MAVT: Multi-Attribute Utility Theory

MCDA: Multi-Criteria Decision Analysis

MCDM: Multi-Criteria Decision Making

MODM: Multi-Objective Decision Making

NIS: Negative Ideal Solutions

PIS: Positive Ideal Solution

PROMETHEE: Preference Ranking Organization MeTHod for Enrichment Evaluations

RE: Renewable Energy

SAW: Simple Additive Weighting

SMART: Simple Multi-Attribute Rating Technique

TOPSIS: Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution

WEC: Wave Energy Converter

WT: Wind Turbine

Α.Π.Ε: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ε.Ε: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΜΣΑ: Εργαλειοθήκη Μεθοδολογιών Στήριξης για τη λήψη Αποφάσεων

Π.Α: Πολυκριτηριακή Ανάλυση

ΣΑΔ-ΑΠΕ: Συστήματα Αξιοποίησης Δυναμικού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Υ.Π.Ε.Κ.Α: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Ερευνητικό πρόβλημα

Οι δραστηριότητες για την ενεργειακή παραγωγή και η αποψίλωση των δασών επιδρούν στο περιβάλλον και σταδιακά έχουν επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις σε αυτό, αφού αυξάνονται οι συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, συντελώντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Η κλιματική αλλαγή και τα αποτελέσματά της εμφανίζονται ακόμη πιο σύντομα απ' ό, τι αναμενόταν. Ερευνητικά, διαφαίνεται ότι η μείωση των εκπομπών $CO_2$ κατά 50% μέχρι το 2050 ενδέχεται να είναι ανεπαρκής για την αποτροπή των κινδύνων που περιέχονται στην έννοια της κλιματικής αλλαγής (IEA, 2012). Σήμερα, οι προσπάθειες για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών απειλών βρίσκονται υψηλά στην πολιτική ατζέντα πολλών χωρών, με τη μορφή βραχυπρόθεσμων ή μακροπρόθεσμων στρατηγικών. Στόχος είναι η βελτίωση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας, η βελτιστοποίηση της λειτουργίας και της διαχείρισής τους, ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητά τους.

Η βιωσιμότητα, λόγω της οικονομικής κρίσης και της πληθυσμιακής αύξησης σε συνδυασμό με την υπερκατανάλωση φυσικών πόρων, έχει αποκτήσει ολοένα και μεγαλύτερη σημασία. Επιπλέον, οι σημαντικότερες προκλήσεις στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες είναι η αποφυγή διαδικασιών που οδηγούν σε απώλεια πόρων, ιδίως στον ενεργειακό τομέα.

Η ενεργειακή παραγωγή για τις σύγχρονες οικονομίες είναι ζωτικής σημασίας ειδικότερα για τη βιομηχανία, τις μεταφορές, την ανάπτυξη υποδομών, την τεχνολογία των πληροφοριών, τη θέρμανση και την ψύξη των κτιρίων, τη γεωργία, τις οικιακές χρήσεις κ.ά.. Τα κράτη χρειάζονται την ενέργεια για την οικονομική τους ανάπτυξη και για να βελτιώσουν το βιοτικό επίπεδο των λαών τους. Γι' αυτό, άμεσα πρέπει να αναληφθούν δράσεις για ολοκληρωμένα μοντέλα βιώσιμης ενέργειας, και να ακολουθηθούν πολιτικές που θα αξιοποιούν νέες τεχνολογίες κατά τη διαχείριση του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η σπουδαιότητα της αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει αναγνωριστεί ήδη από τη δεκαετία του 1990, με το ενδιαφέρον να αυξάνεται τόσο από θεσμική όσο και από ερευνητική πλευρά, ιδιαιτέρως δε στους τομείς της αειφόρου ανάπτυξης και της εξοικονόμησης ενέργειας (Farfan and Breyer, 2017), (Evans et al., 2009), (Foley and Olabi, 2017), (Troldborg, et al.,

2014). Αρχικά με το Πρωτόκολλο του Κιότο το 1997, και σήμερα με την Συμφωνία του Παρισιού η στρατηγική της Ευρώπης 2020 (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2010) αποτελούν ένα πλαίσιο ενεργειών που μπορούν να χαρακτηριστούν ως ουσιαστικές πρωτοβουλίες από τα Ηνωμένα Έθνη και την Ευρωπαϊκή Ένωση, στην κατεύθυνση της αναγνώρισης των αναγκών για τη βελτίωση της ενεργειακής πολιτικής.

Με την αύξηση του αντίκτυπου της βιωσιμότητας στον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων, οι νέες αποδοτικές τεχνολογίες ενεργειακής παραγωγής, αποτελούν βασικό παράγοντα ικανό να γεφυρώσει τις στρατηγικές που υιοθετούνται για αειφόρο ανάπτυξη, την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η κλιματική αλλαγή και η απεξάρτηση από τους ορυκτούς ενεργειακούς πόρους. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γίνουν αλλαγές στην ενεργειακή δομή, να ενσωματωθούν νέες πηγές στην παραγωγή ενέργειας και να αλλάξει ο τρόπος, με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα ορυκτά καύσιμα, ώστε να μειωθεί η βλάβη που προκαλείται στο περιβάλλον (Streimikiene and Sivickas, 2008). Υπό αυτό το πλαίσιο τις δύο τελευταίες δεκαετίες πολλές χώρες, στράφηκαν στη διερεύνηση της αξιοποίησης του δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και έχουν δεσμευτεί να τις συμπεριλάβουν στα ενεργειακά τους συστήματα.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θεωρούνται φιλικές προς το περιβάλλον και είναι σε θέση να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα σε ανταγωνιστικές τιμές (Polatidis et al., 2006). Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν σημαντικές αποφάσεις είτε από κυβερνήσεις, είτε από επιχειρήσεις, προκειμένου να δημιουργηθούν Συστήματα Αξιοποίησης Δυναμικού Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΣΑΔ-ΑΠΕ) σε συγκεκριμένες περιοχές. Παράλληλα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις που σχετίζονται με το είδος της ανανεώσιμης πηγής ενέργειας ή τον συνδυασμό πηγών που θα αξιοποιηθεί, ώστε να αποτελεί την καλύτερη επιλογή (Baños et al., 2011). Σε εθνικό επίπεδο, λόγω της διαφοροποίησης των διαθέσιμων ΑΠΕ, κάθε χώρα θα πρέπει να προετοιμάσει τις δικές της ενεργειακές πολιτικές βάσει γεωγραφικών και περιβαλλοντικών παραγόντων, ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν τα ανακύπτοντα ζητήματα βιωσιμότητας. Όσον αφορά το επιχειρησιακό επίπεδο, αυτό αποτελεί ένα άλλο πεδίο που η βιωσιμότητα επίσης προσεγγίζεται με διαφορετικό τρόπο, εφόσον θα πρέπει να αντιμετωπιστούν θέματα αξιοπιστίας από την ανάπτυξη συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ. Για όλες όμως τις ομάδες, που αποτελούν τους υπευθύνους στη λήψη αποφάσεων για την ανάπτυξη των δομών αξιοποίησης ΑΠΕ, υπάρχει ένας παράγοντας που

είναι καθοριστικής σημασίας. Αυτός είναι η ασφάλεια από τη λειτουργία, την εγκατάσταση και τη διαχείριση των συστημάτων, τόσο απέναντι στο περιβάλλον όσο και για το ίδιο το σύστημα.

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω προσεγγίσεις, εφαρμόζονται διάφορες στρατηγικές στο σχεδιασμό αξιοποίησης ΑΠΕ, που χρησιμοποιούν καινοτόμα συστήματα κατάλληλα για κάθε διαθέσιμη ανανεώσιμη πηγή. Σε αυτά περιλαμβάνονται και τα υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού και της ενέργειας των κυμάτων.

Η παρούσα διατριβή ασχολείται με την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και αποδοτικότητας υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, μέσα από τη μελέτη ανάπτυξης μιας εργαλειοθήκης κατάλληλων μεθόδων σε προβλήματα λήψης αποφάσεων σχετικά με την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί. Παράλληλα δε, αποσκοπεί στο να επιτευχθεί η βέλτιστη διαχείριση και η βελτιστοποίηση των συστημάτων. Αυτά τα είδη προβλημάτων αντιμετωπίζουν αντικρουόμενες οικονομικές, τεχνολογικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές πτυχές για την παροχή της κατάλληλης ισορροπίας μεταξύ:

1. της τεχνολογίας που θα εφαρμοστεί για την παραγωγή της ενέργειας,
2. της πιθανής δυνατότητας κατανάλωσής της με την κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων,
3. της ελαχιστοποίησης των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον,
4. της ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων στο κοινωνικό σύνολο και
5. της ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων στην ασφάλεια που μπορεί να επηρεάζεται από την ανάπτυξη του υπεράκτιου συστήματος.

Δεδομένου ότι η κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη επηρεάζεται από την καταλληλότητα των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν στην αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού, η αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων για την παραγωγή αειφόρου ενέργειας και ο καθορισμός έγκυρων ενεργειακών πολιτικών είναι σημαντικός. Όμως, οι παράγοντες δεν είναι πάντα σίγουροι και ξεκάθαροι. Αντίθετα, περιλαμβάνουν ποιοτικές και ποσοτικές μεταβλητές που θα πρέπει να λάβουν υπόψη τους οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων στα διαφορετικά προβλήματα που παρουσιάζονται. Επιπλέον, είναι δύσκολο οι ποιοτικές μεταβλητές να αναλυθούν και να ποσοτικοποιηθούν, ενώ οι πληροφορίες που απαιτούνται για την αξιολόγησή τους είναι πολλές φορές ανακριβείς και υπόκεινται σε αβεβαιότητα.

Ορισμένες απ' τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος στην αξιολόγηση συστημάτων ΑΠΕ είναι κυρίως για συστήματα εγκατεστημένα ή που πρόκειται να εγκατασταθούν στην ξηρά. Για υπεράκτια συστήματα λίγες μελέτες έχουν εκπονηθεί οι οποίες σχετίζονται με το αντικείμενο του ενεργειακού προγραμματισμού και του χωροταξικού σχεδιασμού των ανεμογεννητριών στη θάλασσα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, υποστηρίζουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων (Decision Makers-DMs) σε όλα τα στάδια της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, παρέχοντας χρήσιμα δεδομένα για την αξιολόγηση κριτηρίων με αβέβαιες αξίες (Kara and Onut, 2010).

Οι μέθοδοι αυτοί αφορούν σε προσεγγίσεις ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (Multiple Criteria Decision Making – MCDA), και περιλαμβάνουν ισχυρά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση προβλημάτων κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια για την εξεύρεση συμβιβαστικών λύσεων, ενώ αλληλοεπιδρούν με άλλους κλάδους, όπως τα έξυπνα συστήματα που ασχολούνται με την αβεβαιότητα (Hwang και Yoon, 1981). Οι Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτηρίων (MCDM) υπό αβεβαιότητα, και τα ασαφή συστήματα, γίνονται δεκτές ως κατάλληλες τεχνικές στη λύση αντικρουόμενων προβλημάτων που δεν δύναται να αναπαρασταθούν πάντα από αριθμητικές τιμές, ιδιαίτερα στην ανάλυση ενέργειας και των τεχνολογιών αξιοποίησής της. Οι μέθοδοι MCDM αντιπροσωπεύουν την αβεβαιότητα, εξομοιώνουν εξειδικευμένους ανθρώπους και χειρίζονται ασαφείς καταστάσεις (Awasthi et al., 2010), (Huang et al., 2011), (Zavadskas and Turskis, 2011).

## 1.2 Σημαντικότητα της έρευνας

Ησημαντικότητα της έρευνας έγκειται στη διερεύνηση και εισαγωγή εργαλείων για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου υποστήριξης λήψης αποφάσεων, με το συνδυασμό κατάλληλων μεθοδολογιών και τεχνικών αξιολόγησης για τεχνολογίες και δομές υπεράκτιων συστημάτων. Παράλληλα διερευνάται η αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της βελτιστοποίησης των συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας λόγω των διακυμάνσεων του ενεργειακού δυναμικού των ΑΠΕ, ώστε να προκύψει μια νέα μέθοδος κατάταξης ή επιλογής διαφορετικών εφαρμογών και διαχειριστικών ενεργειών στην λήψη αποφάσεων ενεργειακών εναλλακτικών λύσεων (σενάρια, τεχνολογίες, στρατηγικές ή πολιτικές).

Δηλαδή, παρουσιάζεται μια εργαλειοθήκη από μεθόδους MCDM για τη λήψη αποφάσεων σε υπεράκτια ΣΑΔ-ΑΠΕ, από ομάδες ληπτών αποφάσεων (Group Decision Making - GDM), με ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια. Αυτή η εργαλειοθήκη, χρησιμοποιεί μεθόδους και τεχνικές ικανές να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας, να κατατάσσουν τις εναλλακτικές λύσεις πολλαπλών κριτηρίων, να αξιολογούν την τεχνολογική αξιοπιστία και τις δυνατότητες βελτίωσης των ΣΑΔ-ΑΠΕ υπό τις μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας τους. Η προτεινόμενη προσέγγιση συγκρίνει μεθόδους MCDM για την εφαρμογή τους σε λήψη αποφάσεων, διερευνάται η σύνθεση μεθοδολογιών και η περαιτέρω σύνθεση με τεχνικές αξιολόγησης της αξιοπιστίας σε υπεράκτια συστήματα.

Ορισμένες εφαρμογές των εργαλείων που προτείνονται στην νέα εργαλειοθήκη, δοκιμάζονται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων για επιλογή της πλέον κατάλληλης από τις διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ, καθώς και υβριδικές εκτιμήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται ως μελέτες περιπτώσεων κατατάσσοντας τις εναλλακτικές λύσεις με βάση τα πολλαπλά κριτήρια που οφείλονται στη φύση του τομέα των ΑΠΕ. Περαιτέρω, μελετάται η αξιολόγηση της εφαρμογής της τεχνολογίας, για την βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος που αναπτύσσεται και της αποδοτικότητάς του μέσω αποφάσεων στη λειτουργική του διαχείριση.

## 1.3 Γενικό πλαίσιο της διατριβής

Οι ΑΠΕ δύνανται να συμβάλουν σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας χωρίς να επιβαρύνουν με ρύπους το περιβάλλον (IEA, 2002), και σήμερα πολλές εφαρμογές τους έχουν αποδειχθεί βιώσιμες οικονομικά. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες. Όμως, ειδικά για τις ανεμογεννήτριες διάφορα κοινωνικοοικονομικά και περιβαλλοντικά εμπόδια δυσχεραίνουν την ανάπτυξή και την αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στη διαθεσιμότητα του αιολικού δυναμικού συμπεριλαμβάνεται αυτό που υπάρχει πέρα από τις ακτές (υπεράκτια αιολική ενέργεια), που μαζί με το δυναμικό από την ενέργεια των κυμάτων (κυματική ενέργεια) αποτελούν μια τεράστια ενεργειακή πηγή, και για την αξιοποίησή της αναπτύσσονται σύγχρονα συστήματα. Στην ανάπτυξη όμως των καινοτόμων τεχνολογικών συστημάτων, μια σειρά από σημαντικούς παράγοντες δύνανται να επηρεάσουν όχι μόνο τις ενεργειακές επιλογές, αλλά και τον βαθμό και τον τρόπο που χρησιμοποιούνται οι διαφορετικές τεχνολογίες (Gross et al., 2003). Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται με την

εγκατάσταση και τη λειτουργία τους, όπου συναντώνται εμπόδια όπως, τεχνολογικές δυσκολίες, φραγμοί από την αγορά (π.χ. μεγάλο αρχικό κόστος), θεσμικοί και κοινωνικοί περιορισμοί, τοπικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την οπτική όχληση και την ασφάλεια από την εγκατάσταση αυτών των κατασκευών.

Επομένως, δημιουργούνται σημαντικά ζητήματα στην ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων που απαιτούνται λήψεις αποφάσεων από πολλούς συμμετέχοντες, οι οποίοι έχουν διαφορετικές απόψεις. Τα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν χαρακτηρίζονται ιδιαιτέρως ευπαθή από πολλές απόψεις όπως η τεχνική, η οικονομική, η κοινωνική και η περιβαλλοντική. Στην ιδιαιτερότητα και την πολυπλοκότητα αυτών των προβλημάτων, η επιστημονική αρωγή περιορίζεται εφόσον οι επιστήμονες μπορούν μόνο να προτείνουν συγκεκριμένους τρόπους χειρισμού, λήψης απόφασης, αντιμετώπισης της αβεβαιότητας και δόμηση του θέματος. Εξαρτάται όμως από πολλούς εμπλεκόμενους να αποφασίσουν ποιο πρόβλημα επιθυμούν να λύσουν, και τι είδους παρεμβάσεις θα δεχτούν. Γι' αυτό, προβλήματα όπως η ανάπτυξη υπεράκτιων δομών, απαιτείται να αντιμετωπιστούν σύμφωνα με ένα δομημένο και διαφανές πλαίσιο. Ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις μεθοδολογίες της MCDM και να αποτελέσουν το μέσον για τη λήψη των αποφάσεων (Wang, et al., 2009) (Salminen, et al., 1998).

Συνεπώς, προϋπόθεση για την ανάπτυξη αξιόπιστων και αποδοτικών συστημάτων αξιοποίησης του υπεράκτιου δυναμικού των ΑΠΕ αποτελεί η αξιοποίηση και δημιουργία κατάλληλων εργαλείων που θα περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων, την ενίσχυση της λειτουργικής ασφάλειας, τη μείωση του συνολικού κόστους, την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών (Mills et al.,1996) (Mamlook et al., 2001). Άρα τα πολλαπλά κριτήρια που απαιτούνται στη λήψη αποφάσεων, αφορούν προβλήματα σε τεχνολογικό, οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο, καθώς και βελτιστοποίησης των συστημάτων που θα περιλαμβάνονται σε ένα ενιαίο μεθοδολογικό πλαίσιο.

Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί πληθώρα μεθόδων όπως, Ανάλυση Σεναρίων, Μοντέλα Πρόβλεψης, Ανάλυση Κόστους-Οφέλους, Πολυκριτηριακή Ανάλυση κ.λπ. με σκοπό να στηριχθούν οι υπεύθυνοι στη λήψη αποφάσεων (Decision Makers). Επίσης έχει αναγνωριστεί

πως η αξιολόγηση ενεργειακών συστημάτων αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία (Nijkamp,1980). Η πληθώρα μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης παρέχει στους λήπτες αποφάσεων τη δυνατότητα επεξεργασίας των δεδομένων τους, με ποικίλους τρόπους ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνικής (Ehrgott, 2002). Συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη την αδυναμία της μετατροπής όλων των σχετικών μεγεθών σε μια κοινή μονάδα μέτρησης, αλλά και της ποιοτικής φύσης των διαθέσιμων πληροφοριών, οι μέθοδοι Πολυκριτηριακής Ανάλυσης παρέχουν ένα αξιόπιστο πλαίσιο διερεύνησης και αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων.

Συγκεκριμένες εφαρμογές των μεθοδολογιών Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε θέματα γενικά με ΣΑΔ-ΑΠΕ αποτελούν ο ενεργειακός σχεδιασμός, η χωροταξική μελέτη, η βελτιστοποίηση κόστους-εσόδων, η αξιολόγηση της επίδρασης στο περιβάλλον της περιοχής εγκαταστάσεώς τους, οι κοινωνικές επιπτώσεις, η επιλογή μεταξύ υποψήφιων αιολικών επενδύσεων, η αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού και η αξιολόγηση στον σχεδιασμό ανεμογεννητριών και των διαφόρων υποδομών για την υποστήριξή τους. Η διερεύνηση από μεθόδους Πολυκριτηριακής Ανάλυσης στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας τέτοιων αποφάσεων, μέσω της βελτίωσης της αποδοτικότητας, της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας και της ενίσχυση στη διαφάνεια, προσφέροντας ένα είδος πλαισίου σε μια προσπάθεια μοντελοποίησης συστημάτων αξιοποίησης του δυναμικού των ΑΠΕ (Wenstop και Seip, 2001).

Το συμπέρασμα που προκύπτει κατά τη διερεύνηση του αντικειμένου, αφορά στην έλλειψη ολοκληρωμένης προσέγγισης θεμάτων που σχετίζονται: 1) με την ανάπτυξη της υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης των διαθέσιμων πηγών ενέργειας και την έλλειψη ενός καθολικού πολυκριτηριακού μεθοδολογικού πλαισίου υποστήριξης λήψης αποφάσεων για την επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας, 2) την βελτίωσης της αξιοπιστίας του επιλεγόμενου συστήματος, 3) την δυνατότητα βελτιστοποίησής του και 4) τη λειτουργία και τη διαχείρισή του στο ιδιαίτερο υπεράκτιο περιβάλλον λόγω της καινοτομίας που παρουσιάζει.

Επίσης, για τις εναλλακτικές λύσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολλά χαρακτηριστικά τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν με διαφορετικές κλίμακες, οι εμπειρογνώμονες θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να τις αξιολογήσουν μέσω ποιοτικών ή ποσοτικών μεταβλητών, εφόσον ενδέχεται να κάνουν λάθη αν αναγκάζονται να κάνουν ακριβέστερες κρίσεις από ό, τι είναι ικανοί. Αντιστρόφως, μπορεί να προκύψει σημαντική απώλεια πληροφοριών εάν οι λήπτες

αποφάσεων αναγκάζονται να κάνουν λιγότερο ακριβείς κρίσεις από ό,τι επιτρέπουν τα διαθέσιμα δεδομένα.

Για τον λόγο αυτό, στην παρουσιαζόμενη εργαλειοθήκη μεθοδολογιών, η λήψη αποφάσεων στηρίζεται κάθε φορά από το κατάλληλο εργαλείο διερεύνησης, διότι χρησιμοποιούνται, συνδυάζονται και τροποποιούνται εργαλεία, στα οποία αξιοποιώντας συνηθισμένες κλίμακες με διαφορετικά σύνολα περιγραφών καταγράφεται ο βαθμός αβεβαιότητας στην αντίληψη του υπευθύνου.

Συνεπώς, η διατριβή εντάσσεται στο θεωρητικό πλαίσιο της λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων και τεχνικών ποιοτικής σκέψης, καθώς και εφαρμογής τεχνικών ποσοτικής αξιολόγησης. Με τον συνδυασμό και την επιλογή των κατάλληλων μεθοδολογιών η εργαλειοθήκη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συστηματικό πλαίσιο το οποίο θα στηρίξει τους υπεύθυνους στην λήψη αποφάσεων για την αξιοποίηση υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ και την χάραξη στρατηγικών ενεργειών μέσω ποιοτικών και ποσοτικών εκτιμήσεων.

## 1.4 Κίνητρα και ερευνητικό κενό

Σύμφωνα με τον σχεδιασμό αξιοποίησης ΑΠΕ, η αύξηση της χρήσης τους στο ενεργειακό μείγμα θα συμβάλει στη βελτίωση και στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, στη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης, στη βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε γενικές γραμμές, θα έχει θετικό αντίκτυπο στη δημιουργία ειδικευμένων θέσεων εργασίας, στην τόνωση της οικονομίας και στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλείται σήμερα από το σύστημα ενεργειακής παραγωγής (IEA, 2013). Όλοι αυτοί οι παράγοντες δικαιολογούν γιατί οι ΑΠΕ έχουν καταστεί στρατηγικός τομέας στην ανάπτυξη της ενεργειακής παραγωγής όλων των χωρών και βασικό ζήτημα στην στρατηγική της οικονομικής, της πολιτικής και της κοινωνικής ανάπτυξης. Μελέτες έχουν εκπονηθεί για την αξιολόγηση σχεδίων αξιοποίησης ΑΠΕ σε τομείς που περιλαμβάνουν την αιολική ενέργεια, υδροηλεκτρική, ηλιακή, βιομάζα, ενέργεια των κυμάτων και η γεωθερμική ενέργεια (Beccali, et al., 2003), (Tsoutsos, et al., 2009). Σύμφωνα με τους στόχους της αντιστάθμισης της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, απαιτούνται κρίσιμες αποφάσεις στον ενεργειακό τομέα (Edenhofer, et al., 2011), (Fais, et al., 2016).

Τα ερωτήματα που τίθενται; Πώς μπορούν να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι; Ποιες μέθοδοι αξιολόγησης στην ανάπτυξη των συστημάτων χρειάζονται; Πώς μπορεί να αξιοποιηθεί το υπεράκτιο δυναμικό των ΑΠΕ από ασφαλή και βιώσιμα συστήματα; Πώς μπορούν οι μέθοδοι MCDM να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να δώσουν μια εικόνα για τα προβλήματα και πώς θα διευκολύνουν τη συμφωνία μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων για τη βελτίωση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων;

Η έρευνα που διεξάγεται προσθέτει αξία σε αυτές τις κατευθύνσεις. Το βασικό ζήτημα είναι η ανάπτυξη και η χρήση μιας εργαλειοθήκης στη λήψη αποφάσεων που θα εφαρμοστεί στην επιλογή, στον σχεδιασμό, στην ανάπτυξη και στη διαχείριση υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, που θα είναι σε θέση να ασχοληθεί ταυτόχρονα με δείκτες ποιοτικού χαρακτήρα μαζί με ποσοτικούς.

Τα προβλήματα στην ανάπτυξη υπεράκτιων δομών έχουν πολλαπλές πτυχές, οι οποίες πρέπει να θεωρηθούν ότι βρίσκουν την συμβιβαστική λύση που είναι αποδεκτή απ’ όλους τους παράγοντες που εμπλέκονται σε ένα δεδομένο πρόβλημα. Επομένως, ο πρωταρχικός στόχος της λήψης αποφάσεων πρέπει να είναι η συλλογή ποιοτικών και ποσοτικών πτυχών, ιδιαίτερα σε προβλήματα με υψηλή αβεβαιότητα. Αν και πολλές πραγματικές εφαρμογές με ποιοτικά κριτήρια χρησιμοποιούν γλωσσικές μεταβλητές (π.χ. στο μάρκετινγκ), υπάρχουν πολλές αριθμητικές τιμές στους τεχνικούς τομείς των προβλημάτων για υπεράκτια συστήματα ΑΠΕ, αλλά υπάρχουν και περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές που δύσκολα ποσοτικοποιούνται. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι από τους δείκτες σε προβλήματα ανάπτυξης και αξιολόγησης δομών είναι αριθμητικοί, οι μέθοδοι είναι βασικά ποσοτικές στην πλειονότητα της βιβλιογραφίας, εστιάζοντας στις τεχνικές και οικονομικές πτυχές αυτών των προβλημάτων. Τέτοιες μέθοδοι είτε αγνοούν ποιοτικές μεταβλητές, όπως οικολογικές ανησυχίες, κοινωνική αποδοχή ή περιβαλλοντικές επιπτώσεις, επειδή είναι δύσκολο να τις ποσοτικοποιήσουν είτε προσπαθούν να βρουν αριθμητικές τιμές γι’ αυτές. Από άποψη βιωσιμότητας, όλες οι πτυχές (τεχνολογικές, οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές) είναι σημαντικές και αναπόφευκτες.

Αν και υπάρχουν πολλές μελέτες που αφορούν στις μεθόδους MCDM, το ενδιαφέρον για τη χρήση συνδυασμών εργαλείων και προσεγγίσεων MCDM έχει αυξηθεί πρόσφατα κυρίως σε

συστήματα στην ξηρά. Επιπλέον, οι αποφάσεις που αφορούν στην αξιολόγηση των υπεράκτιων ΑΠΕ καθορίζονται και επηρεάζονται σε διαφορετικό βαθμό απ' όλους τους εμπλεκόμενους της σύγχρονης ενεργειακής αγοράς, στο νέο ενεργειακής αξιοποίησης περιβάλλον. Σε αυτό το πλαίσιο, βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική αξιολόγηση των υπεράκτιων ΑΠΕ, είναι η διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων και των βασικών επιδιώξεων όλων των εμπλεκομένων στη λήψη αποφάσεων, που περιλαμβάνουν την Πολιτεία, τις εταιρείες ανάπτυξης ενεργειακών συστημάτων και τους χρήστες.

Παρουσιάζεται, λοιπόν, έντονη η ανάγκη για την ανάπτυξη περισσότερο ευέλικτων και αντιπροσωπευτικών υποστηρικτικών πλαισίων και συστημάτων στήριξης αποφάσεων για την αξιολόγηση στην αξιοποίηση υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ, που θα υποστηρίζουν τους λήπτες αποφάσεων κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού και της διαχείρισης, ισορροπώντας ανάμεσα στις λειτουργικές αρχές μιας βιώσιμης ανάπτυξης συστημάτων ενεργειακής παραγωγής και θα εκφράζουν τις προτιμήσεις με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας.

Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη για μεθόδους που θα είναι σε θέση να αναλύσουν σύνθετα προβλήματα, με πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια υπό αβεβαιότητα, για τον προσδιορισμό λύσεων αποδεκτών από όλους τους ενδιαφερόμενους. Τέτοιες μέθοδοι είναι απαραίτητες για να συμπληρώσουν το κενό στις προτιμήσεις των γνώσεων των εμπειρογνωμόνων, χρησιμοποιώντας μεθόδους που περιέχουν γλωσσικούς όρους αλλά και αριθμητικές αξίες.

## 1.5 Σκοπός και Στόχοι

Ο γενικός στόχος μπορεί να συνοψιστεί ως ο ορισμός μιας νέας εργαλειοθήκης ικανής να διαχειριστεί ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες και να απεικονίσει τις δυνατότητες των μεθόδων μέσω εφαρμογών σε προβλήματα αξιολόγησης υπεράκτιων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό, εξετάστηκαν οι ακόλουθοι ειδικοί στόχοι:

1. Η μελέτη σε διαφορετικές τεχνολογίες υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ.
2. Η ανάλυση στα κύρια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα προβλήματα που περιλαμβάνουν τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές.
3. Η ανάλυση σε υπάρχουσες μεθόδους λήψης αποφάσεων και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, καθώς και της εγκυρότητας διαφορετικών προσεγγίσεων με MCDM.

4. Να εξεταστούν πειραματικά παραδείγματα για τη σύγκριση των μεθόδων MCDM. Αυτά τα πειράματα, μαζί με τις αναθεωρήσεις που υιοθετήθηκαν, βοήθησαν στην ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου.
5. Η εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθόδων σε πραγματικές περιπτώσεις στην πλωτή αυτόνομη οικολογική μονάδα αφαλάτωσης.

Η γενική προσέγγιση της πρότασης είναι να καλύψει την έλλειψη μιας ολοκληρωμένης εργαλειοθήκης μεθοδολογιών σε θέματα που σχετίζονται με την αξιολόγηση υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, με την ανάπτυξη ενός ικανού πλαισίου στήριξης λήψης αποφάσεων. Το πλαίσιο αυτό πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις τεχνολογικές ιδιαιτερότητες, τις αξίες και τις προοπτικές ποικίλων συμμετεχόντων, ενώ παράλληλα πρέπει να συνάδει με τους στόχους που θέτονται για περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική αειφόρο ανάπτυξη. Η χρήση ποιοτικών και ποσοτικών μεταβλητών θα ενισχύσει τις αξιολογήσεις των εμπειρογνωμόνων και θα βοηθήσει τους λήπτες αποφάσεων να κατανοήσουν καλύτερα τη συνάφεια των σχετικών κριτηρίων, ώστε να βελτιώσουν τη λήψη αποφάσεων.

## 1.6 Συνεισφορά

Στην εργασία αναπτύσσεται μια εργαλειοθήκη μεθοδολογιών λήψης αποφάσεων. Σκοπός είναι, να δοθεί στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων η δυνατότητα να ξεπεράσουν την αβεβαιότητα, χρησιμοποιώντας ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά στη διερεύνηση για τη λύση των προβλημάτων υπεράκτιων συστημάτων. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη ότι, οι υπεύθυνοι στη λήψη αποφάσεων επιλέγουν να χρησιμοποιούν μεθόδους που είναι κατανοητές και εύκολες στη χρήση. Συνοψίζοντας, η συμβολή της παρούσας εργασίας αφορά στα εξής πεδία:

1. Στη διερεύνηση της αξιοπιστίας στην ανάλυση της ανάπτυξης υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης του διαθέσιμου δυναμικού ΑΠΕ με την εφαρμογή FMEA.

2. Στη χρήση σύγχρονων εργαλείων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ.

3. Στη δημιουργία μιας νέας εργαλειοθήκης με ποιοτικές και ποσοτικές μεθόδους για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων υπό αβεβαιότητα, όπως τα προβλήματα υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης του διαθέσιμου δυναμικού ΑΠΕ.

4. Στη χρήση υβριδικών μεθόδων AHP και TOPSIS σε υπεράκτιες κατασκευές και

5. στην εφαρμογή των προτεινόμενων εργαλείων της εργαλειοθήκης μεθοδολογιών σε διαφορετικά συστήματα ενεργειακής παραγωγής, για να αναδειχθούν οι δυνατότητές τους και η ευκολία χρήσης τους.

Στο ευρύτερο πλαίσιο της συνεισφοράς στον χώρο της αξιολόγησης της αξιοπιστίας και την αποδοτικότητας υπεράκτιων συστημάτων με την χρήση πολλαπλών κριτηρίων και αβεβαιότητας στη στήριξη αποφάσεων των υπευθύνων, δημοσιεύτηκαν οι ακόλουθες επιστημονικές εργασίες:

1. Dagkinis, I., Leventakis, G., Nikitakos, N., (2018). "Reliability evaluation of an offshore platform using FMEA enhanced by TOPSIS". 54th ESREDA Seminar on risk, reliability and safety of energy systems in coastal and marine environments. Nantes. France. (in press)
2. Dagkinis, I., Leventakis, G., Nikitakos, N., (2017). "Evolution of remote performance monitoring in ship's safety decision making reinforced by Analytic Hierarchy Process "Enhancing Safety: the Challenge of Foresight, EC Joint Research Center, Ispra, Italy. pp. 261-272.
3. Dagkinis, I., & Nikitakos, N., (2016). Reliability Assessment of Offshore Floating Renewable Structures by Ahp Methodology. Global Journal of Management and Business Research. Vol 15 Issue 4. pp. 8-13
4. Stefanakou, A., Dagkinis, I., Lilas, T., Maglara, A., & Vatistas, A., (2016). Development of a floating wind-desalination multi-use platform (MUP) in the context of optimal use of maritime space. In Offshore energy and storage symposium (OSES) and industry connector event.
5. Dagkinis, I., & Nikitakos, N., (2016). TOPSIS method implementation on slow steaming alternatives evaluation. In Maritime Technology and Engineering III: Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering (MARTECH 2016, Lisbon, Portugal, 4-6 July 2016), CRC Press, (pp. 125-132).
6. Dagkinis I., Lilas T., Nikitakos N., Maglara A., Pavlogeorgatos G., (2015). Evolvement of Autonomous Offshore Ecological Sea Water Reverse Osmosis System. 14th

International Conference on Environmental Science and Technology (CEST 2015), 3-5 September 2015, Rhodes, Greece (in Press).

7. Dagkinis, I., & Nikitakos, N., (2015). Slow steaming options investigation using multi criteria decision analysis method. ECONSHIP 2015 Chios Greece.
8. Dagkinis, I., & Nikitakos, N., (2013). "Enhance of ship safety based on maintenance strategies by applying of Analytic Hierarchy Process". SPOUDAI, Journal of Economics and Business, SPOUDAI Journal, Vol.63 (2013), Issue 3, pp. 26-36
9. Dagkinis, I., & Nikitakos, N., (2013). "Application of Analytic Hierarchy Process & TOPSIS methodology on ships' maintenance strategies"Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars, Volume 4, pp. 21-27
10. Dagkinis, I., Lilas, T., Nikitakos, N., (2013). "Application of FMEA to an Offshore Desalination Plant under Variable Environmental Conditions". International Journal of Performability Engineering. Volume 9, Number 1 Paper 09 - pp. 97-108
11. Kostis, T., Goudosis, A., Dagkinis, I., Volos, C., Nikitakos, N., (2013). "Wind Turbines & Weather Radar: A Review of the Problem" 2nd International Conference on Applied and Computational Mathematics (ICACM '13)
12. Lilas, T., Dagkinis, I., Nikitakos, N., and Athanasios A., (2012). "Green Offshore Structures Promising Viable Utilization of Shipyard Facilities" Journal of Shipping and Ocean Engineering, Volume 2.
13. Dagkinis, I., Lilas, T., Nikitakos, N., (2012). "Operational failure prevention methodology for offshore systems using multiple criteria decision-making process" Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars, Volume 3, pp. 15-21
14. Dagkinis, I., Lilas, T., Nikitakos, N., (2011). "Apply FMEA modelling to a Floating Ecological Desalination Unit" Summer Safety and Reliability Seminars, Gdańsk-Sopot, Poland pp. 79-81

## 1.7 Διάρθρωση της διατριβής

Η ανάπτυξη της έρευνας, με σκοπό την εκπόνηση μιας νέας εργαλειοθήκης μεθοδολογιών πολλαπλών κριτηρίων για την αξιολόγηση των επιδόσεων των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα του προβλήματος λήψης αποφάσεων, διαρθρώνεται ως εξής:

Το ***Κεφάλαιο 1,*** αποτελεί συνοπτική αναφορά στο πρόβλημα και παρουσιάζεται για την ανάγκη ανάπτυξης ενός μεθοδολογικού πλαισίου στήριξης αποφάσεων για υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ. Περαιτέρω, αναφέρεται το γενικό θεωρητικό πλαίσιο, οι γενικοί και ειδικοί στόχοι, τα κίνητρα και η συμβολή της διατριβής.

Στο ***Κεφάλαιο 2***, περιγράφεται το εννοιολογικό πλαίσιο που σχετίζεται με τον κίνδυνο, την αξιολόγηση, την αξιοπιστία που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση υπεράκτιων συστημάτων.

Στο ***Κεφάλαιο 3,*** αναλύεται το υπόβαθρο για τη διερεύνηση στη λήψη αποφάσεων και των μεθοδολογιών-τεχνικών που την υποστηρίζουν, κατηγοριοποιούνται και προσδιορίζεται το πλαίσιο αναφοράς τους. Στη συνέχεια, μέσα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση τόσο των μεθόδων όσο και των προβλημάτων που μπορούν να αντιμετωπιστούν, προσδιορίζονται τα πεδία εφαρμογής τους που έχουν σχέση με τις ΑΠΕ και τις εφαρμογές τους σε συστήματα αξιοποίησής τους.

Στο ***Κεφάλαιο 4,*** πραγματοποιείται αναφορά στο σύγχρονο περιβάλλον του ενεργειακού τομέα, ενώ παρουσιάζονται οι καινοτόμες τεχνολογίες που αξιοποιούν το δυναμικό των ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον, το οποίο όπως αναλύεται από τη διερεύνηση των τεχνολογιών είναι ικανό να ανταποκριθεί στις ενεργειακές ανάγκες. Με την παρουσίαση των τεχνολογιών που αξιοποιούν το ενεργειακό δυναμικό στο θαλάσσιο περιβάλλον και των δυνατοτήτων τους στην προσέγγιση της βιώσιμης ενεργειακής παραγωγής, προσδιορίζεται η ικανότητά τους να αξιοποιήσουν το μεγάλο ενεργειακό δυναμικό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, κάτι που φαίνεται και από τις σχέσεις που προσδιορίζουν την απόδοση των συστημάτων.

Στο ***Κεφάλαιο 5*** πραγματοποιείται ο καθορισμός του προβλήματος και η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται εργαλεία που αξιοποιούνται στο ερευνητικό πλαίσιο της διατριβής και αφορούν σε τεχνικές αξιοπιστίας για την αξιολόγηση των υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, καθώς και μεθοδολογίες αξιολόγησης και ενίσχυσης των υπευθύνων, αλλά και των εμπλεκομένων σε λήψεις αποφάσεων.

Η προτεινόμενη εργαλειοθήκη μεθοδολογιών, εφαρμόζεται στο ***Κεφάλαιο 6,*** για την επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων, των πλέον βιώσιμων τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Περιγράφεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία, τα επιμέρους βήματα-συνιστώσες της, οι πρωτότυπες πολυκριτηριακές μέθοδοι και οι εφαρμογές στην αξιολόγηση υπεράκτιων συστημάτων που παρουσιάζονται ως ενδεικτικά παραδείγματα. Επιπλέον, παρουσιάζονται περιπτωσιολογικές μελέτες συνδυασμού τεχνολογιών και εργαλείων, στην πλωτή οικολογική αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης και σε λειτουργικές και διαχειριστικές διαδικασίες σε πλοία, και τέλος

στο ***Κεφάλαιο 7,*** εξάγονται συμπεράσματα που προκύπτουν απ' τη διδακτορική διατριβή και κατατίθενται σκέψεις και υποβάλλονται προτάσεις προοπτικής για περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες.

# Κεφάλαιο 2

## 2.1 Εισαγωγή

Στην κεφάλαιο αυτό αναπτύσσονται οι βασικές έννοιες του θεωρητικού υποβάθρου θέματα που σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο μέσα στα οποίο θα κινηθεί η παρούσα ερευνητική προσπάθεια. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Την έννοια του κινδύνου
- Την αξιολόγηση
- Τη λήψης αποφάσεων
- Την επικινδυνότητα[1]
- Την αξιοπιστία
- Τις μεθοδολογίες αξιολόγησης κινδύνων

Με αυτό τον τρόπο προσεγγίζονται τα σχετικά ζητήματα με τα σημαντικότερα πεδία που κινείται η σύγχρονη έρευνα, και αποκαλύπτονται θέματα τα οποία πρέπει να εξεταστούν, οριοθετώντας την ανάγκη για αξιολόγηση των υπεράκτιων Συστημάτων Αξιοποίησης του Δυναμικού ΑΠΕ (ΣΑΔ-ΑΠΕ).

## 2.2 Κίνδυνος

Τον όρο *κίνδυνος ο* κάθε άνθρωπος τον αντιλαμβάνεται ως μια έννοια αρνητική που ενέχει μορφή *απειλής* (Henley, 1981). Για την πλειοψηφία των ανθρώπων ο κίνδυνος αποτελεί κάτι το «*αρνητικό*» ή κάτι «*κακό*». Παρόλα αυτά, κάθε ανθρώπινη προσπάθεια περιλαμβάνει στοιχεία κινδύνου (Chapman, 1998). Στο χώρο όμως των επιχειρήσεων και των κατασκευών, ο κίνδυνος λαμβάνεται περισσότερο ως *ευκαιρία για ανάπτυξη,* ή η έναρξη μιας προσπάθειας σε κάτι νέο, δηλαδή κάτι θετικό. Αυτό προκύπτει διότι στην πλειοψηφία των *επιχειρηματικών δραστηριοτήτων,* σε οποιοδήποτε επιχειρηματικό περιβάλλον, το μέγεθος του κινδύνου ή το πλήθος αυτών είναι ισοδύναμο του μεγέθους ή του πλήθους των πλεονεκτημάτων που αποκομίζοντε ως αποτέλεσμά του (Labuschagne and Eloff 2000).

[1] Η έννοια των όρων κίνδυνος και επικινδυνότητα στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται ως risk. Γι' αυτό στην εργασία όπου συναντώνται οι όροι κίνδυνος και επικινδυνότητα αφορούν στον αγγλικό όρο risk.

Κίνδυνος υφίσταται ενσυνείδητα ή ασυνείδητα στα περισσότερα επιστημονικά πεδία. Σχετικά παραδείγματα υπάρχουν πολλά (Maslow, 1943) και αναφέρονται:

- στη *διαχείριση έργων*, όπου γίνεται ανάλυση και διαχείριση κινδύνων σε κάθε έργο, εφόσον το μέγεθος της επιτυχίας από την ανάπτυξη ενός έργου βρίσκεται σε αναλογία με την αρχική έκθεσή του σε κινδύνους (Tatsiopoulos, et al. 2003).
- σε *περιβαλλοντικά έργα*, που αφορά σε εκτιμήσεις αποφάσεων σχετικά με την επίδραση των επιχειρήσεων στο περιβάλλον, ανάλυση των αντιδράσεων της κοινωνίας, κόστος και όφελος από τις ενέργειες που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο της επιχειρηματικής δραστηριότητας κ.α. (Ponis, 2004), (Hattis, 1999).
- στην *οικονομία*, όπου ένας *ειδικός μαθηματικός κλάδος* έχει αναπτυχθεί και ασχολείται με τη δημιουργία μοντέλων οικονομικής πρόβλεψης, μέσω της διαχείρισης κινδύνων και της αβεβαιότητας (Alexander, 1999).
- στην *ασφάλεια εργασίας*, όπου οι πιθανοί κίνδυνοι αξιολογούνται, δεδομένου ότι μετά τη δεκαετία του ΄60, οι εργαζόμενοι έπαψαν να θεωρούνται «*αναλώσιμοι πόροι*» και αντιμετωπίζονται σταδιακά ως η μεγαλύτερη *αξία* και το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε μια επιχείρηση (διανοητικό κεφάλαιο) (Hale 2002), (Kirwan 1998).
- στη *νομική επιστήμη* όπου χρησιμοποιούνται ευρέως «*λογικές*» σχετικές με τους κινδύνους που εφαρμόζονται σε μοντέλα απόφασης σε κινήσεις κάποιου δικαστικού αγώνα (*αντιδικία*) ή για συμβιβασμό. Τέτοιες αποφάσεις ενδέχεται να επηρεάζονται από παράγοντες όπως το καθαρό κέρδος ή ζημία από την αντιδικία, και αντίστοιχα από το συμβιβασμό, καθώς και την πιθανότητα καταδίκης (Κηρυττόπουλος, 2006).
- στη *πολιτική επιστήμη, όπου* χρησιμοποιούνται αντίστοιχοι συλλογισμοί στη λήψη πολιτικών αποφάσεων σε κυβερνητικά ή μη κυβερνητικά κλιμάκια. Για παράδειγμα, αποφάσεις που είναι κρίσιμες ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγάλο *πολιτικό κόστος,* επόμενος ο βαθμός επικινδυνότητας σταθμίζει τις αποφάσεις πόσο «*επικίνδυνες*» μπορεί να αποδειχθούν για τη βιωσιμότητα μιας κυβέρνησης (Bier, 2001).

Υπάρχουν διάφοροι *ορισμοί* για τον κίνδυνο (Kumar, 2002). Σύμφωνα με το *Project Management Institute - PMI (Ινστιτούτο Διαχείρισης Έργων*), δίνεται ο παρακάτω ορισμός:

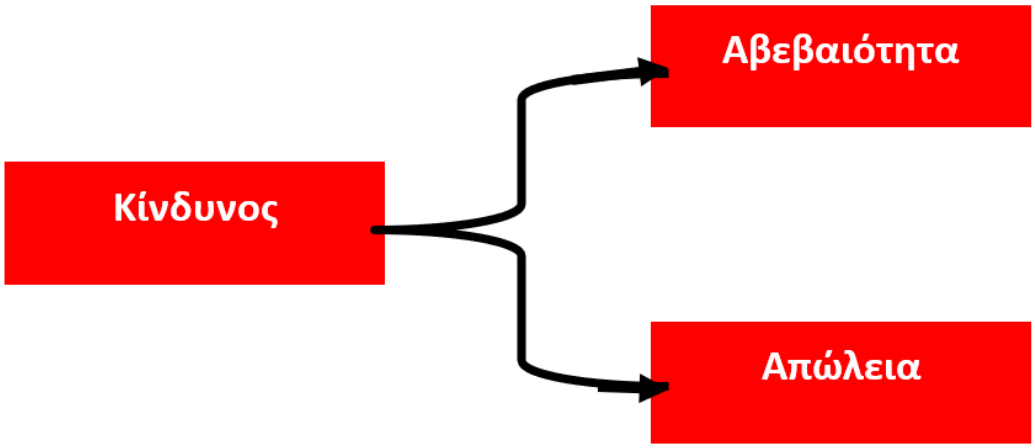
«*Κίνδυνος είναι ένα αβέβαιο γεγονός ή μια κατάσταση η οποία σε περίπτωση που προκύψει, έχει θετική ή αρνητική επίπτωση σε κάποιο στόχο του έργου*».

Κατά το PMI, οι κίνδυνοι πηγάζουν από *αβεβαιότητα,* που είναι πάντα παρούσα στην ανάπτυξη έργων. *Γνωστοί,* είναι οι κίνδυνοι που μπορεί να αναγνωριστούν, να αναλυθούν και να σχεδιαστούν εναλλακτικές δράσεις στην περίπτωση που αυτοί εμφανιστούν. Όταν είναι άγνωστοι, οι κίνδυνοι, τότε δεν μπορεί να γίνει διαχείριση εκ των προτέρων, γι' αυτό κάθε ομάδα έργου πρέπει να σχεδιάσει ένα σχέδιο έκτακτης ανάγκης. Επίσης, σημειώνεται (από το PMI) ότι, οι κίνδυνοι μπορούν να έχουν περισσότερες από μία αιτίες και να έχουν έκβαση σε περισσότερους παράγοντες ή αντικειμενικούς στόχους, όπως: κ*όστος, χρόνος, αντικείμενο έργου*, ή *ποιότητα*.

Ο κίνδυνος μπορεί να ορισθεί και ως ο *συνδυασμός* της πιθανότητας ενός γεγονότος και των συνεπειών του. Γεγονότα και συνέπειες υπάρχουν σε όλους τους τύπους των δραστηριοτήτων, ενώ υπάρχει το ενδεχόμενο να συνιστούν ευκαιρίες προς *όφελος (upside*) ή απειλές της *επιτυχίας (κατηφορική συνέπεια, downside*).

Σύμφωνα με τον Pressman, (1997) (σχ. 2.1), διατυπώθηκε ότι ο κίνδυνος περιλαμβάνει πάντα δύο βασικά χαρακτηριστικά:

- την *αβεβαιότητα (uncertainty*), που αφορά το γεγονός που χαρακτηρίζει ότι ο κίνδυνος μπορεί ή δεν μπορεί να συμβεί, και
- την *απώλεια (loss*), που αφορά την πιθανότητα ο κίνδυνος να λάβει χώρα, ποιες ανεπιθύμητες συνέπειες ή απώλειες θα προκύψουν.




**Σχήμα 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά του Κινδύνου (προσαρμογή από Pressman 1997).**

Στον τομέα των κατασκευών υπάρχει ο *κίνδυνος της αποτυχίας-βλάβης (failure risk),* που αφορά το *ρίσκο (danger*) και περιλαμβάνει ένα αρνητικό αποτέλεσμα. Αν εξεταστεί από την πλευρά του *επενδυτή* αυτό συνεπάγεται ότι όταν αγοράζει ένα προϊόν, μπορεί να παραλάβει κάτι διαφορετικό που δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του ή δεν έχει την αναμενόμενη απόδοση. Από την πλευρά του κατασκευαστή, υπάρχει ο κίνδυνος να μην λάβει το αντίστοιχο *αντίτιμο (πληρωμή*) παρόλο που πρόσφερε τα αντίστοιχα προϊόντα. Επειδή ο κίνδυνος συνεπάγεται ενδεχόμενη απώλεια, υπάρχουν δύο στοιχεία που οφείλουν να τονιστούν: πρώτον, η π*ιθανότητα* μιας μη ικανοποιητικής απόδοσης και δεύτερον, οι σ*υνέπειες* που επιφέρει. Αυτά, μπορούν να συνοψιστούν στην ακόλουθη σχέση:

$$\textit{Κίνδυνος} = \text{πιθανότητα}^2 * \text{απώλεια}^3 \tag{2.1}$$

Η πιθανότητα του κινδύνου αποτελεί κυρίως μια *Bayesean συνάρτηση πιθανοτήτων (*French, 1993) και διατυπώνεται από τη σχέση:

$$p(S_i|y_i) = \frac{p(S_i)*p(y_i|S_i)}{\sum_{i=1}^{n} p(S_i)*p(y_i|S_i)} \tag{2.2}$$

Η Bayes ανάλυση παρέχει μία ποιο πλήρη ανάλυση και συγκέντρωση συμπερασμάτων υπό την έννοια ότι όλη η γνώση που σχετίζεται με την παράμετρο S η οποία διατίθεται λόγω της a-priori κατανομής και των δεδομένων, αντιπροσωπεύεται από την aposteriori κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι η συνάρτηση f(S|x) «είναι» η ανάλυση και συγκέντρωση συμπερασμάτων. Η προσέγγιση κατά Bayes, ποιοτικά, αρχίζει από μια κατανομή πιθανότητας η οποία περιγράφει το επίπεδο της γνώσης μας αναφορικά με τις άγνωστες παραμέτρους πριν συλλέγουν δεδομένα και στην συνέχεια χρησιμοποιεί τα δεδομένα που παρατίθενται προκειμένου να επαναπροσδιοριστεί η κατανομή αυτή. Η εξίσωση του Bayes μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση:

$$posterior = \frac{likelihood*prior}{evidence} \tag{2.3}$$

[2] μη ικανοποιητικής απόδοσης του προϊόντος
[3] των εμπλεκομένων που επηρεάζονται εάν η έκβαση κριθεί μη ικανοποιητική

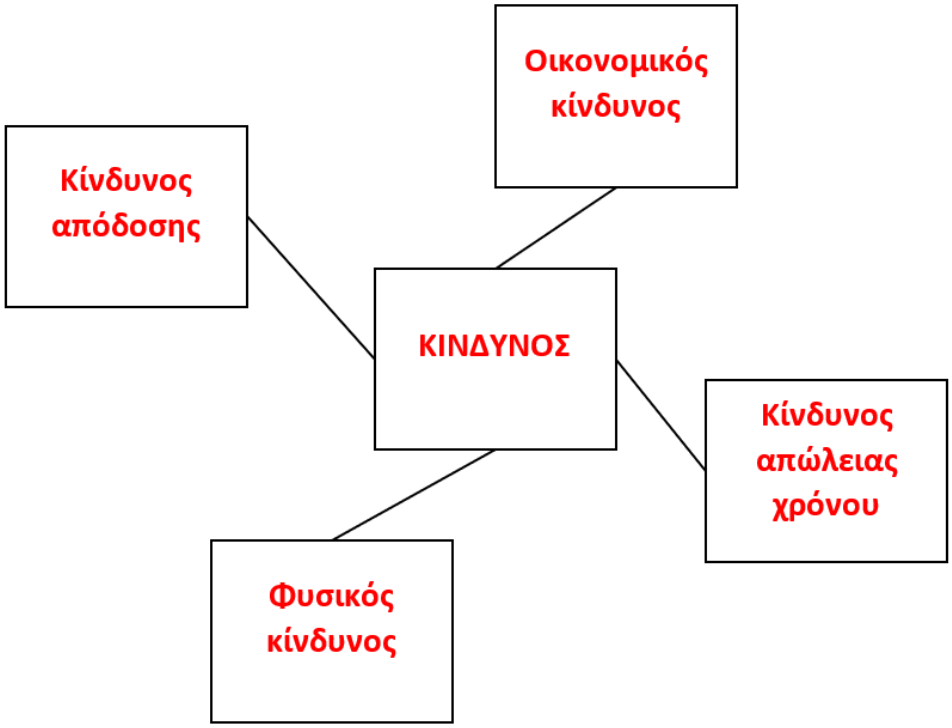
Ο Sakthivel (2002), ορίζει τον κίνδυνο στην ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων ως διαθεσιμότητα ευκαιριών εξοικονόμησης πόρων και ανάπτυξης, όμως ενδέχεται να αυξηθεί ο κίνδυνος μη επίτευξης στόχων ποιότητας, κόστους και προγραμματισμού. Ειδικότερα, ο *κίνδυνος (risk*) είναι η *πιθανότητα μιας αποτυχίας* πολλαπλασιαζόμενη με τις συνέπειες αυτής της αποτυχίας :

$$\text{κίνδυνος} = \text{πιθανότητα (αποτυχίας)} * \text{συνέπεια (αποτυχίας)} \qquad (2.4)$$

Η Αποτυχία περιλαμβάνει οποιοδήποτε γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σε μια επιχείρηση ανάπτυξης υπεράκτιων συστημάτων απώλεια χρημάτων διαμέσου της απώλειας, ή της καταστροφής του συστήματος από απροσδόκητη βλάβη ενός μηχανήματος. Η αξία προκύπτει όταν οι αποτυχίες έχουν συνέπειες, δηλαδή τα μηχανήματα θα πρέπει να έχουν αξία: εγγενή αξία *(intrinsic value*) και *εξαρτημένη αξία (contingent value)*. Υποτίθεται ότι η πιθανότητα μιας αποτυχίας είναι *μη μηδενική (≠0)* και μεταβάλλεται με ένα τρόπο ικανό να προβλεφθεί σε συγκεκριμένο χρόνο.

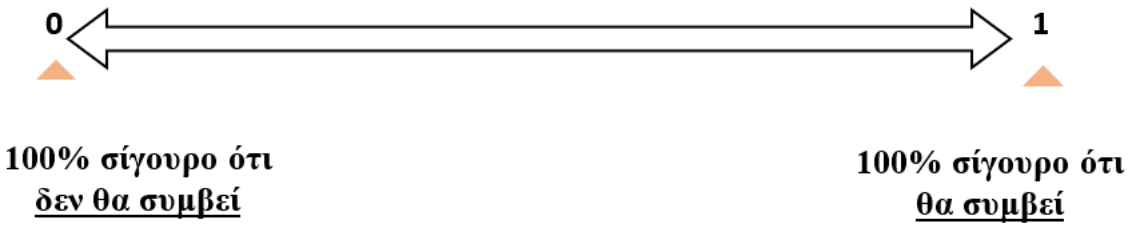
Ο Gerwick, (2007), ορίζει ως κίνδυνο με εφαρμογή στα *υπεράκτια συστήματα*, την *υποκειμενική προσδοκία* απώλειας ή αρνητικών συνεπειών και την διακρίνει σε τέσσερις (4) διαστάσεις κινδύνου (διάγραμμα 2.1):

- *φυσικό κίνδυνο (Physical risk):* αφορά τον κίνδυνο του που οφείλεται στο θαλάσσιο περιβάλλον,
- κί*νδυνος απόδοσης (Performance risk) :* αφορά τον κίνδυνο ότι μία κατασκευή δεν θα μπορέσει να επιτύχει την αναμενόμενη απόδοση,
- οι*κονομικός κίνδυνος (Financial risk):* αφορά τον κίνδυνο της πιθανότητας η ανάπτυξη μιας κατασκευής να οδηγήσει σε οικονομική απώλεια,
- *κίνδυνος απώλειας χρόνου (Time-loss risk):* αφορά τον κίνδυνο ότι μία αποτυχία θα απαιτήσει περισσότερο χρόνο για να αποκατασταθεί και να ολοκληρωθεί.



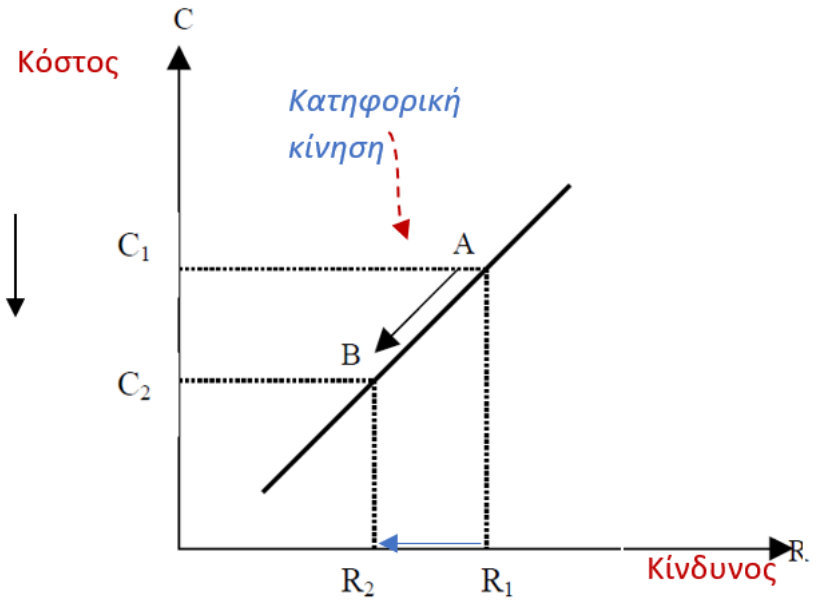

**Διάγραμμα 2.1 Οι τέσσερις διαστάσεις του κινδύνου (Gerwick, 2007)**

Όπως αναφέρθηκε ο κάθε κίνδυνος έχει *κόστος (cost), το οποίο μπορεί* να υπολογισθεί προσεγγιστικά. Ειδικότερα, το κόστος ενός κινδύνου, μπορεί να εκφραστεί ως η πιθανότητα ενός δυσμενούς γεγονότος που παρουσιάζεται στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος, πολλαπλασιαζόμενο με τη *κατηφορική συνέπεια (downside*) του δυσμενούς γεγονότος. Η *πιθανότητα (p)* ενός γεγονότος κυμαίνεται μεταξύ ***1*** (100% σίγουρο ότι θα συμβεί), ενώ ***0*** (100% σίγουρο ότι δεν θα συμβεί) (σχ. 2.2) (Τσιάκη 2005).




**Σχήμα 2.2 Κατανομή πιθανότητας εμφάνισης γεγονότος (κίνδυνος) (προσαρμογή από Τσιάκη 2005).**

Η *συνέπεια* ενός γεγονότος αποτιμάται σε ένα χρηματικό αντίτιμο, που αφορά τη μείωση της επιχειρησιακής αξίας που το γεγονός θα προκαλέσει όταν συμβεί σε μια προσπάθεια. Στο διάγραμμα 2.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση του *κόστους (C)* με τον κίνδυνο *(R)*, όπου όταν μειώνεται ο κίνδυνος ($R_1 \rightarrow R_2$), τότε αντίστοιχα μειώνεται και το κόστος ($C_1 \rightarrow C_2$), θετική επίδραση στο κόστους, καθοδική κίνηση (*A*→*B*) (Τσιάκη 2005):




**Διάγραμμα 2.2 Συσχέτιση Κινδύνου – Κόστους (προσαρμογή από Τσιάκη 2005).**

Περαιτέρω ο κίνδυνος μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση δύο παραμέτρους τη φύση και την προέλευση (διάγραμμα 2.3 - προσαρμογή από Κηρυττόπουλο 2006):

- *Η φύση*, μπορεί να είναι ευκαιρίες ή απειλές, που επηρεάζουν αντίστοιχα θετικά ή αρνητικά, για παράδειγμα κατά τη διαχείριση έργου κάποιους από τους στόχους ανάπτυξής του.
- *Η προέλευση,* που διακρίνεται σε εσωτερικούς ή εξωτερικούς. Για τους εξωτερικούς ειδικά, δεν είναι δυνατό ή υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα να αλλάξει από κάποια ενέργεια ενός οργανισμού η πιθανότητα εμφάνισης.

| | Εξωτερικοί | Εσωτερικοί |
|---|---|---|
| Ευκαιρίες | Αδιάφορο (;) | Πολύ επιθυμητό |
| Απειλές | Ανεπιθύμητο | Πρόβλημα (;) |

**Διάγραμμα 2.3 Διαχωρισμός κινδύνων κατά φύση και προέλευση.**

Στην βιβλιογραφία για την κατηγοριοποίηση των κινδύνων υπάρχουν πολλές μελέτες, όπως εκείνης που τους διαχωρίζει εάν μπορεί να γίνουν αποδεκτοί ή όχι (υποκειμενικό κριτήριο), κινδύνους που έχουν άμεση χρονική επίπτωση ή όχι, και κινδύνους που επαναλαμβάνονται ή συμβαίνουν μία και μόνο φορά (άπαξ) (Kliem, 1997).

Επίσης, ο Turner (1999) διαχωρίζει τον κίνδυνο σε αυτόν που έχει μόνο *αρνητική επίπτωση* (π.χ. αστοχία υλικού) και τον ονομάζει *ασφαλίσιμο (insurable risk*), και σε αυτόν που μπορεί να έχει θετική ή αρνητική επίπτωση, και τον ονομάζει *επιχειρηματικό κίνδυνο (business risk*).

Κάθε κίνδυνος ανεξάρτητα από τη *φύση, την προέλευσή του* ή τον τομέα που *επιδρά*, έχει συγκεκριμένη *κατασκευή*, η οποία περιέχει κάποια στοιχεία που περιλαμβάνου την *αιτία, τον κίνδυνος, τη συνέπεια*. Το κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά *πιθανότητας, βαρύτητας, έκθεσης*. Σε μια πρακτική θεώρηση σχετικά με τη δομή των κινδύνων των στοιχείων που περιλαμβάνονται και τις ιδιότητες που μπορεί να φέρουν παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3 (Κηρυττόπουλος 2006), αναλυτικά για αυτά τα στοιχεία ισχύουν τα ακόλουθα.

**Σχήμα 2.3 Δομή και χαρακτηριστικά κινδύνων.**

Οι *αιτίες,* αποτελούν ένα γεγονός που ενδεχομένως να οδηγήσει στην *εμφάνιση* ενός κινδύνου. Ένας κίνδυνος μπορεί να συμβαίνει διότι πιθανόν να υπάρχουν περισσότερες από μία αιτίες, και αντίστοιχα μια αιτία μπορεί να σχετίζεται σε περισσότερους από ένα κινδύνους. Παρόλα αυτά, ο κίνδυνος είναι ένα «*αβέβαιο*» γεγονός και συνεπώς έχει συγκεκριμένη πιθανότητα εμφάνισης.

Η εμφάνιση καθορίζεται από τις ήδη υπάρχουσες αιτίες και όσο περισσότερες είναι οι αιτίες τόσο μεγαλύτερη θα είναι η πιθανότητα εμφάνισης κινδύνου (Alquier et al. 2000).

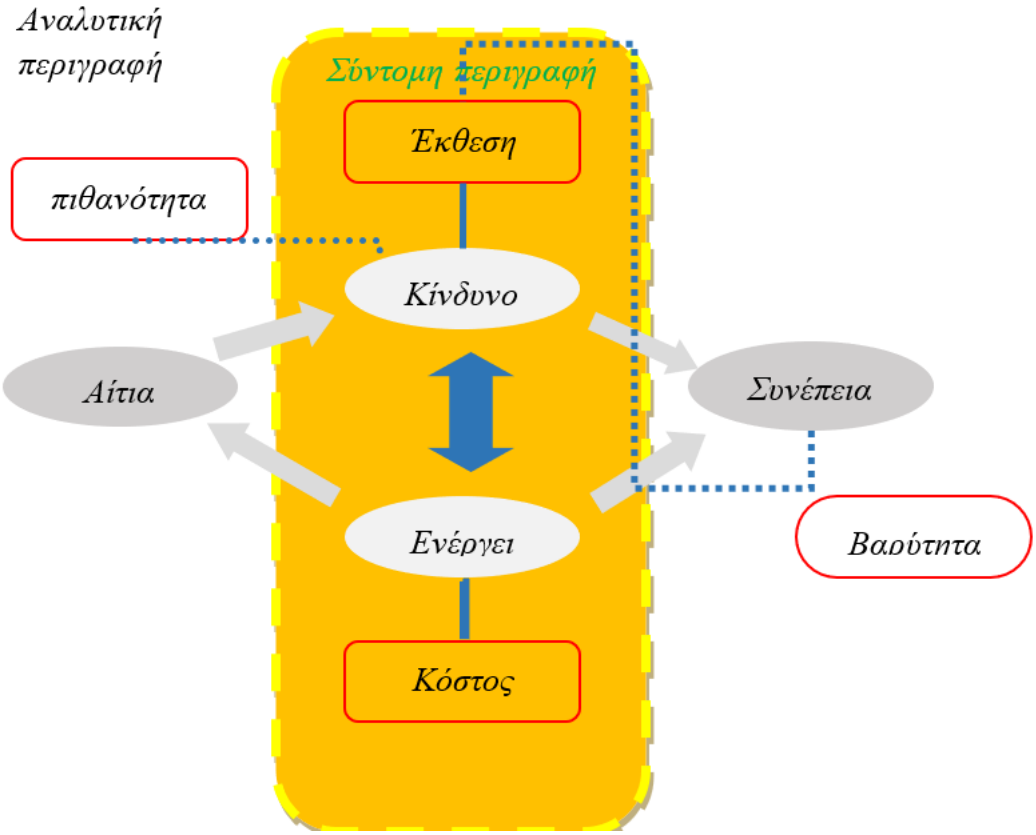
Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του κινδύνου είναι η «*έκθεση» (exposure*), που αναφέρεται στην σημαντικότητα του κάθε κινδύνου και προκύπτει από την πιθανότητα εμφάνισης του κινδύνου και της βαρύτητας της συνέπειας. Η συνέπεια περιγράφεται από το χαρακτηριστικό της βαρύτητας που δείχνει πόσο σημαντική είναι η συνέπεια από ένα κίνδυνο στην περίπτωση που αυτός εμφανιστεί, σε σχέση με το/τους στόχους που έχουν τεθεί (π.χ. σε ένα έργο). Ένας κίνδυνος μπορεί να έχει περισσότερες από μια συνέπειες και μία συνέπεια μπορεί να προκληθεί από περισσότερους από έναν κινδύνους.

Σημειώνεται ότι, η πιθανότητα εμφάνισης, η βαρύτητα της συνέπειας και η έκθεση περιγράφονται είτε ποσοτικά με στοιχεία χρόνου ή κόστους, ενώ όταν η ανάλυση είναι ποιοτική μέσω κλιμάκων. Επίσης, η δομή των κινδύνων ενδέχεται να εμφανίζεται με ελαφρές διαφοροποιήσεις ανά περίπτωση.

Η περιγραφή του κινδύνου μέσω του μοντέλου αιτία-κίνδυνος-συνέπεια αρκετές φορές είναι χρονοβόρα και δύσχρηστη. Σε αυτή την περίπτωση δίνεται η δυνατότητα *σύντομης περιγραφής (Vose, 2008)*, με την οποία ο*μαδοποιούνται* οι αιτίες και οι συνέπειες σε ένα σύνολο, αυτό του κινδύνου (σχ. 2.4). Έτσι, αποφεύγεται η εκτενής ανάλυση σε αίτια και συνέπειες επιτυγχάνοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα που αφορά τη διαχείριση του κινδύνου. Η χρήση μιας σύντομης περιγραφής πραγματοποιείται:

- όταν υπάρχει κρίσιμος χρονικός περιορισμός
- όταν υπάρχει έλλειψη στοιχείων τα οποία απαιτούνται για μεγαλύτερη ανάλυση στην περιγραφή
- όταν κρίνεται ότι η αναλυτική περιγραφή δεν προσθέτει αξία στη διαδικασία διαχείρισης κινδύνου

Τέλος, ένα πρόβλημα, ανεξάρτητα από την περιγραφή που εμφανίζεται συνήθως στη διαχείριση των κινδύνων, αφορά στην ευκολία που η συνέπεια του κινδύνου δύναται να μετατραπεί σε αιτία σε ένα άλλο κίνδυνο, καθώς και η ευκολία να βρεθεί σε μια "αιτία η αιτία". Σε αυτή την περίπτωση η αλληλουχία αιτία-κίνδυνος-συνέπεια ενδέχεται να μεταβληθεί και να παρουσιαστούν ζητήματα που σχετίζονται με την υποθετική αλυσίδα όπου το στοιχείο κινδύνου παρουσιάζεται σε κάθε επίπεδο.




**Σχήμα 2.4 Συσχετισμός στοιχείων δομής κινδύνων (προσαρμογή από Κηρυττόπουλο 2006).**

## 2.3 Αξιολόγηση (Assessment)

Τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζεται ολοένα και μεγαλύτερη απαίτηση για ποιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της αξιοπιστίας (reliability) και της αποδοτικότητας (effectiveness) των υλοποιούμενων κατασκευών και των συστημάτων κάθε μορφής (Vinnem, 2013).

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί ορισμοί της αξιολόγησης, οι οποίοι σχετίζονται με τη μορφή και το είδος της, αλλά και με τα αντικείμενα τα οποία αξιολογούνται, τη συχνότητα

εφαρμογής της, τον τρόπο και το είδος αξιοποίησης των αποτελεσμάτων (Shaw, et al , 2006), (Patton, 2011).

Η αξιολόγηση, σε μια απλή εκδοχή της, μπορεί να οριστεί ως η εκτίμηση της αξίας ενός πράγματος.

Επομένως, η αξιολόγηση ενός έργου ή μιας κατασκευής αποτελείται από τις δραστηριότητες που αποσκοπούν στο να κρίνουν την αξία ή την χρησιμότητα του συγκεκριμένου συστήματος που δημιουργείται σε στάδια ή στο σύνολό του.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η αξιολόγηση των προγραμμάτων – έργων (projects), των κατασκευών και των συστημάτων που έχουν εγκατασταθεί σε αυτά, χρησιμοποιήθηκε ως μέσο προκειμένου να απαντηθούν ερωτήσεις σχετικά με οικονομικά ή άλλα οφέλη που αποκομίστηκαν και από τα χρήματα που δαπανήθηκαν στα διάφορα έργα (Han, Jingyi, 2009), (Just, et. al. 2005), (Venetsanos, et. al. 2002).

Σε ένα ορισμό (Scriven, 2007), η αξιολόγηση θεωρείται ως η διαδικασία προσδιορισμού της αξίας, του βαθμού επίτευξης των στόχων ή το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής. Σύμφωνα με τον ΟΟΣΑ η αξιολόγηση καθορίζεται ως μια συστηματική και αναλυτική αξιολόγηση των επιδόσεων. Επίσης, καθορίζεται ως μία συστηματική και αντικειμενική διαδικασία, η οποία αφορά την εκτίμηση του βαθμού αποτελεσματικότητας (performability) και αποδοτικότητας (efficiency) μιας συγκεκριμένης διαδικασίας και μπορεί να περιλαμβάνει την ανάλυση του τρόπου εφαρμογής και την αποτίμηση της διαχειριστικής διάστασης της συγκεκριμένης δράσης (OECD, 1997).

Περαιτέρω, ένας ορισμός του ΟΟΣΑ, ο οποίος φαίνεται ότι είναι κατάλληλος για την παρούσα μελέτη λόγω της πληρότητας που παρουσιάζει, της ευρύτατης εφαρμογής του, αλλά και της εγκυρότητας που έχει, είναι ο αυτός που αναφέρει ότι «οι αξιολογήσεις συνεχιζόμενων ή ολοκληρωμένων σχεδίων, προγραμμάτων ή πολιτικών αφορούν την εκτίμηση του βαθμού αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού, της υλοποίησης και των αποτελεσμάτων των δράσεων ή των συστημάτων αυτών».

Σκοπός των αξιολογήσεων είναι ο προσδιορισμός της καταλληλότητας και της εκπλήρωσης των στόχων, της αποδοτικότητας, της εξέλιξης και της αποτελεσματικότητάς τους, της επίδρασης που ασκούν, καθώς και της βιωσιμότητάς τους (OECD, 2006), (OECD, 2009b).

Αντίστοιχος ορισμός της UNESCO, παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα με τον προηγούμενο ορισμό του ΟΟΣΑ και αποδίδει με ανάλογο τρόπο τον ορισμό της αξιολόγησης. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει ότι η αξιολόγηση μπορεί να οριστεί ως «η συστηματική λειτουργία διαφορετικών πολυπλοκοτήτων, περιλαμβανομένων της συλλογής δεδομένων, των παρατηρήσεων και αναλύσεων, η οποία πιστοποιείται με αξιολογικές κρίσεις όσον αφορά την ποιότητα του έργου που αξιολογείται στο σύνολό του ως προς ένα ή περισσότερα συστατικά του στοιχεία». Η αξιολόγηση πρέπει να καταλήγει σε μια αξιολογική κρίση, η οποία βασίζεται σε έγκυρα και αξιόπιστα ποιοτικά ή ποσοτικά κριτήρια και δεδομένα όπως και σε κάθε περίπτωση σε δεδομένα που συγκεντρώθηκαν σε ένα αυστηρό, αντικειμενικό και επιστημονικό πλαίσιο (UNESCO).

Κάτω από αυτό το πρίσμα πολλοί ερευνητές (Rossi, et. al. 2003), (Geuna, et.al. 2003) αναφέρουν ότι οι αξιολογήσεις πρέπει να είναι αναλυτικές, συστηματικές, θεμελιωμένες, να χρησιμοποιούνται αναγνωρισμένες τεχνικές, να απαιτείται αυστηρός σχεδιασμός, σωστή χρήση των μεθόδων που επιλέγονται και να είναι μεθοδολογικά και ερευνητικά έγκυρες. Επίσης, οι αξιολογήσεις πρέπει να έχουν συγκεκριμένο σκοπό, να στοχεύουν στην επεξεργασία των βασικών ερωτημάτων του προς αξιολόγηση έργου, συμπεριλαμβανομένης της καταλληλότητας της σαφήνειας, της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας, ενώ θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένες στις ανάγκες των χρηστών, λαμβάνοντας υπόψη τις πολιτικές συγκυρίες και τους διαθέσιμους πόρους.

Η αξιολόγηση ορίζεται επίσης (Hockings, 2006), (Humphreys, et. al. 2003) και ως η συστηματική εκτίμηση και ανάδειξη της αξίας ή η σύγκριση των σκοπών και των στόχων, καθώς και η εκτίμηση της απόδοσης σε σχέση με προκαθορισμένα κριτήρια. Σε αυτή τη βάση, η αξιολόγηση αποτελεί μια διαδικασία με συγκεκριμένους στόχους, σχεδιασμό, τεχνικές, αποτελέσματα, η οποία είναι μεθοδολογικά και ερευνητικά έγκυρη και αξιόπιστη.

Σύμφωνα με τις παραπάνω έννοιες, γίνεται σαφές ότι η αξιολόγηση αναφέρεται στη διαδικασία του προσδιορισμού και την αποτίμησης της αξίας ή της σημασίας που έχει μια δραστηριότητα, μια πολιτική, ένα πρόγραμμα ή ένα έργο.

Έτσι, οι αξιολογήσεις θα πρέπει να παρέχουν πληροφορίες αξιόπιστες, αντικειμενικές και σύμφωνες με τους σκοπούς, τους στόχους και την πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης διαδικασίας, οι οποίες θα επιτρέπουν την ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Περαιτέρω η αξιολόγηση μπορεί να περιλαμβάνει την εκτίμηση των επιδόσεων, των πραγματικών και των αναμενόμενων αποτελεσμάτων (Gibson , 2001), (Patton, 2008).

Διευκρινίζεται ότι, η έννοια της αξιολόγησης αποτελεί έννοια ευρύτερη από αυτή του ελέγχου (monitoring), ενώ με βάση τις κατάλληλες μεθοδολογικές προσεγγίσεις μπορεί να εκτιμηθεί και να βελτιωθεί η απόδοση από μια συγκεκριμένη διαδικασία ή την παραγωγή ενός προϊόντος.

Αυτή η διάκριση μεταξύ του ελέγχου και της αξιολόγησης οδηγεί στη διαπίστωση ότι η αξιολόγηση ορίζεται σε πολλαπλά επίπεδα θεώρησης ως προς το είδος της δραστηριότητας που αξιολογείται (ομάδα-στόχος, διαδικασίες, προγράμματα, έργα, κτλ), ενώ υπάρχουν τομείς στους οποίους έλεγχος και αξιολόγηση μπορούν να βοηθήσουν τη λήψη αποφάσεων και διορθωτικών δράσεων από τους διαχειριστές των υπό αξιολόγηση προγραμμάτων- έργων με στόχο τη συνεχή βελτίωση (Habicht, et. al. 1999), (Owen, et. al. 1999) (Paulk, 1993), (Boulmetis, et. al. 2014), (Tam, et. al. 2004).

Στο γενικευμένο πλαίσιο της αξιολόγησης εντάσσεται και η προσέγγιση που αφορά κατασκευές οι οποίες βρίσκονται, είτε στην ξηρά (onshore structures), είτε είναι επάκτιες (coast line structures), είτε υπεράκτιες (offshore structures), είτε αποτελούν έργα με ώριμες τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί, είτε βρίσκονται σε ερευνητικό (πιλοτικό) στάδιο. Το τελευταίο αποτελεί και το δυσκολότερο πεδίο τόσο κατά την ανάπτυξη των κατασκευών όσο και κατά τη λειτουργία τους.

Τα έργα αυτά σχεδιάζονται, υλοποιούνται, λειτουργούν μέσω σύγχρονων τεχνικών, άρα θα πρέπει και με σύγχρονες τεχνικές να αξιολογούνται. Αυτές οι τεχνικές θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη βασικά χαρακτηριστικά όπως:

- τον τύπο της κατασκευής
- την τεχνολογία που θα εφαρμοστεί
- τον χρόνο εκτέλεσης
- τον τόπο εγκατάστασης
- το κόστος
- την ποιότητα
- το περιβαλλοντικό αποτύπωμα
- την ασφάλεια κ.α.

Το αποτέλεσμα αυτής της αξιολόγησης θα πρέπει να είναι ολοκληρωμένο και να περιλαμβάνει τόσο ποσοτικά (quantitative) όσο και ποιοτικά (qualitative) κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια θα αφορούν μια κατασκευή από το στάδιο σχεδιασμού μέχρι το τέλος της λειτουργικής του ζωής και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη από τους λήπτες αποφάσεων.

## 2.4 Λήψη Αποφάσεων (Decision Making)

Απόφαση (decision) είναι η επιλογή μεταξύ δύο ή περισσοτέρων εναλλακτικών (alternatives) επιλογών-λύσεων που υπάρχουν (π.χ. βιωσιμότητα, τεχνολογία, αποδοχή, περιβαλλοντικό αποτύπωμα κτλ.) ο οποίες είναι ικανές να οδηγήσουν στην βελτίωση της παρούσας κατάστασης ανάλογα με το σχέδιο ή το πεδίο που αφορούν.

Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, η "λήψη των αποφάσεων" (decision making-DM) είναι η διαδικασία επιλογής μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών λύσεων. Η επιλογή αυτή είναι αναγκαία, εξαιτίας της απόστασης που παρατηρείται μεταξύ μιας πραγματικής και μιας επιθυμητής κατάστασης. Η απόσταση μπορεί να είναι ένα πρόβλημα ή μια εναλλακτική λύση για τα οποία θα πρέπει να ληφθεί μια σχετική απόφαση.

Οι εναλλακτικές λύσεις αναφέρονται στον τρόπο, την πορεία, τις ενέργειες, τα μέσα, το χρόνο κτλ., με τα οποία η υπάρχουσα κατάσταση θα οδηγηθεί προς την επιθυμητή ή τη μη επιθυμητή κατάσταση η οποία θα γίνει πραγματικότητα (Anderson, et. al. 2014).

Σε αυτό το πλαίσιο ανήκουν κάποιες αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν σχετικά με την εφαρμογή και την ανάπτυξη κατασκευών αξιοποίησης των ΑΠΕ. Οι αποφάσεις μπορεί να έχουν

διάφορους σκοπούς όπως, τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Reid, 2011), (Viebahn, 2007), την ανάπτυξη συστημάτων εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, την οικονομοτεχνική διερεύνηση των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ (ΣΑΔ-ΑΠΕ) (Pelc, et. al. 1997), (Dincer, 2000) . Επιθυμητή κατάσταση είναι συμβολή στη μείωση αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, η βελτιστοποίηση των συστημάτων, η αύξηση της παραγωγικότητας κ.α..

Οι Barnard και Simon αποδίδουν έναν πληρέστερο ορισμό στη "λήψη αποφάσεων", με προσέγγιση σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της (σχ. 2.5). Υποστηρίζοντας ότι τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

α) Η εξεύρεση ευκαιριών (διαφορά υπάρχουσας-επιθυμητής κατάστασης),

β) Η εξεύρεση πιθανών τρόπων δράσης (εναλλακτικές),

γ) Η επιλογή μεταξύ τρόπων δράσης (απόφαση).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η *λήψη αποφάσεων* αποτελεί μια διανοητική διεργασία η οποία προηγείται της δράσης του ατόμου ή του στελέχους ενός οργανισμού.

**Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστικά της λήψης αποφάσεων**

Η σπουδαιότητά της τόσο για την προσωπική ζωή κάθε ανθρώπου όσο και για επιχειρήσεις ή οργανισμούς είναι προφανής. Κάθε στέλεχος στο επίπεδο της λήψης αποφάσεων (διοικητικό στέλεχος) σπαταλά ένα μεγάλο μέρος του χρόνου του στη λήψη αποφάσεων. Αυτό βέβαια δε σημαίνει ότι κάποιος που λαμβάνει αποφάσεις είναι απαραίτητα διοικητικό στέλεχος. Η διαχείριση (management) είναι εξ ορισμού μια ευρύτερη δραστηριότητα από αυτήν της λήψης αποφάσεων που λαμβάνεται από ένα διοικητικό στέλεχος. Όμως ένα διοικητικό στέλεχος δεν

μπορεί να είναι αποτελεσματικό εάν δεν έχει την ικανότητα να λάβει σωστές αποφάσεις στο σωστό χρόνο.

Βέβαια, η λήψη σωστών αποφάσεων δεν είναι μια «απλή» διανοητική λειτουργία, εφόσον κάθε απόφαση συνήθως απαιτεί ο συνδυασμός από ένα μεγάλο αριθμού πληροφοριών, γνώσεων, χαρακτηριστικών προσωπικότητας, ικανοτήτων, τεχνικών. Επιπλέον, διαταράσσονται ισορροπίες διότι είναι πιθανό να προκληθούν μεγάλες ή μικρές αντιπαραθέσεις, καθώς ενδέχεται η λήψη αποφάσεως να οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία προσδιορίζονται μόνο με μικρή πιθανότητα.

Ωστόσο, παγκοσμίως η αναγκαιότητα των αποφάσεων για την αποτελεσματική λειτουργία και εξέλιξη αναπτυξιακών δραστηριοτήτων και επιχειρηματικών σχεδίων, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες στις οποίες προσκρούει η λήψη σωστών αποφάσεων, οδήγησαν στην έρευνα και τη συστηματοποίηση ενός αρκετά ικανοποιητικού συνόλου σχετικών γνώσεων. Η απόκτηση των γνώσεων αυτών από τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων είναι απαραίτητη. Με τη λήψη αποφάσεων να απαιτεί ειδικές ικανότητες από τα υπευθύνους, αλλά και από όλους τους εμπλεκόμενους σε μια διαδικασία, τις οποίες οφείλουν να αναπτύξουν.

Ως εκ τούτου τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά το σχεδιασμό, την δημιουργία και τη λειτουργία των υπεράκτιων κατασκευών που αποτελούνται από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με ένα σύνολο κριτηρίων λήψης αποφάσεων θα πρέπει να αξιολογούνται και να αναλύονται από λήπτες αποφάσεων που θα χρησιμοποιούν σύγχρονες και έγκυρες μεθόδους και τεχνικές τόσο για την αξιοπιστία τους όσο και για την αποδοτικότητα τους (Santos, et. al. 2002), (Santow, et. al. 2008), (Suwignjo, et. al. 2000), (Stamatis, 2014).

## 2.5 Επικινδυνότητα και Αξιοπιστία

Στη συνέχεια των εννοιών κινδύνου, αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων ουσιαστικός είναι ο προσδιορισμός κάποιων ακόμα εννοιών όπως η επικινδυνότητα και η αξιοπιστία. Διότι το πλήθος των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ που αναπτύχτηκαν τις τελευταίες δεκαετίες και η έκταση των βιομηχανικών εφαρμογών τους, κατέστησε αναγκαία τη διερεύνηση κρίσιμων θεμάτων όπως η ανάλυση και μελέτη από την άποψη των κινδύνων (risk) που εμπεριέχονται σ' αυτά.

Επίσης τα αποτελέσματα από τη λειτουργία τους, δημιούργησαν ερωτηματικά που έπρεπε να απαντηθούν όπως η Αξιοπιστία (reliability), η Αποδοτικότητά τους (Effectiveness) και πως θα μπορούσε να εξασφαλιστεί, η βελτιστοποίηση (optimization) των συστημάτων, καθώς και ο αντίκτυπος από τη λειτουργία τους στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

Η μελέτη της Ανάλυσης Κινδύνων (Risk Analysis) μαζί με τις διεργασίες του προσδιορισμού και της εκτίμησης του κινδύνου συνιστούν την αξιολόγηση/εκτίμηση των επικινδυνότητας (Risk Assessment), ενώ από τη λειτουργική διαδικασία των συστημάτων και την προσπάθεια βελτιστοποίησής τους οι αναλύσεις που αναπτύσσονται μελετώνται σύμφωνα με την αξιοπιστία τους (reliability).

Οι έννοιες, όπως η Ανάλυση Κινδύνων (Risk Analysis) και η Αξιοπιστία (η οποία στη διεθνή βιβλιογραφία εκφράζεται με όρους όπως αξιοπιστία (Reliability ή ακόμα και *dependability*), χρησιμοποιήθηκαν χωρίς σαφή ορισμό. Όμως, όταν οι λέξεις χρησιμοποιούνται χωρίς σαφή ορισμό, οι έννοιες γίνονται ασαφής, η σκέψη είναι ασαφής, η επικοινωνία είναι αμφιλεγόμενη και οι αποφάσεις και οι ενέργειες δεν είναι οι ιδανικές, (Kaplan, 1990). Ως εκ τούτου είναι ιδιαιτέρως σημαντικό όλες οι βασικές έννοιες να ορίζονται με σαφή τρόπο.

Γι’ αυτό, πριν την περιγραφή των διαφόρων μεθόδων που εφαρμόζονται, στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας για την ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου ΣΑΔ-ΑΠΕ, είναι απαραίτητο να διευκρινιστούν οι βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται.

Έννοιες, που μερικές από αυτές αναπτύχθηκαν σταδιακά τα τελευταία είκοσι χρόνια (Villemeur, 1999). Στην περιγραφή περιλαμβάνονται και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εννοιών με σκοπό την εισαγωγή στις αρχές της *προγνωστικής ανάλυσης της αξιοπιστίας συστημάτων (systems dependability predictive analysis).*

## 2.6 Ανάλυση Κινδύνων (Risk analysis) και Εκτίμηση επικινδυνότητας (Risk assessment)

Οι κίνδυνοι μπορούν να αξιολογηθούν σε επίπεδο οργανωτικό, σε επίπεδο τμημάτων, σε έργα ή προγράμματα, σε επιμέρους δραστηριότητες ή σε συγκεκριμένους κινδύνους, με διάφορα εργαλεία και τεχνικές που θα να είναι κατάλληλα στις διάφορες καταστάσεις.

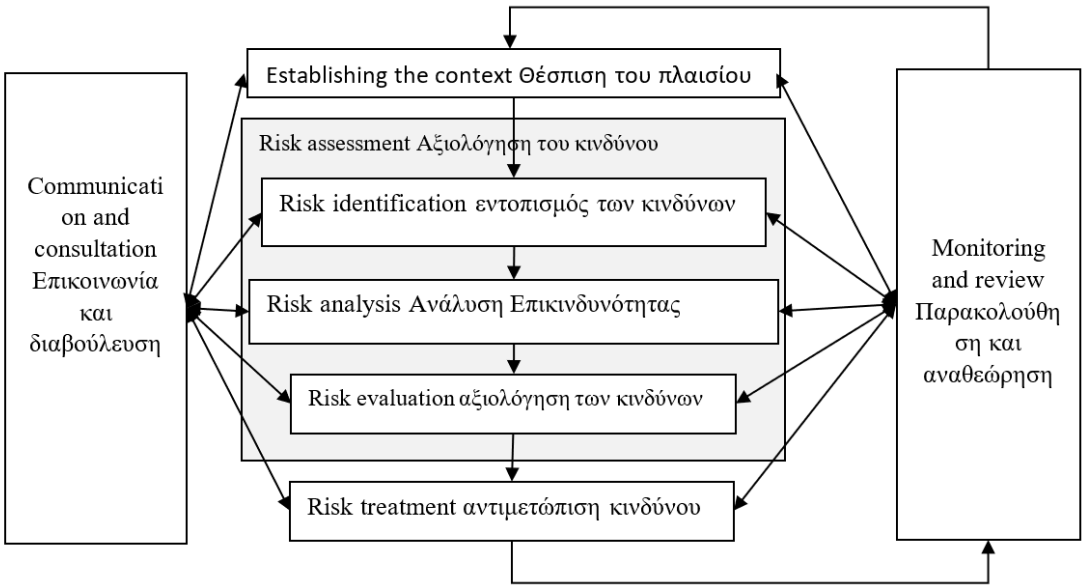
Η αξιολόγηση του κινδύνου, η οποία προέκυψε ως ανάγκη από τα ατυχήματα των τελευταίων ετών μερικά εκ των οποίων ήταν καταστροφικά, είναι η συνολική διαδικασία του προσδιορισμό του κινδύνου, της ανάλυσης και της εκτίμησής του. Παρέχει την κατανόηση των κινδύνων, τα αίτιά τους, τις συνέπειες, τις πιθανότητες τους και στοιχεία για αποφάσεις σχετικά με :

- κατά πόσον θα πρέπει να αναληφθεί μια δραστηριότητα
- πώς να μεγιστοποιηθούν οι ευκαιρίες ανάπτυξης
- πότε οι κίνδυνοι πρέπει να αντιμετωπίζονται
- την επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων με διαφορετικούς κινδύνους
- την ιεράρχηση των επιλογών αντιμετώπισης του κινδύνου
- την πιο κατάλληλη επιλογή των στρατηγικών αντιμετώπισης κινδύνου που θα αποφέρουν αναπόφευκτους κινδύνους σε ανεκτό επίπεδο.

Η *εκτίμηση επικινδυνότητας (*risk assessment) παρέχει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων μία βελτιωμένη κατανόηση των κινδύνων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την επίτευξη των στόχων, καθώς και την επάρκεια και την αποτελεσματικότητα των ελέγχων που ήδη εφαρμόζονται. Η εκτίμηση επικινδυνότητας[4] αποτελεί ένα εργαλείο αξιολόγησης του μεγέθους του κινδύνου (Mousiopoulos, et. al. 2015). Αυτό δημιουργεί τη βάση στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την πλέον κατάλληλη προσέγγιση που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των κινδύνων, ενώ τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του κινδύνου συμβάλουν αποτελεσματικά στη λήψη αποφάσεων των εμπλεκόμενων μερών σε μια διαδικασία.

Ως εκ τούτου η εκτίμηση της επικινδυνότητας είναι η συνολική διαδικασία στον προσδιορισμό του κινδύνου (risk identification), την ανάλυση του κινδύνου (risk analysis) και την αξιολόγησή του (risk evaluation) (διάγραμμα 2.4).

[4] Ο ρόλος της εκτίμησης επικινδυνότητας και της διαχείρισης επικινδυνότητας στη λήψη αποφάσεων άρχισε να γίνεται αποδεκτός μόλις στη δεκαετία του ’80 και αυτό όταν ξεκίνησε να αναγνωρίζεται το πρόβλημα των τοξικών αποβλήτων και να αναζητούνται λύσεις.




**Διάγραμμα 2.4 Συμβολή της εκτίμησης των κινδύνων στη διαδικασία διαχείρισης των κινδύνων (προσαρμογή από IEC-FD, 2009)**

Σκοπός της εκτίμησης της επικινδυνότητας είναι, η παροχή τεκμηριωμένων πληροφοριών και η ανάλυση ώστε να παρθούν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τον τρόπο που θα αντιμετωπιστούν ιδιαιτέρα επικίνδυνες καταστάσεις καθώς και η λήψη της κατάλληλης απόφασης μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών λύσεων. Ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται η διαδικασία εξαρτάται όχι μόνο από το πλαίσιο των διεργασιών της διαχείρισης κινδύνων, αλλά και από τις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη διεξαγωγή της εκτίμησής τους.

Μερικά από τα κύρια οφέλη από την εκτέλεση της εκτίμησης της επικινδυνότητας, όπως αναφέρονται στο IEC (International Electrotechnical Commission)- Final Draft International Standard, 2009, είναι:

- Η κατανόηση του κινδύνου και των πιθανών επιπτώσεων σε συστήματα ή αντικείμενα
- Η παροχή πληροφοριών για τους ιθύνοντες
- Η συμβολή στην κατανόηση των κινδύνων, προκειμένου να βοηθήσει την επιλογή του τρόπου αντιμετώπισης

- Ο προσδιορισμός σημαντικών συντελεστών σε κινδύνους και των αδύναμων κρίκων σε συστήματα και οργανισμούς
- Η σύγκριση των κινδύνων σε εναλλακτικά συστήματα, τεχνολογίες ή προσεγγίσεις
- Η παροχή βοηθείας στον καθορισμό των προτεραιοτήτων
- Οι κίνδυνοι στην επικοινωνία και σε αβεβαιότητες
- Η συμβολή στην πρόληψη συμβάντων που βασίζονται στη διερεύνηση μετά το συμβάν
- Η επιλογή των διαφόρων μορφών αντιμετώπισης του κινδύνου
- Η τήρηση στις απαιτήσεις των ρυθμιστικών αρχών
- Η παροχή πληροφοριών που θα βοηθήσουν στο να αξιολογηθεί κατά πόσον θα πρέπει να γίνει αποδεκτός ο κίνδυνος, σε σύγκριση με προκαθορισμένα κριτήρια
- Η αξιολόγηση των κινδύνων για τη διάθεση ενός συστήματος μετά το τέλος του κύκλου ζωής του.

Βέβαια η εκτίμηση της επικινδυνότητας δεν είναι αυτοτελής διαδικασία, ειδικά σε έργα όπως η κατασκευή και διαχείριση ΣΑΔ-ΑΠΕ. Για μια ολοκληρωμένη διαδικασία θα πρέπει να ενσωματωθεί πλήρως σε όλες τις άλλες συνιστώσες της διαδικασίας διαχείρισης των κινδύνων (risk management process). Οι συνιστώσες αυτές είναι:

- Η *Επικοινωνία και διαβούλευση* με τους ενδιαφερόμενους φορείς. Η συμμετοχή των φορέων στη διαδικασία διαχείρισης κινδύνου βοηθάει στην ανάπτυξη ενός επικοινωνιακού σχεδίου, με καθορισμό του κατάλληλου πλαισίου, εξασφαλίζοντας ότι οι διαφορετικές απόψεις λαμβάνονται υπόψη, οι κίνδυνοι εντοπίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό και έχει εξασφαλιστεί η έγκριση και η υποστήριξη του σχεδίου. Η επικοινωνία και διαβούλευση διασυνδέει την αξιολόγηση των κινδύνων με άλλους κλάδους της διαχείρισης συμπεριλαμβάνοντας στη διαδικασία τις αλλαγές των διαχειριστών, την ποικιλία των προγραμμάτων και των έργων καθώς και την οικονομική διαχείριση.
- Η *Θέσπιση του πλαισίου*. Καθορίζει τις βασικές παραμέτρους για τη διαχείριση των κινδύνων και καθορίζει το πεδίο εφαρμογής και τα κριτήρια για το υπόλοιπο της διαδικασίας. Η Θέσπιση πλαισίου περιλαμβάνει την εξέταση των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων που σχετίζονται με το φορέα, την επιχείρηση ή και τη δομή ως σύνολο, καθώς και το ιστορικό των ιδιαίτερων κινδύνων που αξιολογούνται. Κατά τον

καθορισμό του πλαισίου, το αντικείμενο των κινδύνων που αξιολογούνται, τα κριτήρια του κινδύνου και το πρόγραμμα αξιολόγησης καθορίζονται και συμφωνούνται.

- Η *αντιμετώπιση- διαχείρισης κινδύνου,* περιλαμβάνει τις διεργασίες αντιμετώπισης κινδύνου που θα εφαρμοστούν όταν έχει ολοκληρωθεί μια αξιολόγηση των κινδύνων. Οι τρόποι αντιμετώπισης κινδύνου ενδέχεται να αντιπροσωπεύονται από την υλοποίηση μιας ή περισσοτέρων εναλλακτικών λύσεων, οι οποίες όμως θα είναι κοινής αποδοχής και θα μεταβάλουν (μειώνουν) την πιθανότητα της εμφάνισης ή των αποτελεσμάτων του κινδύνου ή και τα δύο μαζί. Αυτό ακολουθείται από μια κυκλική διαδικασία της επαναξιολόγησης το νέο επίπεδο κινδύνου, με σκοπό τον προσδιορισμό της *ανεκτικότητας (tolerability***)** βάσει των κριτηρίων του που είχαν οριστεί στο προηγούμενο στάδιο, προκειμένου να αποφασιστεί εάν απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για την εύρεση νέων εναλλακτικών λύσεων.
- Η *Παρακολούθηση και αναθεώρηση*, με την οποία οι κίνδυνοι και οι έλεγχοι θα πρέπει να παρακολουθούνται και να αναθεωρούνται σε τακτική βάση ώστε:
    - να επαληθεύεται ότι οι υποθέσεις σχετικά με τους κινδύνους εξακολουθούν να ισχύουν
    - οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η εκτίμηση των κινδύνων συμπεριλαμβανομένου του εξωτερικού και εσωτερικού πλαισίου εξακολουθούν να ισχύουν
    - τα αναμενόμενα αποτελέσματα να επιτυγχάνονται
    - τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των κινδύνων να συνάδουν με την πραγματική εμπειρία
    - οι τεχνικές εκτίμησης του κινδύνου να εφαρμόζονται σωστά και οι αποφάσεις που υλοποιούνται για την αντιμετώπιση του κινδύνου να είναι αποτελεσματικές.

*Η Ανάλυση Κινδύνων (Risk Analysis)* συνίσταται από την ανάλυση και μελέτη ενός συστήματος σύμφωνα με τους κινδύνους που εμπεριέχονται σ’ αυτό. Τα ατυχήματα των τελευταίων χρόνων, εξώθησαν στην αναζήτηση λύσεων και δράσεων με σκοπό την εισαγωγή καινοτομιών στο χώρο της ασφάλειας, αποδεικνύοντας ότι ήταν αναγκαία η υιοθέτηση διαδικασιών διάγνωσης στις αδυναμίες των συστημάτων αλλά και των περιθωρίων βελτίωσής τους.

Κατά την ανάλυση κινδύνων συναντάται και ο όρος ασφάλεια (safety) ο οποίος συνδέεται στενά με τον όρο επικινδυνότητα (risk). Επίσης η επικινδυνότητα μπορεί να συγχέεται με τη λέξη κίνδυνος (hazard). Γι' αυτό πρέπει να αποσαφηνιστεί, εφόσον συχνά λαμβάνει διαφορετική ερμηνεία ανάλογα με το χώρο όπου χρησιμοποιείται, ότι κίνδυνος (κοινώς ρίσκο) εμπεριέχει και την έννοια της πιθανότητας (Kristiansen, 2013), (Berg, 2010). Δηλαδή η ανάλυση κινδύνου προσπαθεί να συνδυάσει την πιθανότητα να συμβεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση συμπεριλαμβάνοντας τα αποτελέσματα ή τις συνέπειες της. Περιλαμβάνει, επίσης, προσδιορισμό των ελέγχων, την εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους και το επίπεδο κινδύνου που προκύπτει από την εφαρμογή των ελέγχων.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία συναντήθηκαν οι ακόλουθοι ορισμοί: [Kristiansen, 2013], (Villemeur, 1992), (Molak, 1997), (Stamatelatos, 2002).

*Επικινδυνότητα (risk),* συνήθως ορίζεται ως το μέτρο του κινδύνου σε συνδυασμό με το ενδεχόμενο ενός επικίνδυνου γεγονότος και το μέγεθος των συνεπειών του. Αντίθετα, *κίνδυνος (hazard), ονομάζεται μια κατάσταση επιβλαβής στον άνθρωπο, την κοινωνία ή το περιβάλλον*. Το ενδεχόμενο της ανεπιθύμητης κατάστασης μετριέται από την πιθανότητα εμφάνισής του σε δεδομένο χρόνο ή τη συχνότητα του δηλαδή το ρυθμό εμφάνισής του. Άρα πρόκειται για μία μεταβλητή ικανή να κρίνει ή να αξιολογήσει τη σοβαρότητα των αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων.

Άρα, η επικινδυνότητα r είναι συνάρτηση της κρισιμότητας των πιθανών συνεπειών c και της πιθανότητας p, να συμβεί κάποιο ανεπιθύμητο γεγονός.

$$r = f(c,p) \qquad (2.5)$$

Και οι δύο παράμετροι της συνάρτησης, c και p εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η ανθρώπινη συμπεριφορά, οι παράγοντες λειτουργίας, διοίκησης, μηχανικής και χρόνου.

Το r υπολογίζεται από το γινόμενο μεταξύ της πιθανότητας και των συνεπειών:

$$r = c\,p \qquad (2.6)$$

Δεδομένης αυτής της σχέσης είναι πιο εύκολο να κατανοηθεί πότε γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενα υψηλού κινδύνου, τα οποία ίσως κριθούν μη αποδεκτά (ως προς την ασφάλεια). Κάποιες φορές αποδοχή υφίσταται όταν συνδυάζεται η χαμηλή πιθανότητα να συμβεί το γεγονός, με υψηλή ή χαμηλή σοβαρότητα συνεπειών (Δείκτης ALARP – As Low As Reasonably Practicable). Οι συνθήκες οι οποίες απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή είναι αυτές όπου και η σπουδαιότητα, αλλά και η πιθανότητα έχουν υψηλό δείκτη.

Με βάση τα παραπάνω, η Εκτίμηση Επικινδυνότητας είναι η διαδικασία προσδιορισμού της επικινδυνότητας, εφόσον η μελέτη του συστήματος κατέληξε σε συγκεκριμένες εν δυνάμει ανεπιθύμητες καταστάσεις.

Συνήθως πραγματοποιείται διαχωρισμός μεταξύ της «ανάλυσης» και της «εκτίμησης». Η ανάλυση συλλέγει δεδομένα, ενώ η εκτίμηση τα αξιολογεί εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής και εφαρμογής κατάλληλων μέτρων ασφαλείας, γνωστά ως Επιλογές Περιορισμού Κινδύνου (Risk Control Options).

Καταλήγοντας, η ανάλυση κινδύνων περιλαμβάνει τη συστηματική καταγραφή κινδύνων, καθώς και σχετιζόμενων αιτιών ή γεγονότων, τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν ένα σοβαρό ατύχημα. Εδώ *συνίσταται το πρώτο βήμα μιας διαδικασίας, κρίσιμο για την επιτυχία ενός εγχειρήματος στη λήψη αποφάσεων Υπεράκτιων ΣΑΔ-ΑΠΕ*.

Στη μελέτη της βιβλιογραφίας διαπιστώνεται ότι στη μεθοδολογία συνεισφέρουν ποιοτικές και ποσοτικές τεχνικές με τη συνδρομή της γνώσης ειδικών στελεχών. Στον πίνακα 2.1, παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία διαφοροποίησης των ποιοτικών και των ποσοτεκών τεχνικών. Σημειώνεται ότι η ποσοτική ανάλυση είναι υπερσύνολο της ποιοτικής ανάλυσης, εφόσον περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία της ποσοτικής ανάλυσης, ενώ έχει επιπλέον τη δυνατότητα της μαθηματικής ανάλυσης (Κηρυττόπουλος 2006).

**Πίνακας 2.1 Διαφοροποίηση Ποσοτικής - Ποιοτικής ανάλυσης (προσαρμογή από Κηρυττόπουλος 2006).**

| Ποιοτική ανάλυση | Ποσοτική ανάλυση |
|---|---|
| Τι είναι ο κίνδυνος; | Στοιχεία ποιοτικής ανάλυσης |
| Γιατί μπορεί να προκύψει; | Μοντελοποίηση της αβεβαιότητας |
| Πόσο πιθανό είναι να προκύψει; | Προσομοίωση των συνδυασμένων συνεπειών |
| Πόσο καλό ή κακό θα προκαλέσει; | Πρόβλεψη αποτελεσμάτων |
| Έχει σημασία; | Έλεγχος σεναρίων |
| Τι μπορούμε να κάνουμε; | |
| Πότε να αντιδράσουμε; | |
| Ποιος είναι υπεύθυνος; | |
| Καταγραφή σε φύλλα ελέγχου | Μαθηματική ανάλυση με χρήση λογισμικού |

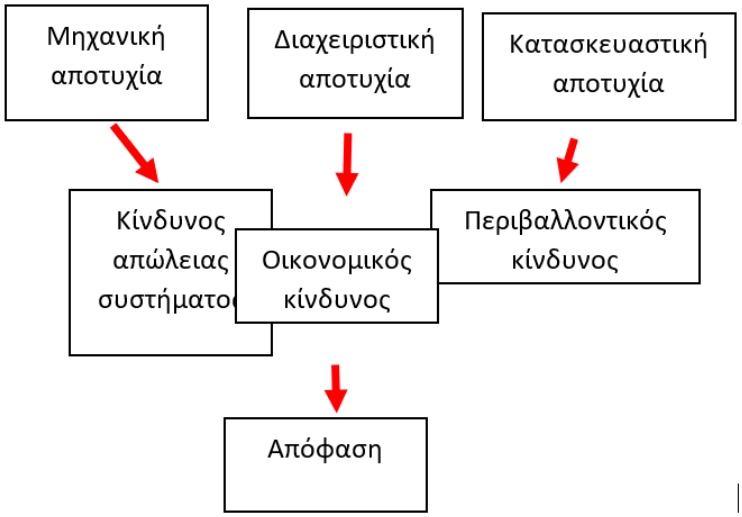
## 2.7 Ανάλυση κίνδυνου, Εκτίμηση αβεβαιότητας συστημάτων

Σε συνέχεια της διερεύνησης των πεδίων που προσδιορίζουν την αξιολόγηση κινδύνων, και τη σχέση του αποτελέσματος ενός κινδύνου καθώς και των αποφάσεων σύμφωνα με τις μέχρι τώρα έννοιες και διεργασίες που πρέπει να διερευνώνται, παρουσιάζονται δύο πεδία απαραίτητα στη αξιολόγηση συστημάτων αυτό της *ανάλυσης κινδύνου* και της *εκτίμησης αβεβαιότητας*.

Η ανάγκη για αυτή την παρουσίαση έγκειται στην συσχέτιση της αειφόρου ανάπτυξης με την προστασία του περιβάλλοντος, την ευημερία και την ασφάλεια του πληθυσμού. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν αντικείμενα μελέτης και λόγους για τους οποίους υφίσταται η μεγαλύτερη ανησυχία στις κοινωνίες κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Την ίδια στιγμή η

βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων φυσικών και οικονομικών πόρων θεωρείται πολύ σημαντική.

Ως εκ τούτου, οι μέθοδοι ανάλυσης του κινδύνου, και περαιτέρω η αξιοπιστία των κατασκευών και των συστημάτων από τα οποία αποτελούνται, που αναπτύχθηκαν από κατασκευαστές, μηχανικούς και ερευνητές, τις κάνουν να αποτελούν όλο και πιο σημαντικά εργαλεία στην υποστήριξη αποφάσεων των εμπλεκόμενων στις διαδικασίες ανάπτυξης των δομών με τρόπο όπως αυτός που απεικονίζεται στο διάγραμμα 2.6.




**Διάγραμμα 2.5 Στοιχεία λήψης αποφάσεων για κατασκευές (προσαρμογή από Thoft-Cristensen, et. al. 2012)**

Οι διάφορες κατασκευές, όπως γέφυρες, κτίρια, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, φράγματα και υπεράκτιες εξέδρες σκοπό έχουν να συμβάλουν, στο κοινό όφελος και στην βελτίωση της ποιότητας ζωής. Επομένως, όταν σχεδιάζονται τέτοιες κατασκευές είναι σημαντικό το όφελος που προκύπτει να μπορεί να προσδιοριστεί λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φάσεις του ‘’κύκλου ζωής’’ τους. Δηλαδή να συμπεριλαμβάνεται το στάδιο του σχεδιασμού, η κατασκευή, η λειτουργία και τελικά ο παροπλισμός και η διάλυσή τους.

Βέβαια, το *όφελος (benefit),* όπως και ο κίνδυνος, έχει διαφορετικές σημασίες για κάθε ομάδα ή για κάθε άτομο χωριστά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαφορετικοί άνθρωποι έχουν διαφορετικές προτιμήσεις. Ωστόσο, γενικά το όφελος για την κοινωνία μπορεί να θεωρηθεί ως:

- Η οικονομική αποδοτικότητα για ένα συγκεκριμένο σκοπό, δημιουργία θέσεων, εργασίας εξοικονόμηση πόρων
- Η τήρηση συγκεκριμένων απαιτήσεων στον τομέα της ασφάλειας των ατόμων που εμπλέκονται άμεσα ή έμμεσα στη διαδικασία κατασκευής και λειτουργία μιας κατασκευής είτε εκτίθενται σε αυτή
- Η εκπλήρωση των δεδομένων απαιτήσεων από τις επιπτώσεις της κατασκευής για την κοινωνία και το περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις πτυχές που πρέπει να πληρούνται από μια κατασκευή, φαίνεται ότι το έργο σχεδιαστών εργαλείων αξιολόγησης κατασκευών είναι να κάνουν προτάσεις ή να παρέχουν τη βάση των αποφάσεων σε όσους εμπλέκονται στη διαδικασία. Αυτές οι προτάσεις ή οι βάσεις αποφάσεων, θα δίνονται με σκοπό που δύναται να εξασφαλιστεί ότι οι κατασκευές θα κατασκευαστούν, θα εγκατασταθούν, θα λειτουργούν, θα συντηρούνται και θα παροπλίζονται με τρόπο που να βελτιστοποιείται ή να ενισχύονται τα πιθανά οφέλη τόσο για την κοινωνία όσο και για τα μέλη της κοινωνίας. Επίσης, να ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές επιπτώσεις από την ανάπτυξη μιας κατασκευής στην κοινωνία και το περιβάλλον.

Οι στατιστικές των ατυχημάτων από τις δραστηριότητες στις εγκαταστάσεις ανοικτής θάλασσας δείχνουν ότι υπάρχουν μεγάλοι κίνδυνοι για το προσωπικό και τις κατασκευές (Tang, et. al. 2018), (JRCI, 2012). Ως εκ τούτου, η πρόληψη των ατυχημάτων χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή με συστηματικό τρόπο, ώστε να μειωθούν τα επίπεδα κινδύνου.

Επιπλέον, *σύγχρονες κατασκευές απαιτούν πιο κρίσιμο και πολύπλοκο σχεδιασμό*, ενώ είναι απαραίτητη η *μελέτη τους ώστε να δημιουργηθούν ποιο αξιόπιστα συστήματα*. Με σκοπό την καλύτερη μελέτη τους και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, τα διάφορα επιστημονικά μοντέλα ή πειράματα (ή γενικότερα τα φυσικά φαινόμενα καθώς και η μελέτη της επίδρασης των φυσικών φαινομένων στα συστήματα και τις κατασκευές) μπορεί να θεωρηθεί ότι εντάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- τα *προσδιοριστικά ή αιτιοκρατικά (deterministic*) μοντέλα ή πειράματα, στα οποία οι γνωστές μεταβλητές (π.χ. αρχικές συνθήκες) αρκούν για την ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τους. Για παράδειγμα ο τόκος που θα ληφθεί από καταθέσεις ύψους Χ με προκαθορισμένο επιτόκιο Ψ, η επαναλειτουργία ενός μηχανήματος μετά την

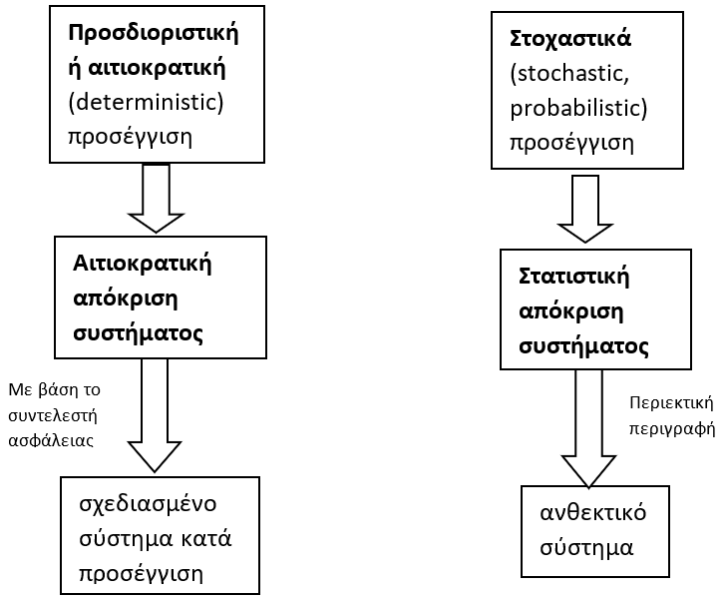
αντικατάσταση ενός εξαρτήματος που υπάρχει ήδη αποθηκευμένο, η παραγωγή ισχύος από μια ανεμογεννήτρια με συγκεκριμένη (σταθερή) ταχύτητα αέρα κ.α.

- τα *στοχαστικά (stochastic, probabilistic*) μοντέλα ή πειράματα, στα οποία οι γνωστές μεταβλητές δεν είναι αρκετές για την ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τους. Τα στοχαστικά πειράματα λέγεται ότι κατά κάποιον τρόπο επηρεάζονται από τον παράγοντα «τύχη», ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ότι περιέχει όλες τις άγνωστες μεταβλητές ή παραμέτρους. Για το λόγο αυτό τα στοχαστικά πειράματα καλούνται και πειράματα τύχης. Παραδείγματα αυτών είναι, η τιμή ενός αγαθού σε μία ορισμένη στιγμή στο μέλλον, ο χρόνος ζωής ενός ανθρώπου, ο τόκος που θα ληφθεί για καταθέσεις ύψους Χ με κυμαινόμενο επιτόκιο Ψ, η αποτελεσματικότητα ενός μηχανήματος στην παραγωγή ενός προϊόντος ή της ποσότητας από το προϊόν με διακύμανση των λειτουργικών παραγόντων (ειδικά εάν επηρεάζονται από καιρικά φαινόμενα) κ.α.

Ως εκ τούτου, για προβλήματα στα οποία η ο *βαθμός τυχαιότητας (randomness*) είναι σχετικά μικρός, συνήθως χρησιμοποιείται ένα *ντετερμινιστικό (deterministic)* μοντέλο παρά ένα *στοχαστικό (stochastic*). Ενώ, όταν το επίπεδο της αβεβαιότητας είναι υψηλό, οι στοχαστικές προσεγγίσεις είναι απαραίτητες τόσο κατά την ανάλυση ενός συστήματος όσο και κατά το σχεδιασμό του.

Με δεδομένο ότι οι σύγχρονες κατασκευές απαιτούν πιο κρίσιμο και πολύπλοκο σχεδιασμό, η ανάγκη για ακριβείς προσεγγίσεις στην εκτίμηση της αβεβαιότητας σε υπολογιστικά μοντέλα, σε υπολογισμούς λειτουργικών φορτίων, στη γεωμετρία της κατασκευής ή του συστήματος, στις ιδιότητες των υλικών, στις διαδικασίες παραγωγής και το λειτουργικό περιβάλλον έχει αυξηθεί σημαντικά.

Ένας αριθμός πιθανοτικών εργαλείων ανάλυσης έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων. Όμως, τα πιο πολύπλοκα συστήματα εξακολουθούν να σχεδιάζονται με απλουστευμένους κανόνες και σχεδιασμό, όπως αυτός (ο σχεδιασμός) που βασίζεται στο συντελεστή ασφαλείας (διάγραμμα 2.6).




**Διάγραμμα 2.6 Εκτίμηση της αβεβαιότητας σε υπολογιστικά μοντέλα (προσαρμογή από Thoft-Cristensen, et. al. 2012)**

Η συγκεκριμένη διεργασία σχεδιασμού, δεν είναι άμεσα αντιπροσωπευτική της τυχαίας φύσης των περισσότερων παραμέτρων που εισάγονται στην αξιολόγηση μιας κατασκευής (π.χ υπεράκτια συστήματα). Ο παράγοντας της ασφαλείας χρησιμοποιείται ώστε να διατηρηθεί σε κάποιο βαθμό η ασφάλεια στον διαρθρωτικό σχεδιασμό. Με γενική προσέγγιση για τον παράγοντα της ασφάλειας , να εννοείται ότι είναι ο λόγος της αναμενόμενης ανταπόκρισης σε αντοχή με το αναμενόμενο φορτίο (δηλαδή η αναλογία μεταξύ της δύναμης και του φορτίου). Στην πράξη όμως, τόσο η αντοχή όσο και τα φορτία είναι μεταβλητές, με τιμές που είναι κατανεμημένες στις αντίστοιχες μέσες τιμές τους.

Όταν λαμβάνεται υπ' όψιν η διασπορά στις μεταβλητές, ο παράγοντας της ασφάλειας θα μπορούσε δυνητικά να είναι μικρότερος της μονάδας, με αποτέλεσμα η διεργασία ( το παραδοσιακό στοιχείο) σχεδιασμού, δηλαδή η αναλογία μεταξύ της δύναμης και του φορτίου ως μέτρο της αξιοπιστίας της κατασκευής, που βασίζεται στην ασφάλεια να αποτύχει. Ενώ, μεγαλύτερη βαρύτητα στις πιθανότητες που εστιάζουν στον παράγοντα της ασφάλειας είναι πολύ συντηρητική και θα οδηγούσε στον υπερβολικά ακριβό σχεδιασμό κάποιου συστήματος .

Σύμφωνα με τον Elishakoff (2004), ο παράγοντας της ασφάλειας συνεχίζει να επιτρέπει την κατασκευή και λειτουργία ασφαλών ή σχεδόν ασφαλών δομών, με αποτέλεσμα κάποιος θα μπορούσε να πει ότι υπό αυτές τις συνθήκες "Αν λειτουργεί, να χρησιμοποιηθεί".

Το ερώτημα όμως είναι: Θα μπορούσε να βελτιωθεί αυτή η μεθοδολογία; Μπορούμε δηλαδή να κάνουμε μια κατασκευή να ανταποκρίνεται καλύτερα στις λειτουργίες για τις οποίες προορίζεται; Ακόμα κι αν ένα αμερικανικό ρητό συμβουλεύει «Αν δεν χαλάσει, μην το επισκευάζεις-συντηρείς." Αυτό θα μπορούσε να αποτελεί και μια στρατηγική με την οποίο θα αντιμετωπίζονταν ο σχεδιασμός των επισκευών και των προγραμμάτων συντήρησης σε ένα λειτουργικό σύστημα μιας κατασκευής.

Όμως, στο σύγχρονο ανταγωνιστικό κόσμο, το σύνθημα που επικρατεί στην κατασκευή των συστημάτων είναι, "*Αν δουλεύει, πρέπει να το κάνεις να δουλεύει καλύτερα* " (O'dell, et. al. 1998).

Σύμφωνα με αυτή τη συνθήκη, σε σύγκριση της ντετερμινιστικής (πλήρως καθορισμένης) προσέγγισης που βασίζεται σε παράγοντες της ασφάλειας, η στοχαστική προσέγγιση βελτιώνει την αξιοπιστία του σχεδιασμού και παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα στους σχεδιαστές κατασκευών και τους μηχανικούς. Τα διάφορα στατιστικά αποτελέσματα, τα οποία περιλαμβάνουν τις μέσες τιμές, τη διακύμανση, και το διάστημα εμπιστοσύνης, μπορεί να προσφέρουν μια ευρύτερη και βελτιωμένη λειτουργική προοπτική και μια πιο ολοκληρωμένη περιγραφή ενός συγκεκριμένου λειτουργικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερους παράγοντες και αβεβαιότητες (Misra, 2012), (Ditlevsen, et. al. 1996).

Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω και σε συνδυασμό με μια ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος, να επιτρέψει στους μηχανικούς να βρουν σημαντικές παραμέτρους για τα μοντέλα αβεβαιότητας. Επιπλέον, η στοχαστική προσέγγιση μπορεί να βοηθήσει να αναπτυχθεί η αρχική καθοδήγηση για τον ασφαλή σχεδιασμό και να προσδιορίζει τις περαιτέρω επιθεωρήσεις και τις έρευνες που θα μπορούσαν να αυξήσουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα της κατασκευής – συστήματος.

Βέβαια η *ανάλυση βαθμού εξάρτησης (dependability*) σε κατασκευές (ή/ και βιομηχανικά συστήματα) είναι δύο φορές ποιο πολύπλοκη διαδικασία. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα

των συστημάτων και των απαιτήσεων από τη λειτουργία τους. Ποιο αναλυτικά από τη μία πλευρά, περιλαμβάνεται η *ποσοτική αξιοπιστία (quantitative reliability), η συντηρησιμότητα (maintainability) και η αξιολόγηση της διαθεσιμότητας (availability assessment)* που προϋποθέτει την στοχαστική μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Ενώ από την άλλη, απαιτείται η ντετερμινιστική μοντελοποίηση, ώστε να συμπεριληφθεί η συμπεριφορά του συστήματος ελέγχου και να επαληθευθούν τα χαρακτηριστικά που θα εξασφαλίζουν την ασφάλή λειτουργία του.

Γενικά θα πρέπει να εφαρμόζονται δύο διαφορετικά μοντέλα (models), τα οποία απαιτούν διαφορετικά μαθηματικά πρότυπα, και να (είναι αυτά που) χρησιμοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του συστήματος ώστε να επιτευχθεί η ανάλυσή του, καθώς και να διερευνώνται και οι δύο πλευρές στην αξιολόγησή του. Αυτά είναι τα πιθανοτικά και χρονικά προσδιορισμένα μοντέλα για τη στοχαστική ανάλυση και τα ντετερμινιστικά μη-χρονικά προσδιορισμένα μοντέλα για την ποιοτική ανάλυση. Αυτό διακρίνεται στα παραδείγματα που ακολουθούν όπου:

Η αξιοπιστία των WTs (Wind Turbines) ως μέρος ενός μεγάλου συστήματος ισχύος έχουν αξιολογηθεί από διάφορους ερευνητές (Brower, 1997). Στις μελέτες τους θεωρούν τον άνεμο ως στοχαστική διαδικασία, χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη χρονική σειρά για τη μοντελοποίηση του ανέμου, και η μελέτη γίνεται με συνδυασμό της καμπύλης ισχύος και ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.

Επίσης υπήρξαν μελέτες σχετικά με την αξιοπιστία των WTs ως διακριτά συστήματα και όχι ως μέρος ενός μεγάλου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως αναφαίρετε από (Roddier, 2010), (Kaiser, et. al. 2010) οι οποίοι επικεντρώνεται στην ανάλυση αξιοπιστίας στο στάδιο του σχεδιασμού ενός συστήματος WT, ως ένα ενιαίο, πολύπλοκο σύστημα, που αποτελείται από διάφορα μηχανικά, ηλεκτρικά και βοηθητικά εξαρτήματα.

Επομένως, κατά την ανάπτυξη συστημάτων που αξιοποιώντας το δυναμικό των ΑΠΕ σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες παράγουν ένα προϊόν εμφανίζεται η αναγκαιότητα της ανάλυσης και της αξιολόγησής τους, ως προς την αξιοπιστία αλλά και την αποδοτικότητά τους, λαμβάνοντας ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά.

Στο πεδίο συστημάτων υπεράκτιων δομών για την παραγωγή, διαχείριση και φύλαξη για παράδειγμα πετρελαϊκών προϊόντων, λόγο της επικινδυνότητας και της ανάπτυξής τους η οποία μετράει αρκετές δεκαετίες συστήθηκαν μελέτες (Spouge, 1999), (Moan, 2005), (OGP, 2010) αλλά και καταγεγραμμένα στοιχεία.

Όμως, στο νέο περιβάλλον ανάπτυξης υπεράκτιων συστημάτων ΣΑΔ-ΑΠΕ για κυματικά συστήματα και υβριδικές λειτουργικές διαδικασίες, δεν βρέθηκαν μελέτες που να πραγματοποιούνται αξιολογήσεις όπου οι πληροφορίες από τη λειτουργία τέτοιων δομών σε συνδυασμό με κριτήρια κοινωνικά, τεχνολογικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά θα λαμβάνονταν υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού νέων αλλά και στην βελτιστοποίηση εγκατεστημένων συστημάτων, ενώ για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες λίγα ήταν αυτά και κυρίως εστίαζαν στον ενεργειακό προγραμματισμό. Το κενό αυτό προσδιορίζεται και από προγενέστερες έρευνες που διαπιστώνεται ότι χρειάζονται μελέτες που να αναπτύσσουν μια εργαλειοθήκη επιλογής των καλύτερων πρακτικών (Παναγιωτόπουλος, 2007) (Δούκας, 2008), (Βαβάτσικος, 2008) αντικείμενο που διερευνάται με τις προσεγγίσεις που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή.

## 2.8 Αξιοπιστία Συστημάτων σε Υπεράκτιες Κατασκευές

Τα τελευταία χρόνια στους τομείς των κατασκευών, αλλά και της βιομηχανίας, η βελτιστοποίηση των έργων είναι επιβεβλημένη για την ορθή, αποδοτική, οικονομική και έγκαιρη αξιόπιστη λειτουργία τους. Η στενότητα σε χρόνο, πόρους και κεφάλαιο κάνει επιτακτική την ανάγκη ορθολογικής αξιολόγησης των έργων έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες που επιδιώκονται από την ανάπτυξή τους.

Ένα σύγχρονο υπεράκτιο σύστημα παραγωγής ενέργειας όπως μια σύγχρονη υπεράκτια κατασκευή αποτελεί μια τεράστια κατασκευή από ατσάλι πάνω στην οποία βρίσκονται εγκατεστημένα ΣΑΔ-ΑΠΕ συνήθως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αξιοπιστία των κατασκευών συνολικά εξαρτάται από την επιστημονική αβεβαιότητα. Στη μελέτη της αξιοπιστίας μιας ανεμογεννήτριας ισχύος για παράδειγμα 2 MW WT (Ribrant, 2006), (Fischer, 2012) η εξάρτηση από την επιστημονική αβεβαιότητα επηρεάζει :

- Τη *δομική αξιοπιστία* της κατασκευής, για την οποία προβλέπεται ένας ρυθμός στην εμφάνιση βλαβών $10^{-4}$ βλάβες/χρόνο,

- Την *ηλεκτρομηχανική αξιοπιστία*, η οποία υπόκειται στις συνήθεις βλάβες εξαρτημάτων με αντίστοιχα μηχανικά μέρη, και μπορεί να προβλεφθεί με τη χρήση μετρήσεων των ποσοστών αποτυχίας, τα οποία κυμαίνονται από 10 έως $10^{-4}$ βλάβες/χρόνο,

- Την *αξιοπιστία του συστήματος ελέγχου*, η οποία εξαρτάται από το περιβάλλον λειτουργίας, τα ηλεκτρομηχανολογικά ζητήματα που προκύπτουν και την αξιοπιστία του λογισμικού που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του συστήματος.

Οι αναλύσεις αυτές γίνονται περισσότερο πολύπλοκες διότι ένα υπεράκτιο σύστημα με εγκατεστημένη ανεμογεννήτρια υπόκειται σε τυχαίες αβεβαιότητες λόγω στοχαστικών αποτελεσμάτων των καιρικών συνθηκών, του ανέμου από τον οποίο προκύπτει η παραγόμενη ενέργεια, και στην περίπτωση των συστημάτων αυτών λαμβάνονται υπόψη επιδράσεις από το συνδυασμό του αέρα και των κυμάτων στην κατασκευή, αλλά και η διάβρωση τους.

Για να παρακολουθούνται οι μεταβολές της αξιοπιστίας με το χρόνο κατά τη διάρκεια διάφορων φάσεων λειτουργίας ενός προϊόντος, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα εξέλιξης της αξιοπιστίας (Kallesøe, 2011). Τα ίδια μοντέλα μπορούν να εφαρμοσθούν στα δεδομένα που συγκεντρώνονται για βλάβες από μελέτες προϊόντων που η αξιοπιστία τους είτε παραμένει σταθερή είτε βελτιώνεται είτε μειώνεται με το χρόνο.

Γι’ αυτό η κατανόηση και η πρόβλεψη αυτών των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνει διερευνηθεί αναλυτικά μέσα από τη αξιοπιστία (Multon, 2012).

Ο ορισμός της αξιοπιστίας μπορεί και υποδιαιρείται σε τέσσερα βασικά στοιχεία :

1. Την Πιθανότητα

2. Την Καθορισμένη λειτουργία

3. Τη Μεταβλητή χρόνου και

4. Τις Συνθήκες λειτουργίας για επαρκείς επιδόσεις

Ο χαρακτηρισμός αξιόπιστη, αναξιόπιστη σχετίζεται με το βαθμό αποτυχίας (failure), που ορίζεται από μια συνάρτηση λ(t).

Ο ορισμός αυτός της αξιοπιστίας, εμφανίζει δυσκολίες ως μέτρο για τη συνεχή λειτουργία συστημάτων, όπως τα υπεράκτια συστήματα με ανεμογεννήτριες, ή άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας ή πραγματοποίησης μιας λειτουργίας, τα οποία ανέχονται – επιτρέπουν βλάβες οι οποίες μπορούν να επισκευαστούν.

Κατά συνέπεια μια περισσότερο κατάλληλη μετρήσιμη ποσότητα είναι η διαθεσιμότητα, η οποία ορίζεται η πιθανότητα να βρεθεί ένα σύστημα σε λειτουργική κατάσταση σε κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον. Αυτός ο ορισμός διαθέτει δύο άλλα βασικά στοιχεία, τη λειτουργικότητα και το χρόνο

Η λειτουργικότητα σχετίζεται με την ικανότητα ενός συστήματος να εκτελέσει την απαιτούμενη από αυτό λειτουργία κάτω από καθορισμένες με σαφήνεια συνθήκες. Εάν, αδυνατεί να τις πραγματοποιήσει, τότε το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση αποτυχίας – μη λειτουργίας, σε αντίθεση με τη λειτουργική του κατάσταση.

Ένα μη επισκευάσιμο σύστημα είναι εκείνο το οποίο δεν επανέρχεται μετά από αποτυχία. Παραδείγματα μη επισευάσιμων συστημάτων είναι οι μπαταρίες, οι λαμπτήρες, κ.α..

Ένα επισκευάσιμο σύστημα, είναι εκείνο στο οποίο όταν συμβεί μια βλάβη – αποτυχία, μπορεί να επανέλθει σε λειτουργική κατάσταση μετά από οποιαδήποτε επισκευή, με εξαίρεση την αντικατάσταση ολόκληρου του συστήματος. Παραδείγματα επισκευάσιμων συστημάτων είναι οι ανεμογεννήτριες, οι μηχανές και τα βοηθητικά μηχανήματα πλοίων πλοίων, οι ηλεκτρικές γεννήτριες, συστήματα παραγωγής νερού (π.χ. αντίστροφη ώσμωση) και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

Πράξεις επισκευής μπορούν να είναι η προσθήκη ενός νέου εξαρτήματος, η αντικατάσταση εξαρτημάτων, η αφαίρεση ενός κατεστραμμένου εξαρτήματος, αλλαγές ή προσαρμογές ρυθμίσεων, η αναβάθμιση λογισμικού, η λίπανση ή το καθαρισμός.

### 2.8.1 Τυχαίες και Συνεχείς Μεταβλητές

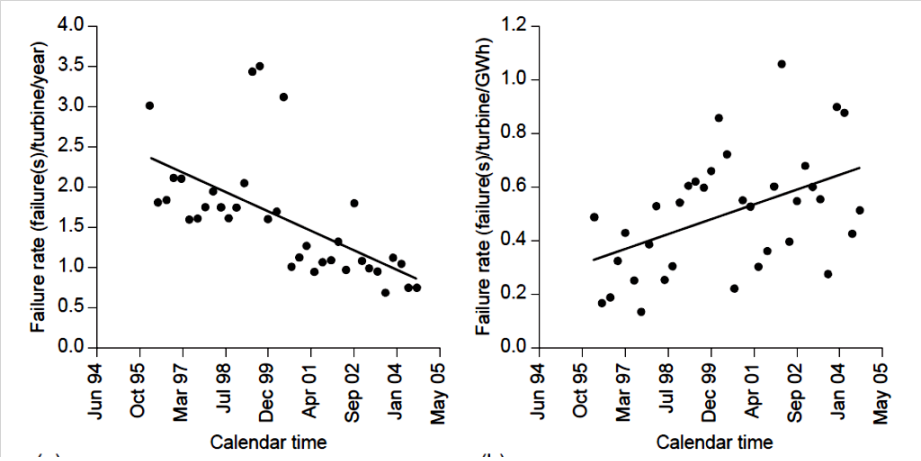
Η τυχαία μεταβλητή, στο γενικό πλαίσιο της αξιοπιστίας των συστημάτων όπως και των ΣΑΔ-ΑΠΕ, είναι τα συμβάντα Χ που καταγράφονται σε σχέση με μια συνεχή μεταβλητή, όπως ο χρόνος. Ωστόσο, τίθεται το ερώτημα αν είναι πάντα κατάλληλο να χρησιμοποιείται ο ημερολογιακός χρόνος ως η συνεχής μεταβλητή. Ο ημερολογιακός χρόνος μπορεί να είναι

εύχρηστος αλλά δεν είναι απαραίτητα η καλύτερη μεταβλητή για τις αναλύσεις της αξιοπιστίας, για παράδειγμα :

- Ο *χρόνος σε δοκιμές* φαίνεται να είναι περισσότερο κατάλληλος
- Οι *περιστροφές* π.χ. σε μια ανεμογεννήτρια, μπορεί επίσης να είναι περισσότερο κατάλληλες, ειδικά για την αεροδυναμική αξιοπιστία
- Η *ενέργεια που παράγεται*, από ανεμογεννήτριες σε GWh, μπορεί επίσης να είναι περισσότερη κατάλληλη, ειδικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στην αξιοπιστία των συσκευών.

Οι φορείς εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας συνήθως δε μπορούν να μετρήσουν το χρόνο σε μια δοκιμή επειδή δε μπορούν εύκολα να παρακολουθήσουν την ημερομηνία εκκίνησης ενός υπεράκτιου συστήματος, αλλά είναι σε θέση εύκολα να μετρήσουν τον αριθμό των αποτυχιών σε ένα χρονικό διάστημα.

Ένα παράδειγμα τέτοιων διαφορών στη τυχαία μεταβλητή φαίνεται στο σχήμα 1, όπου όμοια δεδομένα αποτυχιών, από τη γερμανική βάση δεδομένων Windstats, αναπαρίστανται σε διάγραμμα σε σχέση με τον ημερολογιακό χρόνο είτε ως αποτυχία(ες)/ανεμογεννήτρια/χρόνος είτε ως αποτυχία(ες)/ανεμογεννήτρια/GWh (Drew, et. al. 2009). Στη πρώτη περίπτωση (διάγραμμα 2.7.a) φαίνεται βελτίωση του ρυθμού αποτυχίας με το χρόνο, ενώ στη δεύτερη περίπτωση (διάγραμμα 2.7.b) φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη διακύμανση αλλά μια αύξηση στον αριθμό αποτυχιών – βλαβών ανά παραγόμενη GWh. Το τελευταίο πιθανότατα παρουσιάζει το μέγεθος μικρών αλλά σημαντικών αποτυχιών που συμβαίνουν σε μεγαλύτερες και περισσότερο μηχανικά πολύπλοκες ανεμογεννήτριες.




**Διάγραμμα 2.7 Σύγκριση διαγραμμάτων όμοιων δεδομένων συμβάντων : (a) συμβάντα / ανεμογεννήτρια / χρόνος και (b) συμβάντα / ανεμογεννήτρια / GWh.**

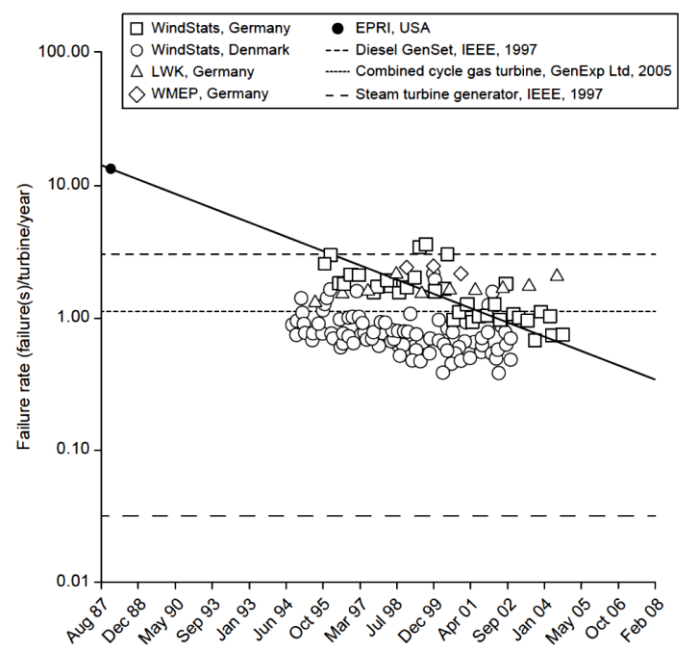
Από τα παραπάνω προκύπτει πως η μέθοδος συλλογής και παρουσίασης των δεδομένων είναι εξαιρετικά σημαντική. Η επιλογή της συνεχούς μεταβλητής έναντι της οποίας η τυχαία μεταβλητή, *X*, θα συλλεχθεί είναι σημαντική :

- Η τυχαία μεταβλητή *X* μπορεί να παρουσιασθεί με διάφορους τρόπους.
- Η διακριτή ή η συνεχής μεταβλητή μπορεί να παρουσιασθεί με διάφορους τρόπους
- Αν ο χρόνος στη δοκιμή πρόκειται να είναι ο ημερολογιακός χρόνος, χρειάζεται να συλλεχθούν δεδομένα της παραγόμενης ενέργειας, ανάλογα πάντα με την ερμηνεία που θα γίνει.
- Η διαγραμματική αναπαράσταση της μεταβλητής X σε σχέση με διαφορετικές διακριτές ή συνεχόμενες μεταβλητές δίνει διαφορετικές πληροφορίες.
- Είναι απαραίτητο να διευκρινίζεται αν το εξάρτημα που συλλέγονται τα δεδομένα είναι επισκευάσιμο ή μη.
- Αν μέθοδος συλλογής των δεδομένων είναι καλή και η μεταβλητή έχει επιλεγεί κατάλληλα, τότε τα στατιστικά δεδομένα της τυχαίας μεταβλητής X που έχουν συλλεχθεί μπορούν να δίνουν ισχυρές πληροφορίες για την αξιοπιστία.
- Αν όχι, οι πληροφορίες για την αξιοπιστία μπορεί να είναι λανθασμένες.

### 2.8.2 Συμβάντα και διαθεσιμότητα ΣΑΔ-ΑΠΕ

Τα ΣΑΔ-ΑΠΕ αποτελούν μη επανδρωμένες κατασκευές-που αποτελούνται από υποσυστήματα- και είναι σχετικά σπάνιο οι διακοπές στη λειτουργία τους να μπορούν εύκολα να χαρακτηριστούν ως βλέβες, διότι, συνήθως το σύστημα σταματά από το σύστημα ελέγχου εφόσον εντοπίζεται μια λειτουργική κατάσταση πέρα από τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του.

Για παράδειγμα , στο διάγραμμα 2.8 φαίνεται ο ρυθμός συμβάντων ανεμογεννητριών στην ξηρά σε βάθος εικοσαετίας, όπου εμφανίζονται οι συνολικές τάσεις του ρυθμού συμβάντων. Μέσα σε αυτές υπάρχουν και οι συμβάντα που αφορούν ένα σοβαρό συμβάν που οφείλεται στη βλάβη του κιβώτιου ταχυτήτων, της γεννήτριας ή των πτερυγίων, το οποίο βέβαια αποτελεί προφανές αίτιο βλάβης.




**Διάγραμμα 2.8 Συνολικές τάσεις ρυθμού βλαβών σε χερσαίες ανεμογεννήτριες για την περίοδο 1987 – 2000.**

Γι' αυτό είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί τι είναι βλάβη. Συνήθως είναι το αποτέλεσμα μιας μη αποδεκτής λειτουργικής κατάστασης, όπως υπερθέρμανση, υπέρβαση λειτουργικών ορίων ή πρόβλημα του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ενέργειας, μηχανική βλάβη σε εξάρτημα του συστήματος. Στις περιπτώσεις αυτές η διάταξη ελέγχου αποσυνδέει το σύστημα παραγωγής ενέργειας (π.χ ανεμογεννήτια) από το δίκτυο που τροφοδοτείται με ενέργεια (δίκτυο ρεύματος, συσκευές ή συστήματα εγκατεστημένα στην υπεράκτα κατασκευή) και θέτει το μηχανισμό σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης (π.χ επέμβαση στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας ώστε η περιστροφή της να διακοπεί άρα η γεννήτρια σταματά). Στην περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας η βλάβη μπορεί να επιλυθεί :

- Είτε από αυτόματη επανεκκίνηση
- Είτε από απομακρυσμένη χειροκίνητη επανεκκίνηση
- Είτε από επιτόπια μετάβαση τεχνικών, που θα κάνουν επιτόπου επανεκκίνηση
- Είτε από επιτόπια μετάβαση τεχνικών που θα επιδιορθώσουν τη βλάβη, και η γεννήτρια θα επανεκκινηθεί.

Σε κάθε περίπτωση μια τέτοια αιτία προκαλεί παύση και το σχήμα 1 μπορεί στη πραγματικότητα να θεωρηθεί ότι απεικονίζει το ρυθμό παύσης παρά το ρυθμό αποτυχίας της ανεμογεννήτριας. Σε κάποιες έρευνες (Tavner, et. Al. 2006) (Spinato, 2008) (Ribrant και Bertling, 2007) οι διακοπές

της λειτουργίας είναι μεγαλύτερες των 24 ωρών. Κατά συνέπεια θεωρούνται σοβαρές διακοπές λειτουργίας, που συνήθως δε μπορούν να επιλυθούν με αυτόματη, απομακρυσμένη ή επιτόπου επανεκκίνηση, με χρόνο διακοπής λειτουργίας τουλάχιστον 24 ώρες.

Ως εκ τούτου, κάποιες μορφές βλάβης, η ακριβής φύση των οποίων δε δύναται να αναγνωριστεί από το χειριστή του συστήματος μέχρι ένα εξάρτημα να αντικατασταθεί ή να γίνουν εργασίες επισκευής.

Επομένως, για να προσδιοριστεί η αξιοπιστία μιας ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι γνωστός ο ρυθμός βλαβών, λ, που επιτρέπουν να προσδιοριστεί ο μέσος χρόνος μεταξύ των βλαβών (mean time between failures – MTBF), MTBF = 1/λ. Για να κατανοηθεί η έννοια της διαθεσιμότητας πρέπει να είναι γνωστές οι παύσεις ή ο χρόνος αργίας (downtime) που αποτελούν το μέσο χρόνο που απαιτείται για την εύρεση των ανταλλακτικών και τη μεταφορά τους στο χώρο εργασίας – υλικοτεχνική χρονική καθυστέρηση – (logistic delay time, *LDT)* και το μέσο χρόνο επιδιόρθωσης (mean time to repair, MTTR) *MTTR* = 1/μ, από το ρυθμό επιδιόρθωσης, μ, και έτσι να προσδιοριστεί η διαθεσιμότητα ως

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR + LDT) \qquad (2.7)$$

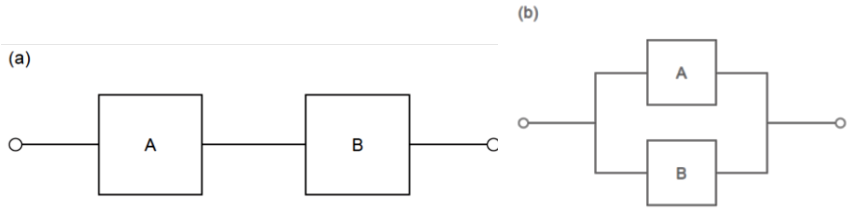
Η γνώση των αποτυχιών για ένα σύστημα ΣΑΔ-ΑΠΕ μας επιτρέπει να συγκρίνουμε την απόδοση της αξιοπιστίας του και να βαθμονομήσουμε τη συμβολή στην αναξιοπιστία κάποιων υποσυστημάτων ή εξαρτημάτων του. Με το τρόπο αυτό οι αποδόσεις στο μέλλον του συστήματος μπορούν να βελτιωθούν μέσω συντήρησης.

### 2.8.3 Διαγράμματα Μπλοκ Αξιοπιστίας

Η μελέτη σε μεμονωμένα υποσυστήματα και εξαρτήματα μπορεί να αναπαρασταθεί στη μοντελοποίηση και πρόβλεψη της αξιοπιστίας (Reliability Modeling and Prediction - RMP), χρησιμοποιώντας μεθόδους αξιολόγησης κινδύνων, με τα διαγράμματα μπλοκ αξιοπιστίας (Reliability Block Diagrams – RBD) σε μια ομάδα και έπειτα σε σύνδεση είτε σε σειρά είτε παράλληλα για να παρουσιαστεί η λειτουργικότητα τους. Στο διάγραμμα 2.9 παρουσιάζονται οι εναλλακτικές πιθανές διευθετήσεις για δύο μπλοκ αξιοπιστίας.

*Συστήματα σε σειρά*

Υπο-συνδεσμολογίες σε ένα σύνολο λέγεται ότι είναι σε σειρά, από τη σκοπιά της αξιοπιστίας, αν πρέπει όλες να είναι σε λειτουργία για να λειτουργεί το σύστημα με επιτυχία και μόνο μια δε πρέπει να λειτουργεί για να μη λειτουργεί το σύστημα.




**Διάγραμμα 2.9 Αναπαράσταση υπο-συνδεσμολογιών σε ένα διάγραμμα μπλοκ αξιοπιστίας. (a) Σε σειρά (b) Σε παράλληλη σύνδεση.**

Έστω ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από δύο ανεξάρτητα εξαρτήματα A και B τα οποία είναι συνδεδεμένα στη σειρά, όπως για παράδειγμα γρανάζια.

$$R_p = \Pi Rt \qquad (2.8)$$

Η εξίσωση αυτή αναφέρεται ως ο κανόνας προϊόντος της αξιοπιστίας.

Έστω $R_a$ και $R_b$ είναι οι πιθανότητες για την επιτυχή λειτουργία μεμονωμένων υπο-συνδεσμολογιών A και B αντίστοιχα (διάγραμμα 2.9.a), και $R_s$ η πιθανότητα για την επιτυχή λειτουργία του συνόλου της σειράς.

Έστω $Q_a$ και $Q_b$ είναι οι πιθανότητες για την αποτυχία των υπο-συνδεσμολογιών A και B, αντίστοιχα :

$$R_s = R_a \times R_b \qquad (2.9)$$

Παράλληλα *συστήματα*

Υπο-συνδεσμολογίες σε ένα σύνολο λέγεται ότι είναι παράλληλες, από τη σκοπιά της αξιοπιστίας, όταν μόνο μία πρέπει να λειτουργεί με επιτυχία το σύστημα ή όλες πρέπει να μη λειτουργούν για να μη λειτουργεί το σύστημα.

Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από δύο ανεξάρτητα εξαρτήματα A και B, σε παράλληλη σύνδεση (διάγραμμα 2.9.b), για παράδειγμα δύο αντλίες λαδιού σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων,

παράλληλες μεταξύ τους. Από τη σκοπιά της αξιοπιστίας, η απαίτηση είναι ότι μόνο ένα από τα υποσυστήματα πρέπει να δουλεύει για λειτουργεί με επιτυχία το σύστημα.

Ξανά $R_a$ και $R_b$ είναι οι πιθανότητες για την επιτυχή λειτουργία μεμονωμένων υπο-συνδεσμολογιών (συστημάτων) Α και Β αντίστοιχα, και $R_p$ η πιθανότητα επιτυχούς λειτουργίας του συστήματος σε παράλληλη σύνδεση.

Έστω $Q_a$ και $Q_b$ είναι οι πιθανότητες αποτυχίας των υποσυστημάτων Α και Β, αντίστοιχα:

$$Qp = \Pi Q_i \qquad (2.10)$$

$$R_p = 1 - \Pi Q_i \qquad (2.11)$$

## 2.9 Μεθοδολογίες αξιολόγησης Κινδύνων

Σκοπός της εκτίμησης των κινδύνων είναι *η παροχή πληροφοριών και η ανάλυση βάσει στοιχείων στον εντοπισμό, στην ανάλυση και την αξιολόγηση των κινδύνων που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την ανάπτυξη ενός έργου ή μιας λειτουργικής διαδικασίας*. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, χρειάζονται διάφορες τεχνικές και μέθοδοι που βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Οι σημαντικότερες μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνου (Widerman, et. al. 1992) περιγράφονται στο παράρτημα 1, ενώ ακολουθεί ο πίνακας 2.2 (International Standard IEC/FDIS 2009) όπου πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση των τεχνικών και των μεθοδολογιών καθώς και πως εφαρμόζονται σε κάθε στάδιο της διαδικασίας εκτίμησης των κινδύνων ως εξής:

- προσδιορισμός κινδύνου.
- Ανάλυση κινδύνου
    - Ανάλυση επιπτώσεων.
    - ποιοτική, ημιποσοτική ή ποσοτική εκτίμηση πιθανοτήτων.
    - εκτίμηση του βαθμού κινδύνου.
- Αξιολόγηση κινδύνου.

Για κάθε στάδιο της διαδικασίας αξιολόγησης κινδύνου, η εφαρμογή της μεθόδου περιγράφεται ως ισχυρή (με το σύμβολο SA-strongly applicable), εφαρμοστέα (A-applicable) ή μη εφαρμόσιμη (NA-no applicable). Στον πίνακα παρατηρείται η ικανότητα της *FMEA* στην ανάλυση και τον εντοπισμό των τρόπων αποτυχίας και των επιπτώσεων με τους οποίους τα συστατικά, τα συστήματα ή οι διεργασίες δεν μπορούν να εκπληρώσουν το σκοπό του σχεδιασμού τους, και είναι η μέθοδος που στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται στην

εκτίμηση των βλαβών και τη λειτουργική διαθεσιμότητα του υπεράκτιου συστήματος αξιοποίησης του δυναμικού των *ΑΠΕ*.

**Πίνακας 2.2 Μεθοδολογίες εκτίμησης κινδύνου και εφαρμοσημότητα (με το σύμβολο SA-strongly applicable η εφαρμογή της μεθόδου περιγράφεται ως ισχυρή, με A-applicable εφαρμοστέα και με NA-no applicable μη εφαρμόσιμη).**

| Μεθόδοι και τεχνικές | Διεργασίες εκτίμησης κινδύνου | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | προσδιορισμός κινδύνου | Ανάλυση κινδύνου | | | Αξιολόγηση κινδύνου |
| | | Ανάλυση επιπτώσεων | ποιοτική, ημιποσοτική ή ποσοτική εκτίμηση πιθανοτήτων | εκτίμηση του βαθμού κινδύνου | |
| Brainstorming | SA | NA | NA | NA | NA |
| Structured or semi-structured interviews | SA | NA | NA | NA | NA |
| Check-lists | SA | NA | NA | NA | NA |
| Delphi | SA | NA | NA | NA | NA |
| Hazard and operability studies (HAZOP) | SA | SA | A | A | A |
| Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) | SA | SA | NA | NA | SA |
| Primary hazard analysis | SA | NA | NA | NA | NA |
| Root cause analysis | NA | SA | SA | SA | SA |
| Failure mode effect analysis | SA | SA | SA | SA | SA |
| Fault tree analysis | A | NA | SA | A | A |
| Event tree analysis | A | SA | A | A | NA |
| Markov analysis | A | SA | A | NA | NA |
| Monte Carlo simulation | NA | A | A | NA | NA |
| Sensitivity analysis | A | SA | A | SA | A |

## 2.10 Σύνοψη

Η εκτίμηση και η διαχείριση κινδύνων υιοθετούνται σήμερα σε κάθε σχεδόν επιστημονικό κλάδο. Ο βασικός σκοπός της εκτίμηση και της διαδικασίας διαχείρισης των κινδύνων είναι η λήψη μέτρων και αποφάσεων σχετικά με τους εντοπιζόμενους κινδύνους.

Όμως στην διερεύνηση των συστημάτων απαραίτητα είναι ο καθορισμός της αποτυχίας η συλλογή των δεδομένων και η μοντελοποίηση των συστημάτων τους ώστε η ολοκληρωμένη μελέτη του κάθε συστήματος να μπορεί να στηριχθεί στη δομική και λειτουργική διαδικασία, καθώς και ποια ακολουθία υπάρχει στη κατασκευή του. Σε αυτό βοηθούν η συγκέντρωση δεδομένων λειτουργίας σε χρονικά διαστήματα και η μοντελοποίηση των συστημάτων σε διαγράμματα μπλοκ αξιοπιστίας.

Η ανάλυση κινδύνων βοηθά στην επιλογή των κινδύνων που είναι απαραίτητο ληφθούν υπόψη και να γίνουν οι κατάλληλες ενέργειες για την αντιμετώπιση τους. Περαιτέρω η διαχείριση κινδύνων, απαιτεί τη χρήση μεθόδων και τεχνικών για την επίτευξη της ολοκληρωμένης προσέγγισης, με στόχο την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, τη βελτιστοποίηση, τη βιωσιμότητα και την αποτελεσματικότητα συστημάτων.

Οι μέθοδοι που διερευνήθηκαν και παρουσιάζονται στο παράρτημα, αξιολογούνται ώστε η ποιο κατάλληλη να εφαρμοστεί στον εντοπισμό και την ανάλυση κινδύνων, ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων που θα βοηθήσει στην επαύξηση την αξιοπιστίας σε μια υπεράκτια κατασκευή αξιοποίησης ΑΠΕ.

Όπως διαπιστώθηκε, υπάρχει πληθώρα εργαλείων με διαφορετικές αποδόσεις και χρήσεις. Όμως, η επιλογή της ποιο κατάλληλης ώστε από την εφαρμογή της να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, είναι στην ευχέρεια της εκάστοτε ομάδας αξιολόγησης και διαχείρισης κινδύνου.

# Κεφάλαιο 3

## 3.1 Εισαγωγή

Η Λήψη αποφάσεων και οι μέθοδοι πολλαπλών κριτηρίων (Multi-Critreria Decision Making - MCDM) που την υποστηρίζουν ανήκουν σε ένα κλάδο Επιχειρησιακής Έρευνας που είναι κατάλληλος για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται διερεύνηση στη λήψη αποφάσεων και των μεθοδολογιών-τεχνικών που την υποστηρίζουν για να κατηγοριοποιηθούν και να προσδιοριστεί το πλαίσιο αναφοράς τους. Στη συνέχεια μέσα από τη βιβλιογραφική επισκόπηση τόσο των μεθόδων όσο και των προβλημάτων που μπορούν να αντιμετωπιστούν προσδιορίζονται τα πεδία εφαρμογής τους που έχουν σχέση με τις ΑΠΕ και τις εφαρμογές τους σε συστήματα αξιοποίησής τους. Το κομμάτι αυτό της έρευνας θα προσδιορίσει την αναγκαιότητα ή και την πιθανότητα κενού που υπάρχει και είναι ο στόχος της διατριβής.

## 3.2 Μέθοδοι και Συστήματα Λήψης Αποφάσεων

Κάθε κατάσταση/πρόβλημα απόφασης υπάρχει μέσα σε ένα πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό αποτελείται από μια σειρά περιστάσεων και συνθηκών που επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα μιας λήψης απόφασης. Οι Radford (1989) και Hipel et al. (1993) προτείνουν τέσσερις σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν το πλαίσιο λήψης αποφάσεων, δηλαδή:

1. Εάν υπάρχει αβεβαιότητα ή όχι,
2. Εάν τα οφέλη και τα κόστη που προκύπτουν από την εφαρμογή των πιθανών δράσεων μπορούν να εκτιμηθούν πλήρως από ποσοτική άποψη,
3. Εάν πρέπει να ληφθεί υπόψη ένα κριτήριο ή πολλαπλά κριτήρια,
4. Αν η εγκυρότητα της λήψης αποφάσεων βρίσκεται υπό τον έλεγχο:
    - ενός οργανισμού
    - ενός ατόμου ή μιας ομάδας
    - εάν δύο ή περισσότεροι συμμετέχοντες έχουν τη δύναμη να επηρεάσουν την απόφαση.

Με βάση αυτούς τους παράγοντες, οι Radford (1989) και Hipel et al. (1993) επικεντρώθηκαν σε τρία σενάρια ανάλυσης αποφάσεων:

1. πολλαπλών κριτήριων- μεμονωμένων συμμετεχόντων (Multiple Criteria - Single DM)
2. πολλαπλών συμμετεχόντων-μεμονωμένων κριτηρίων (Multiple DMs- Single Criterion ) και
3. πολλαπλών κριτηρίων-πολλαπλών συμμετεχόντων (Multiple Criteria - Multiple DMs)

Επεκτείνοντας αυτή την ταξινόμηση με βάση τα *χαρακτηριστικά* ή τις ομοιότητες αυτών των καταστάσεων λήψης αποφάσεων, στον πίνακα 3.1, παρουσιάζεται μια συστηματική σχέση της πολλαπλών κριτηρίων ανάλυσης (MCDA) και πως προσεγγίζονται σχετικά ερευνητικά θέματα. Εξετάζοντας αυτά τα *χαρακτηριστικά* ή τις ομοιότητες αυτών των καταστάσεων λήψης αποφάσεων παρατηρείται ότι:

- Για SDSC και FASC: ένας λήπτης απόφασης εξετάζει ένα μόνο κριτήριο, σε ένα πρόβλημα πεπερασμένων εναλλακτικών λύσεων. Σε πεδία όπου η λήψη απόφασης αφορά καταστάσεις SDSC και FASC τα προβλήματα λήψης αποφάσεων είναι απλά εφόσον ένας λήπτης απόφασης εξετάζει αποκλειστικά ένα κριτήριο για τη λήψη αποφάσεως. Τα ερευνητικά πεδία περιλαμβάνουν την ανάλυση κόστους-οφέλους σε οικονομικά θέματα και την κλασική επιλογή αντικειμενικής βελτιστοποίησης βάσει της επιχειρησιακής έρευνας.
- Για SD/MC και FA/MC: ένας λήπτης απόφασης εξετάζει πολλαπλά κριτήρια, σε πολλαπλών κριτηρίων πρόβλημα πεπερασμένων εναλλακτικών λύσεων. Εδώ κατηγοριοποιούνται προβλήματα όπου ένας λήπτης απόφασης λαμβάνει υπόψη ένα πλήθος κριτηρίων σε προβλήματα πεπερασμένων εναλλακτικών λύσεων.
- Για MD/SC και MD/MC: πολλοί λήπτες αποφάσεων έρχονται αντιμέτωποι με αποφάσεις προβλημάτων με ένα μόνο κριτήριο ή πολλαπλών κριτηρίων. Οι αναλύσεις MD/SC και MD/MC έχουν έναν πεπερασμένο αριθμό ληπτών αποφάσεων, που συμμετέχουν στην ταξινόμηση των αποφάσεων, για ένα ή περισσότερα θέματα. Οι περιοχές των MD/SC και MD/MC αλληλεπικαλύπτονται σε μεγάλο μέρος της έρευνας MC/DA . Στην έρευνα της παρούσας διατριβής διαπιστώθηκε αλληλοεπικάλυψη σε πεδία αλλά η έμφαση δίνετε στην ανάλυση προβλημάτων MD/MC. Στα προβλήματα που διερευνήθηκαν πολλοί DMs

και πολλές φορές οι με αντικρουόμενα κριτήρια, αντιμετωπίζουν προβλήματα λήψης αποφάσεων πολλών εναλλακτικών λύσεων που επηρεάζονται αλλά και επηρεάζουν διάφορους τομείς. Όπως οι τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ οι οποίες επιδρούν στο περιβάλλον, την ασφάλεια, την επιχειρηματική δραστηριότητα, την κοινωνία, θετικά ή αρνητικά και με διαφορετικό βαθμό στάθμισης ή σπουδαιότητας.

- Για ID/SC και ID/MC: εξετάζονται από πολύ μεγάλο αριθμό ληπτών αποφάσεων (θεωρητικά άπειρων) προβλήματα με ένα κριτήριο ή πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων. Η έρευνα που σχετίζεται με το ID/SC και το ID/MC περιλαμβάνει στατιστικά μοντέλα και ανάλυση χρονοσειρών για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων π.χ. της αγοραστικής συμπεριφοράς των καταναλωτών. Με βάση τη μοντελοποίηση της συσσωμάτωσης της ατομικής συμπεριφοράς, τα μοντέλα διακριτών επιλογών μπορούν να αναλύσουν και να προβλέψουν τις επιπτώσεις των διαφόρων σεναρίων αποφάσεων άπειρων DMs, όπως η πρόβλεψη της ζήτησης για ένα προϊόν υπό εναλλακτικές στρατηγικές τιμολόγησης.
- Για IA/SC και IA/MC: ένας απείρως μεγάλος αριθμός εναλλακτικών αποφάσεων εφαρμόζεται σε προβλήματα με ένα ή πολλαπλά κριτήρια. Η έρευνα που σχετίζεται με το IA/SC και το IA/MC περιλαμβάνει μεμονωμένες ή πολλαπλές τεχνικές βελτιστοποίησης προβλημάτων που μελετήθηκαν ευρέως στην επιχειρησιακή έρευνα. Το IA/SC και το IA/MC επικεντρώνονται σε μια σειριακή διαδικασία προσδιορισμού μεταβλητών απόφασης, καθορισμού στόχων, περιορισμών στη μοντελοποίηση και εύρεσης βέλτιστων λύσεων.

Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τα ακρωνύμια που χρησιμοποιούνται στην πράξη για τις διάφορες καταστάσεις που απαιτείται λήψη απόφασης, π.χ. SD/SC για Single DM σε Single Criterion.

**Πίνακας 3.1 Πολυκριτηριακή ανάλυση και σχετικές ερευνητικές περιοχές.**

| | Προβλήματα με ένα κριτήριο (Single Criterion) | Προβλήματα πολλαπλών κριτήριων (Multiple Criteria) |
|---|---|---|
| Μεμονωμένοι συμμετέχοντες στη λήψη αποφάσεων (Single DM) | SD/SC | SD/MC |
| Πολλαπλοί συμμετέχοντες στη λήψη αποφάσεων (Multiple DMs) | MD/SC | MD/MC |
| Πολύ μεγάλος αριθμός ληπτών αποφάσεων (Infinitely many DMs) | ID/SC | ID/MC |
| Προβλήματα πεπερασμένων εναλλακτικών (Finite Alternatives) | FA/SC | FA/MC |
| Απείρως μεγάλος αριθμός εναλλακτικών αποφάσεων (Infinitely many Alternatives) | IA/SC | IA/MC |

### 3.2.1 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων

Οι *μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων* (Multi-Critreria Decision Making - *MCDM*) όπως αναφαίρεται και από τους (Wang, et. al. 2010) είναι ένας κλάδος μιας γενικής κλάσης μοντέλων Επιχειρησιακής Έρευνας που είναι κατάλληλος για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από υψηλή αβεβαιότητα, αντικρουόμενους στόχους, διαφορετικές μορφές δεδομένων και πληροφοριών, πολλά συμφέροντα και προοπτικές, εξελισσόμενων βιοφυσικών και κοινωνικοοικονομικών συστημάτων. Αυτή η μεγάλη κατηγορία μεθόδων χωρίζεται περαιτέρω σε *λήψης αποφάσεων πολλαπλών αντικείμενων-στόχων (Multi-Objective Decision-Making, MODM)* και *λήψης αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών (Multi-Attribute Decision-Making, MADM).* Αυτές οι μεθοδολογίες μοιράζονται τα κοινά χαρακτηριστικά των αντιθέσεων μεταξύ των κριτηρίων, τις σταθμισμένες μονάδες και τις δυσκολίες σχεδιασμού / επιλογής εναλλακτικών λύσεων. Η κύρια διάκριση μεταξύ των δύο μεθόδων βασίζεται στον αριθμό των υπό αξιολόγηση εναλλακτικών επιλογών (Yuan, 2018), (Korhonen, ), (Belton, 2002).

- Οι *μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών* (Multi Atribute Decision Making), έχουν σχεδιαστεί για την επιλογή διακριτών εναλλακτικών λύσεων, ενώ
- οι *μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων* (Multi-Objective Decision-Making), είναι πιο κατάλληλες για την αντιμετώπιση πολλαπλών αντικειμενικών προβλημάτων σχεδιασμού, όταν ένας θεωρητικά άπειρος αριθμός συνεχών εναλλακτικών λύσεων ορίζεται από ένα σύνολο περιορισμών σε ένα διάνυσμα μεταβλητών απόφασης.

Στη διαδικασία λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων (επίσης γνωστή ως πολλαπλών αντικειμενικών προγραμματισμών ή προβλήματα διανυσματικής βελτιστοποίησης / μεγιστοποίησης / ελαχιστοποίησης), οι εναλλακτικές λύσεις δεν είναι προκαθορισμένες, αλλά αντίθετα ένα σύνολο αντικειμενικών λειτουργιών βελτιστοποιείται υπό την επιφύλαξη ενός συνόλου περιορισμών. Έτσι, προτείνεται η πιο ικανοποιητική και αποδοτική λύση. Σε αυτή την αποτελεσματική λύση δεν είναι δυνατόν να βελτιωθεί η απόδοση οποιουδήποτε στόχου χωρίς να υποβαθμιστεί η απόδοση τουλάχιστον ενός άλλου στόχου. Στη διαδικασία λήψης αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών πρέπει να αξιολογηθεί ένας μικρός αριθμός εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με ένα σύνολο χαρακτηριστικών που συχνά είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν (Marttunen, et. al. 2017).

Ωστόσο, οι όροι MADM και MCDM συχνά χρησιμοποιούνται εναλλακτικά για να σημαίνουν το ίδιο πράγμα. Στη μελέτη, το MCDM θα χρησιμοποιείται συχνότερα με τη σημασία MADM. Γενικότερα, MCDM (MADM) επιτυγχάνεται όταν εξ υποθέσεως το υποκείμενο πρόβλημα απόφασης έχει ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων (Hanne, 2012). Σε αυτά τα προβλήματα αποφάσεων, το σύνολο των εξεταζόμενων εναλλακτικών λύσεων είναι προκαθορισμένο. Από την άλλη πλευρά, το MODM λειτουργεί καλύτερα σε ένα περιβάλλον όπου ο χώρος απόφασης είναι συνεχής, που σημαίνει ένα άπειρο υποσύνολο ενός διανυσματικού χώρου ορίζεται από τους περιορισμούς (Triantaphyllou, 2000).

Τυπικά, ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα ($\rho$) MCDM δίνεται από τη συνάρτηση (1) ως:

$$\rho = (A, f) \qquad (3.1)$$

Και αναφέρεται ως πρόβλημα πολλαπλών χαρακτηριστικών λήψης αποφάσεων (MADM) εάν το $A$ που αποτελεί τον αριθμό εναλλακτικών λύσεων (α) είναι πεπερασμένο.

Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα $\rho$ μπορεί να εκφραστεί ως μήτρα (πίνακας) απόφασης MADM με $C \in k^{u,v}$:

$$A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots\dots, \alpha_u) \qquad (3.2)$$

*Και*

$$a_w = \{C_{w1}, C_{w2}, \dots\dots\dots, C_{wv}\} \qquad (3.3)$$

Για κάθε $W \in \{1, \dots, u\}$

όπου C είναι το σύνολο των κριτηρίων, k το σύνολο των αξιολογήσεων των ληπτών αποφάσεων και W η βαρύτητα του κριτηρίου.

Ένα πρόβλημα MCDM $\rho = (A, f)$ αναφέρεται ως πρόβλημα λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων (MODM) αν το $A$ μπορεί να γραφτεί ως:

$$A \subseteq k^n, A = \{a \in k^n : g_i(a) \leq), i \in \{1, \dots, m\}\} \qquad (3.4)$$

Με περιορισμούς g, που αφορούν τους περιορισμούς και επηρεάζουν το σύνολο των αξιολογήσεων:

$$g: k^n \rightarrow k, i \in \{1, \ldots, m\} \qquad (3.5)$$

Σε MCDM ή πιο κατάλληλα, προβλήματα MADM, ορισμένες ορολογίες έχουν προτυποποιηθεί, τόσο στην έρευνα όσο και στις βιομηχανικές εφαρμογές, ώστε να είναι κατευθυντήριες κατά την εφαρμογή των μεθόδων. Ορισμένες από αυτές τις ορολογίες είναι οι ακόλουθες:

### 3.2.2 Λήπτης αποφάσεων (Decision Maker - DM)

Σε προβλήματα λήψης αποφάσεων (Multi Criteria Decision Making) MCDM, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων τυπικά αρχίζει και τερματίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ο DM είναι υπεύθυνος για τη διάρθρωση του προβλήματος απόφασης, τον καθορισμό των εναλλακτικών λύσεων, την επιλογή μιας εναλλακτικής λύσης και την τελική επανεξέταση των αποφάσεων που έχουν ληφθεί.

Στην πράξη, ο DM είναι ως επί το πλείστων εμπειρογνώμονας με σημαντικές γνώσεις σχετικά με τις εναλλακτικές λύσεις και τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση (Gwo-Hshiung, 2010). Ωστόσο, ο DM δεν είναι πάντα αναλυτής αποφάσεων. Ο αναλυτής απόφασης, είναι αυτός που βοηθά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων προσφέροντας κατάλληλες μεθόδους (μεθόδους MCDM) για να καθοδηγήσει ή να βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Επομένως, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων, ο οποίος δίνει αποφάσεις και οι αναλυτές αποφάσεων, που επιλέγουν τις κατάλληλες μεθόδους για το πρόβλημα που αντιμετωπίζετε, είναι πολύ σημαντικοί για τη διαδικασία λήψης απόφασης.

### 3.2.3 Εναλλακτικές λύσεις (Alternatives)

Στη δόμηση της λήψης αποφάσεων, οι εναλλακτικές λύσεις συνήθως αναφέρονται στις επιλογές δράσης ή τις επιλογές που διατίθενται στον λήπτη αποφάσεων. Αυτές, οι εφάμιλλες εναλλακτικές λύσεις αξιολογούνται εκ των προτέρων, λαμβάνουν κάποια προτεραιότητα και τελικά επιλέγονται οι καλύτερες (Triantaphyllou, 2000). Στην ανάλυσή μας, η έμφαση δίνεται στα προβλήματα MADM και συνεπώς οι εναλλακτικές θεωρούνται πεπερασμένες.

### 3.2.4 Κριτήρια (Criteria)

Ο όρος κριτήρια χρησιμοποιείται εναλλακτικά με τους όρους χαρακτηριστικά και στόχοι, για να περιγράψει τη διαφοροποίηση του μέτρου αποτελεσματικότητας και απόδοσης από τα οποία αξιολογούνται οι εναλλακτικές λύσεις.

Σε προβλήματα αποφάσεων όπου εξετάζονται πολλαπλά κριτήρια, η πρακτική είναι να κατηγοριοποιηθούν τα κριτήρια σε μια ιεραρχική δομή, ειδικά όταν ο αριθμός τους είναι μεγάλος. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται μείζονα κριτήρια με συναφή δευτερεύοντα κριτήρια. Σε σπάνιες περιπτώσεις, μερικά δευτερεύοντα κριτήρια μπορεί να έχουν και αυτά συναφή δευτερεύοντα κριτήρια. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε μερικές περιπτώσεις, τα πολλαπλά κριτήρια τείνουν να έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους, ειδικά όταν υπάρχουν αντισταθμιστικά στοιχεία μεταξύ δύο ή περισσοτέρων κριτηρίων.

Ένα παράδειγμα αποτελούν τα κριτήρια του κόστος και της ποιότητας. Δηλαδή, όταν ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος και ταυτόχρονα να μεγιστοποιηθεί η χρησιμότητα (Triantaphyllou, 2000). Όσον αφορά τις συγκρούσεις των κριτηρίων στα MCDM, ο Zeleny (2000) υποστηρίζει ότι συγκρούσεις δεν προκύπτουν μεταξύ κριτηρίων αλλά μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών.

*Συντελεστές Βαρύτητας Αποφάσεων (Decision Weights)*

Στις MCDM, οι περισσότερες από τις μεθόδους χρησιμοποιούν την έννοια της βαρύτητας (Weight) των κριτηρίων. Αυτό σημαίνει ότι η σειρά κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στις κρίσεις έχει προτεραιότητα όσον αφορά τη σχετικότητα ή τη συνεισφορά τους στην τελική απόφαση. Υπάρχουν και περιπτώσεις όπου δεν σταθμίζονται μόνο τα κριτήρια αλλά και οι λήπτες αποφάσεων υποθέτοντας ότι δεν έχουν όλοι την ίδια σημαντικότητα (Hanne, 2012). Τυπικά στις περισσότερες μεθόδους MCDM, οι βαρύτητες κανονικοποιούνται έτσι ώστε το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εκτίμησης των βαρών των κριτηρίων ή των DM, και αυτό οφείλετε στη διαφορά του τρόπου προσέγγισης για τη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος ή με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων MCDM (Roy, 1981).

### 3.2.5 Μήτρα (πίνακας) αποφάσεων (Decision Matrix)

Στη δόμηση μιας MCDM, για διευκόλυνση της ανάλυσης, τα προβλήματα απόφασης διαμορφώνονται σε μορφή μήτρας (matrix, πίνακα) που περιλαμβάνει τους λήπτες αποφάσεων, τις εναλλακτικές λύσεις και τα κριτήρια μέτρησης.

Δηλαδή, μια μήτρα για τη λήψη αποφάσεων $k$ είναι ένας πίνακας (m x n), όπου $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ είναι το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ το σύνολο των κριτηρίων και $k = \{D_1, D_2, \dots, D_d\}$ το σύνολο των ληπτών αποφάσεων.

Η σχέση (6), δείχνει ένα πίνακα αποφάσεων για τον λήπτη αποφάσεων, $k$ = 1,2, ..., $d$

$$k = \begin{matrix} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}, i = 1,2, \dots, m \quad , j = 1,2, \dots, n \qquad (3.6)$$

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n], j = 1,2, \dots, n \qquad (3.7)$$

όπου $x_{ij}$ είναι η αξιολόγηση των εναλλακτικών $A_i$ σε σχέση με το κριτήριο $C_j$.

Επίσης, υπάρχει ένα προκαθορισμένο συντελεστής βαρύτητας (w) για τα κριτήρια που υποδηλώνουν τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου σε σχέση με τη λήψη αποφάσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, $w_j$ στην σχέση (7) δηλώνει το βάρος ενός κριτηρίου για j = 1, 2, 3, ..., n.

## 3.3 Ταξινόμηση των προβλημάτων και μεθόδων MCDM

Πριν από δεκαετίες, οι λήπτες αποφάσεων ίσως αισθάνονταν αβοήθητοι όταν αντιμετώπιζαν προβλήματα αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων. Σήμερα, ενώ ο υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων δεν ελλείπετε σε μεθόδους για λύσεις σε σύνθετα προβλήματα πολλαπλών κριτηρίων, το πλήθος των διαφόρων διαθέσιμων μεθόδων MCDM αποτελεί επίσης πρόκληση που αφορά την καταληλότητα μιας μεθόδου για ένα πρόβλημα. Ως εκ τούτου, η ταξινόμηση μεθόδων MCDM σε διάφορες ομαδοποιήσεις θεωρείται ως ένα βήμα για την ελαχιστοποίηση των προβλημάτων στην καταληλότητα επιλογής μεθόδου.

Η ταξινόμηση των προβλημάτων MCDM και η σειρά λύσεων και μεθόδων τους, βοηθούν στην προσαρμογή των κατάλληλων μεθόδων και λύσεων για συγκεκριμένα προβλήματα. Περαιτέρω, είναι χρήσιμη διότι κάθε μέθοδος MCDM έχει τα δικά της σύνολα χαρακτηριστικών τα οποία

είναι μοναδικά για το πώς προσεγγίζονται τα προβλήματα αποφάσεων. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι καμία από τις μεθόδους MCDM δεν είναι απολύτως τέλεια ούτε μπορεί να προσφέρει λύσεις σε όλα τα προβλήματα αποφάσεων.

Οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, η διάκριση μπορεί να γίνει σύμφωνα με:

1. τα προβλήματα που είναι κατάλληλα για τη μέθοδο λήψης απόφασης
2. τον αριθμό των εμπλεκομένων DMs
3. τη φύση των εναλλακτικών λύσεων
4. τα είδη δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τις μεθόδους

Όταν η ταξινόμηση βασίζεται στον αριθμό των εμπλεκομένων στη λήψη αποφάσεων, το αποτέλεσμα είναι είτε λήψη απόφασης από μια ομάδα, είτε η λήψη απόφασης ενός ατόμου. Από την άλλη πλευρά, όταν εξετάζεται το είδος των δεδομένων που εισάγονται στη μέθοδο, τότε μπορεί να έχουμε αιτιοκρατικές (προκαθορισμένες), στοχαστικές ή ασαφείς μεθόδους MCDM (Triantaphyllou, 2000).

Σύμφωνα με τους Hajkowicz, et. al. (2000), οι μέθοδοι MCDM, όταν λαμβάνεται υπόψη η φύση των εναλλακτικών λύσεων, μπορούν επίσης να ομαδοποιηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, τις συνεχείς και τις διακριτές μεθόδους.

- Οι *συνεχείς μέθοδοι* ανήκουν στην τάξη των προβλημάτων πολλαπλών στόχων λήψης αποφάσεων (MODM), όπου η εστίαση είναι να βρεθεί μια βέλτιστη ποσότητα που μπορεί να μεταβληθεί απεριόριστα σε ένα πρόβλημα απόφασης με ένα άπειρο υποσύνολο ενός διανυσματικού χώρου που ορίζεται από τους περιορισμούς. Τυπικές μέθοδοι MODM κατάλληλες για τέτοια σενάρια προβλημάτων είναι οι Προγραμματισμένου στόχου (Goal programming-GP) και γραμμικού προγραμματισμού (linear programming).
- Οι *διακριτές μέθοδοι* MCDM από την άλλη πλευρά υπάγονται στον κλάδο MADM των πολυκριτηριακών μεθόδων όπου υπάρχει μια προϋπόθεση. Αυτή είναι, ότι θεωρείται ένας πεπερασμένος αριθμός εναλλακτικών λύσεων. Λόγω της προϋπόθεσης αυτής, το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων είναι πάντα προκαθορισμένο.

Σύμφωνα με τον Bouyssou, (1993) οι μέθοδοι MADM (διακριτές) ομαδοποιούνται επίσης σε μεθόδους *κατάταξης* και μεθόδους *στάθμισης*, οι οποίες υποδιαιρούνται περαιτέρω σε *ποιοτικές*, *ποσοτικές* και *μικτές*. Για τις ποσοτικές μεθόδους, τα απαιτούμενα δεδομένα πρέπει να είναι είτε σε θεμελιώδη (basic) είτε σε αναλογική μορφή (Hajkowicz, et. al. 2000), Από την άλλη πλευρά, οι ποιοτικές μέθοδοι απαιτούν σειριακά δεδομένα.

Άλλη μια αξιοσημείωτη μορφή ταξινόμησης είναι *σε μεθόδους αξίας* και *με βάση τη χρησιμότητα*, που βοηθούν τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων να συγκεκριμενοποιούν αποτελεσματικά τις προτιμήσεις τους. Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτουν και πρέπει να σημειωθούν, η θεωρία της *αξίας πολλών χαρακτηριστικών* (Multi-attribute value theory -MAVT) και η θεωρία *χρησιμότητας* πολλαπλών χαρακτηριστικών (Multi-attribute utility theory -MAUT).

Σημειώνεται, ότι στην κατηγορία *MADM* ανήκει και η *μέθοδος Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας* (AHP), η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια και χαρακτηρίζεται η πιο δημοφιλής και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος στο πλαίσιο των προσεγγίσεων αξίας και χρησιμότητας (Mardani, et. al. 2015). Παρόλο που η AHP και η MAVT χρησιμοποιούν σχεδόν το ίδιο μοντέλο στο σχεδιασμό αποφάσεων, η προσέγγιση της AHP όσον αφορά τον καθορισμό κριτηρίων στάθμισης και εναλλακτικών επιλογών διαφέρουν σημαντικά από την προσέγγιση MAVT.

Ορισμένες ταξινομήσεις MCDM επικεντρώνονται επίσης σε μεθόδους *διασφάλισης (χαμηλού ρίσκου)* και *αβεβαιότητας (υψηλού ρίσκου)*. Οι μέθοδοι MAVT εμπίπτουν στην κατηγορία της ποσοτικών αλλά χαμηλού ρίσκου, ενώ οι μέθοδοι MAUT καθώς και οι μέθοδοι της Γαλλικής Σχολής όπως ELECTRE (Elimination and (Et) Choice Translating REality) ανήκουν στην κατηγορία των ποσοτικών με κίνδυνο-υψηλό ρίσκο (Hajkowicz, et. al. 2000).

Σε εφαρμογές των πολυκριτηριακών μεθόδων στην πραγματικότητα, τα προβλήματα που αντιμετωπίζονται παρουσιάζονται με ατελή γνώση, ασάφεια ή υποκειμενικότητα κάτι που οφείλεται ως επί το πλείστων στην εμπλοκή του ανθρώπινο παράγοντα. Αυτό καθιστά τα προβλήματα απόφασης πολύπλοκα στη μοντελοποίηση. Γι’ αυτό το λόγο, οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται από τις μεθόδους MCDM ταξινομούνται μερικές φορές σε *σαφής* ή *ασαφείς*.

Οι πληροφορίες θεωρούνται σαφείς όταν είναι *αιτιοκρατικές* (deterministic) ή *ακριβείς* (precise). Ενώ, μια πληροφορία MCDM θεωρείται *ασαφής (fuzzy*) όταν είναι ανακριβής, *υποκειμενική* ή

*ατελής*. Για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους πληροφοριών χρησιμοποιείται η *θεωρία των ασαφών συνόλων (*Fuzzy set theory).

## 3.4 Ταξινόμηση MCDM βάσει του πεδίου ερευνητικών προβλημάτων

Η έρευνα έχει δείξει ότι σε πολλά πεδία και κλάδους όπως η οικονομία, η επιχειρησιακή έρευνα, τα πληροφοριακά συστήματα, η περιβαλλοντική διαχείριση, η διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, οι κοινωνικές επιστήμες, η τεχνολογία και πολλά άλλα εμφανίζονται προβλήματα πολυκριτηριακών αποφάσεων ((Kahraman, 2008). Ανεξάρτητα από το πού εμφανίζονται τα προβλήματα απόφασης, συνήθως εμπίπτουν σε τέσσερις κατηγορίες που απαριθμούνται από τον Roy (1981) και αναφέρονται από τον (Hanne, 2012). Οι κατηγορίες των προβλημάτων λήψης αποφάσεων έχουν ως εξής:

- *Προβλήματα αποφάσεων επιλογής (Choice problem),* όπου ο στόχος είναι να επιλεχθεί η καλύτερη εναλλακτική λύση μεταξύ ενός πεπερασμένου συνόλου ανταγωνιστικών εναλλακτικών λύσεων. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα της επιλογής αυτοκινήτου, όπου η επιλογή πραγματοποιείται από ένα σύνολο επιλογών βάσει κάποιων κριτηρίων.
- *Πρόβλημα αποφάσεων ταξινόμησης (Sorting problem*). Στα προβλήματα ταξινόμησης, οι εναλλακτικές λύσεις ομαδοποιούνται σε προκαθορισμένες ομάδες που μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, στις αξιολογήσεις των επιδόσεων των εργαζομένων, αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με την απόδοσής τους: στους «*υπερ-αποδοτικούς*», τους «*ικανοποιητικούς*» και τους «*χαμηλής απόδοσης*» εργαζομένους. Μια τέτοια κατηγοριοποίηση θα μπορούσε να βοηθήσει στη διαχείριση ανταμοιβής και εφαρμογής μέτρων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης των εργαζομένων. Τα προβλήματα αποφάσεων ταξινόμησης χρησιμοποιούνται μερικές φορές κατά την αρχική εξέταση πριν από ένα πρόβλημα αποφάσεων επιλογής.
- *Προβλήματα αποφάσεων κατάταξης (Ranking problem),* όπου απαιτείται κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων από τις καλύτερες ή τις πιο ιδανικές προς τις χειρότερες μέσω συγκρίσεων κατά ζεύγη (pairwise comparisons) ή μέσω μέτρων που βασίζονται στην απόσταση (distance based measures). Για παράδειγμα, στις θέσεις εργασίας που σκοπεύουν να προσλάβουν περισσότερους από έναν υποψηφίους, η παρουσίαση κατά τη διάρκεια της συνέντευξης δημιουργεί κατηγοριοποίηση των υποψηφίων, ώστε να επιλεγούν οι ποιο αξιόλογοι από τους υποψηφίους.

- *Προβλήματα αποφάσεων εξάλειψης (Elimination problem).* Αυτή η κατηγορία αποτελεί υποκατηγορία των προβλημάτων λήψης αποφάσεων επιλογής και ο στόχος είναι να εξαλειφθούν οι ανεπιθύμητες επιλογές με παρόμοια χαρακτηριστικά ή που δεν πληρούν ορισμένες απαιτήσεις από μια σειρά επιλογών. Σε αυτά τα σενάρια-προβλήματα, έχει οριστεί μια ελάχιστη τιμή (κατωφλίου) για την εξάλειψη των επιλογών που δεν πληρούν το όριο που έχει τεθεί.

Στον *Πίνακα 3.2* παρουσιάζονται δημοφιλείς μέθοδοι λήψης αποφάσεων που θεωρούνται γενικά κατάλληλες για την επίλυση ιδιαιτέρων προβλημάτων. Κάθε μέθοδος, διακρίνεται ότι έχει τα δικά της πλεονεκτήματα, αδυναμίες και γενικά περιορισμούς όσον αφορά τα είδη προβλημάτων που μπορεί να επιλύσει.

**Πίνακας 3.2 Προβλήματα MCDM αποφάσεων και μέθοδοι όπου (•) κατάλληλη και (×) δεν εφαρμόζεται (προσαρμογή από βιβλίο Multiple criteria decision analysis Greco, et. al. 2016)**

| **Πούκριτηρικές μέθοδοι (MCDM Methods)** | **Προβλήματα αποφάσεων επιλογής (Choice/Selection Decision)** | **Προβλήματα αποφάσεων κατάταξης (Ranking problem)** | **Πρόβλημα αποφάσεων ταξινόμησης (Sorting problem)** | **Προβλήματα αποφάσεων εξάλειψης (Elimination problem).** |
|---|---|---|---|---|
| Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) | • | • | × | × |
| Analytic Hierarchy Process (AHP) | • | • | × | × |
| Case-Based Reasoning (CBR) | • | × | × | • |
| Data Envelopment Analysis (DEA) | • | • | × | × |
| Fuzzy Set Theory | × | × | • | • |
| Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) | × | • | × | • |
| Goal Programming (GP) | × | × | × | • |
| ELECTRE I | • | × | × | × |
| ELECTRE III | × | • | × | × |
| PROMETHEE | • | • | × | × |
| Simple Additive Weighting (SAW) | × | × | • | • |
| Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS) | • | • | × | × |

Ωστόσο, για να επιλυθούν τα προβλήματα αποφάσεων βάση του ερευνητικού πεδίου, συχνά απαιτείται μια προσέγγιση από *κανονιστικές (formal) και περιγραφικές (prescriptive) αναλύσεις* για να κατανοηθούν οι απαιτήσεις του υποκείμενου προβλήματος. Μερικές από αυτές τις κανονιστικές και τις περιγραφικές μεθόδους ανάλυσης προσδιορίζονται σε μελέτες (Kleindorfer, et. al. 1993), (Bell, et. al. 1988) και αναφέρονται από τον Gwo-Hshiung (2010). Η προσέγγιση της περιγραφικής ανάλυσης επικεντρώνεται στα προβλήματα που οι DMs παρέχουν πραγματικά λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη αναθεωρημένες αναλύσεις και εντοπίζοντας μεθόδους κατάλληλες για να χρησιμοποιηθούν στην επίλυση προβλημάτων αποφάσεων. Από την άλλη, η κανονιστική ανάλυση εξετάζει τα είδη των προβλημάτων που θα πρέπει να επιλύσουν ιδανικά οι λήπτες αποφάσεων.

Καθώς δεν υπήρχε κανένα πλαίσιο που να βοηθά να αποφασιστεί ποια μέθοδος είναι απολύτως κατάλληλη για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, ο Guitouni et. al. (1999) πρότειναν ένα προκαταρκτικό πλαίσιο έρευνας για να βοηθήσει τις δυσκολίες της επιλογής μιας κατάλληλης μεθόδου πολλαπλών κριτηρίων για ένα κατάλληλο πρόβλημα. Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζεται η έννοια της *σύγκρισης ανά ζεύγη,* η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ομαδοποίηση μερικών από τις μεθόδους MCDM.

Σημειώνεται ότι οι μέθοδοι AHP και MACBETH[5], υποστηρίζουν αυτήν την προσέγγιση σύγκρισης κατά ζεύγη των κριτηρίων και των εναλλακτικών επιλογών. Εντούτοις, για την AHP, η σύγκριση ανά ζεύγη βασίζεται σε μια κλίμακα αναλογίας, ενώ στην MACBETH (Guitouni et. al. (1999), (Hajkowicz, et. al. 2000) χρησιμοποιείται μια κλίμακα διαστήματος. Στο πλαίσιο της διατριβής συνδυάζονται η περιγραφική (prescriptive) και η κανονιστική (normative- formal) προσέγγιση ανάλυσης τόσο στις ερευνητικές όσο και στις σχεδιαστικές προσεγγίσεις των υβριδικών εφαρμογών των μεθόδων MCDM.

### 3.4.1 Αιτιολόγηση χρήσης MCDM

Σύμφωνα με τους Tsoutos et al. (2009) υπάρχουν *τέσσερις* βασικοί λόγοι που δικαιολογούν τη χρήση μεθόδων λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, προσδιορίζοντας ότι:

[5] Η μέθοδος MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique), προτάθηκε από τους Bana e Costa and Vansnick (1994), και είναι μια αλληλεπιδραστική προσέγγιση, η οποία λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, βοηθά τον αποφασίζοντα να εκτιμήσει τη συνολική ελκυστικότητα (global attractivity) των διαφορετικών δράσεων (actions).

1. Επιτρέπεται η *διερεύνηση* και η *ενσωμάτωση* των συμφερόντων και των στόχων πολλών εμπλεκομένων, δεδομένου ότι η συνεισφορά τόσο των ποσοτικών όσο και των ποιοτικών πληροφοριών από κάθε παράγοντα λαμβάνεται υπόψη υπό μορφή κριτηρίων και συντελεστών βαρύτητας
2. Ταιριάζουν με την *πολυπλοκότητα* από τη συμμετοχή πολλών εμπλεκομένων στη λήψη αποφάσεων, παρέχοντας πληροφορίες για το αντικείμενο μελέτης που είναι εύκολο να αντιληφθούν οι εμπλεκόμενοι, με αποτέλεσμα να είναι φιλικές προς το χρήστη. Η φιλικότητα προς το χρήστη των μεθόδων έγκειται σε δύο παραμέτρους:
    a. τα προτεινόμενα κριτήρια υπολογίζονται και δίνονται τιμές που είναι συνεπείς και συγκρίσιμες με τα δεδομένα εισόδου (έτσι διερευνάται το μέτρο καταλληλότητας), και
    b. η μορφή των αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων είναι «απλή» ώστε να καθιστά τα αποτελέσματα της μεθόδου ουσιαστικά και άμεσα εφαρμόσιμα από τους εμπλεκόμενους.
3. Είναι *γνωστές και εφαρμόσιμες* μέθοδοι εκτίμησης εναλλακτικών αποφάσεων, οι οποίες επιπλέον περιλαμβάνουν διαφορετικές εκδοχές της μεθόδου η οποία αναπτύχθηκε και ερευνήθηκε για συγκεκριμένα προβλήματα ή / και συγκεκριμένα πλαίσια
4. Είναι μέθοδοι που επιτρέπουν την *αντικειμενικότητα* και την *ενσωμάτωση* των διαφορετικών αντιλήψεων και συμφερόντων των εμπλεκομένων χωρίς να είναι δαπανηρές σε πόρους (ενέργεια ή κόστος).

Οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων μπορούν να παρέχουν λύσεις στην αύξηση των σύνθετων προβλημάτων διαχείρισης. Προσφέρουν καλύτερη κατανόηση των εγγενών χαρακτηριστικών του προβλήματος για τη λήψη της απόφασης, προάγουν το ρόλο των συμμετεχόντων στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, διευκολύνουν συμβιβασμούς και συλλογικές αποφάσεις και τέλος παρέχουν μια καλή βάση για να γίνουν κατανοητά τα μοντέλα των αναλυτών σε ένα ρεαλιστικό σενάριο.

Επίσης, οι μέθοδοι συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας των αποφάσεων καθιστώντας τις πιο ρητές, ορθολογικές και αποτελεσματικές, και με τη χρήση τους διευκολύνεται η διαπραγμάτευση, η ποσοτικοποίηση και η κατανόηση των προτεραιοτήτων (Pohekar and Ramachandran 2004).

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέθοδοι και τα αποτελέσματά τους δεν είναι απαραίτητα συγκρίσιμα. Κάθε μέθοδος έχει τους περιορισμούς της, που οφείλονται κυρίως σε παραδοχές στην ανάπτυξη των μοντέλων, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση μιας μεθόδου. Σύμφωνα με τη μελέτη των Kangas and Kangas 2002 ενδέχεται να προκύψουν ανακολουθίες διότι:

- οι επιλογές μοντελοποίησης των προβλημάτων δεν αντικατοπτρίζουν τις ίδιες προτιμήσεις,
- οι τρόποι επεξεργασίας των πληροφοριών προτίμησης ποικίλλουν μεταξύ διαφορετικών μεθόδων
- οι μέθοδοι ερμηνεύουν διαφορετικά τη βαρύτητα-στάθμιση των κριτηρίων

Γι' αυτό, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της μεθόδου που θα εφαρμοστεί σε κάποιο πρόβλημα λήψης αποφάσεως.

## 3.5 Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων Πολλαπλών Κριτήριων (MCDMs)

Οι MCDMs αποτελούν ένα κλάδο μοντέλων της επιχειρηματικής έρευνας (operation research models) για την υποβοήθηση της λήψης αποφάσεων. Ο ρόλος τους σε διάφορους τομείς εφαρμογής έχει αυξηθεί σημαντικά, ειδικά εφόσον αναπτύσσονται νέες μέθοδοι και βελτιώνονται οι παλιές. Οι μέθοδοι μπορούν να χειριστούν τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά κριτήρια και να αναλύσουν τις αντιθέσεις μεταξύ των κριτηρίων και των ληπτών αποφάσεων (Pohekar and Ramachandran, 2004).

Στη διερεύνηση των MCDMs διαπιστώθηκε ότι περιέχονται πολλές διαφορετικές μεθόδοι, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι:

- *η Multi-Attribute Utility Theory (MAUT)*
- *η Analytic Hierarchy Process (AHP)*
- *η Case-Based Reasoning (CBR)*
- *η Data Envelopment Analysis (DEA)*
- *η Fuzzy Set Theory, η Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART)*
- *η Goal Programming (GP)*

- *η ELimination and Choice Expressing REality (ELECTRE I, ELECTRE III)*
- *η Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations (PROMETHEE)*
- *η Simple Additive Weighting (SAW)*
- *η Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS)*

Η σύγκριση των μεθόδων MCDMs που σχετίζονται με τον σχεδιασμό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συζητείται στη βιβλιογραφία (Polatidis, 2006), (Chu, 2007), (Hobbs and Horn, 1997), (Wang, et al. 2009). Σημειώνεται ότι σε προηγούμενες αναλύσεις από τους Ahmad, and Tahar (2014) και νωρίτερα από τους Shen, et. al (2010), η AHP ήταν η μέθοδος MCDM που χρησιμοποιήθηκε στη εκτίμηση προβλημάτων ενεργειακού προγραμματισμού, ακολουθούμενη από τα συστήματα, PROMETHEE, ELECTRE, MAUT, κλπ.

Με σκοπό τον καθορισμό του πλαισίου στο οποίο στηρίζεται η διατριβή, οι σημαντικότερες από τις μεθόδους λήψης αποφάσεων πολλαπλών MCDM αναλύονται στη συνέχεια και καθορίζεται η εφαρμογή τους σε διαφορετικές καταστάσεις αξιολογώντας τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Η ανάλυση στηρίχθηκε στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, ώστε να επιτευχθεί μια περίληψη των ποιο γνωστών μεθόδων λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων. Από την ανασκόπηση, εκτός από τα πεδία εφαρμογής τους για αποφάσεις σε πραγματικά έργα που έχουν υλοποιηθεί, διαπιστώθηκε ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες και η έρευνα στην εξεύρεση εργαλείων που θα ενισχύουν τους υπευθύνους στη λήψη αποφάσεων, οδήγησε σε προσεγγίσεις που αναπτύσσουν συνδυασμούς των μεθόδων για σύνθετα προβλήματα λήψης αποφάσεων. Αυτός ο πειραματισμός με συνδυασμένες μεθόδους λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων προσέφερε μια εντελώς νέα προσέγγιση στην ανάλυση λήψης αποφάσεων. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι ορισμένες μέθοδοι MCDM είναι πιο κατάλληλες για συγκεκριμένες καταστάσεις, ενώ για κάποιες εφαρμογές ορισμένες μέθοδοι θα πρέπει να αποφευχθούν εντελώς. Από τα ευρήματα της ανασκόπησης των πιο γνωστών μεθόδων MCDM δημιουργήθηκε ο πίνακας 3.3, ενώ περιληπτικά για κάθε μια από αυτές ισχύει ότι:

- Η *Multi-Attribute Utility Theory, MAUT,* είναι μια μέθοδος αναμενόμενης χρησιμότητας που μπορεί να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την καλύτερη πορεία δράσης

σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, προσδιορίζοντας τη χρησιμότητα σε κάθε πιθανή συνέπεια και υπολογίζοντας την καλύτερη δυνατή χρησιμότητα (Konidari and Mavrakis, 2007). Το σημαντικό πλεονέκτημα της MAUT είναι ότι λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα. Είναι περιεκτική και μπορεί να υπολογίζει και να ενσωματώνει τις προτιμήσεις για κάθε συνέπεια σε κάθε βήμα της μεθόδου. Αυτή η ακρίβεια είναι χρήσιμη, ωστόσο μπορεί να οδηγήσει σε πολλά πιθανά μειονεκτήματα. Δηλαδή μια απίστευτη ποσότητα εισαγωγής δεδομένων, η οποία είναι απαραίτητη σε κάθε βήμα της διαδικασίας προκειμένου να καταγραφούν με ακρίβεια οι προτιμήσεις των ληπτών αποφάσεων. Αυτό καθιστά τη μέθοδο εξαιρετικά περιοριστική. Επίσης τα δεδομένα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα για κάθε πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Οι προτιμήσεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων πρέπει επίσης να είναι ακριβείς, δίνοντας συγκεκριμένα βάρη σε κάθε μια από τις συνέπειες, με αποτέλεσμα να χρειάζονται υποθέσεις σε κάθε επίπεδο. Αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί με ακρίβεια καθώς μπορεί και να είναι σχετικά υποκειμενικό. Οι τομείς εφαρμογής της MAUT είναι σε οικονομικά προβλήματα, ασφαλιστικά, διαχείριση της ενέργειας και προβλήματα στον αγροτικό τομέα. Όλα αυτά τα είδη προβλημάτων έχουν σημαντικές ποσότητες αβεβαιότητας και έχουν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα για να καταστήσουν τη MAUT μια κατάλληλη μέθοδο λήψης αποφάσεων.

- Η ***Analytic Hierarchy Process, AHP,*** είναι η θεωρία της μέτρησης μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη και βασίζεται στις εκτιμήσεις των εμπειρογνωμόνων για την εξαγωγή στάθμισης των ζευγών προτεραιότητας (Saaty, 2008), και αποτελεί μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους MCDM. Η χρήση συγκρίσεων ανά ζεύγη μπορεί να επιτρέψει στους λήπτες αποφάσεων να υπολογίσουν τους συντελεστές στάθμισης και να συγκρίνουν εναλλακτικές λύσεις με σχετική ευκολία. Είναι κλιμακωτή και μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε προβλήματα πολλών στοιχείων, αντιμετωπίζοντας προβλήματα λήψης αποφάσεων λόγω της ιεραρχικής δομής της. Παρόλο που απαιτεί αρκετά δεδομένα για να εκτελεστούν σωστά οι συγκρίσεις ανα ζεύγη, δεν είναι τόσο περιοριστική όσο η MAUT. Η μέθοδος έχει παρουσιάσει προβλήματα αλληλεξάρτησης μεταξύ κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων, γι' αυτό είναι απαραίτητη η προσεκτική μελέτη. Μία από τις μεγαλύτερες επικρίσεις της είναι ότι η γενική μορφή της AHP είναι επιρρεπής στην αντιστροφή της κατάταξης, λόγω της φύσης των συγκρίσεων και τις βαθμολογίες

(Mateo, 2012). Δηλαδή, η προσθήκη εναλλακτικών στο τέλος της διαδικασίας θα μπορούσε να προκαλέσει αναστροφή στην τελική κατάταξη. Η AHP έχει αξιοποιηθεί σε πολλά προβλήματα σε επίπεδο επιδόσεων, διαχείριση πόρων, εταιρική πολιτική και στρατηγική, δημόσια πολιτική, και σχεδιασμό συστημάτων. Η αποτελεσματικότητα της AHP στη διαχείριση μεγάλων προβλημάτων την καθιστά ιδανική για την αντιμετώπιση προβλημάτων λήψης αποφάσεων που συγκρίνουν τις επιδόσεις μεταξύ εναλλακτικών επιλογών.

- Η *Case-Based Reasoning, CBR,* είναι μια μέθοδος MCDM που χρησιμοποιείται σε προβλήματα με πληροφορίες από μια ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων με σκοπό να προτείνει μια λύση σε ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων με βάση παρόμοιες περιπτώσεις (Daengdej, et. al. 1999). Αυτό παρέχει το πρώτο από τα πλεονεκτήματά της, ότι απαιτεί λίγη προσπάθεια όσον αφορά την απόκτηση πρόσθετων δεδομένων. Απαιτεί επίσης μικρή προσπάθεια για ενημέρωση, διότι η βάση δεδομένων ήδη υπάρχει. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που έχει σε σχέση με τις περισσότερες μεθόδους MCDM, είναι ότι μπορεί να βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου, ειδικά καθώς προστίθενται περισσότερα στοιχεία στη βάση δεδομένων. Το κύριο μειονέκτημα της είναι η ευαισθησία της στην ασυνέπεια των δεδομένων (Daengdej, et. al. 1999). Δηλαδή, οι προηγούμενες περιπτώσεις ενδέχεται να μην είναι έγκυρες ή σχετικές με το πρόβλημα που αναλύεται με αποτέλεσμα να προκύπτουν ασυνεπείς ή λανθασμένες απαντήσεις. Επίσης παρόμοιες περιπτώσεις μπορεί να μην είναι πάντα ακριβείς όσον αφορά την επίλυση του προβλήματος. Η CBR χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες όπου υπάρχει ήδη σημαντικός αριθμός προηγούμενων περιπτώσεων από προβλήματα λήψης αποφάσεων. Αυτό περιλαμβάνει τις επιχειρήσεις ασφάλισης οχημάτων, φαρμάκων και εταιρείες μηχανολογικού εξοπλισμού που υπάρχουν πολλά προηγούμενα έργα ώστε να βοηθήσουν τη λήψη απόφασης σε συγκεκριμένα προβλήματα.
- Η *Data Envelopment Analysis, DEA,* χρησιμοποιεί μια τεχνική γραμμικού προγραμματισμού για τη μέτρηση της σχετικής αποτελεσματικότητας των εναλλακτικών λύσεων (Thanassoulis, et. al. 2012). Αξιολογεί την αποτελεσματικότητα των εναλλακτικών λύσεων μεταξύ τους, με την πιο αποδοτική εναλλακτική λύση να λαμβάνει βαθμολογία 1 ενώ όλες οι άλλες εναλλακτικές να είναι κλάσμα του 1. Στα πλεονεκτήματά της είναι η αποτελεσματικότητα στο χειρισμό εισαγωγής και εξαγωγής

δεδομένων, ότι η αποδοτικότητα μπορεί να αναλυθεί και να ποσοτικοποιηθεί, ότι μπορεί να αποκαλύψει σχέσεις που ενδέχεται να μην είναι δυνατόν να διαπιστωθούν με άλλες μεθόδους. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία να ληφθούν υπόψη ασαφή δεδομένα, διότι υποθέτει ότι όλα τα δεδομένα εισόδου και εξόδου είναι ακριβή. Σε πραγματικές καταστάσεις η υπόθεση μπορεί να μην είναι πάντα σωστή (Wang, et. al. 2005). Η DEA χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα οικονομικά, στην ιατρική, οδικής ασφάλειας, στη γεωργία, στο λιανικό εμπόριο και σε επιχειρηματικά προβλήματα, όπου απαιτείται βελτίωση της αποτελεσματικότητας.

- Η *Fuzzy set theory*, είναι μια επέκταση της κλασικής θεωρίας των συνόλων που επιτρέπει την επίλυση πολλών προβλημάτων που σχετίζονται με την αντιμετώπιση ασαφών και αβέβαιων δεδομένων. Έχει πολλά πλεονεκτήματα εφόσον λαμβάνει υπόψη τις ανεπαρκείς πληροφορίες και την εξέλιξη της διαθέσιμης γνώσης (Balmat, 2011), ενώ επιτρέπει τη χρήση λίγων κανόνων για την αντιμετώπιση προβλημάτων με μεγάλη πολυπλοκότητα. Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνεται ότι σε ασαφή συστήματα μπορεί μερικές φορές να είναι δύσκολο να εφαρμοστού και να αναπτυχθούν, ενώ σε πολλές περιπτώσεις ενδέχεται να απαιτηθούν πολυάριθμες προσομοιώσεις προτού μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν. Η θεωρία ασαφών συνόλων έχει καθιερωθεί και έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως η μηχανική, η οικονομία, το περιβάλλον, η ιατρική και η διαχείριση (management) και αυτό διότι πολλοί από αυτούς τους τύπους προβλημάτων χρειάζονται τη διαθεσιμότητα ασαφών στοιχείων-δεδομένων εισόδου.
- Η *Fuzzy Set Theory, η Simple Multi-Attribute Rating Technique, SMART* ,είναι μία απλούστερη μορφή της MAUT. Απαιτεί δύο παραδοχές, δηλαδή ανεξαρτησία χρησιμότητας και ανεξαρτησία στις προτιμήσεις (Chen, et. al. 2010). Αυτή η μέθοδος μετατρέπει αποτελεσματικά σημαντικά βάρη σε πραγματικούς αριθμούς. Στα πλεονεκτήματα της SMART, εκτός από αυτά που περιγράφονται και είναι κοινά με τη MAUT, είναι η απλότητα στη χρήση και ότι επιτρέπει οποιουσδήποτε τύπους τεχνικών αντιστοίχισης βαρύτητας (δηλαδή σχετικές, απόλυτες κλπ.). Επίσης, απαιτεί λιγότερη προσπάθεια από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων από τη MAUT. Όπως η MAUT, μειονεκτεί στη διαδικασία προσδιορισμού των προτιμήσεων λαμβάνοντας υπόψη ένα πολύπλοκο πλαίσιο (Konidari and Mavrakis, 2007). Οι συνήθης εφαρμογές της SMART αφορούν προβλήματα περιβάλλοντος, κατασκευών, μεταφορών και εφοδιαστικής

αλυσίδας, αμυντικά θέματα, κατασκευαστικά και συναρμολόγησης. Η ευκολία χρήσης της βοηθά σε στη λήψη αποφάσεων για προβλήματα όπου υπάρχει αρκετή πληροφόρηση και είναι εύκολη η πρόσβαση στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

- Η *Goal Programming, GP,* είναι μια πρακτική μέθοδος προγραμματισμού και δίνει τη δυνατότητα επιλογής απόφασης ένα άπειρο αριθμό εναλλακτικών λύσεων. Ένα από τα πλεονεκτήματά της είναι η αποτελεσματικότητα στο χειρισμό μεγάλης κλίμακας προβλημάτων. Έτσι μπορεί να παράγει άπειρες εναλλακτικές λύσεις που ανάλογα με την κατάσταση αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι ορισμένων μεθόδων. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι η αδυναμία της να βρεθούν συντελεστές στάθμισης. Ως εκ τούτου σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι, όπως το AHP, για να σταθμιστούν σωστά οι συντελεστές. Η GP έχει εφαρμογές στον προγραμματισμό της παραγωγής, την υγειονομική περίθαλψη, την επιλογή χαρτοφυλακίου, το σχεδιασμό του συστήματος διανομής και τον ενεργειακό προγραμματισμό. Σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους για την κατάλληλη στάθμιση. Κατ 'αυτόν τον τρόπο, εξαλείφεται μία από τις αδυναμίες της, ενώ εξακολουθεί να υποστηρίζει την επιλογή απόφασης έναν άπειρο αριθμό εναλλακτικών λύσεων.
- Η *ELimination and Choice Expressing Reality, ELECTRE*, μαζί με τις πολλές διαφοροποιημένες εφαρμογές της, είναι μια μέθοδος κατάταξης – κατανομής (outranking) βασισμένη στην ανάλυση της συναίνεσης. Το σημαντικό πλεονέκτημά της είναι ότι λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και την ασάφεια. Μειονεκτεί στην ανάπτυξη της διαδικασίας και τα αποτελέσματά της μπορεί να είναι δύσκολο να εξηγηθούν με απλούς όρους. Επιπλέον, λόγω του τρόπου με τον οποίο ενσωματώνονται οι προτιμήσεις δεν εμφανίζονται οι χαμηλότερες επιδράσεις από ορισμένα κριτήρια. Η μέθοδος ELECTRE δεν προκαλεί την άμεση αναγνώριση των πλεονεκτημάτων και των αδυναμιών των εναλλακτικών λύσεων, ούτε τα αποτελέσματα και τις επιπτώσεις που πρέπει να επαληθεύονται (Konidari and Mavrakis, 2007). Έχει χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα λήψης αποφάσεων που αφορούν ενέργεια, οικονομικά και περιβαλλοντικά. Όπως και άλλες μέθοδοι, λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και την ασάφεια, πολλές από τις οποίες ενδέχεται να απαιτούν τα προβλήματα που εφαρμόζεται.

- Η Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations, ***PROMETHEE,*** είναι μια μέθοδος κατάταξης – κατανομής (outranking), παρόμοια με την ELECTRE και έχει αρκετές διαφοροποιημένες εφαρμογές. Η οικογένεια μεθόδων PROMETHEE, συμπεριλαμβανομένου του PROMETHEE I για μερική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων και του PROMETHEE II για την πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1982. Λίγα χρόνια αργότερα, διάφορες εκδόσεις των μεθόδων PROMETHEE παρουσιάστηκαν όπως η PROMETHEE III για την κατάταξη με βάση το διάστημα, η PROMETHEE IV για την πλήρη ή μερική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων όταν το σύνολο των βασικών λύσεων είναι συνεχές, η PROMETHEE V για προβλήματα με περιορισμούς τμηματοποίησης, η PROMETHEE VI για την ανθρώπινη απεικόνιση του εγκεφάλου (Behzadian et al., 2010). Το πλεονέκτημά της είναι η ευκολία στη χρήση, χωρίς να απαιτείται η παραδοχή ότι τα κριτήρια είναι ανάλογα. Μειονεκτεί διότι προτείνεται μια σαφή μέθοδο για τον προσδιορισμό βαρών, ενώ απαιτεί τον προσδιορισμό των τιμών χωρίς να παρέχει μια σαφή μέθοδο για τον προσδιορισμό αυτών των τιμών. Η PROMETHEE έχει αξιοποιηθεί στην περιβαλλοντική διαχείριση, τη διαχείριση των υδάτων, τη διαχείριση των επιχειρήσεων , στην οικονομία, τη χημεία, την εφοδιαστική αλυσίδα και τις μεταφορές, την κατασκευή και τη συναρμολόγηση, τη διαχείριση της ενέργειας.
- Η *Simple Additive Weighting, SAW,* είναι μια μέθοδος συνάρτησης αξίας που βασίζεται σε μια απλή προσθήκη βαθμολογιών οι οποίες αντιπροσωπεύουν την επίτευξη στόχου κάτω από κάθε κριτήριο, πολλαπλασιασμένη με τα συγκεκριμένα βάρη (Qin et al., 2008). Είναι αποτελεσματική στην αντιστάθμιση μεταξύ των κριτηρίων. Ο υπολογισμός είναι απλός και μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια σύνθετων προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έχει συγκεκριμένα μειονεκτήματα εφόσον όλες οι τιμές των κριτηρίων πρέπει να μεγιστοποιηθούν. Επίσης, τα κριτήρια ελαχιστοποίησης θα πρέπει να μεγιστοποιηθούν πριν χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση και οι τιμές των κριτηρίων πρέπει να είναι θετικές. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, δηλαδή οι τιμές του κριτηρίου, εξαρτώνται από τον τύπο του μετασχηματισμού τους σε θετικές τιμές. Επίσης, οι εκτιμήσεις που προέρχονται από τη SAW δεν αντανακλούν πάντα την πραγματική κατάσταση. Το αποτέλεσμα που λαμβάνεται μπορεί να μην είναι λογικό, και οι τιμές

ενός συγκεκριμένου κριτηρίου να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από εκείνες άλλων κριτηρίων (Podvezko, 2011). Η SAW έχει εφαρμογές στον τομέα της διαχείρισης των υδάτινων πόρων, των επιχειρήσεων και της οικονομικής διαχείρισης.

- Η *Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions, TOPSIS***,** είναι μια προσέγγιση για τον εντοπισμό μιας εναλλακτικής λύσης που είναι πιο κοντά στην ιδανική (θετική) λύση και πιο μακριά στην αρνητική ιδανική λύση σε έναν πολυδιάστατο υπολογιστικό χώρο (Qin et al., 2008). Πλεονεκτεί διότι είναι εύκολη στη χρήση και προγραμματιζόμενη. Ο αριθμός των βημάτων παραμένει ο ίδιος ανεξάρτητα από τον αριθμό των χαρακτηριστικών (attributes) (Ic, 2012). Ένα μειονέκτημα είναι η χρήση της Ευκλείδιας απόστασης (Euclidean Distance) που δεν λαμβάνει υπόψη την συσχέτιση των χαρακτηριστικών. Είναι δύσκολο να σταθμιστούν τα χαρακτηριστικά και να διατηρηθεί η συνοχή της κρίσης, ειδικά όταν έχουν πρόσθετα χαρακτηριστικά. Η TOPSIS έχει χρησιμοποιηθεί στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στο σχεδιασμό συστημάτων, στη μηχανική και στα συστήματα παραγωγής, στη διαχείριση επιχειρήσεων και εμπορίας, στην περιβαλλοντική διαχείριση, στη διαχείριση ανθρώπινων πόρων και στη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Πολλές από τις χρήσεις που αναφέρθηκαν στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας είχαν επιβεβαιώσει τις απαντήσεις που δίδονταν από την TOPSIS με απαντήσεις που προτείνονταν από άλλες μεθόδους MCDM. Το πλεονέκτημα της απλότητας και της ικανότητάς της να διατηρεί το ίδιο ύψος βημάτων ανεξάρτητα από το μέγεθος του προβλήματος, επέτρεψε τη γρήγορη αξιοποίησή της για την επανεξέταση άλλων μεθόδων ή για να παραμείνει ως μοναδικό εργαλείο στη λήψη αποφάσεων.

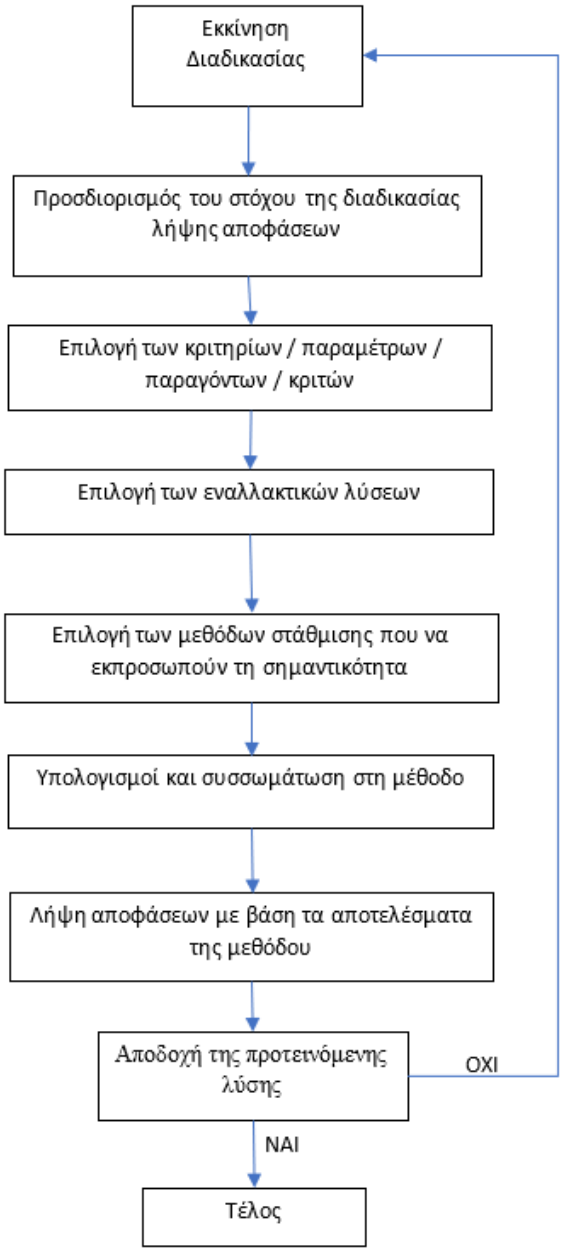
**Πίνακας 3.3 Περίληψη των MCDM**

| **Πολυκριτηρικές μέθοδοι (MCDM Methods)** | **Πλεονεκτήματα** | **Μειονεκτήματα** | **Περιοχές εφαρμογής** |
|---|---|---|---|
| Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) | λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και ενσωματώνει τις προτιμήσεις | Μεγάλος αριθμός εισαγωγής δεδομένων, Οι προτιμήσεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων πρέπει επίσης να είναι ακριβείς | σε οικονομικά προβλήματα, ασφαλιστικά, διαχείριση της ενέργειας και προβλήματα στον αγροτικό τομέα |
| Analytic Hierarchy Process (AHP) | Είναι κλιμακωτή και μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε προβλήματα πολλών στοιχείων, αντιμετωπίζοντας προβλήματα λήψης αποφάσεων λόγω της ιεραρχικής δομής της | προβλήματα αλληλεξάρτησης μεταξύ κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων, γι' αυτό είναι απαραίτητη η προσεκτική μελέτη | διαχείριση πόρων, εταιρική πολιτική και στρατηγική, δημόσια πολιτική, και σχεδιασμό συστημάτων |
| Case-Based Reasoning (CBR) | χρησιμοποιείται σε προβλήματα με πληροφορίες από μια ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων, απαιτεί μικρή συντήρηση δεδομένου ότι η βάση δεδομένων ήδη υπάρχει, μπορεί να βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου | ευαισθησία στην ασυνέπεια των δεδομένων, απαιτούνται πολλές προηγούμενες μελέτες | επιχειρήσεις ασφάλισης οχημάτων, φαρμάκων και εταιρείες μηχανολογικού εξοπλισμού που υπάρχουν πολλά προηγούμενα έργα |
| Data Envelopment Analysis (DEA) | αποτελεσματικότητα στο χειρισμό εισαγωγής και | αδυναμία να ληφθούν υπόψη ασαφή δεδομένα, | σε προβλήματα οικονομικά, ιατρικά, οδικής ασφάλειας, στη γεωργία, στο |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | εξαγωγής δεδομένων, αποδοτικότητα μπορεί να αναλυθεί και να ποσοτικοποιηθεί, μπορεί να αποκαλύψει σχέσεις που μπορεί να μην μπορούν να διαπιστωθούν με άλλες μεθόδους | σε πραγματικές καταστάσεις η υπόθεση μπορεί να μην είναι πάντα σωστή | λιανικό εμπόριο και σε επιχειρηματικά προβλήματα |
| Fuzzy Set Theory | λαμβάνει υπόψη τις ανεπαρκείς πληροφορίες, επιτρέπει τη χρήση σε λίγους κανόνες για την αντιμετώπιση προβλημάτων με μεγάλη πολυπλοκότητα | σε ασαφή συστήματα είναι δύσκολο να εφαρμοστούν και να αναπτυχθούν, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να απαιτηθούν πολυάριθμες προσομοιώσεις | στη μηχανική, στην οικονομία, στο περιβάλλον, στην ιατρική και στη διαχείριση |
| Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) | μετατρέπει αποτελεσματικά σημαντικά βάρη σε πραγματικούς αριθμούς, επιτρέπει οποιουσδήποτε τύπους τεχνικών αντιστοίχισης βαρύτητας | στη διαδικασία προσδιορισμού των προτιμήσεων λαμβάνοντας υπόψη ένα πολύπλοκο πλαίσιο | προβλήματα περιβάλλοντος, κατασκευών, μεταφορών και εφοδιαστικής αλυσίδας, αμυντικά θέματα, κατασκευαστικά και συναρμολόγησης |
| Goal Programming (GP) | αποτελεσματικότητα στο χειρισμό μεγάλης κλίμακας προβλημάτων | αδυναμία να βρεθούν συντελεστές στάθμισης | προγραμματισμό της παραγωγής, την υγειονομική περίθαλψη, την επιλογή χαρτοφυλακίου, το σχεδιασμό του συστήματος διανομής και τον ενεργειακό προγραμματισμό |
| ELECTRE | λαμβάνει υπόψη την | στην ανάπτυξη της διαδικασίας και τα | λήψη αποφάσεων που αφορούν |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | αβεβαιότητα και την ασάφεια | αποτελέσματά της μπορεί να είναι δύσκολο να εξηγηθούν σε απλούς όρους | ενέργεια, οικονομικά και περιβαλλοντικά θέματα |
| PROMETHEE | **Δεν** απαιτείται η παραδοχή ότι τα κριτήρια να είναι ανάλογα | απαιτεί τον προσδιορισμό των τιμών χωρίς να παρέχει μια σαφή μέθοδο για τον προσδιορισμό τους | στην περιβαλλοντική διαχείριση, τη διαχείριση των υδάτων, τη διαχείριση των επιχειρήσεων , στην οικονομία, τη χημεία, την εφοδιαστική αλυσίδα και τις μεταφορές, την κατασκευή και τη συναρμολόγηση, τη διαχείριση της ενέργειας |
| Simple Additive Weighting (SAW) | αποτελεσματική στην αντιστάθμιση μεταξύ των κριτηρίων, ο υπολογισμός είναι απλός και μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια σύνθετων προγραμμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών | όλες οι τιμές των κριτηρίων πρέπει να μεγιστοποιηθούν, τα κριτήρια ελαχιστοποίησης θα πρέπει να μεγιστοποιηθούν πριν χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση και οι τιμές των κριτηρίων πρέπει να είναι θετικές | στον τομέα της διαχείρισης των υδάτινων πόρων, των επιχειρήσεων και της οικονομικής διαχείρισης |
| Technique for Order Preferences by Similarity to Ideal Solutions (TOPSIS) | Προγραμματιζόμενη, ο αριθμός των βημάτων παραμένει ο ίδιος ανεξάρτητα από τον αριθμό των χαρακτηριστικών | δύσκολο να σταθμιστούν τα χαρακτηριστικά και να διατηρηθεί η συνοχή της κρίσης, ειδικά με πρόσθετα χαρακτηριστικά | στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στο σχεδιασμό συστημάτων, στη μηχανική και στα συστήματα παραγωγής, στη διαχείριση επιχειρήσεων και εμπορίας, στην περιβαλλοντική διαχείριση, στη διαχείριση ανθρώπινων πόρων και στη διαχείριση των υδάτινων πόρων |

Γενικά, οι μέθοδοι MCDM έχουν βασικά βήματα (διάγραμμα 3.1) που υποστηρίζουν τη λήψη πιο αποδοτικών και ορθολογικών αποφάσεων (Majumder, 2015) τα οποία είναι:




**Διάγραμμα 3.1 Διεργασία των αναλύσεων MCDM.**

Κατά τον ερευνητικό σχεδιασμό της παρούσας διατριβής διαπιστώθηκε η συχνότητα των MCDM και των ασαφών μεθοδολογικών προσεγγίσεων από MCDM που χρησιμοποιούνται σε

διάφορα θέματα, όπως η βιωσιμότητα κατά τον ενεργειακό προγραμματισμό και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, διαπίστωση που αποτυπώνεται και από τους A Mardani, A. et. al. (2015). Οι μέθοδοι AHP και FAHP καθώς και οι εφαρμογές τους έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερο από άλλα εργαλεία και προσεγγίσεις. Δεύτερη σε κατάταξη ήταν οι ολοκληρωμένες-συνδυαστικές τεχνικές και προσεγγίσεις, ενώ άλλες μέθοδοι, TOPSIS και F-TOPSIS κατέχουν την τρίτη και την τέταρτη θέση.

## 3.6 Εφαρμογές μεθόδων λήψης απόφασης στον ενεργειακό τομέα και τις ΑΠΕ

Τα προβλήματα διαχείρισης της ενέργειας, τα οποία συνδέονται με την ταχεία κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, δημιούργησαν κρίσιμα ζητήματα σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο παγκοσμίως για πολλές δεκαετίες (Ming, et. al. 2015). Ο αυξανόμενος αριθμός ενεργειακών ζητημάτων μπορεί να οδηγήσει σε ποικίλες επιπτώσεις και υποχρεώσεις σε τομείς της δημόσιας υγείας και στην αειφόρο περιφερειακή ανάπτυξη, επιπλέον, τα ενεργειακά προβλήματα μπορούν να επηρεάσουν την οικονομική ανάπτυξη (Roca, et. al. 2001). Με τις απαιτήσεις τόσο της προόδου σε όλους τους τομείς όσο και της ανάγκης να αυξηθεί η ευαισθητοποίηση του κοινού για τα ενεργειακά προβλήματα, επιβάλλονται αυξανόμενες πιέσεις στους υπεύθυνους σχεδιασμού και στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων για μια πιο ισχυρή απάντηση σε μια σειρά ενεργειακών προβλημάτων.

Συνεπώς, είναι *επιθυμητός ο καθορισμός πρωτοκόλλων απόφασης με υγιή περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά αποτελέσματα* προκειμένου να προωθηθούν αξιόπιστες και αποδοτικές πρακτικές ενεργειακής αξιοποίησης από συστήματα ΑΠΕ.

Οι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν από τους υπεύθυνους σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων περιέχουν κοινωνικά, οικονομικά, τεχνικά θεσμικά και πολιτικά ζητήματα, καθώς και για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διατήρηση των πόρων.

Οι πολυπλοκότητες που εμπλέκονται στη δημιουργία των επιθυμητών αποφάσεων από τη αξιοποίηση των συστημάτων ΑΠΕ ενδέχεται να επιδεινωθούν από αβεβαιότητες που υπάρχουν στα επιμέρους στοιχεία των συστημάτων. Επιπλέον, τέτοιες αβεβαιότητες και πολυπλοκότητες μπορούν να ενισχυθούν περαιτέρω όχι μόνο από αλληλεπιδράσεις και τη δυναμική μεταξύ

διαφόρων υποσυστημάτων αλλά και από το ενδεχόμενο οικονομικών και περιβαλλοντικών κυρώσεων.

Σε πολλά προβλήματα αξιοποίησης της ενέργειας, έχουν ληφθεί υπόψη ορισμένα κριτήρια ή / και στόχοι, που οδηγούν στην ανάπτυξη πολλαπλών κριτηρίων και στόχων για τη λήψη αποφάσεων (Streimikiene, 2012). Οι Haimes και Hall (1977) ανέπτυξαν ένα αναλυτικό και επιχειρησιακό πλαίσιο πολλαπλών στόχων, στο οποίο εξετάστηκαν η ευαισθησία, η σταθερότητα, ο κίνδυνος και η μη αναστρεψιμότητα ως αντικειμενικές λειτουργίες και προτάθηκε μια εναλλακτική αντισταθμιστική (trade-off) μέθοδος για την επίλυση ενός προβλήματος πολλαπλών αντικειμένων στη διαχείριση της ενέργειας.

Τις τελευταίες δεκαετίες, έγιναν πολλές προσπάθειες για τη διευκρίνιση της έννοιας της ενεργειακής ανάπτυξης και την ανάπτυξη σχετικών θεωρητικών και πρακτικών επιλογών. Επί του παρόντος, η πρόκληση έχει μετατοπιστεί στο σχεδιασμό και την τόνωση διαδικασιών αποτελεσματικού σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων σε όλα τα επίπεδα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί τοπική, εθνική και παγκόσμια αειφόρος ανάπτυξη (Musson , 2012).

Προκειμένου οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων να κατανοήσουν τις περίπλοκες σχέσεις μεταξύ των ενεργειακών πρακτικών αξιοποίησης και διαχείρισης και να αντιμετωπίσουν την ανάγκη καθορισμού στρατηγικών για τη διατήρηση της οικολογικής περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (Liu, et. al. 2011), αναπτύχθηκαν ολοκληρωμένες αναλύσεις περιβαλλοντικών συστημάτων που περιλαμβάνουν προσομοιώσεις κοινωνικοοικονομικών συμπεριφορών και των περιβαλλοντικών διαδικασιών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων και την ανάλυση των συναφών αβεβαιοτήτων (Nie, et. al. 2007).

Επιπλέον, ανεξάρτητα από το γενικό βαθμό αντίληψης σε ένα ενεργειακό πρόβλημα και πόσο αποδοτική είναι μια απόφαση για τη λύση του προβλήματος, αυτή δεν θα τεθεί σε ισχύ παρά μόνον αν συμφωνηθεί από πολλούς εμπλεκόμενους φορείς στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Εξετάζοντας το παράδειγμα της αλλαγής του κλίματος διακρίνετε ότι οι άνθρωποι κατανοούν ήδη τους βασικούς μηχανισμούς της κλιματικής αλλαγής και έχουν αναπτύξει καλές στρατηγικές για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι DMs έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε ενεργειακά συστήματα και χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακά μοντέλα λήψης αποφάσεων (MCDM) διερευνούν πώς αυτές οι μέθοδοι μπορούν να λύσουν σύνθετα προβλήματα όσον αφορά τη αξιοποίηση της ενέργειας ΑΠΕ.

Οι MCDM εφαρμόζονται σε διάφορους ενεργειακούς τομείς, και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία διαπιστώθηκε ότι έχουν εφαρμοστεί σε ολοκληρωμένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Liu, 2014), (Doukas, et. al. 2007), την αξιολόγηση βιωσιμότητας συστημάτων (Cinelli, et. al. 2014), στρατηγικό περιβαλλοντικό σχεδιασμό (Garfì, et. al. 2011), την παροχή ηλεκτρισμού εκτός δικτύου (Sen and Bhattacharyya, 2014) και σε θέματα αειφορικής-βιώσιμης ενέργειας (Wang, et. al. 2009).

Μερικές πολυκριτηριακές μέθοδοι που έγιναν αποδεκτές για την κατανόηση της βιώσιμης ανάπτυξης, όπως η εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΕΠΕ) είναι προσεγγίσεις στη λήψη αποφάσεων από τους Josimović, et. al. (2015), οι οποίοι εφάρμοσαν μια αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων για τα σχέδια διαχείρισης αποβλήτων βάσει στρατηγικής περιβαλλοντικής εκτίμησης. Οι Wanderer και Herle (2014) χρησιμοποίησαν την AHP για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ενέργεια, οι Massei, et. al. (2014) εφάρμοσαν την ELECTRE I με AHP και το ασαφές σύνολο για την αξιολόγηση του μοντέλου περιβαλλοντικής διαχείρισης, οι Schetke and Haase (2008) χρησιμοποίησαν το MCAM για κοινωνικο-περιβαλλοντική αξιολόγηση σε πόλεις όπου μειώνεται ο πληθυσμός, οι Kaya and Kahraman (2011) αξιολόγησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις χρησιμοποιώντας AHP και ELECTRE και οι Mysiak, et. al. (2005) εφάρμοσαν την TOPSIS για την εκτίμηση περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Επιπλέον, μια διαδικασία MCDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως μέρος σε μια μελέτη προ-σκοπιμότητας για να δοθεί προτεραιότητα σε έργα ανανεώσιμης ενέργειας (San Cristóbal, 2011). Υπάρχουν διάφορα εργαλεία που χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για τη διευκόλυνση της λήψης αποφάσεων (Haralambopoulos and Polatidis, 2003) για την επιλογή έργων ανανεώσιμης ενέργειας. Τα εργαλεία χρησιμοποιούνται κυρίως για να βοηθήσουν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καταλήξουν σε συναίνεση όσον αφορά την ιεράρχηση των απαραίτητων έργων ανανεώσιμης ενέργειας μέσω μιας αντικειμενικής διαδικασίας κατάταξης. Μερικές κοινώς

χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι AHP και ασαφής AHP οι οποίες συνδυάζονται με άλλα εργαλεία, ακολουθούμενη από PROMETHEE και TOPSIS.

### 3.6.1 Εφαρμογές σε υπεράκτια Συστήματα

Όσον αφορά το πλαίσιο για την εφαρμογή των MCDM στον τομέα των υπεράκτιων δομών αξιοποίησης των ΑΠΕ (ΥΔΑ-ΑΠΕ), ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων και προσεγγίσεων ερευνήθηκε ώστε να διαπιστωθούν τα πεδία που πολυκριτηριακές μεθόδοι χρησιμοποιήθηκαν για τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων.

Οι Akbari, N., et. al. (2017) διερεύνησαν τις δυνατότητες εφοδιαστικής αλυσίδας των λιμένων για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Δηλαδή, τα φυσικά χαρακτηριστικά, τη συνδεσιμότητα και τη διάταξη του λιμένα, για τη στήριξη των φάσεων εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των υπεράκτιων αιολικών έργων. Η σχετική σημασία αυτών των κριτηρίων προσδιορίζεται με τη μέθοδο της αναλυτικής ιεραρχίας (AHP). Η μεθοδολογία AHP εφαρμόζεται στη συνέχεια σε μια μελέτη περίπτωσης ως εργαλείο λήψης αποφάσεων για αιολικό πάρκο ανοικτής θαλάσσης που βρίσκεται εκτός των ακτών της Βόρειας Θάλασσας του Ηνωμένου Βασιλείου.

Οι Kambezidis, H, et. al.(2011) διερεύνησαν το πιο κατάλληλο μίγμα πολιτικών στην Ελλάδα για την επίτευξη ή την προσέγγιση του στόχου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό 40% από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2020. Για την αξιολόγηση των διαφόρων πολιτικών μιγμάτων χρησιμοποιούνται δύο ερευνητικά εργαλεία, Green-X μοντέλο προσομοίωσης και η μέθοδος αξιολόγησης πολλαπλών κριτηρίων AMS η οποία είναι ο συνδυασμός των τυπικών μεθόδων πολλαπλών κριτηρίων AHP, MAUT και SMART.

Οι Wanderer and Herle (2014) προσέγγισαν με AHP την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών συνθηκών και των επιπτώσεων τους στην παραγωγή ενέργειας. Στόχος είναι ο προσδιορισμός των καλύτερων θέσεων για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Οι Sánchez-Lozano JM et. al. (2013) χρησιμοποίησαν AHP και TOPSIS με σκοπό τον εντοπισμό του καλύτερου χώρου για φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ισπανία, η μελέτη αυτή ενσωμάτωσε την τεχνική GIS και MCDM.

Οι Ishfaq, S., et. al. (2018) εξετάζουν χρησιμοποιώντας τρεις σημαντικές τεχνικές λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων, την AHP, την TOPSIS και τη VIKOR, στην επιλογή της καλύτερης πηγής ανανεώσιμης ενέργειας την οποία πρέπει να επενδύσει το Πακιστάν. Στους παράγοντες που λήφθηκαν υπόψη στην προσέγγιση του προβλήματος από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων ήταν οι οικονομικοί, οι τεχνολογικοί και οι περιβαλλοντικοί.

Οι Lozano-Miguez et. al. (2011) προτείνουν μια μέθοδο για τη συστηματική αξιολόγηση της επιλογής των πλέον προτιμητέων δομών στήριξης για ανεμογεννήτριες. Η προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μέθοδο λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων TOPSIS για τη συγκριτική αξιολόγηση των υποψηφίων επιλογών. Σε αυτή τη μελέτη, συγκρίνονται οι εναλλακτικοί τρόποι δημιουργίας βάσης του πλωτού για τη στήριξη ανεμογεννήτριας 5,5 MW και βάθος αναφοράς 40 μέτρων λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές του προβλήματος.

Οι Fetanat and Khorasaninejad (2015) προτείνουν μια υβριδική προσέγγιση πολλαπλών κριτηρίων για επιλογή θέσεων αιολικών πάρκων ανοικτής θαλάσσης με βάση την ασαφή διαδικασία αναλυτικού δικτύου (FANP), την ασαφή πορεία λήψης αποφάσεων, το εργαστήριο αξιολόγησης και το ασαφές ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), στοχεύοντας να βρεθεί η καλύτερη επιλογή τοποθεσίας ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο Ιράν εξετάζοντας έξι κριτήρια που περιλαμβάνουν το βάθος και το ύψος της περιοχής, τα περιβαλλοντικά θέματα, η δυνατότητα προσέγγισης στις εγκαταστάσεις, τις οικονομικές πτυχές, τεχνικά προβλήματα και κοινωνική αποδοχή..

Οι Cradden et. al. (2011) χρησιμοποιούν μεθόδους πολλαπλών κριτηρίων για τον προσδιορισμό της τοποθεσίας για πλατφόρμες με εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες και συστήματα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας, εξετάζοντας δύο ομάδες κριτηρίων επιλογής. Τα πρωταρχικά κριτήρια επιλογής περιλαμβάνουν την ελάχιστη ταχύτητα ανέμου, την πυκνότητα ισχύος ελάχιστου κύματος, το εύρος βάθους και την ελάχιστη απόσταση από την ακτή. Η ομάδα δευτερευόντων κριτηρίων περιλαμβάνει την εφοδιαστική αλυσίδα, τη ναυτιλιακή κυκλοφορία, τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Οι Ghosh, et. al. (2016) προσεγγίζουν και προσπαθούν να αντιμετωπίσουν με MCDM το κενό και να προτείνουν μια νέα μέθοδο που να είναι τόσο αντικειμενική όσο και γνωστική, για τον

εντοπισμό κατάλληλων θέσεων όπου μπορεί να παραχθεί η βέλτιστη ποσότητα ενέργειας κύματος για την εγκατάσταση συστημάτων αξιοποίησης κυματικής ενέργειας. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποίησε τις MCDM και την ANN (Artificial neural network model) για να προβλέψουν ένα δείκτη που αντιπροσωπεύει άμεσα την καταλληλόλητα των θέσεων για παραγωγή ενέργειας κυμάτων. Ο δείκτης εφαρμόστηκε σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες με ποικίλα επίπεδα ενεργειακού δυναμικού κυμάτων και τα αποτελέσματά τους ενθαρρύνουν τους ερευνητές για περαιτέρω εφαρμογή της μεθόδου.

Ο M Shafiee (2015) προτείνει μια προσέγγιση ασαφούς αναλυτικού δικτύου (FANP), βασισμένη στην ανάλυση της έκτασης Chang, προκειμένου να επιλέξει την "καταλληλότερη στρατηγική μετριασμού των κινδύνων" για υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Οι Dinmohammad and Shafiee (2017) χρησιμοποίησαν ένα υβριδικό μοντέλο πολλαπλών κριτηρίων λήψης αποφάσεων (MCDM) βασισμένο στην AHP και TOPSIS για να προτείνουν μια μέθοδο που να αξιολογήσει και να δώσει προτεραιότητα σε διάφορες στρατηγικές μεταφοράς για συστήματα ανεμογεννητριών. Για το σκοπό αυτό, καθορίζονται ορισμένα κριτήρια και επιμέρους κριτήρια που αφορούν επενδυτές αιολικής ενέργειας, κατασκευαστές ανεμογεννητριών.

Ο Karahalios (2017) προτείνει το συνδυασμό TOPSIS και AHP για τον προσδιορισμό ενός εργαλείου λήψης αποφάσεων κόστους-οφέλους, το οποίο θα ισχύει για τους διαχειριστές των πλοίων. Ειδικότερα, οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για τα συστήματα επεξεργασίας του θαλασσινού νερού που χρησιμοποιείται για τον ερματισμό (Ballast water treatment-BWTS) των πλοίων, σχετικά με τις τεχνικές απαιτήσεις των συστημάτων.

Οι Kannan, D. et. al. (2013) προτείνουν τη εφαρμογή F-TOPSIS και FAHP για την αξιολόγηση προμηθευτών πράσινων προϊόντων. Για την επιλογή των προμηθευτών υπάρχουν ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια λόγω των περιορισμών των προμηθευτών. Για την επιλογή, την αξιολόγηση και την αξιολόγηση των καλύτερων πράσινων προμηθευτών, στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια με βάση την ασαφή θεωρία MAUT και τον προγραμματισμό πολλαπλών αντικειμένων.

Από τη βιβλιογραφία διαπιστώνεται ότι οι MCDM συμβάλλουν στην αποσαφήνιση των εγγενών χαρακτηριστικών του προβλήματος, στη στήριξη του ρόλου των συμμετεχόντων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, στην κατανόηση των μοντέλων ενισχύοντας την αντίληψη των αναλυτών σε ένα πρακτικό σενάριο, στη επίτευξη συμβιβασμών και συλλογικών αποφάσεων καθώς και τον τρόπο να βελτιώνεται η ποιότητα των αποφάσεων, καθιστώντας τους αναλυτές και λήπτες αποφάσεων πιο ορθολογικούς, σαφείς και αποτελεσματικούς, έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές προσεγγίσεις σχετικές με τεχνολογία όσο και βιώσιμη ανάπτυξη.

Η χρήση των πολυκριτηριακών μεθόδων, δημιουργεί παράγοντες όπως η διαπραγμάτευση, η ποσοτικοποίηση και η επικοινωνία, με τις προσεγγίσεις και τις τεχνικές MCDM να χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων στις οποίες υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι.

Οι DMs επιλέγουν μεταξύ των πολλαπλών ποσοτικοποιήσιμων ή μη ποσοτικοποιήσιμων κριτηρίων. Γενικά, οι στόχοι σε αυτά τα προβλήματα δεν είναι πάντα ασύμβατοι μεταξύ τους με αποτέλεσμα μια λύση να εξαρτάται από την προτίμηση του DM. Στις περισσότερες περιπτώσεις, διάφορες ομάδες DM εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Κάθε ομάδα παρέχει διάφορες απόψεις και κριτήρια, τα οποία στη συνέχεια επιλύονται σε ένα πλαίσιο κατανόησης και αμοιβαίου συμβιβασμού.

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας διαπιστώθηκε ότι κυρίως οι προσεγγίσεις με πολυκριτηριακές μεθόδους χρησιμοποιούνται στην αρχική τους μορφή και σε μερικές περιπτώσεις σε συνδυασμούς που προσέγγιζαν μόνο τον ενεργειακό σχεδιασμό ή την επιχειρηματική δραστηριότητα από την ανάπτυξη των συστημάτων ΑΠΕ. Όμως δεν έχουν ληφθεί υπόψη σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση κριτήρια όπως η ασφάλεια, η κοινωνική αποδοχή από της εγκατάσταση ενός συστήματος, η καταλληλόλητα του συστήματος συνδυαστικά και τεχνολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα ενός υπεράκτιου συστήματος.

Η βιωσιμότητα όμως ενός έργου ΑΠΕ και η αποδοτικότητά του στο υπεράκτιο περιβάλλον, που περιλαμβάνει οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά και θέματα ασφάλειας και το δυναμικό για την ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων που βελτιστοποιούν τη διαθεσιμότητα και επαυξάνουν τη βιωσιμότητά του  είναι ένα πρόβλημα για υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που θα πρέπει περαιτέρω να διερευνηθεί.

Λαμβάνοντας υπόψη την αναγκαιότητα για πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων με παράγοντες που σχετίζονται με κοινωνικά, οικονομικά, τεχνικά, θεσμικά ζητήματα, καθώς και την προστασία του περιβάλλοντος, η ασφάλεια και η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας, στην παρούσα διατριβή διερευνώνται αυτοί οι παράγοντες με τη χρήση MCDM για υπεράκτια συστήματα.

## 3.7 Οφέλη και Περιορισμοί των Μεθόδων και Συστημάτων Λήψης Αποφάσεων με Πολλαπλά Κριτήρια

Η ανάλυση των αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) αποτελεί ένα σύνολο μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη στήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια με ευέλικτο τρόπο, μέσω ενός δομημένου και κατανοητού πλαισίου (Gerber, 2013).

Έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκπόνηση αξιολόγησης βιωσιμότητας και έχουν προκύψει ποικίλες εφαρμογές. Παρ 'όλα αυτά, στην πλειονότητα των διαθέσιμων αξιολογήσεων, η επιλογή της μεθόδου MCDA εξαρτάται από την εξοικείωση και τη συνάφεια με την προσέγγιση και όχι με την υπό εξέταση κατάσταση λήψης αποφάσεων (Cinelli, 2017).

Σε αξιολογήσεις που σχετίζονται με την αειφορία, οι μέθοδοι MCDM μπορούν να διαχειριστούν μεικτά δεδομένα και να υποστηρίξουν μια προσέγγιση κύκλου ζωής (Morrissey and Browne, 2004). Για αξιολογήσεις βιωσιμότητας οι οποίες βασίζονται σε πολυκριτηριακές αξιολογήσεις, και απαιτούν την ενσωμάτωση μιας ευρείας ποικιλίας τυπολογίας δεδομένων με διάφορους βαθμούς βεβαιότητας, μπορούν να χειριστούν πολύ καλά τις αβέβαιες πληροφορίες μέσω κατανομών πιθανοτήτων και κατωφλίων. Επιπλέον, η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να διεξαχθεί με όλες τις προσεγγίσεις για να εξεταστεί η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων ανάλογα με τις τιμές δεδομένων, ένα απαραίτητο χαρακτηριστικό στο εξαιρετικά αβέβαιο πεδίο βιωσιμότητας.

Στα πιο περίπλοκα προβλήματα είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μεθόδων με σκοπό την καλύτερη ανάλυση στη λήψη της απόφασης (Løken, 2007). Τα μοντέλα αξιολόγησης MCDA που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη διατριβή βασίζονται (λαμβάνουν υπόψη) στοιχεία άλλων μοντέλων, αλλά αναπτύσσονται ανεξάρτητα ώστε να αντιμετωπιστούν καλύτερα οι συγκεκριμένες αποφάσεις που αφορούν τις υπεράκτιες ΑΠΕ. Η χρήση πολλαπλών εργαλείων

στην ανάλυση αποφάσεων μπορεί να βασιστεί στα πλεονεκτήματα των περισσότερων πολυκριτηριακών μοντέλων και να εξαλείψει τα ελαττώματα που μπορεί να εμφανιστούν από μεμονωμένες μεθόδους. Αντίθετα, τα μειονεκτήματα των μεθόδων θα μπορούσε να συνδυαστούν και να οδηγήσουν σε ένα αβέβαιο αποτέλεσμα συνολικά.

Μια αστοχία σε πολλές μεθόδους MCDAs είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια λανθασμένη ή ακατάλληλη μέθοδος, με αποτέλεσμα οι πληροφορίες που λαμβάνονται υπόψη να μην είναι ακριβείς ή να μην ανταποκρίνονται κατάλληλα στην λήψη απόφασης. Αυτό είναι περισσότερο πρόβλημα της αναγνώρισης της κατάλληλης μεθόδου παρά ενός προβλήματος που οφείλετε στα χαρακτηριστικά οποιουδήποτε από τα μοντέλα. Γι' αυτό πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να διασφαλίζεται ότι χρησιμοποιείται η κατάλληλη μέθοδος καθώς δεν μπορούν να εφαρμοστούν όλες οι μέθοδοι σε όλα τα προβλήματα αποφάσεων. Εάν υιοθετηθεί μια ακατάλληλη μέθοδος, οι λήπτες αποφάσεων μπορεί να μην κατανοήσουν γιατί ορισμένες επιλογές κατατάχθηκαν υψηλότερα από κάποιες άλλες ή να καταλήξουν σε αβεβαιότητα και δυσπιστία σχετικά με το τελικό αποτέλεσμα (Løken, 2007). Ο προσδιορισμός της κατάλληλης μεθόδου απόφασης είναι δύσκολος καθώς κάθε απόφαση είναι μοναδική.

Ορισμένοι από τους δημοφιλής συνδυασμούς που χρησιμοποιούνται για να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα των μοντέλων για ανάλυση ενεργειακών αποφάσεων είναι η AHP με PROMETHEE II (Turcksin, et. al. 2011), (Dağdeviren, 2008), AHP με TOPSIS (Chakladar and Chakraborty 2008), (Büyüközkan and Çifçi 2012), (Bas, 2013), (Lin, et. al. 2008) και AHP με GP (Bertolini and Bevilacqua 2006), (Badri, 2001). Η μέθοδος AHP είναι σαφώς πολύ δημοφιλής σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους (Løken, 2007). Η ELECTRE είναι επίσης πολύ χρήσιμη ως πρώτο βήμα στην ανάλυση προκειμένου να προκύψει ένα μειωμένο σύνολο εφικτών λύσεων οι οποίες θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν για να συμπεριληφθούν στη συνέχεια σε μια πιο εμπεριστατωμένη ανάλυση.

Επίσης, πολλές από τις μεθόδους MCDA περιλαμβάνουν αντιστοίχιση μιας σχετικής βαθμολογίας για ένα κριτήριο από κάποιο άλλο. Οι ανά ζεύγος συγκρίσεις (Pair-wise comparisons) είναι το πιο συνηθισμένο παράδειγμα σχετικής βαθμολόγησης. Στη σύγκριση αυτή, τα κριτήρια αποτιμώνται συγκριτικά σε σχέση με κάποιο άλλο. Αν η σύγκριση δεν γίνει με κατάλληλο τρόπο, η σχετική βαθμολογία μπορεί να οδηγήσει σε τιμές (αξίες) χωρίς νόημα

(Barzilai, 2008). Για παράδειγμα, η μέτρηση χωρίς μονάδες μπορεί να δημιουργήσει κλίμακες στις οποίες η πρόσθεση και ο πολλαπλασιασμός δεν είναι εφαρμόσιμες, όπως κατά τη σύγκριση προτιμήσεων για χρώματα για τα οποία δεν υπάρχει το μηδέν στην κλίμακα χρησιμότητας. Γι' αυτό οι σχετικές κλίμακες μπορεί να είναι προβληματικές, καθώς η έννοια της μηδενικής χρησιμότητας ή της μηδενικής προτίμησης δεν είναι καλά καθορισμένες.

Ένα σημείο που πρέπει να δοθεί προσοχή, και διαπιστώθηκε κατά την διερεύνηση των MDCMs, είναι ότι ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν ανούσιες κλίμακες για τη στάθμιση αξίας χρησιμότητας όπως π.χ. μια κλίμακα 1-10, της απόστασης που έχει η απόσταση δύο πόλεων η οποία θεωρείται δεδομένη (Barzilai, 2008). Τέτοιου είδους εκτιμήσεις προτιμήσεων πρέπει να γίνονται σε σχέση με άλλες επιλογές, έτσι ώστε να υπάρχει μια φυσική κλίμακα ή εναλλακτική λύση με την οποία θα μπορεί ένα κριτήριο να συγκριθεί. Οι σχετικές κλίμακες μπορεί να εφαρμοστούν σε εκτιμήσεις αξίας στη λήψη αποφάσεων αλλά δεν αποτελεσματικές για όλα τα κριτήρια.

Ένα πεδίο περιορισμού που δεν είναι ακόμα σαφές αφορά το ενδεχόμενο να επηρεάζονται οι προτιμήσεις των ληπτών αποφάσεων από την ψυχολογική τους κατάσταση ώστε να ελλοχεύει ο κίνδυνος να επιδράσουν στην προτεραιότητα (προτίμηση) και εάν μπορούν να μετρηθούν εμπειρικά. Η διερεύνηση του πεδίου η οποία προτάθηκε από τη Βρετανική Ένωση για την Προώθηση της Επιστήμης (Association for the Advancement of Science) το 1940 δεν συζητήθηκε εκτενώς από τότε (Barzilai, 2008).

Οι τιμές κατωφλίου (threshold), μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθεί πότε και πόσο συχνά μια βαθμολογία σε ένα κριτήριο υπερβαίνει ένα καθορισμένο όριο. Τα κατώτατα όρια σχετίζονται συχνά με πρότυπα. Τα πρότυπα αυτά, όταν υπερβαίνουν το καθορισμένο όριο, ενδέχεται να έχουν ισχυρές αρνητικές επιπτώσεις, όπως το να μη γίνει αποδεκτό κάποιο έργο. Τα κατώτατα όρια παρουσιάζουν ένα μοναδικό πρόβλημα σε σχέση με τις MCDM. Ορισμένες, επιτρέπουν την καταχώριση των αποτελεσμάτων ενός κριτηρίου, δίνοντας ένα εύρος πιθανών τιμών που παρέχει μια πληρέστερη αναπαράσταση των πιθανών τιμών του κριτηρίου. Χρησιμοποιώντας τη διανομή πιθανών βαθμολογιών ενός κριτηρίου θα ήταν παρόμοια με την εκτέλεση μιας προσομοίωσης αρκετές φορές σε κάθε τιμή μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής διανομής (όπως γίνεται με προσομοιώσεις Monte Carlo και ανάλυση ευαισθησίας). Ωστόσο, η χρήση της αναμενόμενης τιμής ενός κριτηρίου ή ακόμα και μια

κατανομή των αναμενόμενων τιμών, δεν έχει απαραίτητα νόημα στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, διότι οι άνθρωποι συχνά αντιμετωπίζουν κινδύνους ακόμη και αν υπάρχει μόνο ελάχιστη πιθανότητα εμφάνισης ενός αρνητικού συμβάντος μπορεί να αρνηθούν να το αποδεχθούν (Barzilai, 2010b). Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τιμή κατωφλίου, στην οποία μια εναλλακτική λύση θα αποκλείεται από την ανάλυση εάν υπάρχει ενδεχόμενο να υπερβεί αυτή την τιμή.

Οι μέθοδοι MCDA που χρησιμοποιούνται στη έρευνα αξιολόγησης ΑΠΕ στην παρούσα διατριβή βασίζεται σε πτυχές πολλών κοινών εργαλείων. Όμως το πεδίο των MCDA δεν έχει ακόμη φθάσει σε μια ώριμη κατάσταση και ως εκ τούτου υπάρχουν προβλήματα με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται (Barzilai, 2008). Ορισμένα προβλήματα είναι εγγενή σε όλες τις μεθόδους, ενώ άλλα είναι μοναδικά σε συγκεκριμένες μεθόδους. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου MCDA πρέπει να βασίζεται στην κατάλληλη γνώση των βασικών αρχών της προσέγγισης και της αξιολόγησης που πρέπει να γίνει επίσης. Αυτό συνεπάγεται την αναγνώριση ότι ορισμένες πτυχές μπορούν να καλυφθούν μόνο με ορισμένες μεθόδους και όχι με άλλους, έτσι ώστε η υιοθέτηση της προσέγγισης να είναι προσαρμοσμένη στην κατάσταση λήψης αποφάσεων και όχι αντίστροφα (Cinelli, et.al. 2014) . Έτσι, η κατανόηση των οφελών και των μειονεκτημάτων των μεθόδων είναι επομένως πολύ σημαντική.

## 3.8 Σύνοψη

Πολλές μέθοδοι MCDM έχουν δημιουργηθεί και αξιοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Με βάση την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, τα παρατηρούμενα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς και οι τομείς εφαρμογής για κάθε μέθοδο, συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Οι μέθοδοι εξωστρέφειας, όπως το ELECTRE και το PROMETHEE, οι οποίες επικράτησαν νωρίς στην ανάπτυξη του πεδίου των πολυκριτηριακών προβλημάτων, ξεπεράστηκαν από τη χρήση προσεγγίσεων όπως οι AHP, ANP, TOPSIS και MAUT. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αποτελεσματικότητας από την εφαρμογή τους και τη δυνατότητα συνδυασμού διαφορετικών μεθόδων στη λήψη αποφάσεων οι MCDM γίνει κοινός τρόπος προσέγγισης πολύπλοκων προβλημάτων.

Ο συνδυασμός πολλαπλών μεθόδων αντιμετωπίζει ελλείψεις που μπορεί να παρατηρηθούν, και μαζί με τις μεθόδους στις αρχικές τους μορφές, μπορούν να είναι εξαιρετικά επιτυχείς στις εφαρμογές τους. Βασική προϋπόθεση είναι να αξιολογούνται σωστά τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες τους. Έτσι αποφεύγονται και ορισμένα προβλήματα λήψης αποφάσεων από την προσέγγιση με μόνο μια μέθοδο που μπορεί να μην είναι η πλέον κατάλληλη για την επίλυσή τους.

Στο κεφάλαιο αυτό από τη διερεύνηση των διαφόρων μεθοδολογιών εντοπίστηκαν τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες τους, ώστε να γίνει ένα σημαντικό βήμα για την εδραίωση της βάσης της έρευνας στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια, η προσέγγιση της διατριβής μέσα από την εφαρμογή σε πρακτικά προβλήματα των μεθόδων αναζητά τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθούν ενσωματώνοντας τα πλεονεκτήματα, ενώ παράλληλα να εξαλειφθούν τα μειονεκτήματα.

# Κεφάλαιο 4

## 4.1 Εισαγωγή

Με την ανάπτυξη σε τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ και της προσπάθειας εξοικονόμησης πόρων προς μια βιώσιμη ανάπτυξη, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σταδιακή μεταβολή στην αύξηση της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό φαίνεται από τις εκτιμήσεις σε σχετικές μελέτες όπως αυτή του "Renewables 2015 global status report, renewable energy policy network for the 21st century", όπου παρουσιάζεται η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας που χρησιμοποιείται από αυτή που παράγεται με ΑΠΕ να φτάνει το 19%, με την αύξηση της παραγωγικής ικανότητας να εμφανίζεται ότι επεκτείνετε στα επόμενα έτη.

Πριν την ανάλυση των λεπτομερειών της παρούσας έρευνας θα παρατεθούν μερικά στοιχεία τα οποία καταγράφουν την έντονη τάση για διείσδυση των ΑΠΕ στον ενεργειακό τομέα, την αύξηση του ενεργειακού μεριδίου στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές αλλά και τους τολμηρούς στόχους που τίθενται σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο.

Επίσης παρουσιάζονται οι καινοτόμες τεχνολογίες που αξιοποιούν το δυναμικό των ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον, το οποίο όπως αναλύεται από τη διερεύνηση των τεχνολογιών είναι ικανό να ανταποκριθεί στις ενεργειακές ανάγκες. Βέβαια παρά την διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις διάφορες μορφές της, αιολική, κυματική, θαλάσσια ρεύματα, ηλιακή, υδραυλική, βιομάζα και γεωθερμία, οι τεχνολογίες ανά πεδίο δεν είναι όλες αρκετά ώριμες ώστε να θεωρηθούν ότι θα αξιοποιήσουν ικανοποιητικά το διαθέσιμο δυναμικό, ή δεν αποτελούν τη βέλτιστη λύση για την περιοχή που σχεδιάζεται να αναπτυχθούν.

Επομένως, η έρευνα στα επιμέρους πεδία είναι αναγκαία και παρουσιάζεται από πολλές μελέτες σύμφωνα με την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που εμβαθύνουν στον ενεργειακό προγραμματισμό.

Στην παρούσα διατριβή η διερεύνηση εστιάζει στην αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού στο θαλάσσιο περιβάλλον με την προσέγγιση ενός μεθοδολογικού πλαισίου αξιοποίησής του μέσω κατάλληλων τεχνολογιών. Γεννάται όμως το ερώτημα ποιες είναι αυτές οι τεχνολογίες; Αυτό το ερωτηματικό της παρουσίασης των τεχνολογιών που εγκαθίστανται σε υπεράκτια συστήματα για

την αξιοποίηση του διαθέσιμου δυναμικού καθώς και το σύγχρονο περιβάλλον του ενεργειακού τομέα αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

## 4.2 Το σύγχρονο περιβάλλον του ενεργειακού τομέα

Στον ενεργειακό τομέα δυο βασικές προκλήσεις στρατηγικών ανάπτυξης μπορούν να εντοπισθούν. Η μια πρόκληση είναι η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην κάλυψη ενός μεγάλου μέρους των διαλείπων ενεργειακών πόρων σε ενεργειακά συστήματα, ιδίως στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές (Duic and Carvalho, 2004) (Lund, 2006), και η άλλη να συμπεριληφθεί στις στρατηγικές του τομέα των μεταφορών (Ghanadan, R., J.G. Koomey, 2005), (Lund, H., E. Munste, 2006). Στο πλαίσιο αυτών των στρατηγικών εμφανίζονται πολλά παραδείγματα και μελέτες που προωθούν την ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ (Huacuz, 2005) (Alnatheer, 2005), (Duke, et. al. 2005), (Kaldellis, 2005). Επίσης, εντοπίζεται ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των υπεράκτιων κατασκευών, το οποίο οφείλεται στον παράγοντα του τεράστιου δυναμικού ενεργειακών πόρων του θαλασσίου περιβάλλοντος.

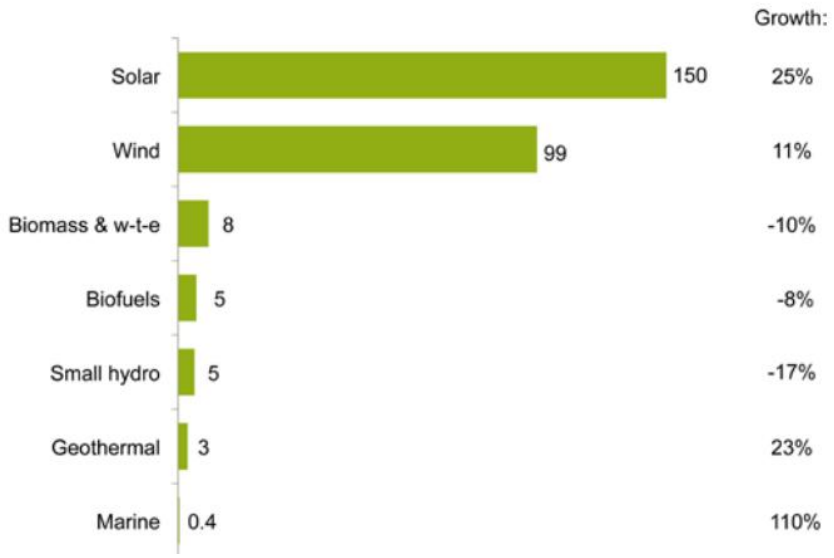
Για τους παραπάνω λόγους, καθώς και την παράλληλη ταχεία ανάπτυξη σε τεχνολογίες αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού των ΑΠΕ, οι επενδύσεις στον τομέα της υπεράκτιας ενέργειας είναι πιθανό να αυξηθεί (Lund, 2007). Η έρευνα στην μετατροπή της θαλάσσιας θερμικής ενέργειας, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια και η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει οδηγήσει σε πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες και σε πολλές περιπτώσεις οι τεχνολογίες αυτές να χρησιμοποιούνται ικανά συστήματα που υπόσχονται εμπορική ανάπτυξη.

Σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με την έκθεση για την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ του International Energy Association 2015 (International Energy Agency World Energy Outlook 2014) η απόδοση συστημάτων για θέρμανση αυξήθηκε με σταθερό ρυθμό, ενώ η παραγωγή από βιοκαυσίμα για τις μεταφορές αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, μετά από μια επιβράδυνση την περίοδο 2011-2012, η οποία καταλογίζεται στην παγκόσμια οικονομική κρίση.

Ταχύτερη ανάπτυξη, και μεγαλύτερη αύξηση της παραγωγικής ικανότητας σημειώθηκε στον τομέα της ενέργειας, που προέρχεται από την εγκατάσταση συστημάτων παραγωγής ενέργειας

από το αιολικό δυναμικό με τη χρήση ανεμογεννητριών, από την ηλιακή με φωτοβολταϊκά και από υδροηλεκτρικά συστήματα.

Οι επενδύσεις σε συστήματα ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον ενώ ποσοστιαία εμφανίζουν αλματώδη εξέλιξη λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του τομέα έχουν μικρό ποσοστό σε αυτή κατανομή του ενεργειακού ισοζυγίου (εικόνα 4.1).




**Εικόνα 4.1 Νέες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανά τομέα παγκοσμίως, το 2014, και η ανάπτυξη σε σχέση με το 2013, σε $ BN (Global Trends in Renewable Energy Investment, 2015).**

Στην έρευνα για τη μελλοντική ανάπτυξη των ΑΠΕ, η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας διανύει μια βασική μεταμόρφωση, ιδίως όσον αφορά την ενεργειακή ανάπτυξη και διαχείριση των πόρων, ενώ εξετάζονται δύο σενάρια.

1. Το πρώτο (Σ-40) αφορά, σύμφωνα με το National Renewable Energy Action Plan in Scope of Directive 2009/28/EC (Ypeka 2010), το μερίδιο των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα προσεγγίσει το 40% έως το έτος 2020. Σύμφωνα με την έκθεση IEA: Renewables Will Overtake Coal's Share in World Power Mix by 2040, η παγκόσμια αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θα απαιτήσει αύξηση των εγκαταστάσεων με ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 7.200 GW. Το

ήμισυ των υφιστάμενων εγκαταστάσεων στο προβλεπόμενο διάστημα θα πρέπει να αντικατασταθούν λόγο παλαιότητας.

Σημειώνεται επίσης ότι η απόσυρση συστημάτων παραγωγής ενέργειας, καθώς και το ποσοστό απόσυρσης μεταξύ των συστημάτων που παράγουν ενέργεια με καύση συμβατικών καυσίμων και ΑΠΕ διαφέρει μεταξύ των κρατών.

Για παράδειγμα, περίπου το 60% της παραγωγικής ικανότητας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) είναι προγραμματισμένο να αποσυρθεί κατά την περίοδο 2014 και 2040, σε σύγκριση με την Κίνα που είναι το 16%. Σύμφωνα με την ίδια έκθεση, οι ΗΠΑ ενδέχεται να αποσύρουν περίπου 736 GW, μεταξύ 2014 και 2040, κάνοντας σημαντική αυτή τη μεταβολή εάν ληφθεί υπόψη ότι σημαντικός αριθμός από τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις που είχε δυναμικό 1.032 GW το 2012. Περαιτέρω οι νέοι κανονισμοί στις ΗΠΑ αναμένεται να ενθαρρύνουν την αύξηση κατά 40% της χρήσης του φυσικού αερίου για την ενέργεια και την προώθηση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά 165%. Στην ΕΕ, η συμμετοχή των συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σχεδόν θα διπλασιαστεί, φθάνοντας το 46% το 2040.

2. Το δεύτερο αναφέρεται σε μια πολύ μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ, της τάξης του 80%, η οποία, σύμφωνα με τον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό (Ευρωπαϊκός Οικονομικός Χώρος, ΕΟΧ-50, 2012), θα επιτευχθεί περί το 2040. Η επίτευξη του παγκόσμιου στόχου σύμφωνα με τη WWF είναι μέχρι το 2050 το ποσοστό να φτάσει σχεδόν το 100% (εικόνα 4.2).

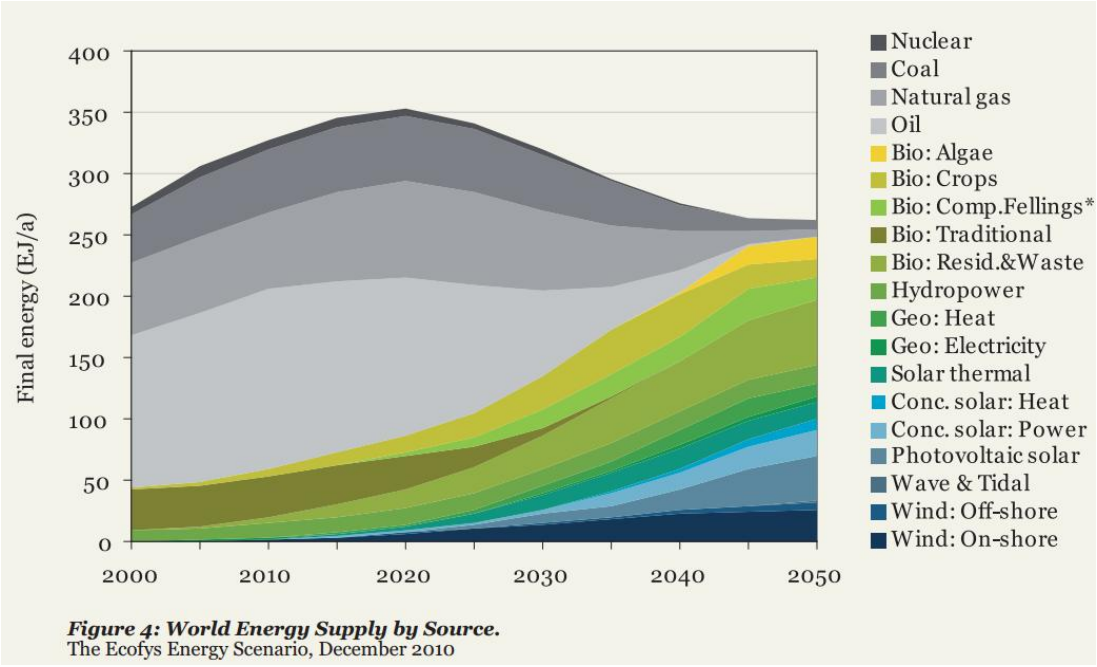



***Figure 4: World Energy Supply by Source.***
The Ecofys Energy Scenario, December 2010

**Εικόνα 4.2 Έκθεση ενεργειακού σχεδιασμού :100% Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2050 (WWF 2011).**

Στο ίδιο ερευνητικό πλαίσιο για την ενεργειακή ανάπτυξη των ΣΑΔ-ΑΠΕ στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), τα τελευταία χρόνια εντείνονται οι προσπάθειες μεταβάλλοντας το πολιτικό πλαίσιο σε ένα που στοχεύει την προώθηση των ΑΠΕ. Έτσι μειώνεται η εξάρτησή της από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, προστατεύοντας το περιβάλλον και στηρίζοντας την ενεργειακή βιομηχανία, η οποία αποτελεί έναν από τους πιο αναπτυσσόμενους κλάδους της. Αυτό παρουσιάζεται και στα αποτελέσματα των στατιστικών στοιχείων της έκθεσης του 2014 και των βασικών τάσεων για την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην ευρωπαϊκή βιομηχανία στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί.

**Πίνακας 4.1 Βασικές τάσεις για την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην ευρωπαϊκή βιομηχανία.**

| | |
|---|---|
| Η αγορά υπεράκτιας αιολικής ενέργειας για το 2014 | • 408 νέες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε εννέα αιολικά πάρκα αναπτύχθηκαν, αξίας 4,2 δις € και 5,9 δις €, και είναι πλήρως διασυνδεδεμένα από 1ης Ιανουαρίου και 31ης Δεκεμβρίου 2014. Η νέα δυναμικότητα ανέρχεται σε 1,483.3 MW, - 5,34% λιγότερο από ό, τι το 2013<br>• 536 ανεμογεννήτριες κατασκευάστηκαν κατά τη διάρκεια του 2014, κατά μέσο όρο 5,9 MW ανά ημέρα, ενώ 373 από αυτές τις ανεμογεννήτριες περιμένουν σύνδεση με το δίκτυο<br>• Εργασίες σε 12 ακόμα έργα που είναι σε εξέλιξη. |
| Συγκεντρωτική αγορά υπεράκτιας αιολικής ενέργειας | • 2,488 ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί και είναι συνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο, δημιουργώντας ένα αθροιστικό σύνολο 8,045.3 MW σε 74 αιολικά πάρκα σε 11 ευρωπαϊκές χώρες<br>• 78,8% των υποδομών είναι με στήριξη μονών πασσάλων (monopiles), 10,4% είναι με θεμέλια βαρύτητας gravity foundations, 4,7% με κατασκευές πλέγματος (jackets), 4,1% με τρίποδες , και 1,9% με στήριξη σε τρεις πάσσαλους (tripiles)<br>• Υπάρχουν επίσης δύο πλήρους κλίμακας διασυνδεδεμένες πλωτές κατασκευές με ανεμογεννήτριες. |
| Προοπτικές της αγοράς για το 2015 και το 2016 | • Με την ολοκλήρωση των 12 υπεράκτιων έργων που βρίσκονται υπό, η εγκατεστημένη ισχύς θα αυξηθεί κατά 2,9 GW, ώστε η σωρευτική ικανότητα στην Ευρώπη στο 10,9 GW. |
| Τάσεις : κατασκευές ανεμογεννητριών, η εγκατάστασή τους, το βάθος του νερού και η απόσταση από τις ακτές | • Το μέσο μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών ήταν 3,7 MW, ελαφρώς μικρότερη από ό, τι το 2013<br>• Το μέσο μέγεθος των διασυνδεδεμένων υπεράκτιων αιολικών πάρκων το 2014 ήταν 368 MW, 24,1% λιγότερο από ό, τι το προηγούμενο έτος.<br>• Το μέσο βάθος του νερού των αιολικών πάρκων που ολοκληρώθηκε, ή μερικώς έχει κατασκευαστεί, το 2014 ήταν 22,4 μέτρα (m) και η μέση απόσταση στην ακτή ήταν 32,9 χιλιόμετρα. |
| Χρηματοδοτικές επισημάνσεις και εξελίξεις | • Η χρηματοδότηση έργων γίνεται όλο και περισσότερο ένα σημαντικό εργαλείο στην ανάπτυξη των κατασκευών υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Η βιομηχανία έθεσε 3.140.000.000 € το 2014 – που είναι το υψηλότερο επίπεδο που επιτεύχθηκε ποτέ.<br>• Σχεδόν οι μισές από τις τελικές επενδυτικές αποφάσεις που ελήφθησαν το 2014 ήταν έργα δισεκατομμυρίων ευρώ, με συνολικά χρηματοδότηση έργα δυναμικότητα 2.323 MW νέας ισχύος<br>• Η δημιουργία εταιρικών σχέσεων γίνεται το κλειδί της επιτυχίας και καθώς η ρευστότητα μειώνετε στις χρηματοπιστωτικές αγορές, οι κατασκευαστές θα είναι πιο πιθανό να ταυτίζουν τα συμφέροντα τους με αυτά των δυνητικών επενδυτών. |

Συνοπτικά για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ,
- 20% διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ και
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat που δόθηκε το 2014, η ενεργειακή κατανάλωση από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ανήλθε το 2012 σε 15,1% επί του συνόλου 14,1% στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Κατά την περίοδο 2004-2012 η Ελλάδα υπερδιπλασίασε τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην κάλυψη της ζήτησης ενέργειας από 7,2% το 2004 σε 15,1% το 2012.

Ο μελλοντικός στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, αφορά μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση.

Η Ελληνική πολιτεία στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος αναλύεται σε 40 % συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20 % σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10 % στις μεταφορές.

Οι εθνικοί ενεργειακοί στόχοι για το 2020, όπως περιγράφονται στο σχέδιο δράσης, αλλά και όπως έχουν διαμορφωθεί από τις πρόσφατες νομοθετικές παρεμβάσεις και τα αντίστοιχα εθνικά προγράμματα στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών προγραμμάτων χρηματοδότησης (ΕΣΠΑ) διαμορφώνουν ένα ισχυρά αναπτυξιακό επιχειρηματικό πλαίσιο.

Στο πλαίσιο αυτό, η Ελλάδα καλείται να αξιοποιήσει τις δυνατότητες που της προσφέρει το φυσικό δυναμικό που διαθέτει με τεχνολογίες ΑΠΕ και να διαμορφώσει ένα νέο μοντέλο «πράσινης» ανάπτυξης. Παράλληλα, η επίτευξη αυτών των στόχων θα συνεισφέρει στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού, στη βέλτιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας βασικών κλάδων της Ελληνικής οικονομίας (Diakoudaki, 2014).

Από τις τάσεις και τις ενέργειες σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό, αλλά και εθνικό επίπεδο διαφαίνεται η μεγάλη πίεση που ασκείται για την υιοθέτηση συγκεκριμένων και φιλόδοξων στόχων. Η πίεση αυτή δημιουργεί την ανάγκη στη σύγχρονη κοινωνία αφενός να καλείται να υλοποιήσει άμεσα τους στόχους που έχουν τεθεί και συγχρόνως να κινηθεί πέρα από αυτούς αποδεικνύοντας εμπράκτως ότι είναι δυναμική, ιδιαίτερα ευαισθητοποιημένη σε θέματα περιβάλλοντος και βιώσιμης ανάπτυξης (Papaioannou and Mavroidis, 2005).

Ουσιαστικά, η προσπάθεια στοχεύει στην προσέγγιση ενός αειφορικού ενεργειακού συστήματος. Στο σύστημα αυτό πρέπει η παραγωγή, η διανομή και η χρήση των ενεργειακών πηγών, να παρέχει δίκαιη, οικονομικά βιώσιμη ενέργεια, να διασφαλίζεται ο ενεργειακός εφοδιασμός και ταυτόχρονα η προστασία του περιβάλλοντος, και αυτά να θεωρούνται οι βασικότερες προτεραιότητες.

Επομένως, είναι ιδιαίτερα κρίσιμες και πολύπλοκες οι ενεργειακές προκλήσεις που αντιμετωπίζονται σήμερα προς έναν αειφορικό ενεργειακό τομέα και καθίσταται σαφές ότι η αξιοποίηση των ΑΠΕ αποτελεί ένα μέσο τήρησης των δεσμεύσεων, στο πλαίσιο της πρόληψης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγή. Η σχέση μεταξύ ενεργειακής παραγωγής και περιβαλλοντικού σχεδιασμού καθίσταται αμφίδρομη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις χωρών που χαρακτηρίζονται από το ιδιαίτερα πλούσιο δυναμικό ΑΠΕ όπως η Ελλάδα.

Σε περιβάλλον σαν αυτό, ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας δομών αξιοποίησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) γίνεται, μία από τις βασικές προτεραιότητες σε παγκόσμιο επίπεδο από ερευνητική, λειτουργική, οικονομική πλευρά, προσεγγίζοντας το πλαίσιο μιας «βιώσιμης ενεργειακής ανάπτυξης».

Η ανάγκη αυτή συνδέεται όχι μόνο με την επικείμενη μείωση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, αλλά και με την αύξηση της εξαρτώμενης εισαγωγής ενέργειας, τη μείωση του αριθμού σημαντικών εξαγωγών πόρων, την διευθέτηση ζητημάτων περιβαλλοντικών πολιτικών καθώς και την αξιοποίηση κατάλληλων τεχνολογιών.

## 4.3 Υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΥΔΑ-ΑΠΕ)

Ως θαλάσσιες κατασκευές (υπεράκτιες κατασκευές) αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΥΔΑ-ΑΠΕ) ορίζονται οι κατασκευές αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ο αέρας, τα κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα, τα παλιρροιακά ρεύματα και διαμορφωμένα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Η ανάπτυξη αυτών των κατασκευών ενδέχεται να στοχεύει είτε στην αξιοποίηση μιας μορφής ΑΠΕ, είτε να αξιοποιεί περισσότερα μέσα από τη δημιουργία υβριδικών συστημάτων που σκοπό έχουν την επαύξηση της αποδοτικότητάς τους.

Η έρευνα στον τομέα δημιουργεί τις προϋποθέσεις να αναπτύσσονται κατασκευές όπως πακτωμένες στο βυθό ή πλωτές ανεμογεννήτριες, συστήματα αξιοποίησης των κυμάτων, της παλιρροϊκής ενέργειας, συστήματα εκμετάλλευσης της θερμικής διαβάθμισης των υδάτων και της διαβάθμισης της αλατότητας, τα οποία αποτελούν τους κύριους τύπους των υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του θαλάσσιου περιβάλλοντος και τέλος πλωτά φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.

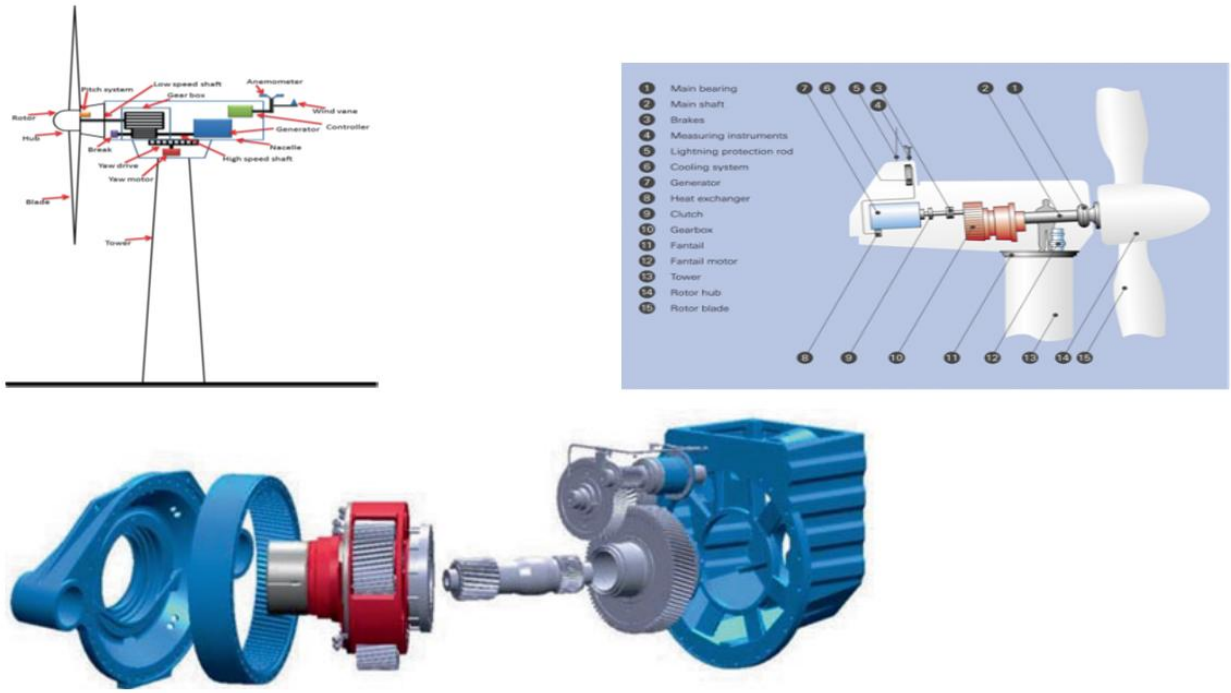
Σημειώνεται ότι τα συστήματα παλιρροϊκής, θερμικής διαβάθμισης και αλατότητας δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας διότι αποτελούν συστήματα που προϋποθέτουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για την αξιοποίηση των ανάλογων ΑΠΕ και εγκαθίστανται σε ειδικές περιοχές. Όσον αφορά τα πλωτά φωτοβολταικά συστήματα εξετάζονται ως βοηθητικές εναλλακτικές λύσεις διότι λόγω των περιορισμών από την επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάστασή τους και της διαθέσιμης μέχρι σήμερα τεχνολογίας των πάνελ στην παραγωγή -σχέση απόδοσης/επιφάνειας- δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για την δημιουργία βιώσιμων οικονομικά συστημάτων.

### 4.3.1 Πλωτές ή Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες (Offshore Wind Turbines)

Οι κατασκευές για την αξιοποίηση του ανέμου με ανεμογεννήτριες, όπως και οι ανεμογεννήτριες ξηράς, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Σε μια σύντομη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας και των τύπων εγκατάστασής τους, μέσα από αναφορές στα βιβλία Offshore Energy Structures - For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms (Karimirad, 2014) και Marine renewable energy handbook (Multon, 2013), διαπιστώνεται ότι μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί με τον αντίθετο τρόπο ενός ανεμιστήρα (ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσει και να περιστρέφουν τα πτερύγια του έλικα).

Στην ανεμογεννήτρια η ενέργεια του ανέμου γυρνά τα πτερύγια που είναι εγκατεστημένα στη πλήμνη ενός ρότορα. Ο ρότορας, που είναι το κινούμενο σύνολο άξονα και έλικα, έχει ως απόληξη τον άξονα χαμηλής ταχύτητας. Έτσι, δημιουργείται ένα κινούμενο σύστημα το οποίο μεταδίδει την περιστροφική κίνηση σε ένα σύστημα ενδιάμεσων οδοντωτών τροχών (γρανάζια) διαφόρων διαμέτρων, με κατάλληλη διάταξη, ώστε να αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής και ταυτόχρονα να μεταδίδει την περιστροφή σε ένα άξονα υψηλής ταχύτητας (εικόνα 4.3).

Ο άξονας υψηλής ταχύτητας τελικά είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια, η οποία δημιουργεί την ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη από τη γεννήτρια ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια μέσω μιας διάταξης καλωδίων και συσκευών σταθεροποίησης και εξομάλυνσης του ρεύματος (όπως μετασχηματιστές, ανορθωτές, κλπ) μεταφέρεται στους καταναλωτές.




**Εικόνα 4.3 Εξαρτήματα ανεμογεννήτριας και όψη των στοιχείων του κιβωτίου μετάδοσης της κινήσεως (Courtesy US Department of Energy, US Government 2014).**

Σύμφωνα με τη διάταξη που αναπτύσσεται σε μια ανεμογεννήτρια παράδειγμα το (εικόνα 4.3) και με βάση τη θεωρία Rankine-Froude, η δύναμη ($P$) που παράγεται για να περιστρέψει το σύστημα μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{1}{2}\rho_{air} C_p A_S V_{Rel}^3 \qquad (4.1)$$

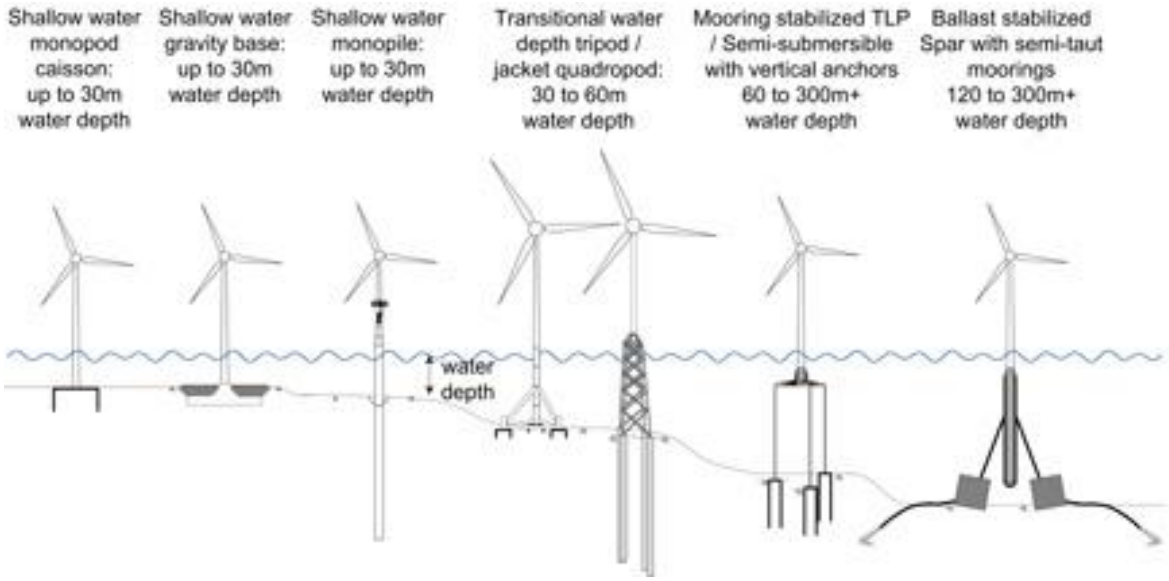
στην οποία $\rho_{air}$ είναι η πυκνότητα του αέρα, $C_p$ είναι ο συντελεστής ισχύος, $A_S$ είναι η περιοχή η οποία σαρώνεται από το ρότορα της ανεμογεννήτριας και $V_{Rel}$ είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου.

Αυτή η απλή σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της δύναμης δείχνει ότι σε μια αύξηση 10% της σχετικής ταχύτητας του ανέμου θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση κατά 33% στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (Wilson, et. al. 1974). Γι' αυτό το λόγο, η εγκατάσταση

συστημάτων στην θάλασσα όπου το αιολικό δυναμικό είναι μεγάλο (Henderson, et. Al. 2003), (Musial, et. al. 2006) μπορεί να αποδώσει μεγάλα φορτία ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κατασκευές που αναπτύσσονται εξαρτώνται από την απόσταση από την ξηρά, την μορφολογία του βυθού και το βάθος της εγκατάστασης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Οι κατασκευές που βρίσκονται κοντά στην ξηρά σε απόσταση 25 έως 60 m και σε μικρό βάθος μπορούν να εγκατασταθούν στο βυθό και ονομάζονται μόνιμες ή πακτωμένες στο βυθό υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (Fixed Offshore Wind Turbines).

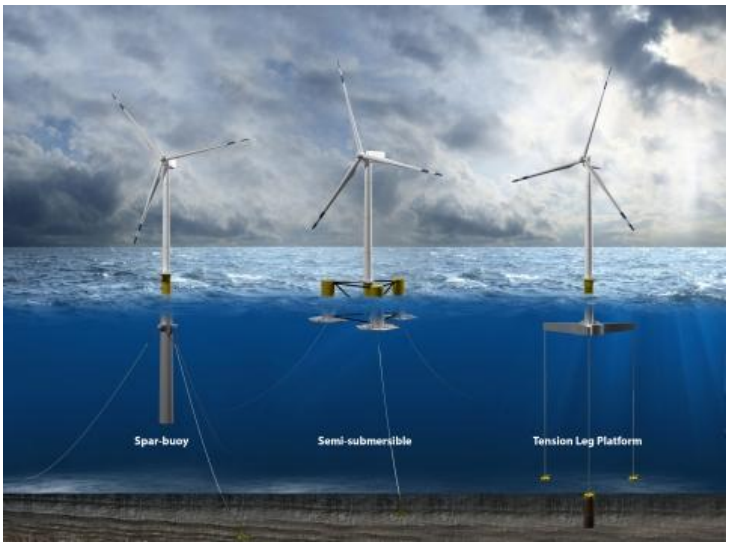
Όμως η αύξηση του βάθους του νερού, με σκοπό να επιτευχθεί σταθερότητα της εγκατάστασης και ταυτόχρονα τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε μεγάλο βάθος, δημιουργούνται κατασκευές που ονομάζονται Πλωτές Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες (Floating Offshore Wind Turbines) για τις οποίες απαιτούνται διαφορετικοί τύποι θεμελίωσης. Κατηγοριοποιώντας τους τύπους των υπεράκτιων κατασκευών με ανεμογεννήτριες δημιουργούνται διάφοροι τύποι (Musial, et. al. 2010), οι οποίοι είναι:




**Εικόνα 4.4 Τύποι εγκατάστασης ανεμογεννητριών στη θάλασσα. Πηγή J. Schneider NREL.**

- Η Shallow water monopod caisson (για αβαθύ νερα μονό υδατοστεγές κιβώτιο), όπου πραγματοποιείται με κρουστική σφυρηλάτηση για τη στήριξη της βάσης στο βυθό, με βάθος νερού μέχρι 30 μέτρα

- Η Shallow water gravity base (με βάσεις βαρύτητας), όπου συγκεκριμένες βάσεις βαρύτητας συνδέονται στη βάση της θεμελίωσης (ενδεχομένως σε συνδυασμό με κάποια αναρρόφηση ανάμεσα στην άμμο και το θεμέλιο) για την παροχή στήριξης σε βάθη μέχρι 30m
- Η Shallow water monopile (μίας μακράς σωληνοειδούς κατασκευής), όπου πραγματοποιείται γεώτρηση στα σκληρότερα στρώματα του βυθού και δημιουργείται μια τρύπα για την εγκατάσταση και συναρμολόγηση της βάσης
- Οι Transitional water depth tripod / jacket quadropod (κατασκευές τύπου τρίποδα ή με υδραυλικό/μηχανικό τετραπλό υαδατοστεγές κιβώτιο) που χρησιμοποιούν είτε έναν αριθμό (συνήθως 3) μικρότερους πασσάλους για την παροχή υποστήριξης, είτε δικτύωμα με τέσσερα σημεία στήριξης, σε βαθιά νερά της τάξης των 30 έως 60 μέτρα.
- Οι Floating Platforms (πλωτές πλατφόρμες) εγκατάστασης ανεμογεννητριών για την παροχή στήριξης σε βάθη 60 μέχρι 300m. Οι βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο, αλλά αποτελούν μέσα για την αξιοποίηση του μεγάλου αιολικού δυναμικού στην ανοικτή θάλασσα. Με την κατασκευή πλωτών πλατφόρμων αντιμετωπίζεται το μεγάλο κόστος που θα υπήρχε για την πάκτωση της βάσης τους στο βυθό.

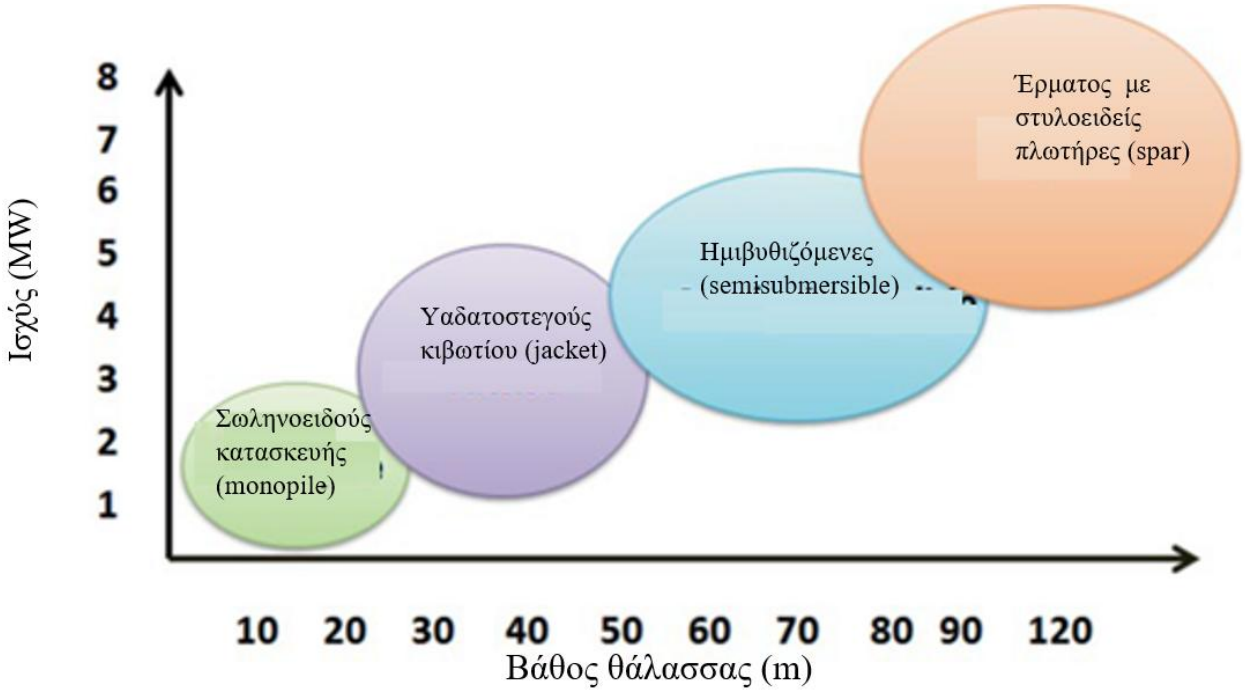



**Εικόνα 4.5 Τυπικές Πλωτές πλατφόρμες με αρχές στατικής ευστάθειας. Πηγή: http://energy.gov.**

Οι ποιο αντιπροσωπευτικοί τύποι (Musial, et. al. 2007), παρουσιάζονται στην εικόνα 4.5 και είναι:

- Έρματος στυλοειδείς πλωτήρες (Ballast Spar-buoys), είναι πλατφόρμες- πλωτά που επιτυγχάνουν τη σταθερότητα με τη χρήση έρματος κάτω από μια κεντρική δεξαμενή άνωσης που δημιουργεί μια ροπή επαναφοράς και υψηλή αντίσταση αδράνειας στις κινήσεις ανατροπής από τους κυματισμούς καθώς και την επίτευξη του απαιτούμενου βυθίσματος για την ευστάθεια του πλωτού (Musial, et. al. 2004).
- Άνωσης (Buoyancy) ή ημιβυθιζόμενες (Semisubmersible), είναι οι πλατφόρμες που επιτυγχάνουν τη σταθερότητα μέσω της χρήσης πλωτήρων που διανέμεται το βάρος και για την σταθερότητα του πλωτού αξιοποιείται σταθμισμένα η περιοχή της επιφάνειας του νερού που καλύπτουν για τη ροπή επαναφοράς (Newman, 1977) ,όπως αυτή που εμφανίζεται στο κέντρο του σχήματος.
- Αγκυροβόλιση με συρματόσχοινα έντασης (Mooring Lines), είναι πλατφόρμες που η σταθερότητά τους επιτυγχάνεται μέσω της πρόσδεσης και έντασης με χρήση συρματόσχοινων. Η πλατφόρμα με συρματόσχοινα (Tension-Leg Platform TLP), βασίζεται στην ένταση πρόσδεσης για την ανόρθωση και τη σταθερότητα (Musial, et. al. 2004).

Επί του παρόντος, περίπου 32 πλωτά υπεράκτια έργα, με ικανότητα παροχής ισχύος κάθε ένα από αυτά πάνω από 1MW, έχουν δημιουργηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Παραδείγματα αποτελούν έργα όπως το Πορτογαλικό WindFloat και το Ιαπωνικό Fukushima (τύπου Semisubmersible) με εγκατεστημένη ισχύ τα 2 MW, καθώς και το Νορβηγικό Hywind (τύπου Spar) με εγκατεστημένη ισχύ τα 2,3 MW. Οι ημι-βυθιζόμενες τύπος ως βάση για το πλωτό είναι ο πιο δημοφιλής, με περισσότερες από 13 να είναι αυτές που εφαρμόζεται. Η ονομαστική ισχύς σε σχέση με το βάθος του νερού για τις διάφορες κατασκευές σταθερών και πλωτών ανεμογεννητριών παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.1.




**Διάγραμμα 4.1 Ονομαστική ισχύς σε σχέση με το βάθος του νερού για τις διάφορες κατασκευές ανεμογεννητριών (European Wind Energy Association (EWEA)).**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια μπορεί να μεταφέρετε μέσω των καλωδίων στην ξηρά για διασύνδεσή της στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή να χρησιμοποιείται σε συστήματα π.χ. αφαλάτωσης για την παραγωγή γλυκού νερού από το θαλασσινό, ενώ δημιουργούνται αιολικά πάρκα με τη διασύνδεση πολλών ανεμογεννητριών μεταξύ τους.

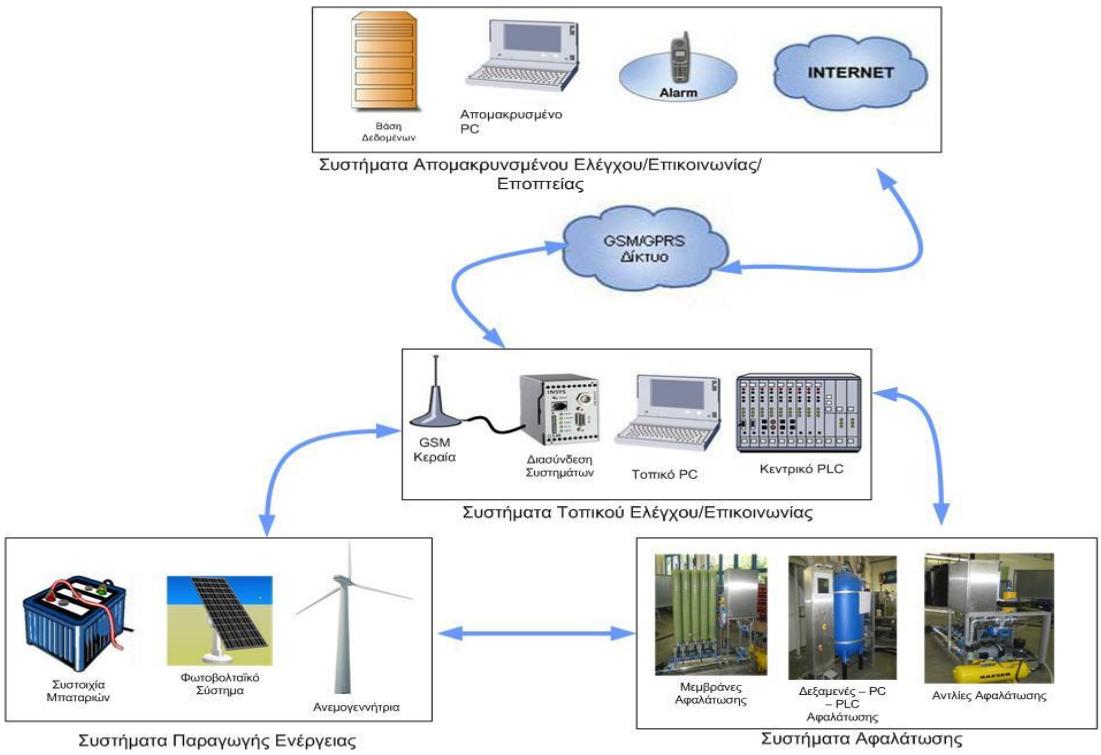
Στην περίπτωση των εγκατεστημένων στην πλωτή κατασκευή συστημάτων όπως το *αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού*, το γλυκό νερό που παράγεται διοχετεύεται με σωλήνες στην ξηρά για την υδροδότηση απομακρυσμένων παράκτιων οικισμών ή σε μικρά νησιά που το νερό είναι λίγο και για την υδροδότησή τους απαιτείται η μεταφορά του με πλοία υδροφόρες (Nikitakos, Lilas 2007). Έτσι δημιουργούνται πολύπλοκα συστήματα, που απαραίτητο είναι να διερευνηθεί η ικανότητά τους να λειτουργούν με αξιοπιστία και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που πρόκειται να εξυπηρετήσουν.

Το *αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού,* μελετάται στο πλαίσιο της διατριβής και αποτελεί μια αποτελεσματική και οικολογική αντιμετώπιση, που έχει αναπτυχθεί για τα

νησιά του Αιγαίου. Σε αυτό ενσωματώνονται ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση (RO) σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια και εναλλακτικά φωτοβολταϊκά πάνελ.

Η πλωτή κατασκευή αποτελείται από τέσσερις περιφερειακούς κυλινδρικούς-πλωτήρες και έναν κεντρικό που συνδέονται με κατάλληλο δικτύωμα, ώστε σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του να ελαχιστοποιείται η επίδραση των κυμάτων σε αυτό. Μέσα στον κεντρικό πλωτήρα, που χωρίζεται σε τρείς ορόφους, βρίσκονται εγκατεστημένα όλα τα συστήματα. Στην επιφάνεια που δημιουργείται, μεταξύ του δικτυώματος και των πλωτήρων, είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταικά πάνελ.

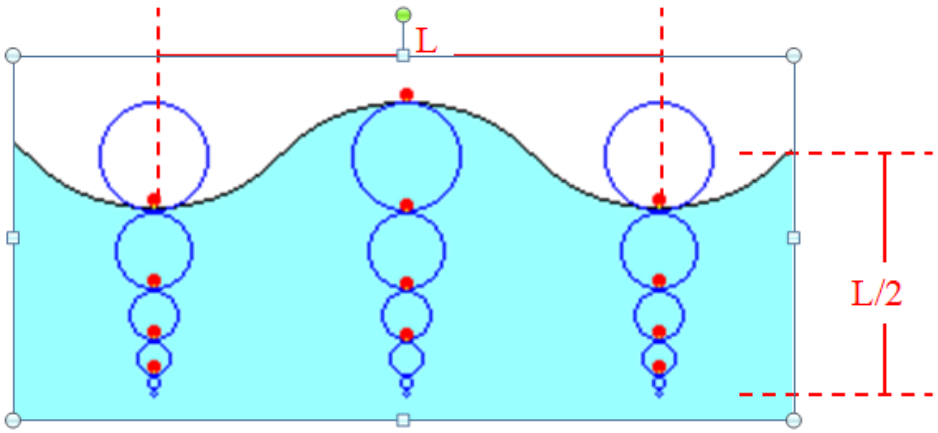
Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τη μονάδα αφαλάτωσης προέρχεται από την ανεμογεννήτρια χωρίς αξιοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ή οποιουδήποτε άλλου είδους γεννήτριας diesel. Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου λειτουργίας και μελετών είναι επίσης εγκατεστημένο στον κεντρικό πλωτήρα, δημιουργώντας της προϋποθέσεις της αυτοματοποιημένης λειτουργίας και της αυτονομίας, εικόνα 4.6.




**Εικόνα 4.6 Κατασκευή του αυτόνομου συστήματος αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού**

### 4.3.2 Συστήματα Αξιοποίησης Κυματικής Ενέργειας (Wave Energy Converters)

Τα κύματα εμφανίζονται από την κίνηση των μορίων στην επιφάνεια της θάλασσας. Η κίνηση προκαλείται από τον αέρα ο οποίος αρχίζει να κινείται λόγο της άνισης κατανομής των περιφερειών της πίεσης στην ατμόσφαιρα της γης, η οποία οφείλεται στον ήλιο. Έτσι, τα οριακά στρώματα του αέρα που δημιουργούνται πάνω στην επιφάνεια του νερού, με την κίνησή τους παρασύρουν σε κίνηση τα μόρια της επιφάνειας του νερού σχηματίζοντας τον κυματισμό, εικόνα 4.7. Σημειώνεται ότι, μέχρι βάθος L/2 από την επιφάνεια της θάλασσας, όπου L το μήκος του κύματος, δημιουργούνται στροβιλισμοί οι οποίοι αναδεύουν το νερό, ενώ κάτω από το βάθος αυτό η επίδραση του κυματισμού καθίσταται αμελητέα. Ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή κάτω από αυτό το βάθος αποτελούν τα θαλάσσια ρεύματα που αξιοποιούνται με άλλα συστήματα ΑΠΕ και περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο.




**Εικόνα 4.7 Σχηματισμός των κυμάτων**

Η ένταση της κυματικής ενέργειας εξαρτάται από την συχνότητα των κυμάτων, με τα ωκεάνια κύματα να αποτελούν ένα τεράστιο ποσό ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Σε σύγκριση με την αιολική ή την ηλιακή ενέργεια, παρέχουν 15-20 φορές περισσότερη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο (Muetze and Vining 2006). Αυτό κάνει τους ωκεανούς μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας της τάξης των terawatts (TW), με την ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από τα κύματα που χτυπούν παγκοσμίως όλες τις ακτές να έχει εκτιμηθεί ότι είναι της τάξεως του 1 TW (Falnes

2002). Επίσης το μεγάλο εύρος (fetch) που είναι το μήκος του νερού πάνω από το οποίο συγκεκριμένος άνεμος εμφυσάτε, αποτελεί βασικό παράγοντα για την παραγωγή υπεράκτιας κυματικής ενέργειας.

Ποιο αναλυτικά η δύναμη ή η ενέργεια (P) που διαβιβάζεται από τη ροή ενός κανονικού κύματος ανά μονάδα πλάτους μπορεί να γραφτεί ως εξής (Cornett, 2008):

$$P = \frac{1}{8}\rho_{water} g C_g H^2 \qquad (4.2)$$

όπου $\rho_{\text{water}}$ είναι η πυκνότητα του νερού, $H$ είναι το ύψος κύματος και $C_g$ είναι η ενιαία ταχύτητα η οποία ορίζεται από:

$$C_g = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2kh}{sinh(2kh)}\right]\frac{\lambda}{T} \qquad (4.3)$$

όπου $h$ είναι το μέση βάθος του νερού, $\lambda$ είναι το μήκος κύματος, το $T$ είναι η περίοδος κύματος, $k = 2\pi / \lambda$ είναι ο αριθμός κυμάτων, και $C = \lambda / T$ είναι η λεγόμενη ταχύτητα κύματος.

Η περίοδος κύματος, το μήκος κύματος, και το βάθος του νερού σχετίζονται με την εξίσωση διασποράς:

$$\lambda = T\sqrt{\frac{g}{k} tan\, h\, (kh)} \qquad (4.4)$$

Για ρηχά νερά ($h < 0,5\lambda$), το μήκος κύματος μπορεί να γραφτεί ως (Cornett 2008):

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}\left(tan\, h\, \left[\left(\frac{4\pi^2 h}{g\, T^2}\right)^{3/4}\right]\right)^{2/3} \qquad (4.5)$$

Για μεγάλα βάθη ($h > 0,5\lambda$), $C = \lambda / T = 2C_g$ και $\lambda = gT^2 / 2\pi$, ώστε η ισχύς κυμάτων σε βαθιά νερά μπορεί να γραφεί (Mørk et al. 2010) ως:

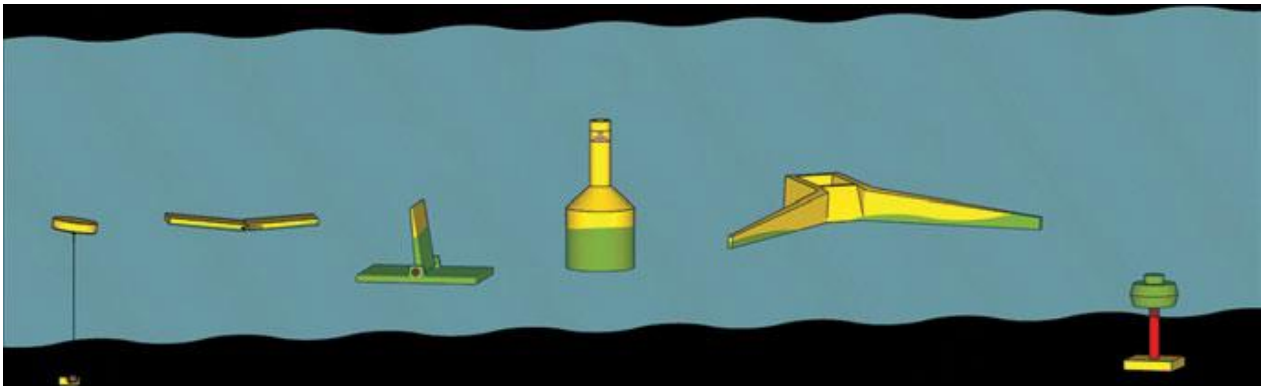
$$P = \frac{1}{32\pi}\rho_{water} g^2 H^2 T \qquad (4.6)$$

Ως εκ τούτου, η μεγάλη ενέργεια των κυμάτων στις θάλασσες, ανάλογα το βάθος και την απόσταση από την ακτή, παρακινεί τον επιστημονική κοινότητα να καταβάλει προσπάθειες με στόχο την αξιοποίηση ενός μέρους της στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη διερεύνηση για τα αποτελέσματα αυτών των προσπαθειών είναι η ανάπτυξη, σε πειραματικό αλλά και σε επιχειρησιακό επίπεδο συστημάτων με γενική τη ονομασία «μετατροπείς της ενέργειας των κυμάτων» (wave energy converters WECs). Με αυτά, το δυναμικό της κινηματικής ενέργειας των μορίων του νερού που αποτελούνται τα κύματα μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Στο εικόνα 4.8 παρουσιάζονται παραδείγματα WECs. Κάθε σύστημα στηρίζει τη λειτουργία του σε μια διαφορετική τεχνολογία. Οι κατασκευές-τεχνολογίες αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας, από αριστερά προς τα δεξιά είναι:

1. Οι *Point absorber (σημειακής απορρόφησης),* των οποίων ο σχεδιασμός βασίζεται στην κίνηση που προκαλείται σε στερεά σώματα από την κίνηση των κυμάτων. Η συσκευή επιπλέει στην επιφάνεια του νερού, ενώ συγκρατείται με καλώδια που συνδέονται στον πυθμένα της θάλασσας και καθώς οι πλωτήρες κινούνται μέσω υδραυλικών αντλιών παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
2. Οι *Surface Attenuator (Επιφανειακής Εξασθένησης)*, αυτές οι συσκευές λειτουργούν παρόμοια με τις Point absorber, με τη διαφορά ότι διαθέτουν πολλαπλά επιπλέοντα τμήματα τα οποία συνδέονται το ένα με το άλλο και είναι προσανατολισμένα κάθετα στα κύματα. Οι κινήσεις κάμψης που δημιουργούνται από τα κύματα ενεργοποιούν υδραυλικές αντλίες για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
3. Οι *Oscillating wave surge converter (Ταλαντευόμενοι μετατροπείς κυμάτων),* είναι συσκευές που έχουν ένα άκρο στερεωμένο στο βυθό ενώ το άλλο άκρο είναι ελεύθερο να κινηθεί. Η ενέργεια συλλέγεται από τη σχετική κίνηση του ελεύθερου άκρου με το σταθερό σημείο. Η κίνηση λειτουργεί υδραυλικά συστήματα που συνδέονται με υδραυλικούς κινητήρες για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Οι *Oscillating water column (Συσκευές Ταλαντευόμενης στήλης του νερού),* οι οποίες μπορούν να είναι εγκατεστημένες στην ακτή ή σε βαθύτερα νερά. Με τη λειτουργία τους σε θαλάμους αέρα αναγκάζουν σε περιστροφή ένα στρόβιλο με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας.

5. Οι *Overtopping device (Συσκευές υπερπήδησης),* είναι μεγάλου μήκους κατασκευές που χρησιμοποιούν την ταχύτητα των κυμάτων για να γεμίσει μια δεξαμενή από υψηλότερο επίπεδο από το επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας περιστρέφοντας στροβίλους που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε χαμηλότερο ύψος μέσα στη δεξαμενή για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσκευές μπορεί να βρίσκονται εγκατεστημένες είτε στην ξηρά είτε να είναι πλωτά υπεράκτια συστήματα.
6. Οι *Submerged pressure differential (υποθαλάσσιες συσκευές διαφοράς πιέσεως),* είναι συσκευές που εγκαθίστανται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και συνδέονται στο βυθό, ώστε (όπως οι Point absorber) καθώς κινούνται από την κίνηση των κυμάτων δημιουργούν διαφορά πιέσεως σε υδραυλική αντλία που παρέχει με πίεση υγρό για τη λειτουργία υδραυλικού κινητήρα που είναι εγκατεστημένος στο εσωτερικό της κατασκευής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικόνα 4.8 Παραδείγματα κατασκευών μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων WECs (https://www.iea.org)**

Αποτέλεσμα των διαφορετικών τεχνολογιών και στην προσπάθεια να εκτιμηθεί η απόδοσής τους, προκύπτει η αναγκαιότητα αξιολόγησής τους. Η αξιολόγηση θα πρέπει να γίνει όχι μόνο στην τεχνολογία, αλλά και:

- στη θέση στην οποία θα εγκατασταθούν καθώς το ενεργειακό δυναμικό μεταβάλλεται όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις
- στο αποτύπωμα στην επιφάνεια ή το βυθό από τις ίδιες τις κατασκευές

- στα συστήματα πρόσδεσης και τα υποθαλάσσια καλώδια μεταφοράς της υδραυλικής ή της ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία επηρεάζουν το θαλάσσιο περιβάλλον.

Στην ανάλυση για τη γενική κατανόηση των συστημάτων, όλοι οι μετατροπείς της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες με κριτήριο την απόσταση της τοποθεσίας εγκατάστασης και λειτουργίας τους από τις ακτές. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

- Οι *τεχνολογίες κοντά στην ακτή* (close to coast technologies), οι οποίες είναι σταθερές ή ενσωματωμένες στην ακτογραμμή, κάτι το οποίο τους προσδίδει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Επίσης οι τεχνολογίες ακτογραμμής δεν απαιτούν αγκυροβολήσεις σε μεγάλο βάθος υδάτων, ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς της ενέργειας. Ωστόσο, υπόκεινται σε ένα κυματικό ενεργειακό δυναμικό σημαντικά μικρότερης ισχύος, κάτι που μπορεί να αντισταθμιστεί από τη φυσική συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας. Επιπλέον, η εγκατάσταση τέτοιων διατάξεων μπορεί να περιοριστεί από τη γεωλογία της ακτογραμμής, το εύρος της παλίρροιας, τη διατήρηση του περιγράμματος της ακτής, κ.α. Οι πιο ανεπτυγμένες τεχνολογικά συσκευές ακτογραμμής είναι τύπου παλλόμενης στήλης ύδατος.
- Οι *παράκτιες τεχνολογίες* (coastal technologies), οι οποίες εγκαθίστανται σε βάθος υδάτων περίπου 20 με 30 μέτρα και σε απόσταση μέχρι και περίπου 500 μέτρα από την ακτή. Έχουν σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις τεχνολογίες ακτογραμμής, ενώ παράλληλα υπόκεινται σε θαλάσσια κύματα υψηλότερου επιπέδου ισχύος. Σε αυτές περιλαμβάνονται τεχνολογίες παλλόμενης/ταλαντούμενης στήλης ύδατος, κατακόρυφης ταλάντωσης, αρθρώσεων και οριζόντιας κίνησης.
- Οι *υπεράκτιες τεχνολογίες* (ή Ανοιχτής Θαλάσσης- offshore technologies), οι οποίες εκμεταλλεύονται τα πιο ισχυρά κύματα που συναντώνται σε μεγάλο βάθος υδάτων, μεγαλύτερο από 40 μέτρα. Ο σχεδιασμός των πιο πρόσφατων υπεράκτιων τεχνολογιών επικεντρώνεται κυρίως σε μικρές αρθρωτές συσκευές, που δίνουν συνολική παραγόμενη έξοδο μεγάλης ισχύος όταν παρατάσσονται σε μεγάλο αριθμό.

Περισσότερες από 100 τεχνικές μετατροπής της κυματικής ενέργειας έχουν κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σε ολόκληρο τον κόσμο. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτού του

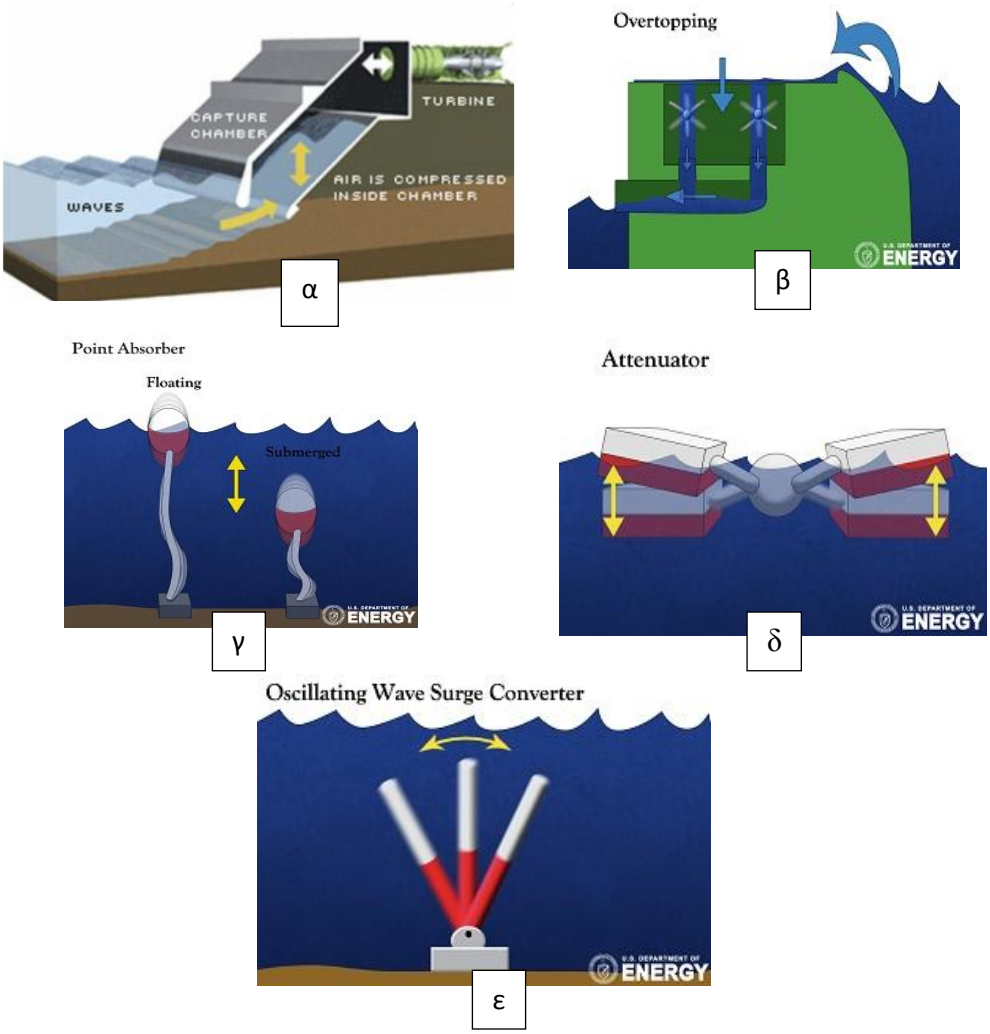
φαινομενικά μεγάλου αριθμού συνδυάζει χαρακτηριστικά που τις κατατάσσουν σε περισσότερες από μια κατηγορίες σύμφωνα με την προηγούμενη ταξινόμηση.

Γι' αυτό χρησιμοποιώντας λειτουργικά και κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά η κατηγοριοποίηση μπορεί να προσδιοριστεί σε λίγους μόνο διαφορετικούς τύπους, αυτοί είναι:

1. Τεχνολογίες Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος, εικόνα 4.9.α, όπου πρόκειται για συσκευές με θάλαμο αέρα, βυθισμένο κατακόρυφα στο μισό μήκος του περίπου, ανοικτό προς την πλευρά του πυθμένα. Η παλινδρομική κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας προκαλεί ρυθμική συμπίεση-αποσυμπίεση της αέριας μάζας μέσα στον θάλαμο, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση του στροβίλου που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι τοποθετημένα στην ακτή ή να είναι πλωτά.
2. Τεχνολογίες Υπέρβασης/Υπερύψωσης, πρόκειται για πλωτές ή σταθερές δεξαμενές, οι οποίες περισυλλέγουν το νερό των κυμάτων σε στάθμη υψηλότερη από τη μέση στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας εικόνα 4.9.β. Η διαφορά στάθμης χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων υδροστροβίλων που συνδέονται σε γεννήτρια για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης, που πρόκειται για πλωτήρες στην επιφάνεια της θάλασσας ή αγκυρωμένους στον θαλάσσιο πυθμένα, οι οποίοι ακολουθούν την κατακόρυφη κίνηση της θαλάσσιας επιφάνειας εικόνα 4.9.γ. Η παλινδρομική κίνηση του πλωτήρα μετατρέπεται μέσω μηχανικών ή υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική ή άλλου είδους κίνηση για τη λειτουργία ηλεκτρογεννήτριας. Ένα τέτοιο σύστημα είναι η συσκευή CETO η οποία είναι ένα αγκυροβολημένο σύστημα σημειακής απορρόφησης ενέργειας. Λειτουργεί δημιουργώντας μια παραγωγική μηχανική αντίδραση στις αργά μεταβαλλόμενες κινήσεις των θαλάσσιων κυμάτων. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα πλωτά σώματα θα ανεβοκατεβαίνουν σε συνήθεις κυματικές συνθήκες παρέχοντας με πίεση νερό στην ακτή όπου περιστρέφει το στρόβιλο που συνδέεται μια γεννήτρια για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Τεχνολογίες Αρθρώσεων, εικόνα 4.9.δ, πρόκειται για πλωτά, αρθρωτά συστήματα, τα οποία στις αρθρώσεις φέρουν αντλίες. Με τις κινήσεις του κυματισμού οι αντλίες συμπιέζουν υδραυλικό υγρό και δίνουν κίνηση σε υδραυλικούς κινητήρες.

Αντιπροσωπευτικό δείγμα αποτελεί το Pelamis. Το Pelamis είναι σχεδιασμένο με ένα γρήγορο και εύκολο σύστημα σύνδεσης/αποσύνδεσης που επιτρέπει τη ρυμούλκηση των μηχανών σε ασφαλή νερά για συντήρηση. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μη χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ειδικός εξοπλισμός, δύτες υποβρύχιος εξοπλισμός ή πλωτούς γερανούς, ενώ όλες οι εργασίες συντήρησης μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη μηχανή να επιπλέει στα νερά μιας αποβάθρας.

5. Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης, όπου πρόκειται για συσκευές που εκμεταλλεύονται την οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού των θαλάσσιων κυμάτων για την εκτροπή κατάλληλων σωμάτων ή τη συμπίεση/αποσυμπίεση ενός εύκαμπτου αεροθαλάμου που αντικρίζει το μέτωπο των θαλάσσιων κυμάτων. Σχεδιαστικά και λειτουργικά πρόκειται για συλλέκτη κοντά στην επιφάνεια, ο οποίος εδράζεται πάνω σε κινούμενο βραχίονα που είναι εγκατεστημένος στον πυθμένα της θάλασσας. Η ενέργεια παράγεται καθώς ο βραχίονας ταλαντεύεται λόγω της κίνησης των σωματιδίων νερού των κυμάτων όπως δείχνει η εικόνα 4.9.ε. Παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι η υποβρύχια συσκευή Waveroller και το διατρητικό επιφάνειας Oyster.




**Εικόνα 4.9 Τεχνολογίες (α) Παλλόμενης/Ταλαντούμενης Στήλης Ύδατος, (β) Υπέρβασης/Υπερύψωσης, (γ) Κατακόρυφης Ταλάντωσης, (δ) Αρθρώσεων, (ε) Οριζόντιας Κίνησης.**

Η κυματική ενέργεια παρουσιάζει μεταξύ των ανανεώσιμων την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. π.χ., σε ημερήσια βάση, η ενέργεια κυματισμού ύψους 1 μ. μπορεί -σε μέτωπο πλάτους μόλις ενός μέτρου- να ξεπεράσει τις 300 kWh. Από την ενέργεια αυτή θα μπορούσε να απορροφηθεί και να μετατραπεί σε ωφέλιμο ηλεκτρισμό τουλάχιστον ένα ποσοστό της τάξεως του 5-10%, δηλαδή περίπου 15-30 kWh ημερησίως.

Στην αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας και στην ανάπτυξη των τεχνολογιών όμως υπάρχουν και δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν οι σπουδαιότερες εκ των οποίων είναι:

- Οι τυχαίοι θαλάσσιοι κυματισμοί ως προς το ύψος, τη φάση και την διεύθυνσή τους. Έτσι, είναι δύσκολο να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση μιας συσκευής σε όλο το εύρος των συχνοτήτων διέγερσής της από τους θαλάσσιους κυματισμούς.
- Οι κοπώσεις που οφείλουν να αναληφθούν από τις συσκευές σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών, όπως τυφώνες, μπορεί να είναι και 100 φορές μεγαλύτερες από τις μέσες κοπώσεις και φορτία που δέχονται οι κατασκευές σε συνήθεις καταστάσεις λειτουργίας.
- Η σύζευξη της ακανόνιστης, αργής κίνησης του κυματισμού (συχνότητας περίπου 0.1 Hz) με ηλεκτρικούς κινητήρες απαιτεί συνήθως περί τις 500 φορές υψηλότερη συχνότητα.
- Ο βαθμός αξιοπιστίας των συστημάτων
- Το υψηλό κόστος με τα σημερινά δεδομένα
- Η θαλάσσια ασφάλεια εφόσον τα συστήματα είναι εγκατεστημένα στη θάλασσα με πιθανό ενδεχόμενο την πρόκληση θαλάσσιου ατυχήματος.
- Η ιδιαιτερότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος που επηρεάζει την αντοχή των συστημάτων

Παράγοντες που πρέπει να αξιολογηθούν στην προσπάθεια για βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική ανάπτυξη, εφόσον η ενέργεια του θαλάσσιου κυματισμού είναι, όπως όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανεξάντλητη. Για να γίνει ευκολότερα κατανοητό το μέγεθος της διαθέσιμης ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα παγκοσμίως, αρκεί να αναφερθεί ότι η αξιοποίηση μόνο του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη μας θα κάλυπτε στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση.

### 4.3.3 Υβριδικά συστήματα αιολικής και κυματικής ενέργειας (Combined Wave- and Wind-Power Devices)

Τα υβριδικά συστήματα για αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ολοκληρωμένα συστήματα που συνδυάζουν πάνω σε μια πλωτή κατασκευή ανεμογεννήτριες και συστήματα

αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων. Είναι γνωστό ότι κατά την τελευταία δεκαετία, έχουν κατασκευαστεί περισσότερα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα ενσωμάτωσης άλλων συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του θαλασσίου περιβάλλοντος όπως WECs με πλωτές ανεμογεννήτριες αυξάνεται.

Η ενσωμάτωση των συστημάτων μπορεί να παρουσιάσει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η καλύτερη αξιοποίηση της θαλάσσιας περιοχής στην οποία το σύστημα εγκαθίσταται, ώστε να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα παράλληλα με το σχετικό κόστος, π.χ. το κόστος εγκατάστασης / συντήρησης, σε σχέση με την ανάπτυξη ξεχωριστών κατασκευών.

Επίσης η ωριμότητα των συστημάτων είναι διαφορετική, διότι η τεχνολογία των WECs είναι νεώτερη από αυτή των ανεμογεννητριών και η υπεράκτια αιολική τεχνολογία είχε καλύτερη ανάπτυξη σε σύγκριση με την κυματική ενέργεια με παράδειγμα την εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη που φτάνει τα 3,8 GW (Mocia et al., 2011).

Βέβαια, επειδή όλα τα συστήματα, WECs και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, υποβάλλονται σε παρόμοιες προκλήσεις, όπως οι ιδιαιτερότητες του θαλάσσιου λειτουργικού περιβάλλοντος, με την δημιουργία ολοκληρωμένων συστημάτων εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού και της κυματικής ενέργειας δίνεται η ευκαιρία:

- μείωση του κόστους
- να επιτευχθεί η εκμετάλλευση του γεγονότος ότι η υπεράκτια βιομηχανία αιολικής ενέργειας είναι πιο ώριμη και τέλος
- να αξιοποιηθεί η τεχνογνωσία στη δημιουργία δομών με ικανότητα μείωσης του χρόνου που το σύστημα θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Παράδειγμα ενός τέτοιου ολοκληρωμένου-υβριδικού συστήματος είναι η επίτευξη παραγωγής τελικού προϊόντος (όπως το γλυκό νερό από σύστημα με αφαλάτωσης) με ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής της λειτουργίας του.

Συγκεντρωτικά μερικά από τα οφέλη που επιτυγχάνονται από ένα συνδυασμό τεχνολογιών κυματικής και αιολικής ενέργειας σε υβριδικές πλωτές κατασκευές είναι:

- Μειωμένο βάρος με τη βέλτιστη κατανομή στη θεμελίωση της πλατφόρμας

- Μείωση κόστους για το σχεδιασμό,  τη λειτουργία και τον επιμερισμό του κόστους από:
    - την κοινή υποδομή και τον εξοπλισμό υποστήριξης στην ξηρά
    - την υποδομή μεταφοράς πλωτής κατασκευής
    - την κοινή σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
    - την αδειο-δότηση και το κόστος ανάπτυξης έργου
    - τα λειτουργικά έξοδα, την παρακολούθηση και τη συντήρηση
- Αύξηση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας ανά θαλάσσια επιφάνεια
- Βελτιστοποίηση της χρήσης των θαλάσσιων περιοχών
- Χρήση ταυτόχρονα δύο πηγών ανανεώσιμης ενέργειας
- Μειώστε του χρόνου (ωρών)  που δεν παράγεται ηλεκτρική ενέργεια
- Μείωση στη διακύμανση-μεταβλητότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- Ομαλή απόδοση ισχύος με:
    - Βελτίωση της αποδοτικότητας
    - Βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας
    - Μείωση στο σφάλμα πρόβλεψης της ισχύος εξόδου

## 4.4 Συμπεράσματα

Στον ενεργειακό τομέα, υποστηρίζεται πως η ανάπτυξη ΣΑΔ-ΑΠΕ όπως και η αύξηση της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων, θα αποτελέσουν σημαντικούς τρόπους για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προβλημάτων που σχετίζονται με το περιβαλλοντικών, την παραγωγή, μεταφορά, διανομή και κατανάλωση της ενέργειας (Stern and Dietz, 1994), (Snyder and Kaiser, 2009), (Moan, 2005).

Η προσπάθεια αντιμετώπισης των παραπάνω ζητημάτων, αποκτά ιδιαίτερη σημασία εάν συνδυαστεί με τις απαιτήσεις που θεσπίζονται σε διεθνές επίπεδο και τις προβλέψεις της IEA για την παγκόσμια αύξηση της ενεργειακής ζήτησης (IEA, 2002).

Το σενάριο των νέων πολιτικών ενσωματώνει τον αντίκτυπο των υφιστάμενων ενεργειακών πολιτικών και πλαισίων, καθώς και μια αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που είναι πιθανό να προκύψουν από

εφαρμογή των νέων δεσμεύσεων σύμφωνα με την ενεργειακή πολιτική και το σχεδιασμό της. Οι προβλέψεις στο σενάριο των νέων πολιτικών δείχνουν σημαντική πρόοδο στην επίτευξη των παγκόσμιων ενεργειακών και περιβαλλοντικών στόχων, ενώ ο τομέας της ενέργειας βρίσκεται στην πρωτοπορία της ενεργειακής μετάβασης (International Energy Agency- Offshore Energy Outlook, 2017). Στο πλαίσιο αυτών των πολιτικών για την επίτευξη των στόχων περιλαμβάνεται και η ανάπτυξη συστημάτων ΑΠΕ στη θάλασσα.

Με την παρουσίαση των τεχνολογιών που αξιοποιούν το ενεργειακό δυναμικό στο θαλάσσιο περιβάλλον και των δυνατοτήτων τους στην προσέγγιση της βιώσιμης ενεργειακής προσδιορίζεται η ικανότητά τους να αξιοποιήσουν το μεγάλο ενεργειακό δυναμικό με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, κάτι που φαίνεται και από τις σχέσεις που προσδιορίζουν την απόδοση των συστημάτων.

Βέβαια, θα πρέπει να διερευνηθούν και άλλα στοιχεία, εκτός από την ενεργειακή απόδοση όπως οι οικονομικές, οι κοινωνικές, οι τεχνολογικές και οι περιβαλλοντικές διαστάσεις, οι οποίες δίνουν ένα πολυδιάστατο χαρακτήρα στα συστήματα αξιοποίησης των ΑΠΕ και αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια.

# Κεφάλαιο 5

## 5.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο, Εισαγωγή

Τα ενεργειακά συστήματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας. Η επιλογή μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων για την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπου η περιβαλλοντική διάσταση προστίθεται στα συνήθη οικονομικά, τεχνικά και κοινωνικά κριτήρια, απαιτεί τη χρήση ισχυρών τεχνικών λήψης αποφάσεων.

Η παραδοσιακή ενιαία προσέγγιση λήψης αποφάσεων δεν είναι πλέον σε θέση να χειριστεί αυτά τα προβλήματα. Η πολλαπλότητα των κριτηρίων και η συμμετοχή διαφόρων παραγόντων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων καθιστά την ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων ένα πολύτιμο εργαλείο για τη διαμόρφωση πολιτικής για την υποκατάσταση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Τα συστήματα αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού των ΑΠΕ εγκυμονούν κινδύνους κατά τη λειτουργία τους που θα πρέπει να λαμβάνονται αποφάσεις σε πολύπλοκα προβλήματα κατά το σχεδιασμό την υλοποίηση και τη διαχείρισή τους ώστε η λειτουργική ζωή τους να ενισχύει την προσπάθεια για αειφόρο ανάπτυξη.

Επομένως, κρίνεται απαραίτητο να διερευνηθούν με ολοκληρωτικές προσεγγίσεις στοιχεία και χαρακτηριστικά των δομών που αναπτύσσονται στην ξηρά και υπεράκτια που τα οποία επηρεάζουν την αξιοπιστία και την αποδοτικό τους.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται εργαλεία που αξιοποιούνται στο ερευνητικό πλαίσιο της διατριβής και αφορούν τεχνικές αξιοπιστίας για την αξιολόγηση των υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ καθώς και μεθοδολογίες αξιολόγησης και ενίσχυσης των υπευθύνων αλλά και των εμπλεκομένων σε λήψης αποφάσεων.

Αρχικά προσδιορίζεται το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται και η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης, γίνεται παρουσίαση της τεχνικής FMEA, αναλύεται η εφαρμογή των μεθόδων λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται

και η διεργασία των AHP και TOPSIS, και τέλος προσδιορίζεται η στάθμιση-βαρύτητα στις MCDM.

## 5.2 Καθορισμός Προβλήματος και η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων

Η ανανεώσιμη ενέργεια (renewable energy RE) είναι η ενέργεια που παράγεται από φυσικούς πόρους όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η βροχή, η βιομάζα, η παλίρροια και η γεωθερμία. Η διαθεσιμότητα αυτών των πηγών έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον κατά τα τελευταία χρόνια με την δυνατότητα αξιοποίησής τους μέσω αντίστοιχων τεχνολογιών. Τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου του θερμοκηπίου και της τρύπας του όζοντος, που έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής και υγείας των ανθρώπων, αναγνωρίζονται πλέον ως σημαντικά προβλήματα.

Σήμερα αναγνωρίζεται ευρέως ότι η μεγαλύτερη πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, από την οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η παραγωγή και χρήση ενέργειας σε ολόκληρο τον κόσμο (Mardani, et. al. 2018), (Shimray, et. al.2017). Ταυτόχρονα η ζήτηση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εκπομπή τοξικών χημικών ρύπων, των αερίων θερμοκηπίου και άλλων ρύπων προκαλεί την αλλαγή του κλίματος και την περιβαλλοντική ρύπανση του αέρα, της ξηράς και του νερού-θάλασσας. Επιπλέον, η αύξηση του κόστους των πρώτων υλών που προκαλείται από τη αύξηση της τιμής του πετρελαίου, οι οποίες επηρεάζονται έντονα από τις πολιτικές συνθήκες που επικρατούν σε διεθνές επίπεδο, μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις παγκόσμιες οικονομίες.

Στο πλαίσιο αυτό, η ευαισθητοποίηση των περιβαλλοντικών θεμάτων, ο αβέβαιος χαρακτήρας της εξάρτησης από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, η ευπάθεια πολλών κρατών όσον αφορά την αυτονομία στον ενεργειακό τομέα και η εμφάνιση των εναλλακτικών λύσεων με ΑΠΕ (RE), ανάγκασε πολλές χώρες, ειδικά τις ανεπτυγμένες, να στραφούν στις ανανεώσιμες πηγές και τη διερεύνηση τεχνολογιών που έχουν τη ικανότητα να είναι ποιο αποδοτικές.

Η καθαρή, εγχώρια και ανανεώσιμη ενέργεια είναι κοινώς αποδεκτή ως το κλειδί για τη μελλοντική βιωσιμότητα (Martín-Gamboa, et. al. 2018). Ο καθορισμός στόχων για την εξασφάλιση της προστασίας του περιβάλλοντος και η άμβλυνση των επιπτώσεων της αλλαγής

του κλίματος, ενώ επιδιώκεται η μακροχρόνια βιώσιμη ανάπτυξη, είναι ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που αντιμετωπίζει σήμερα ο κόσμος (Cohen, et. al.2018).

Η Αειφόρος Ανάπτυξη αποτέλεσε το αντικείμενο ευρείας συζήτησης σε κυβερνητικούς, μη κυβερνητικούς και ακαδημαϊκούς κύκλους, που αποτελούν βασικό στόχο εθνικών και διεθνών οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών θεμάτων, με την αειφόρο ανάπτυξη, που ορίζεται ως η κάλυψη των αναγκών της τρέχουσας γενιάς χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ανταποκρίνονται στις δικές τους ανάγκες (World Commission on Environment and Development, 1987), να αποτελεί άλλο ένα πεδίο μεγάλου ενδιαφέροντος και διερεύνησης.

Τα ενεργειακά συστήματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη μιας χώρας και στη ζωή των ανθρώπων. Η ισορροπία στην παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας, που δεν έχει ή έχει ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, και ταυτόχρονα δίνει την ευκαιρία σε μια χώρα να τη χρησιμοποιήσει στις κοινωνικές και οικονομικές της δραστηριότητες, μπορεί να θεωρηθεί ως ο τελικός στόχος (Marttunen, et. al. 2017).

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει τεράστια οφέλη τόσο από την άποψη της προστασίας του περιβάλλοντος όσο και από την εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων πόρων (Ghisellini, et. al.2016) (Harris, et. al. 2017).

Οι ανανεώσιμες πηγές, ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή τους, εκλύουν χαμηλά επίπεδα ρύπων οποιασδήποτε μορφής ή οι εκπομπές αερίων ρύπων και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και το δυναμικό αποτίμησης αποβλήτων είναι χαμηλό ή απουσιάζει παντελώς. Επίσης είναι ικανές να αντικαταστήσουν τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε ποικίλες εφαρμογές σε ανταγωνιστικές τιμές (Sharma, et. al.2015).

Η εντατικότερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και των τεχνολογιών μεταφοράς, μετατροπής και διατήρησης, καθώς και η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό

μέσο αντιμετώπισης πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει σήμερα ο κόσμος.

## 5.3 Η ανάγκη για ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων

Στη διερεύνηση του δεδομένου ότι ο ενεργειακός τομέας, ο ενεργειακός σχεδιασμός και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην αξιοποίηση των ΑΠΕ, επηρεάζουν ιδιαίτερα τα συμφέροντα και τους πόρους πολλών παραγόντων, θα πρέπει να προτείνονται (ή ακόμη και να εφαρμόζονται) εναλλακτικές λύσεις λαμβάνοντας υπόψη τα συμφέροντα και τις προτιμήσεις των πολλαπλών επηρεαζόμενων παραγόντων (Kerzner, et. al. 2017), (Strantzali, et. al. 2016).

Οι παράγοντες που επηρεάζονται αποτελούν διαφορετικές ομάδες φορέων οι οποίοι εμπλέκονται στη διαδικασία. Κάθε ομάδα παρουσιάζει διαφορετικά κριτήρια και απόψεις, τα οποία πρέπει να επιλυθούν μέσα σε ένα πλαίσιο κατανόησης και αμοιβαίου συμβιβασμού (παραχωρήσεις). Οι φορείς περιλαμβάνουν ομάδες ατόμων, ιδρυμάτων και αρχών όπως οι τοπικές αρχές και οι κοινότητες, οι δυνητικοί επενδυτές, τα ακαδημαϊκά ιδρύματα, οι περιβαλλοντικές ομάδες και οι κυβερνήσεις, οι οποίες μέσω των προτεραιοτήτων και των συστημάτων αξιολόγησής τους έχουν συμφέροντα ή ενδιαφέροντα που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και δεν πρέπει να διακυβεύονται.

Άλλοι παράγοντες που άλλαξαν τελείως το σενάριο της ανάπτυξης και αξιοποίησης συστημάτων ΑΠΕ τις τελευταίες δεκαετίες, συμπεριλαμβανομένων αυτών του υπεράκτιου περιβάλλοντος, από τη σχεδόν αποκλειστική ανησυχία για την ελαχιστοποίηση του κόστους των επιλογών από την πλευρά της προσφοράς. Αποτέλεσμα είναι οι επιλογές να ¨μετακινηθούν¨ προς την ανάγκη ικανοποίησης σαφώς πολλαπλών και ενδεχομένως αντικρουόμενων στόχων, είναι αυτοί που σχετίζονται με το πιο περίπλοκο κοινωνικό, οικονομικό, τεχνολογικό και περιβαλλοντικό σενάριο.

Διερευνώντας τους πολλαπλούς στόχους συμπεραίνεται ότι πρέπει να αναλυθούν πεδία με διαφορετικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν:

1. το κόστος κατασκευής,
2. την αξιοπιστία του συστήματος αξιοποίησης ΑΠΕ
3. την καταλληλότητα της τεχνολογίας που επιλέγεται

4. την αποδοτικότητα του κάθε συστήματος εφόσον οι ΑΠΕ υπόκεινται σε μεταβλητές που επηρεάζουν την ικανότητα ενεργειακής απόδοσή
5. την προσβασιμότητα
6. τον έλεγχο
7. την επισκευασιμότητα
8. την επίδραση στην οπτικοακουστική όχληση που ενδέχεται να προκαλεί και η αποδοχή του από τους χρήστες ή τους αποδέκτες των ωφελειών
9. τις πτυχές των κινδύνων από τη λειτουργία και τη θέση που εγκαθίστανται και
10. την ασφάλεια από την πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος.

Η βιβλιογραφία παραδοσιακά διαιρεί τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες που όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1 και αφορούν τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια (Moran, 2018**), (**Greco, et. al. 2016**), (**De Medeiros, et. al. 2014**).**

**Πίνακας 5.1 Κριτήρια και περιοχές διερεύνησης κριτηρίων (Προσαρμογή από Wang, et.al., 2010).**

| Κριτήρια (Description) | Περιοχές διερεύνησης κριτηρίων |
|---|---|
| Τεχνολογικά κριτήρια (Technical criteria) | Αποδοτικότητα (Efficiency) |
| | Βαθμός απόδοσης (Exergy efficiency) |
| | Δείκτης πρωτογενούς ενέργειας (Primary energy ratio (PER)) |
| | Ασφάλεια (Safety) |
| | Αξιοπιστία (Reliability) |
| | Ωριμότητα (Maturity) |
| Περιβαλλοντικά κριτήρια (Environmental criteria) | Εκπομπές σωματιδίων (Particles emissions) |
| | Οι πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός του μεθανίου (Non-methane volatile organic compounds, NMVOCs) |
| | Περιβαλλοντικό αποτύπωμα-Χρήση της γης (Land use) |
| | Θόρυβος (Noise) |
| | Τοπογραφία (Topography) |
| Οικονομικά κριτήρια (economic criteria) | Κόστος επένδυσης (Investment cost) |
| | Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operation and maintenance costs) |
| | Κόστος καυσίμων (Fuel costs) |
| | Εσωτερικός συντελεστής απόδοσης (Internal rate of return) |
| | Καθαρή παρούσα αξία (Net present value) |
| | Περίοδος αποπληρωμής (Payback period) |
| | Διάρκεια ζωής (Service life) |
| Κοινωνικά κριτήρια (Social criteria) | Κοινωνική αποδοχή (Social acceptability) |
| | Δημιουργία θέσεων εργασίας (Job creation Number) |
| | Κοινωνικά οφέλη (Social benefits) |

Επομένως, η προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων με ενιαία κριτήρια, που συνήθως αποσκοπεί στον εντοπισμό της πλέον αποτελεσματικής επιλογής με χαμηλό κόστος, δεν είναι πλέον σε θέση να χειριστεί αυτά τα προβλήματα.

Από διεπιστημονική άποψη, η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να αξιολογηθεί θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη πεδία που θα περιέχουν:

- πιθανές λύσεις
- τρόπους δράσης
- εναλλακτικές λύσεις επιλογής
- επιλογές της βέλτιστης εναλλακτικής λύσης
- προσδιορισμό της πιθανότητας μη βιωσιμότητας του υπεράκτιου συστήματος ενεργειακής αξιοποίησης από ΑΠΕ
- ενημέρωση και σαφή πληροφόρηση των σχεδιαστών λειτουργών και κατασκευαστών συστημάτων σχετικά με τις επιδόσεις των ολοκληρωμένων εναλλακτικών λύσεων και
- την παρακολούθηση των επιπτώσεων στην κοινωνία και το περιβάλλον
- τη συγκέντρωση των επενδύσεων στους πλέον κατάλληλους τομείς

Πεδία που δεν μπορούν πλέον να βασίζονται σε ένα μονοδιάστατο άξονα αξιολόγησης, όπως κόστος το όφελος ή η ωφέλεια.

Η διαμόρφωση των πολιτικών για την υποκατάσταση της ενέργειας που παράγετε από ορυκτά καύσιμα από συστήματα ΑΠΕ, θα πρέπει να αντιμετωπιστεί σε ένα πλαίσιο που να περιλαμβάνει το σχεδιασμό συστημάτων και τη λειτουργική τους διαθεσιμότητα, αξιοπιστία, παραγωγικότητα και αντοχή στο λειτουργικό τους περιβάλλον τους, καθώς και παράγοντες που σχετίζονται με την ασφάλεια, το περιβάλλον και την κοινωνία άρα ένα πλαίσιο πολλαπλών κριτηρίων.

Η πολλαπλότητα των κριτηρίων και η πολυπλοκότητα των έργων ενεργειακής παραγωγής σε υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ καθιστούν την ανάλυση με εργαλεία αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας απαραίτητη, ενώ η ανάπτυξη και εφαρμογή μεθοδολογικών προσεγγίσεων και τεχνικών πολλαπλών κριτηρίων πολύτιμο εργαλείο στη διαδικασία λήψης κρίσιμων αποφάσεων που θα μπορούν να ενισχύσουν την προσπάθεια για αειφορική ανάπτυξη.

Ως εκ τούτου η ανάλυση κατά το σχεδιασμό για την αξιόπιστη λειτουργία ενός υπεράκτιου συστήματος ΑΠΕ είναι απαραίτητο να διερευνηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις τεχνολογικής υποστήριξης που προκύπτουν από τις ιδιαιτερότητες των συστημάτων. Με την προέκταση της διερεύνησης από πολυκριτηριακές μεθόους πρέπει να εξετάσουν περισσότερους από έναν στόχους που περιέχουν πολλαπλά κριτήρια και να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα των υπεύθυνων στις λήψεις αποφάσεων.

Σκοπός σε όλες τις πτυχές του προβλήματος είναι η επίτευξη του βέλτιστου τελικού αποτελέσματος σε σχέση με το στόχο που έχει τεθεί και αφορά την ικανοποίηση των περιορισμών που θέτονται από πλευρές όπως:

- Η τεχνική
- Η περιβαλλοντική
- Η οικονομική και
- Η κοινωνική

Με την αξιοποίηση τεχνικών πρόληψης αποτυχίας και πολυκριτηριακών μεθόδων οι υπεύθυνοι στη λήψη αποφάσεων εφοδιάζονται με ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ικανό να προβλέψει τη χρησιμότητα, την αποδοχή, τον αντίκτυπο και τη βιωσιμότητα ενός υπεράκτιου έργου αξιοποίησης ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας αλλά και ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής τελικού προϊόντος.

## 5.4 Κριτήρια Αξιολόγησης

Η έρευνα στο πεδίο αξιοποίησης των υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ έθεσε προβληματισμούς σχετικά με τα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν κατάλληλα προκειμένου να αντιμετωπιστούν σε οποιαδήποτε εφαρμογή των συστημάτων αυτών. Οι προβληματισμοί αφορούν τέσσερα σημαντικά ζητήματα που προσδιορίζονται ως τεχνολογικά-αειφορίας, περιβαλλοντικά, οικονομικά-αξίας και κοινωνικά.

### 5.4.1 Τεχνολογία και παράγοντες αειφορίας

Η τεχνολογία και οι παράγοντες αειφορίας, είναι ενοποιημένοι διότι όσο πιο τεχνικά άρτιο είναι ένα σύστημα αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ τόσο περισσότερο συμβάλλει στην αειφόρο ανάπτυξη.

Η διαδικασία της τεχνολογικής εξέλιξης μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια: *εφεύρεση, καινοτομία και διάχυση* (Jaffe et al., 2002), (Weaver, et. al. 2017). Το πρώτο στάδιο της εφεύρεσης είναι η πρώτη ανάπτυξη ενός προϊόντος που είναι το αποτέλεσμα της επιστημονικής τεχνολογικής έρευνας, αλλά δεν έχει ακόμα κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας ή διατίθεται στη αγορά ως εμπορεύσιμο προϊόν. Πολλές εφευρέσεις δεν κατοχυρώνονται με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Αυτές που καταχωρούνται με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας και μπαίνουν στην αγορά δεν θεωρούνται πλέον εφευρέσεις αλλά καινοτομίες. Η καινοτομία είναι επομένως η εμπορευματοποίηση μιας εφεύρεσης. Το τελευταίο βήμα της τεχνολογικής εξέλιξης είναι η διάχυση, η οποία αποτελεί την επιτυχή υιοθέτηση και την ευρεία διαθεσιμότητα του καινοτόμου προϊόντος και των εφαρμογών του από επιχειρήσεις ή και ιδιώτες.

Με δεδομένη την τεχνολογική εξέλιξη από την υιοθέτηση υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ στις αξιολογήσεις του κριτηρίου περιλαμβάνονται οι τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη και να διερευνηθούν και αφορούν αξιολογήσεις:

- της *αποδοτικότητας* (Efficiency), δηλαδή της αναλογίας της ενέργειας εξόδου προς την ενέργεια εισόδου που παράγεται από το σύστημα
- του βαθμού απόδοσης (Exergy efficiency) σε ένα σύστημα που αφορά στο πόσο ωφέλιμο έργο αξιοποιείται από εκείνο που είναι πραγματικά διαθέσιμο από την αντίστοιχη ΑΠΕ.
- της *επίδρασης από το Δείκτη πρωτογενούς ενέργειας* (Primary energy ratio (PER)) που παρουσιάζει το λόγο της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας προς την ενεργειακή ζήτηση των χρηστών.
- της *Ασφάλειας* (Safety) στη διερεύνηση των επιπτώσεων των συστημάτων στην κοινωνία και τους ανθρώπους
- της *Αξιοπιστίας* (Reliability) η οποία σχετίζεται με την ικανότητα μιας συσκευής ή ενός συστήματος να εκτελέσει τις λειτουργίες για τις οποίες έχει σχεδιαστεί. Για την

αξιολόγηση της αξιοπιστίας θα πρέπει να διερευνηθεί και η διαθεσιμότητα ενός συστήματος ΑΠΕ[6].

- Της *Ωριμότητας* (Maturity) η οποία μετράει τον βαθμό ωριμότητας της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται σε υπεράκτιες εφαρμογές, δείχνοντας πόσο διαδεδομένη είναι σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

### 5.4.2 Το Περιβαλλοντικό κριτήριο

Όλες οι πηγές ενέργειας έχουν κάποια επίδραση στο περιβάλλον. Τα ορυκτά καύσιμα, ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο καταστρέφουν ουσιαστικά περισσότερο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υφίστανται σε περισσότερα μέτρα, εφόσον σχετίζονται με τη ρύπανση του αέρα και των υδάτων, των ζημιών στη δημόσια υγεία, της άγριας πανίδας και της απώλειας οικοτόπων, τη χρήση γης και των εκπομπών για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Στα πλαίσια αυτού του κριτηρίου εξετάζονται παράγοντες όπως:

- *Εκπομπές σωματιδίων* (Particles emissions)την εξάλειψη σε εκπομπές που περιλαμβάνουν NOx, CO2, CO και SO2 που μπορούν να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση του πλανήτη και να συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Οι *πτητικές οργανικές ενώσεις* εκτός του μεθανίου (Non-methane volatile organic compounds, NMVOCs) που αναφέρονται σε ένα γενικό όρος από μια μεγάλη ποικιλία διαφορετικών χημικών ενώσεων, όπως για παράδειγμα βενζόλιο, αιθανόλη, φορμαλδεΰδη, κυκλοεξάνιο ή ακετόνη

[6] Ένα παράδειγμα αποτελεί ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής όπου διαθεσιμότητα είναι ο χρόνος που είναι ικανός να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για μια ορισμένη περίοδο, διαιρούμενο με το χρονικό διάστημα της περιόδου. Η διαθεσιμότητα του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής επηρεάζεται από προγραμματισμένη συντήρηση και αιφνίδιες αναγκαστικές διακοπές. Ο τύπος καυσίμου, ο σχεδιασμός της εγκατάστασης, η ποιότητα του εξοπλισμού και η συντήρηση του είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα. Αντίστοιχα η Διαθεσιμότητα ενός συστήματος ΑΠΕ υπόκεινται σε αδυναμίες που σχετίζονται με τη μη διαθεσιμότητα των πόρων με αποτέλεσμα να πρέπει να διερευνηθούν παράγοντες όπως το δυναμικό της ΑΠΕ που αξιοποιείται ώστε να επισπεύδονται οι ενέργειες αποκατάστασης της λειτουργικότητας του συστήματος ή πως θα αντιμετωπίζονται ανάλογα με τις ανάγκες. Από την άποψη της λειτουργίας των συστημάτων ΑΠΕ, αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί διότι επιδρούν στην ποιότητα ισχύος του συστήματος, για παράδειγμα οι διακυμάνσεις της ισχύος στα συστήματα αιολικής ενέργειας. Τέλος στα τεχνικά κριτήρια που σχετίζονται με την αξιοπιστία και κατ' επέκταση προκύπτουν από τη διαθεσιμότητα των υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ είναι ο παράγοντας της επισκευασιμότητας και της συντήρησης. Αυτές μπορεί να είναι προγραμματισμένες ή αποτέλεσμα αιφνίδιας διακοπής και επιδρούν στο χρονικό διάστημα που δεν θα είναι διαθέσιμο το σύστημα.

- Το *Περιβαλλοντικό αποτύπωμα*-Χρήση της γης (Land use). Το περιβάλλον και το τοπίο επηρεάζονται άμεσα από τη γη που καταλαμβάνουν τα ενεργειακά συστήματα. Η ποιότητα της ζωής των ανθρώπων επηρεάζεται από τα ενεργειακά συστήματα, όπως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πάρκων και κέντρων αναψυχής. Ιδιαίτερα συστήματα ενεργειακής παραγωγής με βιομάζα και βιοκαύσιμα απαιτούν μεγάλη έκταση γης. Επομένως, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αντανακλά την οπτική όχληση που μπορεί να δημιουργηθεί από την ανάπτυξη ενός έργου σε συγκεκριμένη περιοχή. Την επίδραση στο τοπίο των διαφόρων τοποθεσιών, την απόσταση από τον πλησιέστερο παρατηρητή, τον τύπο και το μέγεθος των συστημάτων που πρόκειται να εγκατασταθούν και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στο περιβάλλον. Παράγοντες που πρέπει τα λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων που προτείνονται.
- Ο *Θόρυβος* (Noise), ως ρύπανση από τα ενεργειακά συστήματα και ο δυσάρεστος ήχος που δημιουργείται από τη μηχανή και διαταράσσει τη δραστηριότητα ή την ισορροπία της ζωής ανθρώπων και ζώων
- Η *Τοπογραφία* (Topography), η οποία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο κατά την επιλογή μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών λύσεων, όπως οι τοποθεσίες των αιολικών πάρκων.

### 5.4.3 Το Οικονομικό κριτήριο

Στη διερεύνηση των κριτηρίων το οικονομικό, λαμβάνεται υπόψη διότι σχετίζεται με πολλές δαπάνες όταν η λήψη αποφάσεων αναφέρεται στην εγκατάσταση υπεράκτιου συστήματος αξιοποίησης δυναμικού ΑΠΕ. Συνοπτικά, το αρχικό κόστος δεν θα μπορούσε να είναι το μόνο αντιπροσωπευτικό εφόσον από τα λειτουργικά, το κόστος συντήρησης και επισκευών, μέχρι και το κόστος των καυσίμων των υποστηρικτικών υποδομών (πλοία εξυπηρέτησης, κλπ) είναι αξιοσημείωτα. Στην ανάλυση για τη λήψη αποφάσεων οι εκτιμήσεις που αξιολογούνται βάσει του οικονομικού κριτηρίου σχετίζονται με:

- Το *Κόστος επένδυσης (Investment cost),* που ξεκινά από το σχεδιασμό την αγορά μηχανολογικού εξοπλισμού, κατασκευή υποδομών και συνδέσεις με το κεντρικό δίκτυο, κόστος μεταφοράς και τοποθέτησης, και άλλες παρεπόμενες κατασκευαστικές εργασίες

- Το *Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operation and maintenance costs)*, περιλαμβάνει τα κεφάλαια που δαπανώνται για την ενέργεια, τα προϊόντα και οι υπηρεσίες για τη λειτουργία και το κόστος συντήρησης του συστήματος, όπως οι μισθοί των εργαζομένων (οπότε η αυτονομία ενός υπεράκτιου συστήματος είναι βασική), καθώς και οι μεταφορά τεχνικών, εξαρτημάτων και υλικών που αποσκοπούν στην παράταση της ζωής των ενεργειακών συστημάτων και την αποφυγή βλαβών.
- Το *κόστος καυσίμων (Fuel costs),* στο κεφάλαιο που δαπανήθηκε για την παροχή πρώτων υλών που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του συστήματος, για τις μεταφορές, περιλαμβάνοντας και αυτό που προκύπτουν από την λειτουργεία και συντήρηση
- Τον *εσωτερικό συντελεστή απόδοσης (Internal rate of return),* πρόκειται για το επενδυτικό κριτήριο που χρησιμοποιείται συνήθως και εκφράζει το ποσοστό απόδοσης ενός έργου
- Την *καθαρή παρούσα αξία (Net present value),* ποπυ αφορά τη συνολική παρούσα αξία μιας χρονικής σειράς ταμειακών ροών
- Την *περίοδο αποπληρωμής (Payback period)* και αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επιστροφή μιας επένδυσης για «αποπληρωμή» του ποσού της αρχικής επένδυσης
- Τη *διάρκεια ζωής (Service life),* και αφορά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός ενεργειακού συστήματος και τη σχέση του με το ισοδύναμο ετήσιο κόστος όπως είναι το κόστος ανά έτος της ιδιοκτησίας και της εκμετάλλευσης ενός περιουσιακού στοιχείου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

### 5.4.4 Το κοινωνικό κριτήριο

Το κριτήριο αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό διότι η γνώμη του πληθυσμού και των ομάδων πίεσης μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο που απαιτείται για εξέλιξη και την ολοκλήρωση ενός υπεράκτιου έργου αξιοποίησης ΑΠΕ καθώς και πολιτικές που επιδρούν και επηρεάζονται από την προώθηση των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε αυτό το πεδίο περιέχονται παράγοντες που σχετίζονται με:

- Την *Κοινωνική αποδοχή* (Social acceptability), που είναι ένα ποιοτικό κριτήριο και εκφράζει την επισκόπηση των απόψεων που σχετίζονται με τα ενεργειακά συστήματα

από τον τοπικό πληθυσμό σχετικά με την υποθετική υλοποίηση των υπό εξέταση έργων από πλευράς ωφελουμένων-καταναλωτών

- Τη *Δημιουργία θέσεων εργασίας* (Job creation Number), και σχετίζεται με τον αριθμό θέσεων εργασίας που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου
- Τα *Κοινωνικά οφέλη* (Social benefits),που εκφράζεται η κοινωνική πρόοδος στις τοπικές περιφέρειες που φιλοξενούν τα ενεργειακά συστήματα, εκτιμώντας τον συνολικό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο που μπορεί να γίνει αντιληπτός με την ανάπτυξη ενός ενεργειακού έργου αξιοποίησης ΑΠΕ

## 5.5 Εργαλεία Αξιολόγησης

Η *μεθοδολογική προσέγγιση (methodology approach)* που ακολουθήθηκε στην *ανάλυση των συστημάτων υπεράκτιων κατασκευών που αξιοποιούν ΑΠΕ λαμβάνοντας υπόψη ποσοτικά αλλά και ποιοτικά κριτήρια.* Η επιλογή αυτή έγινε διότι από την *βιβλιογραφική* έρευνα προέκυψε η ανάγκη να αξιολογηθούν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά κριτήρια.

Οι εναλλακτικές που προκύπτουν από τη διερεύνηση της βιβλιογραφίας είναι περιορισμένες, με δεδομένο ότι τα συστήματα αξιοποίησης του υπεράκτιου δυναμικού αφορούν συγκεκριμένες τεχνολογίες, όπως και τα κριτήρια αξιολόγησης μπορούν να γίνουν συγκεκριμένα αλλά και να ομαδοποιηθούν όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1. Όμως πολλά από αυτά υπόκεινται κατά την αξιολόγηση σε αβεβαιότητες, ενώ ο αριθμός των εμπλεκομένων μπορεί να καλύπτει όλο το εύρος κατηγοριών από πολύ μικρό έως πολύ μεγάλο.

Αρχικά*, πολύ μικρός* είναι ο αριθμός των εμπλεκομένων όταν αφορά τον αριθμό των υπευθύνων κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος αξιοποίησης ΑΠΕ. *Αυξάνεται*, όταν στη λήψη αποφάσεων ενός προβλήματος ΑΠΕ η προσέγγιση πραγματοποιείται από την πλευρά των *επενδυτών* και των *λειτουργών*, εφόσον και οι δύο ομάδες έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Για τους *πρώτους* απαιτείται γνώση και ανάλυση κινδύνων με την έννοια της προσπάθειας και της εκμετάλλευσης νέων ευκαιριών. Για τους *δεύτερους*, απαιτείται τεχνογνωσία για τα νέα συστήματα με αξιοποίηση της προηγούμενης εμπειρίας διότι στις υπεράκτιες κατασκευές χρησιμοποιούνται συστήματα που ήδη έχουν αξιολογηθεί από την εφαρμογή τους στην ξηρά, με την έννοια ότι υπάρχει μια σχετική βάση δεδομένων ικανών να ενισχύσουν τη βελτίωση των συστημάτων, όχι όμως τέτοιος που θα παρέχει τη δυνατότητα να αξιολογηθεί επαρκώς ένα σύστημα ΑΠΕ στις

ιδιαίτερες συνθήκες του θαλασσίου περιβάλλοντος. Τέλος, *πολύ μεγάλος* είναι ο αριθμός των *εμπλεκομένων* όταν στα κριτήρια λαμβάνεται υπόψη η κοινωνική αποδοχή και η επίδραση στο περιβάλλον.

Με δεδομένο ότι πολλά από τα συστήματα που χρησιμοποιούνται στην αξιοποίηση των ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελούν ένα νέο ερευνητικό πεδίο, και πολλά από αυτά είναι ακόμα στο στάδιο έρευνας με άλλα τόσα στο στάδιο της ευρισητεχίας, οι εναλλακτικές δεν ήταν πάντοτε εφικτό να είναι σε *αρχειακή* μορφή από μια βάση δεδομένων.

Η *λειτουργικότητα,* επίσης, στην παραγωγή ενέργειας υπόκειται σε *μεταβλητότητα (variables*) εφόσον οι ΑΠΕ και το δυναμικό τους δεν είναι σταθερό, αλλά επηρεάζεται από κλιματολογικές συνθήκες που υπόκεινται σε περιοδικότητα, που και αυτή δεν είναι πάντοτε σταθερή ενισχύοντας αντίστοιχα την αβεβαιότητα από την εφαρμογή κάποιου από τα συστήματα. Τότε η προσέγγιση απαιτείται να διερευνηθεί στο πλαίσιο των υβριδικών συστημάτων.

Συγκεκριμένα το παρόν *μεθοδολογικό πλαίσιο* περιλαμβάνει τα εξής:

- *Επιλογή μεθοδολογίας ανάλυσης στοιχείων* με *εργαλεία* και *τεχνικές* που θα μπορούν να χειριστούν *ποιοτικά* αλλά και *ποσοτικά* κριτήρια στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συστημάτων αλλά και τη λήψη αποφάσεων.
- *Σχεδίαση εννοιολογικών κατηγοριών* βάση ερευνητικού πλαισίου και *επιλογή μονάδων ανάλυσης*.
- *Επιλογή κριτηρίων* βάση των εμπλεκομένων στη λήψη αποφάσεων και την αξιολόγηση.
- *Κωδικοποίηση υλικού* βάση προδιαγραφών καθώς και καθορισμός της βαρύτητας των εναλλακτικών και των κριτηρίων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα εργαλεία αξιολόγησης της αξιοπιστίας αλλά και από τις πολυκριτηριακές μεθόδους.
- *Επεξεργασία στοιχείων* βάση της μεθοδολογίας ανάλυσης και ερευνητικού πλαισίου.
- *Εξαγωγή συμπερασμάτων* βάση ανάλυσης σύμφωνα με τα ερευνητικά ερωτήματα του ερευνητικού πλαισίου.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα εργαλεία αξιόλογης που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής και εφαρμόστηκαν σε διάφορους τομείς που σχετίζονται με την ανάπτυξη συστημάτων στο θαλάσσιο περιβάλλον και τον τομές των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ. Η

παρουσίαση των εργαλείων γίνεται σύμφωνα με το τρόπο που αξιοποιήθηκαν, με πρώτη την FMEA η οποία χρησιμοποιήθηκε στην αξιολόγηση αξιοπιστίας των συστημάτων και των υποσυστημάτων των υπεράκτιων κατασκευών αξιοποίησης των ΑΠΕ, και στη συνέχεια οι μέθοδοι AHP και TOPSIS προσεγγίζοντας προβλήματα στη λήψη αποφάσεων για υπεράκτιες κατασκευές με πολλαπλά κριτήρια.

## 5.6 Πλαίσιο Ανάλυσης Αξιοπιστίας

Η ανάλυση για την αξιοπιστία συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ αποτελεί ένα ευρή και ανερχομενο πεδίο, εφόσον νέες προσεγγίσεις παρουσιάζονται. Παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα αιολικής ενέργειας για τα οποία σύμφωνα με το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Energy Council), βρίσκονται σε φάση ταχείας ανάπτυξης από το 2000, ενώ ταυτόχρονα η τεχνολογία ανεμογεννητριών βελτιώνεται διαρκώς (GWEC, 2016). Αυτή η ανάπτυξη επηρεάζει επίσης την αξιοπιστία και την απόδοση των ανεμογεννητριών (GWEC, 2015), καθώς οι νέες τεχνολογίες βασίζονται σε πιο αξιόπιστα εξαρτήματα που τις αποτελούν (IEC, 1990), (Department of Defense Handbook. MIL-HDBK-189C, 2011). Η ανάλυση αξιοπιστίας αφορά τις αιτίες της βλάβης, τις πιθανότητες ή τη συχνότητά τους και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να αποφευχθούν σε συστήματα. Στα υπεράκτια συστήματα ανάλογα, η διερεύνηση στην ανάλυση της αξιοπιστίας υποστηρίζει την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και ασφαλών συστημάτων, ενώ αποτελεί παράγοντα στη μείωση του κόστους (Pérez-Collazo, et. al. 2015).

Για την αξιολόγηση των συστημάτων και της αξιοπιστίας τους εφαρμόστηκε η τεχνική της Ανάλυσης Τρόπων Αποτυχίας και των Επιπτώσεων (Failure mode and effect analysis - FMEA) η οποία αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο αξιολόγησης των εξαρτημάτων ενός μηχανήματος αλλά και ένα μέσο σύγκρισης και αξιολόγησης της διαμόρφωσης των μηχανημάτων που αποτελούν ένα σύστημα (Tague, 2004). Αυτή η μεθοδολογία αξιολογεί τα τμήματα του συστήματος και προσδιορίζει τους τρόπους αστοχίας καθώς και τα αποτελέσματά τους κατά τη λειτουργία του, όπως και την επίδραση της αστοχίας ενός στοιχείου-εξαρτήματος και σε άλλα στοιχεία ή μηχανήματα του συστήματος.

### 5.6.1 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Η FMEA έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών συστημάτων (Betancourt, et. al. 2011), στην αεροδιαστημική βιομηχανία (Filo, et. al. 2018), στην αυτοκινητοβιομηχανία (Villacourt, 1992) όπου η μεθοδολογία χρησιμοποιείται στο στάδιο του σχεδιασμού, κατασκευής και συναρμολόγησης των προϊόντων της (QS 9000, Chrysler, L.L.C., 2008). Επίσης εφαρμόζονται διαφορετικοί τύποι της FMEA οι οποίοι χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση διαφόρων συστημάτων σε πολλούς τομείς (AFNOR, CEI 60812: 2006), (Tsai, et. al. 2017). Ο κύριος στόχος είναι να ανιχνευθούν όλα τα πιθανά προβλήματα σε ένα περίπλοκο σύστημα και οι πιθανότητες εμφάνισής τους.

Οι μέθοδοι ανάλυσης FMEA (Failure mode and effect analysis), καθώς και αυτές των αναλύσεων με Δέντρα σφαλμάτων FTA (Fault tree analysis) και Ανάλυση Αιτίας και Συνεπειών CCA (Cause Consequence Analysis) αποτελούν τις ποιο κατάλληλες για πιο λεπτομερή και αντικειμενική ανάλυση των συστημάτων ανεμογεννητριών. Όμως, η CCA είναι λιγότερο ακριβής από την FMEA και την FTA (Health and Safety Laboratory, 2005). Ενώ, η FTA βασίζεται σε μια συμπερασματική λογική (deductive logic) που υποθέτει αποτυχίες των οποίων η πιθανότητα εμφάνισης είναι ήδη γνωστή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μεθοδολογία FMEA είναι καταλληλότερη για τη μελέτη της συμπεριφοράς αποτυχίας των στοιχείων-εξαρτημάτων ενός συστήματος.

Περαιτέρω, η αξιολόγηση των δεικτών FMEA (*σοβαρότητα (severity), εμφάνιση (occurrence) και ανίχνευση (detection))* συχνά βασίζεται σε τυποποιημένες κλίμακες ή σε εμπειρική κατάταξη (*ασήμαντο (minor), οριακό (marginal) και καταστροφικό (catastrophic*)) που υοστηρίζουν μια ποιο αποτελεσματική αξιολόγηση. Ορισμένες *υβριδικές* μέθοδοι FMEA, όπως η FMEA σε συνδιασμό με κόστος έχουν χρησιμοποιήσει την ίδια κατάταξη, ενώ κάποιες παρουσιάζουν άλλες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της κρισιμότητας των εξαρτημάτων χωρίς τη χρήση των πρότυπων δεικτών (Leimeister, et. al. 2018), (Devold, et. al. 2017), (Klochkov, et. al. 2016), (Rhee, et. al. 2003).

Ορίζοντας το πεδίο εφαρμογής της FMEA αναφέρεται ότι είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των τρόπων με τους οποίους τα κύρια στοιχεία ενός μηχανήματος, τα μηχανήματα που αποτελείται ένα σύστημα ή οι διεργασίες που πραγματοποιούνται από ένα

σύστημα δεν μπορούν να εκπληρώσουν τις λειτουργίες για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί (IEC, 2004). Με την FMEA προσδιορίζονται:

- όλες οι πιθανές αποτυχίες-βλάβες κατά τη λειτουργία των διαφόρων τμημάτων ενός συστήματος (μια λειτουργική αποτυχία-βλάβη είναι αυτή που παρατηρείται ότι αποτυγχάνει ή εκτελείται εσφαλμένα).
- τα αποτελέσματα που μπορεί να έχουν αυτές οι αποτυχίες-βλάβες στο σύστημα.
- οι μηχανισμοί βλάβης.
- πώς να αποφεύγονται οι αστοχίες ή / και να μετριάζονται οι επιπτώσεις των βλαβών στο σύστημα.

Την FMEA επεκτείνει η FMECA με την οποία κάθε αναγνωρισμένη λειτουργία σφάλματος μπορεί να ταξινομείται σύμφωνα με την σημασία ή κρισιμότητά του. Αυτή η ανάλυση κρισιμότητας είναι συνήθως ποιοτική ή ημι-ποσοτική αλλά μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα πραγματικά ποσοστά αποτυχίας-βλάβης.

Για την ολοκλήρωση της FMEA πρέπει να δημιουργηθεί μια ομάδα που θα συμμετέχει στην ανάπτυξη και την συλλογή και αξιολόγηση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Όπως συμβαίνει στις περισσότερες πτυχές του σχεδιασμού, η καλύτερη προσέγγιση για την ολοκλήρωση της FMEA είναι με διασταύρωση των δεδομένων που εισάγονται.

Οι συμμετέχοντες στη διαδικασία πρέπει να προέρχονται από όλους τους κλάδους του οργανισμού, όπως των πωλήσεων, του μάρκετινγκ, του ανθρωπίνου δυναμικού, τους υπεύθυνους για την αξιολόγηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του παραγόμενου προϊόντος, της παραγωγής, και κάθε κατάλληλου τομέα που θα μπορεί με τη συμμετοχή του να παρέχει πληροφορίες για την εφαρμογή της μεθόδου.

Για να ολοκληρωθεί αποτελεσματικότερα η FMEA, θα πρέπει να διεξάγεται ταυτόχρονα με τη διαδικασία σχεδιασμού και στη συνέχεια, η διαλειτουργική ομάδα να συζητήσει ώστε να επιτευχθεί συναίνεση σχετικά με τους τρόπους αποτυχίας-βλάβης που εντοπίστηκαν και τις αποτιμημένες βαθμολογίες (Gullo, 2018), (Fragassa, et. al. 2016), (Ozturk, et. al. 2018), (Carlson, 2012).

Για τη διεξαγωγή της FMEA ακολουθούνται μια σειρά από βήματα τα οποία είναι:

1. Ο προσδιορισμός των εξαρτημάτων που αποτελείται το υπο εξέταση σύστημα και οι συναφείς με αυτό λειτουργίες που υποστηρίζονται. Δηλαδή, προσδιορίζονται όλα τα εξαρτήματα που πρέπει να αξιολογηθούν. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει όλα τα μέρη που αποτελούν το προϊόν ή εάν η εστίαση είναι μόνο μέρος του προϊόντος τα μέρη που το αποτελούν και τα υποσύνολα του.
2. Ο *προσδιορισμός των λειτουργικών αστοχιών-αποτυχιών-βλαβών*. Εδώ αναγνωρίζονται οι δυνητικοί τρόποι αποτυχίας για κάθε εξάρτημα. Οι τρόποι αποτυχίας μπορεί να περιλαμβάνουν αλλά δεν περιορίζονται σε:
    - Ολοκληρωτικές αποτυχίες-βλάβες
    - Αποτυχίες-βλάβες μη διαπιστωμένες
    - Μερικές αποτυχίες-βλάβες
    - Αποτυχίες-Βλάβες με την πάροδο του χρόνου
    - Λανθασμένη λειτουργία
    - Αδυναμία διακοπής της λειτουργίας σε καθορισμένο χρόνο
    - Αδυναμία λειτουργίας σε καθορισμένο χρόνο

    Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι ένα εξάρτημα μπορεί να έχει περισσότερους από έναν τρόπους αποτυχίας.
3. *Ο προσδιορισμός των αποτελεσμάτων από μια λειτουργική αποτυχία-βλάβη*. Για κάθε αναγνωρισμένη βλάβη παρατίθενται οι συνέπειες ή οι επιπτώσεις στο προϊόν, την ιδιοκτησία και τα άτομα. Αυτές οι επιδράσεις περιγράφονται καλύτερα αν προσδιορίζονται από την οπτική του χρήστη.
4. *Ο προσδιορισμός της σοβαρότητας από την αποτυχία-βλάβη*. Η βαθμολογία-στάθμιση της σοβαρότητας ή κρισιμότητας (severity or criticality) υποδεικνύει πόσο σημαντική είναι η επίπτωση που έχει η αποτυχία-βλάβη και ο αντίκτυπος στο σύστημα ή το χρήστη. Η σοβαρότητα μπορεί να κυμαίνεται από ασήμαντο έως καταστροφικό. Ανάλογα με τη μέθοδο FMEA που χρησιμοποιείται, η σοβαρότητα συνήθως δίνεται είτε σε αριθμητική βαθμολογία είτε σε κωδικοποιημένη βαθμολογία. Το πλεονέκτημα μιας αριθμητικής αξιολόγησης είναι η ικανότητα να μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός προτεραιότητας κινδύνου (Risk Priority Number-RPN) (βλ. Βήμα 9). Οι αξιολογήσεις της σοβαρότητας

μπορούν να προσαρμοστούν εφόσον είναι καλά καθορισμένες, τεκμηριωμένες και εφαρμόζονται με συνέπεια.

5. *Ο προσδιορισμός της αιτίας (-ες) του τρόπου αποτυχίας-βλάβης*. Για κάθε τρόπο αποτυχίας εντοπίζονται τα αίτια. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε σχεδιαστικές ελλείψεις που οδηγούν σε αποτυχίες απόδοσης ή κατασκευαστικά σφάλματα.
6. Ο *προσδιορισμός της πιθανότητας εμφάνισης*. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό ή την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης μιας συγκεκριμένης αιτίας ή αστοχίας. Η πιθανότητα εμφάνισης μπορεί να προσδιοριστεί από δεδομένα πεδίου ή ιστορικό προηγούμενων προϊόντων. Εάν αυτές οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες, γίνεται μια υποκειμενική αξιολόγηση με βάση την εμπειρία και τη γνώση εμπειρογνωμόνων. Δύο από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της πιθανότητας εμφάνισης είναι μια αριθμητική κατάταξη και μια σχετική πιθανότητα αποτυχίας. Όπως και στην αριθμητική βαθμολογία σοβαρότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αριθμητική πιθανότητα εμφάνισης συμβάντος για τον υπολογισμό του RPN, ενώ εάν χρησιμοποιείται σχετική κλίμακα, κάθε κατάσταση αστοχίας κρίνεται σε σχέση με τις άλλες λειτουργίες αποτυχίες-βλάβες. Οι αξιολογήσεις που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι υψηλή, μέτρια, χαμηλή και απίθανο να συμβεί.
7. Ο *προσδιορισμός των ελέγχων,* που ήδη υπάρχουν, οι οποίοι είτε εμποδίζουν, είτε εντοπίζουν την αιτία αποτυχίας-βλάβης. Οι προληπτικοί έλεγχοι είτε εξαλείφουν την αιτία είτε μειώνουν τον ρυθμό εμφάνισης. Οι έλεγχοι που ανιχνεύουν την αιτία αποτυχίας-βλάβης επιτρέπουν διορθωτικές ενέργειες, ενώ οι έλεγχοι που ανιχνεύουν την αποτυχία χωρίς την ανίχνευση της αιτίας επιτρέπουν την απόσυρση του προϊόντος.
8. Ο *προσδιορισμός της αποτελεσματικότητας των ελέγχων* που ήδη υπάρχουν. Η βαθμολογία αυτής της αποτελεσματικότητας ελέγχου υπολογίζει πόσο καλά μπορεί να προληφθεί ή να ανιχνευτεί η αιτία ή η βλάβη. Εάν χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας έλεγχοι για μια δεδομένη αιτία ή λειτουργική αποτυχία, δίνεται μια βαθμολογία αποτελεσματικότητας σε αυτούς τους ελέγχους. Οι αξιολογήσεις της αποτελεσματικότητας του ελέγχου προσαρμόζονται και ακολουθούνται οι αξιολογήσεις όπως αυτές που περιεγράφηκαν για την σοβαρότητα και την πιθανότητα εμφάνισης.
9. Ο *υπολογισμός του αριθμού προτεραιότητας κινδύνου (RPN).* Το RPN είναι ένα προαιρετικό βήμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει να δοθεί

προτεραιότητα στις ενέργειες για την πρόληψη βλάβης. Υπολογίζεται για κάθε κατάσταση αστοχίας, πολλαπλασιάζοντας τις αριθμητικές τιμές της σοβαρότητας, της *πιθανότητας εμφάνισης και της πιθανότητας ανίχνευσης (RPN = S x O x D)*. Γενικά, οι τρόποι αποτυχίας που έχουν το μεγαλύτερο RPN λαμβάνουν προτεραιότητα για διορθωτικές ενέργειες. Σημειώνεται ότι το RPN δεν πρέπει να υπαγορεύει απόλυτα την προτεραιότητα, καθώς σε ορισμένες βλάβες ενδέχεται να απαιτούνται άμεσα ενέργειες, ακόμα και αν το RPN τους μπορεί να μην είναι μεταξύ των υψηλότερων.

10. *Ο προσδιορισμός των ενεργειών που θα μειώσουν τον κίνδυνο αποτυχίας*. Η λήψη μέτρων για τη μείωση του κινδύνου αποτυχίας είναι η πιο κρίσιμη πτυχή σε μια FMEA. Εφόσον σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται η αναθεώρηση για να προσδιοριστεί πού πρέπει να ληφθούν τα διορθωτικά μέτρα, καθώς και ποια μέτρα πρέπει να ληφθούν και πότε. Από τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των αποτυχιών σε ορισμένες η ενέργειες θα πρέπει να γίνουν άμεσα, ενώ για άλλες θα προγραμματιστούν για το μέλλον ή ακόμα και να μην λάβουν καμία προσοχή ή να προγραμματιστούν για μεταγενέστερη επανεκτίμηση.

*Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της FMEA.*

Τα πλεονεκτήματα του *FMEA* / *FMECA* έχουν ως εξής:

Αποτελεί ένα ευρέως εφαρμόσιμο εργαλεία στην αξιολόγηση των τρόπων αποτυχίας-βλάβης που οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα, του εξοπλισμού και των εξαρτημάτων του συστήματος, των υλικών που χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή, σε λογισμικά και στις διαδικασίες.

- εντοπίζουν τις λειτουργικές αστοχίες εξαρτημάτων, τις αιτίες και τις επιπτώσεις τους στο σύστημα και τις παρουσιάζουν με ευανάγνωστη μορφή.
- αποφεύγεται η ανάγκη για δαπανηρές τροποποιήσεις των εξαρτημάτων ενός μηχανήματος, εντοπίζοντας τα προβλήματα στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας σχεδιασμού.
- Εντοπίζονται αποτυχίες και οι απαιτήσεις για περισσότερα συστήματα ασφαλείας.

- Παρέχει πληροφορίες σε προγράμματα παρακολούθησης της ανάπτυξης προϊόντων, επισημαίνοντας βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να παρακολουθούνται.

Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν:

- μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τον εντοπισμό μίας μόνο αστοχίας, όχι συνδυασμού βλαβών.
- οι μελέτες μπορεί να είναι χρονοβόρες και δαπανηρές, εκτός εάν ελέγχονται επαρκώς και είναι εστιασμένες
- μπορεί η ανάλυση να είναι δύσκολη και κουραστική για πολυσύνθετα συστήματα.

## 5.7 Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων

Η λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων μπορεί να θεωρηθεί ως μια πολύπλοκη και δυναμική διαδικασία που περιλαμβάνει τη διερεύνηση από δύο πλευρές, αυτή της διαχείρισης και την τεχνική πλευρά. Η διαχειριστική πλευρά ορίζει τους στόχους και επιλέγει την τελική βέλτιστη εναλλακτική λύση. Η τεχνική πλευρά καθορίζει τις εναλλακτικές λύσεις, επισημαίνει τις συνέπειες της επιλογής για οποιαδήποτε από αυτές με την προσέγγιση διαφόρων κριτηρίων, ενώ εκτελεί και την κατάταξη πολλαπλών κριτηρίων των εναλλακτικών επιλογών. Η τεχνική προσέγγιση πραγματοποιεί και τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Κατά τη διαδικασία για τη λήψη μιας απόφασης τη διαχειριστική πλευρά αποτελούν οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων και έχουν την εξουσία να δέχονται ή να απορρίπτουν τη λύση που προτείνεται από την τεχνική πλευρά (Opricovic, et. al. 2004).

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων περιλαμβάνει συνήθως πέντε βασικά στάδια τα οποία είναι τα εξής:

1. *Καθορισμός του προβλήματος, δημιουργία εναλλακτικών λύσεων και καθορισμός κριτηρίων*. Το πρόβλημα της λήψης αποφάσεων θα πρέπει να ξεκινήσει με τον σαφή προσδιορισμό του προβλήματος, τον προσδιορισμό των εναλλακτικών επιλογών, τον εντοπισμό των υπευθύνων για τη λήψη απόφασης, τους στόχους και τα σημεία αντιθέσεών τους, τους περιορισμούς που μπορεί να υπάρχουν, τον βαθμό αβεβαιότητας και τα βασικά ζητήματα και θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη..

2. *Αντιστοίχιση βαρύτητας-στάθμιση των κριτηρίων , όπου περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας για τα κριτήρια*. Η βαρύτητα, είναι αυτή που δείχνει τη σχετική σημασία των κριτηρίων στο υπό εξέταση πολυκριτηριακό πρόβλημα, μπορούν να προσδιοριστούν με τεχνικές όπως η διαδικασία της αναλυτικής ιεραρχίας.
3. *Δημιουργία του πίνακα αξιολόγησης*. Στο σημείο αυτό κατασκευάζεται το μοντέλο και αποτελεί μια διαδικασία από την οποία εξάγεται η «ουσία» του προβλήματος ώστε από τη σύνθετη κατάσταση που αντιμετωπίζεται να καταρτιστεί ένας πίνακας ώστε το πρόβλημα να εκτιμηθεί επαρκώς. Στο τέλος αυτού του σταδίου το πρόβλημα MCDM μπορεί να εκφραστεί σε μορφή μήτρας-πίνακα (matrix) ως εξής:

$$\begin{matrix} Criteria & C_1, & C_2, & \dots, & C_n \\ Weights & W_1, & W_2, & \dots, & W_n \\ Alternatives & & & & \end{matrix}$$
$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

όπου $x_{ij}$ είναι η αξιολόγηση που δίνεται στην εναλλακτική λύση i με βάση το κριτήριο j, W είναι το βάρος των κριτηρίων j, *n* ο αριθμός των κριτηρίων και *m* είναι ο αριθμός των εναλλακτικών επιλογών.
4. *Επιλογή της κατάλληλης μεθόδου*. Μια μέθοδος πολλαπλών κριτηρίων πρέπει να επιλεγεί και να εφαρμοστεί στο υπό εξέταση πρόβλημα προκειμένου να ταξινομηθούν εναλλακτικές λύσεις. Η επιλογή μεταξύ διαφόρων μεθόδων πολλαπλών κριτηρίων εξαρτάται από τα δεδομένα και το βαθμός αβεβαιότητας που αποτελούν βασικούς παράγοντες για τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων.
5. *Κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών*. Αποτελεί το τελικό στάδιο, όπου γίνεται η κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών και προτείνεται η καλύτερη δυνατή εναλλακτική λύση.

### 5.7.1 Analytic Hierarchy Process, AHP

Η επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων για δεδομένο πρόβλημα, μπορεί να είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί όταν οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων επιθυμούν να αξιολογήσουν

την απόδοση μιας σειράς εναλλακτικών λύσεων και οι στόχοι είναι σημαντικοί και πολλαπλοί,. Τότε, οι εναλλακτικές λύσεις μπορεί να αξιολογηθούν βάσει ενός αριθμού κριτηρίων απόφασης. Αυτή την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί από την AHP διότι δίνει τη δυνατότητα να γίνει διαχείριση και να εξεταστούν μια ένας μεγάλος αριθμός από ποιοτικά κριτήρια, όπως πολιτικοί ή κοινωνικοί παράγοντες, οι οποίοι πρέπει να συμπεριληφθούν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων ή όταν πρόκειται για μελλοντικές τεχνολογίες, όπου τα χαρακτηριστικά τους ενδέχεται να μην είναι γνωστά (Marler, et. al. 2004), (Greco, et. al. 2016).

Η Διαδικασία της Αναλυτικής Ιεράρχησης (AHP) είναι ένας τρόπος λήψης αποφάσεων που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Saaty στη δεκαετία του 1980 (Saaty, 1980) και έκτοτε αποτέλεσε ένα αποτελεσματικό εργαλείο στη δομή και τη μοντελοποίηση καταστάσεων που περιλαμβάνουν πολλαπλούς και ενίοτε αντικρουόμενους στόχους. Χρησιμοποιήθηκε για να συμπληρώσει το κενό από την έλλειψη κοινών, εύκολα κατανοητών και εφαρμόσιμων μεθόδων στη διαδικασία λήψης σύνθετων αποφάσεων.

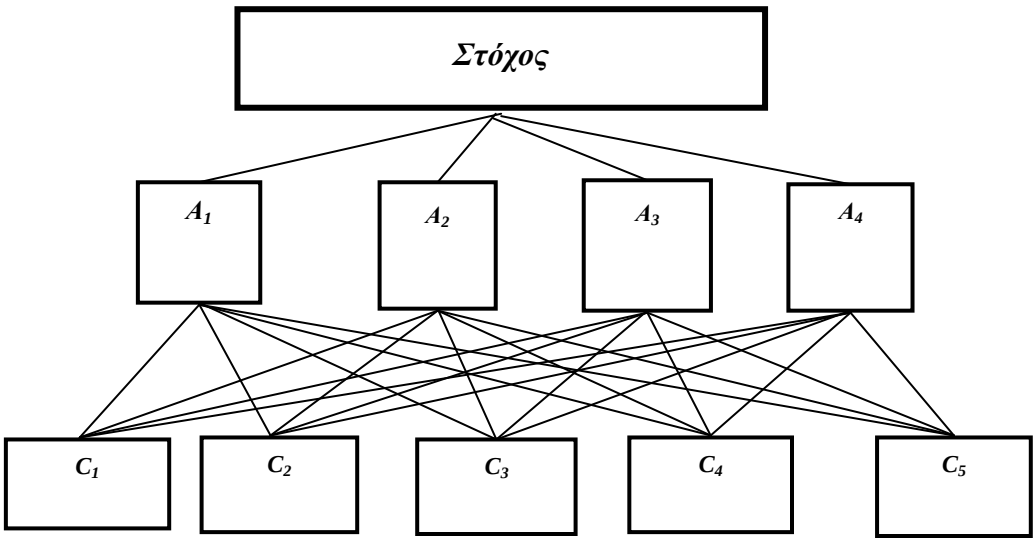
Ο στόχος της χρήσης της AHP είναι ο προσδιορισμός της προτιμώμενης εναλλακτικής λύσης και ο προσδιορισμός της κατάταξης των εναλλακτικών στη λήψη αποφάσεων όταν λαμβάνονται υπόψη όλα τα κριτήρια απόφασης ταυτόχρονα.

Με την εφαρμογή της AHP ένα μη δομημένο πρόβλημα διασπάται σε τμήματα-κομμάτια, σε μία ιεραρχία υπο-προβλημάτων, τα οποία μπορούν να κατανοηθούν και να αξιολογηθούν καλύτερα. Στη συνέχεια, ο υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων καθοδηγείται από μια σειρά κατά ζεύγη συγκρίσεων για να εκφράσει τη σχετική ισχύ ή την ένταση της επίδρασης των στοιχείων-δεδομένων στην ιεραρχία.

Αυτές οι κρίσεις, προσδιορίζονται αντιπροσωπευτικά από αριθμητικές τιμές-βαρύτητα. Για παράδειγμα, στον υπολογισμό των βαρών, μία σειρά ερωτήσεων τίθενται στο λήπτη αποφάσεων, από τις οποίες ζητείται να προσδιοριστεί πόσο σημαντικό μπορεί να είναι ένα συγκεκριμένο κριτήριο σε σχέση με κάποιο άλλο στην απόφαση που πρέπει να πάρει. Στη συνέχεια οι τιμές συντίθενται στη χρήση των διανυσμάτων για τον καθορισμό των μεταβλητών που έχουν την υψηλότερη προτεραιότητα.

Η AHP είναι μια μέθοδος που στηρίζεται στη διαίσθηση των συμμετεχόντων (intuitive) για τη διατύπωση και την ανάλυση των αποφάσεων και χρησιμοποιεί τα ακόλουθα τέσσερα στάδια για την επίλυση ενός προβλήματος:

1. *Δομή του προβλήματος απόφασης σε ένα ιεραρχικό μοντέλο στόχων, κριτηρίων και εναλλακτικών* (διάγραμμα 5.1). Όπως και στο πλαίσιο της έρευνας που αφορά αξιολόγηση συστημάτων ΑΠΕ, κάθε τεχνολογία αξιοποίησης της ενέργειας αποτελείται από πολλά υποσυστήματα και αυτά από εξαρτήματα. Η χρήση όμως των τεχνολογιών έχει κοινωνικές, περιβαλλοντικές, πολιτικές ή οικονομικές συνέπειες. Οι συνέπειες αυτές μερικές φορές είναι αλληλεξαρτώμενες. Ως εκ τούτου, το πρώτο βήμα στη διερεύνηση ενός προβλήματος περιλαμβάνει, τη δόμηση του προβλήματος λήψης απόφασης σε ένα ιεραρχικό πρότυπο, που δημιουργείται με την υποστήριξη ειδικών-εμπειρογνωμόνων (experts) από τους διαφορετικούς τομείς. Αυτό συνεπάγεται την διάσπαση του προβλήματος σε στοιχεία σύμφωνα με τα κοινά χαρακτηριστικά τους, σχηματίζοντας ένα ιεραρχικό μοντέλο με διαφορετικά επίπεδα που δείχνει τις σχέσεις μεταξύ στόχου, κριτηρίων (υποκριτηρίων εάν είναι αναγκαίο) και εναλλακτικών λύσεων.




**Διάγραμμα 5.1 Δομή του προβλήματος απόφασης σε ένα ιεραρχικό μοντέλο στόχων όπου Α οι εναλλακτικές και C τα κριτήρια.**

2. *Προσδιορισμός βαρύτητας-στάθμιση για κάθε κριτήριο.* Στο δεύτερο στάδιο, εφόσον προσδιοριστούν τα σχετικά κριτήρια και οι εναλλακτικές λύσεις καθώς και οι σχέσεις μεταξύ τους, τα στοιχεία ενός συγκεκριμένου επιπέδου συγκρίνονται κατά ζεύγος σε σχέση με ένα συγκεκριμένο στοιχείο στο αμέσως ανώτερο επίπεδο. Τότε δημιουργείται έμας συγκριτικός πίνακας (matrix), ο πίνακας κατά ζεύγη συγκρίσεων (A) χρησιμοποιώντας γλωσσικούς όρους που περιλαμβάνουν τις προφορικές κρίσεις του υπεύθυνου λήψης αποφάσεων. Η καταχώρηση στη γραμμή i και στη στήλη j του πίνακα A (που ονομάζεται $\alpha_{ij}$) υποδεικνύει πόσο σημαντικότερο είναι το κριτήριο i από το j σε σχέση με την εναλλακτική λύση. Για να μετατραπούν οι λεκτικές κρίσεις σε ποσοτικές - αριθμητικές, ο Saaty πρότεινε τη χρήση ακέραιων τιμών σε κλίμακα 1-9 όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1.

**Πίνακας 5.1 Ακέραιες τιμές και ερμηνεία**

| Τιμές (Values) | Ερμηνεία (Interpretation) |
|---|---|
| 1 | Οι στόχοι i και j είναι εξίσου σημαντικοί |
| 3 | Ο στόχος i είναι ελαφρώς πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 5 | Η εμπειρία και οι κρίσεις δείχνουν ότι ο στόχος i είναι πολύ πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 7 | Ο στόχος i είναι πολύ ισχυρός ή αποδεδειγμένα πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 9 | Ο στόχος i είναι απολύτως πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 2,4,6,8 | Οι ενδιάμεσες τιμές, για παράδειγμα, μια τιμή 8 σημαίνουν ότι ο στόχος i είναι στο μέσο μεταξύ ισχυρού και απολύτως πιο σημαντικός από τον στόχο j |

Κατά την κατασκευή της μήτρας σύγκρισης ζευγών, πρέπει να επαληθευτούν οι ακόλουθοι κανόνες:

I. Αν $a_{ij} = a$, τότε $a_{ji} = 1/a$

II. Αν κριθεί ότι το κριτήριο i έχει ίση σχετική σημασία προς το κριτήριο j, τότε $a_{ij} = a_{ji} = 1$ και $a_{ii} = 1$ για όλα τα i.

III. Εάν όλες οι συγκρίσεις είναι απόλυτα συνεπείς, τότε η σχέση $a_{ik} = a_{ij} = a_{jk}$ για όλα τα i, j και k.

Για να προσδιοριστεί το διάνυσμα W = [$w_1$, $w_2$,. . . , $w_N$] από το A, το οποίο υποδηλώνει το βάρος που έχει κάθε κριτήριο στη σύγκριση ανά ζεύγη, χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία δύο σταδίων:

a. Για κάθε μία από τις στήλες A διαιρείται κάθε καταχώριση στη στήλη i του A με το άθροισμα των καταχωρίσεων στη στήλη i. Αυτό δίνει μια νέα μήτρα, που ονομάζεται Anor (normalized-κανονικοποιημένη) στην οποία το άθροισμα των καταχωρήσεων σε κάθε στήλης είναι 1.
b. Το $W_i$ προσδιορίζεται ως ο μέσος όρος των καταχωρήσεων στη γραμμή I του κανονικοποιημένου πίνακα Anorm.

Μόλις γίνει κατά ζεύγη η σύγκριση, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η συνέπεια. Οι μικρές ασυνέπειες είναι συχνές και δεν προκαλούν σοβαρές δυσκολίες. Ενώ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη διαδικασία ώστε να ελεγχθεί η συνοχή στις συγκρίσεις των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων.

- Υπολογίζεται ο συνολικός πίνακας $AW^T$ (T, ανάστροφος), όπου W υποδηλώνει την εκτίμηση για το βάρος της λήψης αποφάσεων.
- Υπολογίζεται η μέγιστη τιμή ιδιοδιανύσματος (Eigen value) $\lambda_{max}$:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{ith\ είσοδος\ στο\ AW^T}{ith\ είσοδος\ στο\ W^T} \qquad (5.1)$$

- Ο συντελεστής συνέπειας (CI- Consistency Index) υπολογίζεται από:

$$CI = \frac{(\lambda_{max})-n}{n-1} \qquad (5.2)$$

Όπου n είναι ο αριθμός των στοιχείων-εναλλακτικών που συγκρίνονται στη λήψη απόφασης.

Όσο μικρότερος είναι ο CI, τόσο μικρότερη είναι η απόκλιση από τη συνέπεια. Εάν ο CI είναι πολύ μικρός, οι συγκρίσεις του υπεύθυνου για τη λήψη αποφάσεων είναι κατά πάσα πιθανότητα αρκετά συνεπείς ώστε να δώσουν χρήσιμες εκτιμήσεις βαρύτητας σχετικά με το στόχο. Για έναν απόλυτα συνεπή υπεύθυνο λήψης αποφάσεων ο CI = 0.

IV. Η σύγκριση του Δείκτη Συνέπειας με τον Τυχαίο Δείκτη (Random Index-RI) για την κατάλληλη τιμή του n, φαίνεται στον Πίνακα 5.2.

**Πίνακας 5.2 Τιμές Δείκτη Τυχαίας Συνέπειας RI για διαφορετικές τιμές n.**

| **n** | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **RI** | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

Εάν $\frac{CI}{RI} < 0.10$ ο βαθμός συνέπειας είναι ικανοποιητικός, αλλά εάν το $\frac{CI}{RI} > 0.10$ ενδέχεται να υπάρχουν σοβαρές ασυνέπειες και το AHP να μην αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα.

3. *Προσδιορίζεται το αποτέλεσμα της κάθε εναλλακτικής λύσης για κάθε κριτήριο***.** Έτσι καθορίζεται πώς κάθε εναλλακτική «ικανοποιεί» ή «είναι κοντά στο αποτέλεσμα» για κάθε στόχο. Για να προσδιοριστούν αυτές οι βαθμολογίες, πρέπει να κατασκευαστεί ένας πίνακας σύγκρισης ανά ζεύγος για κάθε στόχο. Σε αυτόν τον πίνακα, οι σειρές και οι στήλες είναι οι πιθανές αποφάσεις λήψης αποφάσεων.
4. *Λαμβάνεται η συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική λύση***.** Η σύνθεση είναι η διαδικασία της στάθμισης και του συνδυασμού προτεραιοτήτων μέσω του μοντέλου που οδηγεί στα συνολικά αποτελέσματα. Μέσω αυτής της διαδικασίας, συνθέτονται τα αντικειμενικά βάρη με τα αποτελέσματα κάθε εναλλακτικής επιλογής σε κάθε κριτήριο για να δημιουργηθεί η συνολική βαθμολογία από κάθε εναλλακτική λύση. Για τον υπολογισμό του «συνολικού βάρους», χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$Τελική\ προτεραιότητα\ της\ εναλλακτικής\ λύσης\ 1 = \sum_i (Τοπική\ προτεραιότητα\ του\ A1\ σε\ σχέση\ με\ το\ C1) \times (Τοπική\ προτεραιότητα\ του\ C_i σε\ σχέση\ με\ το\ στόχο) \quad (5.3)$$

Η μέθοδος AHP, σύμφωνα με τον Saaty (1980), βασίζεται θεωρητικά σε τέσσερα αξιώματα:

1) Το πρόβλημα αποφάσεως μπορεί να διαμορφωθεί σε ένα ιεραρχικό μοντέλο.

2) Όλα τα κριτήρια και τα υπο-κριτήρια, καθώς και όλες οι σχετικές εναλλακτικές, απεικονίζονται με ιεραρχία.

3) Ο λήπτης αποφάσεων έχει την ικανότητα να δημιουργεί συγκρίσεις ανα ζεύγη $\alpha_{ij}$ δύο εναλλακτικών i και j σε σχέση με ένα κριτήριο ή υπο-κριτήριο σε μια αντίστροφη κλίμακα $\alpha_{ij}=1/\alpha_{ij}$.

4) Δεν κρίνεται μία εναλλακτική ως απόλυτα καλύτερη από μία άλλη σε σχέση με ένα κριτήριο, από το λήπτη απόφασης, για παράδειγμα $\alpha_{ij}\neq\infty$.

Συνοπτικά η AHP είναι ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων ικανό να αξιοποιηθεί και να ανταποκριθεί στην προσπάθεια λήψης αποφάσεων όταν τα διαθέσιμα δεδομένα για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν ή όταν είναι απαραίτητο να βασιστούν σε γνώμες ή προτιμήσεις εμπειρογνωμόνων με ορισμένες άυλες πτυχές. Ωστόσο, η μέθοδος έχει επικριθεί για την αδυναμία της να διαχειριστεί επαρκώς την εγγενή αβεβαιότητα και θέματα που συνδέονται με ορισμένα περιβάλλοντα. Επιπλέον, είναι δύσκολο να υπολογιστεί υποκειμενικά ένας συγκεκριμένος ποσοτικός αριθμός για να καταστεί δυνατή η σύγκριση ανά ζεύγη χωρίς να χάσει κάποιο βαθμό ακρίβειας. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η σχετική ευκολία με την οποία χειρίζεται πολλαπλά κριτήρια και εκτελεί ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα έχει ευνοήσει τη χρήση της ως μέθοδο λήψης αποφάσεων σε πολλές προσεγγίσεις για ΑΠΕ (Ramanathan, et. al. 1995), (Mohsen, et. al. 1997), (Akash, et. al. 1999), (Wang, et. al. 2002) (Vashishtha, et. al. 2006), (Nagesha, et. al. 2006), (Kon Lee, et. al. 2008), (Lee, et. al. 2009).

### 5.7.2 TOPSIS

Η *Τεχνική για τον Προσδιορισμό Προτιμήσεως από την Ομοιότητα με την Ιδανική Λύση (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution-TOPSIS*) αναπτύχθηκε από τους Hwang και Yoon (1981), ως εναλλακτική λύση στην ELECTRE. Η βασική αρχή είναι ότι η επιλεγμένη εναλλακτική λύση θα πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από την ιδανική λύση και την πιο μακρινή απόσταση από την αρνητική ιδανική λύση με γεωμετρική έννοια. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, αρχικά διερευνώνται οι ιδανικές και αρνητικές ιδανικές λύσεις. Η ιδανική λύση προσδιορίζεται ως μια σύνθεση από την καλύτερη απόδοση που παρουσιάζεται από οποιαδήποτε εναλλακτική λύση για κάθε χαρακτηριστικό/κριτήριο, και η αρνητική ιδανική λύση από τις χειρότερες τιμές απόδοσης.

Η μέθοδος TOPSIS μέθοδος υποθέτει ότι κάθε χαρακτηριστικό έχει μια μονοτονικά (monotonically) αυξανόμενη ή μειούμενη χρησιμότητα. Αυτό καθιστά εύκολο τον εντοπισμό των ιδανικών και αρνητικά ιδανικών λύσεων. Η σειρά προτιμήσεων των εναλλακτικών λύσεων αποδίδεται μέσω της σύγκρισης των Ευκλείδειων αποστάσεων. Η TOPSIS είναι μέθοδος ικανή για την διερεύνηση πολλαπλών κριτηρίων λήψης αποφάσεων (MCDM) για τον εντοπισμό λύσεων από ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων. Η μέθοδος TOPSIS αξιολογεί τον πίνακα αποφάσεων $X = \left[x_{ij}\right]_{mxn}$ που αναφέρεται σε m εναλλακτικές λύσεις οι οποίες αξιολογούνται με n κριτήρια και υποδηλώνουν το μέτρο απόδοσης της i εναλλακτικής όσον αφορά το j κριτήριο. Για την εφαρμογή της μεθόδου τα επόμενα βήματα ακολουθούνται:

Υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας αποφάσεων $X = \left[x_{ij}\right]_{mxn}$ όπου m είναι ο αριθμός των εναλλακτικών λύσεων και n είναι ο αριθμός των κριτηρίων. Η κανονικοποιημένη-ομαλοποιημένη τιμή υπολογίζεται ως:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad i = 1,2,\ldots,m\,; j = 1,2,\ldots,n \tag{5.4}$$

Η κανονικοποίηση γίνεται για ευκολία σύγκρισης μετατρέποντας διαφορετικές μονάδες κριτηρίων σε μια ενοποιημένη μονάδα.

2 Υπολογίζεται η στάθμιση στον κανονικοποιημένο πίνακα αποφάσεων $V = \left[v_{ij}\right]_{mxn}$. Η σταθμισμένη κανονικοποιημένη τιμή υπολογίζεται ως εξής:

$$v_{ij} = \left(w_j\right)\left(r_{ij}\right) \quad i = 1,2,\ldots,m\,; j = 1,2,\ldots,n \tag{5.5}$$

Όπου $w_{ij}$ είναι το βάρος των κριτηρίων j και $\sum_{i=1}^{n} w_j = 1$.

3. Προσδιορίζεται η θετική ιδανική λύση (positive ideal solution-PIS) $A^+$ και η αρνητική ιδανική λύση (negative ideal solution -NIS) $A^-$ :

$$A^+ = \left\{\left(\max_i v_{ij} | j \in J\right), \left(min v_{ij} | j \in J'\right) | i = 1,2,\ldots,m\right\} =$$
$$= \left\{v_1^+, v_2^+, \ldots, v_j^+, \ldots, v_n^+\right\} \tag{5.6}$$

$$A^- = \left\{\left(\min_i v_{ij} | j \in J\right), \left(max v_{ij} | j \in J'\right) | i = 1,2,\ldots,m\right\} =$$

$$= \left\{v_1^-, v_2^-, \ldots, v_j^-, \ldots, v_n^-\right\} \quad (5.7)$$

όπου

$J = \{j = 1,2,\ldots,n | j$ σχετίζεται με τα κριτήρια που έχουν θετικό αντίκτυπο (positive impact)$\}$

$J' = \{j = 1,2,\ldots,n | j$ σχετίζεται με τα κριτήρια που έχουν αρνητικό αντίκτυπο (negative impact)$\}$

4 Υπολογίζονται τα μέτρα διαχωρισμού (separation measures), χρησιμοποιώντας την n-διαστάσεων Ευκλείδεια απόσταση.

Ο διαχωρισμός κάθε εναλλακτικής λύσης από τη θετική ιδανική λύση:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \quad i = 1,2,\ldots.,m \quad (5.8)$$

Ο διαχωρισμός κάθε εναλλακτικής λύσης από τη αρνητική ιδανική λύση:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \quad i = 1,2,\ldots.,m \quad (5.9)$$

*5 Υπολογίζεται η σχετική εγγύτητα c με την ιδανική λύση:*

$$c_i = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}, 0 \prec c \prec 1, i = 1,2,\ldots.,m \quad (5.10)$$

$c_i = 1 \quad if \quad A_i = A^+$

$c_i = 0 \quad if \quad A_i = A^-$

6 Βαθμολογούνται οι εναλλακτικές σε σχέση με την $c_i$ κατά φθίνουσα σειρά. Η προτιμώμενη εναλλακτική λύση θα πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από τη θετική ιδανική λύση και την πιο μακρινή απόσταση από την αρνητική ιδανική λύση, όπου υψηλότερο $c_i$ θα σήμαινε υψηλότερη προτίμηση.

Συμπερασματικά ένα μειονέκτημα της μεθόδου TOPSIS είναι ότι εισάγει τον δείκτη κατάταξης που περιλαμβάνει την απόσταση από το ιδανικό σημείο και από το αρνητικό ιδανικό σημείο χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η σχετική σημασία τους, γι' αυτό κατά τη βιβλιογραφική επισκόπηση διαπιστώθηκε να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους. Στην λήψη αποφάσεων σχετικά με ΑΠΕ, οι εφαρμογές της είναι περιορισμένες, με κάποια παραδείγματα να περιλαμβάνουν τη διαχείριση στερεών αποβλήτων (Cheng, et. al. 2009), στη βιωσιμότητα των επιλογών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Doukas, et. al. 2010), στην αξιολόγηση των δομών στήριξης ανεμογεννητριών (Lozano-Minguez, et. al. 2011) και σε αβέβαια περιβάλλοντα εφαρμόστηκε σε φωτοβολταικά συστήματα και στον ενεργειακό σχεδιασμό (Cavallaro, 2010), (Kaya, et. al. 2011).

## 5.8 Ο προσδιορισμός στάθμισης-βαρύτητας στις MCDM

Η έννοια της ανάθεσης σταθμίσεων-βαρύτητας, είτε στα κριτήρια είτε στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων, είναι βασική για τις περισσότερες μεθόδους λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) και χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη φάση συσσωμάτωσης-άθροισης (aggregation) των προτιμήσεων. Η πιο δημοφιλής μορφή είναι όταν τα κριτήρια σταθμίζονται ουσιαστικά για να προσδιοριστεί η σχετική σημασία τους για το γενικό στόχο λήψης αποφάσεων.

Δεδομένου ότι, ένας από τους στόχους είναι να βρεθεί μια κατάλληλη μέθοδος προσδιορισμού βαρών σε ένα σύνολο κριτηρίων όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 4. Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ορισμένες μέθοδοι MCDM, ανάλογα με το πρόβλημα λήψης αποφάσεων, αποδίδουν ίσο βάρος, ή σημασία για όλα τα κριτήρια, στις περισσότερες εφαρμογές η προϋπόθεση είναι ότι ορισμένα κριτήρια θα συμβάλουν περισσότερο στη σύνθετη απόφαση από άλλα. Στη συσσωμάτωση των αλγορίθμων στις MCDM, ένα πλήθος από διάφορες μεθόδους στάθμισης των κριτηρίων έχουν προταθεί κατά τη διάρκεια των ετών. Η λογοτεχνία αφθονεί σε πολλές από αυτές τις μεθόδους στάθμισης, όπου ο κύριος σκοπός είναι να αναθέσει είτε μια κύρια είτε μια κανονική αξία στο φάσμα των κριτηρίων για να τα διακρίνει όσον αφορά την αξία τους στην τελική απόφαση.

Οι υπεύθυνοι στην εφαρμογή MCDM θεωρούν ότι η απόδοση βαρύτητας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα βήματα στη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, σε μια ευρεία σειρά μεθόδων και προσεγγίσεων, η απόδοση βαρύτητας προσεγγίζεται πλημμελώς από την κακή χρήση των

μεθόδων απόδοσης βαρύτητας. Ως εκ τούτου, η επιλογή μίας μεθόδου MCDM ειδικά για μια τέτοια εργασία, όπως η ρύθμιση του βάρους, θα πρέπει πάντα να καθοδηγείται από το τι θέλει ο λήπτης απόφασης ως προϊόν και ποια είναι η μέθοδος που μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη.

Για παράδειγμα, η επιδιωκόμενη σημασία για τη χρήση AHP (μέθοδος πλήρους συσσωμάτωσης) ή ELECTRE (μέθοδος εξωστρέφειας) είναι τελείως διαφορετικές (Ishizaka, et. al. 2013). Για το σκοπό αυτό, μια λεπτομερής ταξινόμηση των μεθόδων απόδοσης βαρύτητας βοηθά να επιλεγεί μια ιδανική μέθοδος για το σωστό πρόβλημα.

Στις μεθόδους MCDM, στις οποίες επικεντρώνεται αυτή η διατριβή, οι μέθοδοι στάθμισης μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρία είδη, τις υποκειμενικές, τις αντικειμενικές και τις υβριδικές μεθόδους στάθμισης.

Στις *υποκειμενικές μεθόδους στάθμισης*, τα κριτήρια στάθμισης καθορίζονται με βάση τις αξιολογήσεις ή τις προτιμήσεις των υπευθύνων λήψης αποφάσεων. Ορισμένες από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται υποκειμενική στάθμιση και συναντώνται ευρέως στη βιβλιογραφία είναι οι μέθοδοι για σύγκρισης ανά ζεύγη όπως η AHP μια η ANP (Analytic Network Process), οι μέθοδοι αντιστάθμισης (trade-off methods) και η μέθοδος Delphi. Δεδομένου ότι οι συντελεστές υποκειμενικών κριτηρίων καθορίζονται από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, τα βάρη μπορούν να επηρεαστούν ώστε να αντικατοπτρίζουν την απόκτηση νέας γνώσης ή τις αλλαγές στις απαιτήσεις του στόχου της απόφασης.

Στην *αντικειμενική στάθμιση* τα βάρη προέρχονται από υπάρχοντα ή ιστορικά δεδομένα με τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων. Οι μέθοδοι με προσεγγίσεις αντικειμενικής στάθμισης περιλαμβάνουν μεθόδους βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, την TOPSIS και τη μέθοδο εντροπίας (θεώρημα Shannon). Θεωρούνται σχετικές για πολυκριτήρια προβλήματα MCDM, ειδικά όταν είναι δύσκολο να ληφθούν αξιόπιστα υποκειμενικά βάρη ή είναι ανύπαρκτα. Ο υπολογισμός αντικειμενικών βαρών αντιμετωπίζει μερικές φορές προβλήματα ακρίβειας και αξιοπιστίας (Tervonen, et. al. 2009).

Επιπρόσθετα υπάρχει προσέγγιση για τον καθορισμό της στάθμισης στα MCDM που είναι η *χρήση υβριδικών μεθόδων* που περιλαμβάνουν τον συνδυασμό της προσθετικής και της πολλαπλασιαστικής σύνθεσης (Tervonen, et. al. 2009). Η υβριδική προσέγγιση είναι χρήσιμη

και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα απαιτεί τη χρήση υποκειμενικών και αντικειμενικών μεθόδων στάθμισης.

Η απόφαση για την επιλογή κατάλληλης μεθόδου στάθμισης για τα προβλήματα λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων είναι μία από τις πιο δύσκολες διαδικασίες στην αλυσίδα των βημάτων στις MCDM. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τα προβλήματα MCDM όπου απαιτείται αντιστοίχιση βαρών, τα βάρη γίνονται το σημείο αναφοράς στην τελική κατάταξη και επιλογή των ανταγωνιστικών εναλλακτικών αποφάσεων. Έτσι, μια μικρή αλλαγή ή ανακρίβειες στα βάρη μπορεί να έχουν επίπτωση στα τελικά αποτελέσματα κατάταξης. Με αυτό το σκεπτικό και με την προσέγγιση από την έρευνα του Hobbs (1980) που επιβεβαιώνει ότι διαφορετικές μέθοδοι στάθμισης οδηγούν σε διαφορετικά κριτήρια βάσεων κριτηρίων και κατά συνέπεια στα συνολικά αποτελέσματα, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου στάθμισης κατάλληλης για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα λήψης αποφάσεων.

Στην προσέγγιση της υβριδικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα της διατριβής οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στον καθορισμό της βαρύτητας είναι μέθοδοι που υπάγονται σε μεθόδους υποκειμενικής και αντικειμενικής στάθμισης.

## 5.9 Σύνοψη

Η αειφόρος ανάπτυξη των τεχνολογιών στους τομείς αιολικής ενέργειας και ενεργείας των κυμάτων στην ανοικτή θάλασσα απαιτεί βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πόρων που σχετίζονται με αυτές.

Η αξιολόγηση των συστημάτων και οι λήψεις αποφάσεων που σχετίζονται με τις υπεράκτιες κατασκευές πρέπει να αντιμετωπιστούν ως πολυκριτηριακά προβλήματα. Παράλληλα ο συνδυασμός τεχνολογιών αποτελεί κοινή πρόκληση και για τις δύο βιομηχανίες, ώστε να μειώσουν το αρχικό κόστος και η επιλογή της ενσωμάτωσης της υπεράκτιας αιολικής και κυματικής ενέργειας που προέκυψε κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας (Pérez-Collazo, et. al. 2015) μπορεί να ενισχύσει την προσπάθεια για βιώσιμη και αξιόπιστη ανάπτυξη.

Οι τεχνικές αξιολόγησης της αξιοπιστίας και των πολυκριτηρικών μεθόδων στην ανάπτυξη των ΣΑΔ-ΑΠΕ είναι ικανές να ενισχύσουν τους υπευθύνους στη λήψη αποφάσεων να αντιμετωπίσουν την πολυπλοκότητα των προβλημάτων, την διαχείρισή τους και την

πολυκριτηριακή φύση της ανάπτυξης αυτών των κατασκευών. Το αντικείμενο της ανάπτυξης των υπεράκτιων κατασκευών αξιοποίησης ΑΠΕ και της πολυπλοκότητας των προβλημάτων που εγείρονται, διερευνάται στη επόμενη ενότητα όπου αναλυτικά παρουσιάζεται η δυνατότητα εφαρμογής ενός μεθοδολογικού πλαισίου ικανό να στηρίξει τη λήψη αποφάσεων.

# Κεφάλαιο 6

## 6.1 Πλαίσιο Αξιολόγησης Συστημάτων ΑΠΕ, Εισαγωγή

Πολλοί συνδυασμοί έχουν αναπτυχθεί, οι οποίοι χρησιμοποιώντας μεθόδους MCDM, διερευνούν ζητήματα που αφορούν στον ενεργειακό σχεδιασμό, στη διαχείριση αποβλήτων, στη διαχείριση ενέργειας και μεταφοράς της, και στις εναλλακτικές λύσεις ηλεκτροπαραγωγής στην ξηρά.

Όπως όμως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια οι πολυκριτηριακές αναλύσεις ενδείκνυται για την ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων προώθησης των ΑΠΕ στο σύγχρονο περιβάλλον λειτουργίας του ενεργειακού τομέα, παρ' όλο που μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως για συστήματα ανεμογεννητριών, ελάχιστα για συστήματα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας, ενώ δεν εφαρμόζονται σε μελέτες υβριδικών συστημάτων στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων δομών, και δεν λαμβάνονται υπόψη παράγοντες αξιοπιστίας των τεχνολογικών ή η αξιοπιστία σε λειτουργιών και ελέγχου.

Με βάση τα παραπάνω, στόχος αυτής της ενότητας είναι η παρουσίαση της εργαλειοθήκης πολυκριτηρικών μεθολογιών με τη σύνδεση τεχνικών αξιολόγησης αξιοπιστίας στη στήριξη των υπευθύνων σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων. Επίσης, περιλαμβάνονται οι επιμέρους δοκιμές των μεθοδολογιών στην τέλεση αξιολογήσεων και στην παρουσίαση υβριδικών προσεγγίσεων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της προτεινόμενης εργαλειοθήκης.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η διαδικασία των συνιστωσών καθώς και η πρωτότυπη πολυκριτηριακή εργαλειοθήκη μεθοδολογιών που αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση των προτάσεων ανάπτυξης υπεράκτιων δομών ΑΠΕ σε σχέση με τη συνάφειά τους με τα χαρακτηριστικά των εμπλεκομένων στη λήψη αποφάσεων και των κριτηρίων που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Στο πλαίσιο εφαρμογής της προτεινόμενης προσέγγισης, παρουσιάζεται η υποστήριξη των επιμέρους διαδικασιών και συγκεκριμένα αυτών που έχουν να κάνουν με τις πολυκριτηριακές αξιολογήσεις των διαφόρων εναλλακτικών, δηλαδή των επιμέρους εργαλείων και συνακόλουθα των διαμορφωμένων προτάσεων αξιολόγησης υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού ΑΠΕ.

## 6.2 Ανασκόπηση υφιστάμενων πλαισίων

Τα ζητήματα εκμετάλλευσης, αξιοπιστίας και βιωσιμότητας είναι πρωταρχικής σημασίας και δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τεχνολογιών για την υποκατάσταση των συμβατικών πηγών ενέργειας. Οι αξιολόγησης τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ έχει προχωρήσει πολύ σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, όταν θεωρούνταν αντικείμενο ενός στόχου, δηλαδή της μεγιστοποίησης της ενεργειακής παραγωγής με λογικό χρηματικό κόστος.

Οι οικονομίες κλίμακας και οι περιβαλλοντικές πτυχές της μετατροπής της ενέργειας, δηλαδή η αλλαγή του κλίματος, οι ατμοσφαιρικές εκπομπές κ.λπ., σε συνδυασμό με την εξάντληση των συμβατικών πόρων ενέργειας, προκάλεσαν μετατόπιση των προτεραιοτήτων και των στόχων.

Παρόλα αυτά, η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μερικές φορές καθυστερεί από τις αρχικές προσδοκίες, ενώ υποστηρίζεται έντονα ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν μπορούν από μόνες τους να διατηρήσουν το σημερινό επίπεδο υψηλής κατανάλωσης ενέργειας στις σύγχρονες κοινωνίες (Trainer, 1995).

Σε διεπιστημονικό επίπεδο έχει διαπιστωθεί ότι για την επιτυχή ανάπτυξη ενός έργου αξιοποίησης της ενέργειας από ΑΠΕ απαιτείται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση ικανή να καλύψει την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, τη βιωσιμότητα, ενώ παράλληλα να ενισχύει την προσπάθεια εξεύρεσης λύσεων σε περίπλοκα προβλήματα που περιλαμβάνουν τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα.

Αυτή η πολυπλοκότητα στην αντιμετώπιση των προβλημάτων περιλαμβάνει το στάδιο του σχεδιασμού, του ελέγχου, της λειτουργίας, της διαχείρισης, των προγραμματισμένων συντηρήσεων, των επισκευών και της εγκατάστασης, ζητήματα που συναντώνται σε κατασκευές που αναπτύσσονται στην ξηρά αλλά και στη θάλασσα-υπεράκτια.

Για τα υπεράκτια συστήματα, οι προβληματισμοί θα πρέπει επιπλέον να περιλαμβάνουν εκτός από την μεταβλητότητα των (variability) των ΑΠΕ ως πηγή ενέργειας, την ιδιαιτερότητα του θαλασσίου περιβάλλοντος, όπου οι συνθήκες λειτουργίας επηρεάζονται από την υγρασία και την αλατότητα, αλλά και ζητήματα όπως οι καιρικές συνθήκες και η προσβασιμότητα.

Τα ζητήματα και οι προβληματισμοί απαιτούν προσεγγίσεις οι οποίες προκύπτουν από διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Οι εμπλεκόμενοι σε αυτές είναι σχεδιαστές, κατασκευαστές, διαχειριστές, λειτουργοί και ωφελούμενοι που περιλαμβάνουν επενδυτές αλλά και τελικούς χρήστες του προϊόντος που παράγεται από τα συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ στη θάλασσα.

Μετά από την βιβλιογραφική επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε, στην ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ ανάδειξε καινοτόμες θεωρήσεις που αποκαλύπτουν ουσιαστική συνειδητοποίηση όσον αφορά τις κοινωνικοοικονομικές πτυχές της ώθησης της κοινωνίας προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον με την ευρεία χρήση των ΑΠΕ των τεχνολογιών αξιοποίησης ενέργειας.

Η χρήση μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία εδώ και αρκετές δεκαετίες κυρίως στον ενεργειακό σχεδιασμό παρέχοντας ένα έγκυρο μεθοδολογικό πλαίσιο για την αξιολόγηση, κατηγοριοποίηση και επιλογή ενεργειακών έργων και πολιτικών όπως έχει εφαρμοστεί σε διάφορες μελέτες από τους Siskos, Hubert, (1983), Roy, B., & Bouyssou, D. (1986), Jones et al, Barda et al, (1990), Georgopoulou et al, (1997), Pokharel, Chandrashekar, (1998), Gandibleux et. al. (1999), Mirrazavi et al, (2003). Ειδικότερα:

Οι Siskos, και Hubert (1983), εφαρμόζουν την πολυκριτηριακή μέθοδο απόφασης ELECTRE III για τη σύγκριση μακροπρόθεσμων εναλλακτικών ενεργειακών στρατηγικών.

Οι Lootsma, et. al. (1990) Εφαρμόζουν πολυκριτηρτιακές μεθόδους για την ικανοποίηση της εθνικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο πλαίσιο ενός χαμηλού, μεσαίου και υψηλού σεναρίου για την ανάπτυξη της εθνικής οικονομίας.

Σύμφωνα με τους Ramanathan & Ganesh (1995), η κατανομή των ενεργειακών πόρων είναι ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα απόφασης δομημένο στη βάση ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων και αναφέρουν ότι οι μέθοδοι Goal Programming (GP) και η Analytic Hierarchy Process (AHP) αποτελούν συχνά πρακτικές επίλυσης τέτοιων προβλημάτων.

Οι Pan, J., & Rahman, S. (1998). Χρησιμοποιούν την Multiattribute utility analysis στην αξιολογηση επέκτασης της ανάπτυξης ενεργειακών συστημάτων.

Οι Beccali et al. (2003), παρουσιάζουν μια εφαρμογή μεθοδολογίας λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που χρησιμοποιείται για αξιολόγηση ενός προγράμματος δράσης για την

αξιοποίηση των ανανεώσιμων ενεργειακών τεχνολογιών σε περιφερειακό επίπεδο. Γίνεται εφαρμογή για το νησί της Σαρδηνίας.

Οι Herva, et al, (2013), πραγματοποίησαν ανασκόπηση συνδυασμένων προσεγγίσεων και ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων για εταιρική περιβαλλοντική αξιολόγηση.

Οι Theodosiou, et al. (2015), μελέτησαν την ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών πτυχών διαχείρισης στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των ενεργειακών συστημάτων.

Οι Goh, et al. (2016). Διερεύνησαν την αιολική ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη τη συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου στη Μαλαισία.

Οι Abaei, et al. (2017). Ανέπτυξαν μια νέα μεθοδολογία βασισμένη στον κίνδυνο για τη λήψη αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων στις εφαρμογές θαλάσσιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Συνήθως, οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις μετριούνται με όρους οικονομικών δεικτών, όπως η απασχόληση και τα νομισματικά κέρδη, αλλά στην πραγματικότητα η ανάλυση όσον αφορά υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ σχετίζεται με μια σειρά πτυχών που περιλαμβάνουν κοινωνικά, πολιτιστικά, θεσμικά και περιβαλλοντικά ζητήματα (Domac et al., 2005 ) καθώς και τεχνολογικά, ασφάλειας και βιωσιμότητας (Silvestre, B. S. et. al.2017), (Optehostert, F. et. al. 2017).

Οι Ness et. al. (2007) καθορίζουν ότι "Ο σκοπός της αξιολόγησης, για την ακρίβεια της βιωσιμότητας εφαρμογών από τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ, είναι να παρέχεται στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων μια τεχνική αξιολόγησης που να περιλαμβάνει τα ολοκληρωμένα συστημάτα, το περιβάλλον και την κοινωνία, με βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προοπτικές προκειμένου να τους βοηθήσει να καθορίσουν ποιες ενέργειες πρέπει ή δεν πρέπει να πραγματοποιηθούν-εφαρμοστούν σε μια προσπάθεια να καταστεί μια απόφαση σε ένα δεδομένο πρόβλημα βιώσιμη ".

Μια μεγάλη ποικιλία δεικτών βιώσιμης ανάπτυξης και μεθοδολογιών αξιολόγησης της βιωσιμότητας παρουσιάζεται από τους Singh et. al. (2009). Εκεί προσδιορίστηκαν συνολικά 41 δείκτες σύμφωνα με τον αριθμό των αποδεικτών, την κλιμάκωση / εξομάλυνση, τη στάθμιση και την ομαδοποίηση. Εκτός από τις προσπάθειες για τη μέτρηση της βιωσιμότητας ως

ολοκληρωμένη προσέγγιση, οι περισσότερες περιπτώσεις εξετάζουν μόνο περιβαλλοντικές ή οικονομικές ή κοινωνικές πτυχές.

Σε αναθεωρημένες έρευνες έχουν εφαρμοστεί διάφοροι δείκτες στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που περιλαμβάνουν τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια όπως έχουν οριστεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επιτυχία της αξιολόγησης εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα των δεικτών για κάθε κριτήριο που μπορεί να αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα ή / και να εκπληρώνει τον στόχο.

Από τους Afgan, et. al. (2002), χρησιμοποιήθηκαν κριτήρια βιωσιμότητας (πόροι, περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά) για την επιλογή τεχνολογίας σε συστήματα παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ. Μια άλλη προσέγγιση παρουσιάστηκε από Barin, et. al. (2009) λαμβάνει υπόψη μόνο τα τεχνοοικονομικά κριτήρια για την αιολική, τη γεωθερμική, τη μικρής κλίμακας υδροηλεκτρική, και την ηλιακή ενέργεια. Οι τεχνικοί δείκτες είναι η περίοδος κατασκευής, η τεχνική διάρκεια ζωής, ο συντελεστής απόδοσης και η μέγιστη διαθεσιμότητα. Οι οικονομικοί δείκτες που αφορούν το κόστος επένδυσης, τις σταθερές και μεταβλητές λειτουργίες διαχείρισης, καθώς και το δείκτη προόδου. Ένας ακόμα πιο ολοκληρωμένος κατάλογος δεικτών, με πτυχές της βιωσιμότητας να ομαδοποιούνται σε τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια παρουσιάζεται από τους Kumar, et. al. (2017).

Η φύση των υπεράκτιων συστημάτων, απαιτεί η διαδικασία επιλογής των τεχνολογιών αξιοποίησης να βασίζεται σε διαφορετικά κριτήρια και δείκτες. Οι Barin et al. τα χώρισαν σε ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά με σκοπό τον καθορισμό την τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σενάριο ποιότητας ενέργειας (Barin, et. al. 2009). Οι ποιοτικοί δείκτες επικεντρώνονται στη διαχείριση του ενεργειακού φορτίου, την τεχνική ωριμότητα της τεχνολογίας και την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, με αντίστοιχα χαρακτηριστικά να είναι η ισορροπία κατανομής του φορτίου, διαθεσιμότητα ενέργειας, η εφεδρεία των συστημάτων ή η τυπική χρήση της κάθε διαθέσιμης τεχνολογίας.

Η προσέγγιση του δείκτη βιωσιμότητας πραγματοποιήθηκε από τους Singh, et. al. (2009). Στην έρευνα αυτή, χρησιμοποιήθηκε μια σταθμισμένη προσέγγιση για τον ποσοτικό προσδιορισμό κάθε δείκτη ανάλογα με τη σημασία του. Τα κριτήρια κυμαίνονταν από οικονομικές και

περιβαλλοντικές πτυχές, αλλά επίσης λαμβάνονται υπόψη δείκτες όπως η αξιοπιστία, η διάρκεια ζωής του συστήματος ή η αναλογία ενεργειακής πυκνότητας

Από τα ανωτέρω είναι σαφές ότι, υπάρχουν ορισμένα κοινά κριτήρια και δείκτες σε όλες τις περιοχές αξιολόγησης των συστημάτων και των χαρακτηριστικών που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε προβλήματα λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με ΑΠΕ. Επίσης είναι απαραίτητο να επιλέγεται ένα κατάλληλο σύνολο κριτηρίων βάσει του στόχου του σχεδιασμού.

## 6.3 Σχεδιασμός Πλαισίου

Για το σχεδιασμό ενός πλαισίου αξιολόγησης συστημάτων η διερεύνηση πρέπει να αποτελεί μια ολοκληρωμένη διαδικασία και όχι να είναι το αποτέλεσμα μιας τυχαίας επιλογής. Επίσης, οι περισσότεροι δείκτες που χρησιμοποιούνται για τα συστήματα ΑΠΕ βασίζονται σε περιπτώσεις από τη μελέτη χερσαίων συστημάτων (Ciang, et. al. 2008), συστημάτων για τεχνολογίες που αναπτύσσονται σε νησιωτικές περιοχές (Polatidis, et. al. 2006), είτε για συστήματα αιολικών πάρκων που διαφοροποιούνται από τη δομή υπεράκτιων κατασκευών που σχεδιάζονται για να εγκατασταθούν σε ειδικές περιοχές, όπως συμβαίνει με τις θαλάσσιες περιοχές μεταξύ νησιών ή κοντά σε ακτές.

Επομένως, είναι απαίτηση να διερευνηθούν πεδία αξιοπιστίας και αποδοτικότητας που να αντιστοιχούν σε υπεράκτια συστήματα, καθώς και η προσέγγιση αυτών των συστημάτων ως προβλήματα λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που να λαμβάνουν όποτε είναι απαραίτητο στοιχεία από την αξιολόγηση της αξιοπιστίας τους.

Επίσης, στο πλαίσιο της διερεύνησης σκόπιμο είναι να αξιολογηθεί:

- η πιθανότητα αξιοποίησης υβριδικών συστημάτων που εφαρμόζουν περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας,
- η πιθανότητα παραγωγής ενός προϊόντος, καθώς και
- η αυτόνομη λειτουργία των συστημάτων.

Παράδειγμα αποτελεί η πλωτή αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης, στην οποία η διερεύνηση επεκτείνεται σε συνδυασμούς συστημάτων παραγωγής ενέργειας και κατανάλωσής της, δημιουργώντας ολοκληρωμένα συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ (Lilas και Nikitakos, 2007).

Για προβλήματα σαν αυτά που περιεγράφηκαν στη μέχρι τώρα κατά τη διερεύνηση των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, η εφαρμογή τεχνικών για την αξιολόγηση και την ανάλυση της αξιοπιστίας των συστημάτων, όπως και οι τεχνικές ανάλυσης πολλαπλών κριτηρίων καθίστανται εποικοδομητικά εργαλεία στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, με το ακόλουθο *ερευνητικό πλαίσιο* απότοκο της θεωρητικής ανάλυσης και βιβλιογραφικής ανασκόπησης.

Ο σχεδιασμός του μεθοδολογικού πλαισίου αξιολόγησης υπεράκτιων δομών αξιοποίησης ΑΠΕ, έχει σα βάση την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της βελτιστοποίησης των δομών με τη χρήση τεχνικών αξιολόγησης συστημάτων, καθώς και την προσέγγιση προβλημάτων λήψης αποφάσεων των εναλλακτικών σεναρίων επίτευξης των εκάστοτε στόχων που επιδιώκονται, με πολυκριτηριακή ανάλυση.

Στόχος είναι η δημιουργία μιας *Εργαλειοθήκης (tool-kit) Μεθοδολογιών για τη Στήριξη στη λήψη Αποφάσεων (ΕΜΣΑ),* η οποία να εστιάζει στην επιλογή κατάλληλου εργαλείου για τη βελτιστοποίηση των υπεράκτιων συστημάτων όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στην αξιοποίηση του ενεργειακού δυναμικού ΑΠΕ. Μέσα από την προσέγγιση αυτή λαμβάνονται υπόψη τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια και πώς αυτά επηρεάζουν αλλά και επηρεάζονται από τις διαθέσιμες εναλλακτικές με ιδιαίτερη έμφαση στην αξιοποίηση των ΑΠΕ από υπεράκτιες κατασκευές.

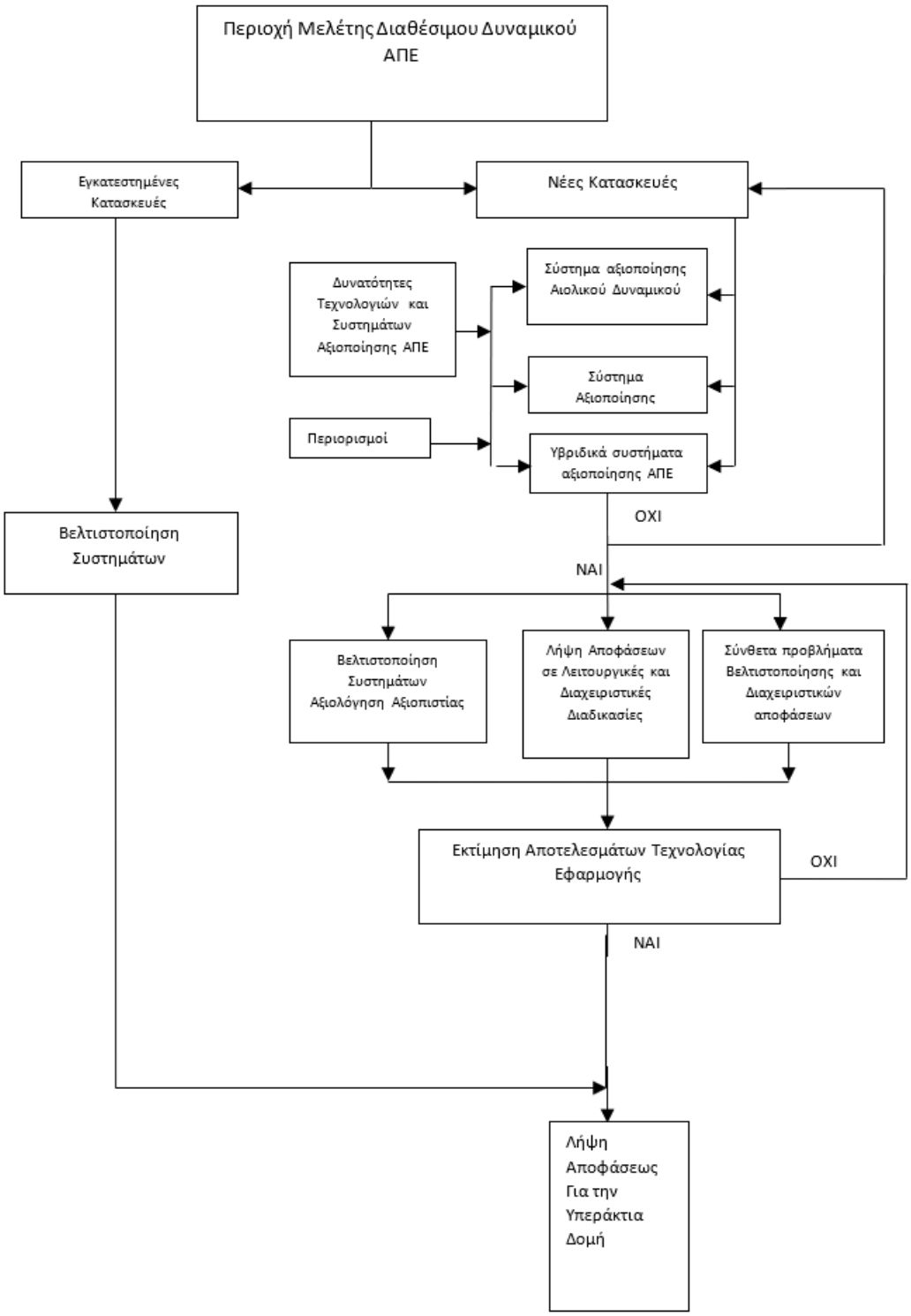
Περιγράφοντας το *μεθοδολογικό* πλαίσιο της διατριβής μπορεί προσδιοριστεί συνοπτικά ως:

- Ο *εντοπισμός των ερευνητικών ερωτημάτων και των προβλημάτων* που τίθενται από την λειτουργία ή την ανάπτυξη ενός συστήματος από τις διαθέσιμες τεχνολογίες για την αξιοποίηση των ΑΠΕ στο υπεράκτιο περιβάλλον. Επίσης, τον εντοπισμό ζητημάτων αξιοπιστίας και ασφάλειας που αποτελούν θέματα μείζονος σημασίας σε συνδυασμό με την ευρύτερη αποδοχή από το κοινωνικό σύνολο.
- Η *μοντελοποίηση της διαδικασίας στην ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων* αξιοποίησης ΑΠΕ, που περιλαμβάνει την ανάπτυξη μιας εργαλειοθήκης, η οποία ενσωματώνει ένα ευρύ φάσμα πολυκριτηριακών μεθόδων αλλά και τεχνικών αξιολόγησης της αξιοπιστίας των διαθέσιμων συστημάτων, ικανό να απαντά στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν προηγουμένως. Επιπλέων να ικανοποιεί το μεγάλο αριθμό τεχνολογικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών

και κοινωνικών, κριτηρίων και το συγκερασμό αντικρουόμενων απόψεων με τη βοήθεια πολυκριτηριακών μεθόδων.

- Η *εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου σε υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης* ΑΠΕ, οι δοκιμές και οι διαφορετικές περιοχές εφαρμογής του πλαισίου και σε άλλα συστήματα όπως τα πλοία όλων των τύπων και των κατηγοριών.
- Η *εξαγωγή συμπερασμάτων και ευρημάτων από το σύνολο* της έρευνας και προτάσεις για τη συνέχισή της.

Σύμφωνα με τη μελέτη του πλαισίου αξιολόγησης υπεράκτιων κατασκευών με ΣΑΔ-ΑΠΕ, στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η διαδικασία διερεύνησης της αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας-βελτιστοποίησης στη στήριξη λήψης αποφάσεων σε υπάρχουσες και σε νέες κατασκευές υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ που υιοθετείται για την έρευνα της διδακτορικής εργασίας.



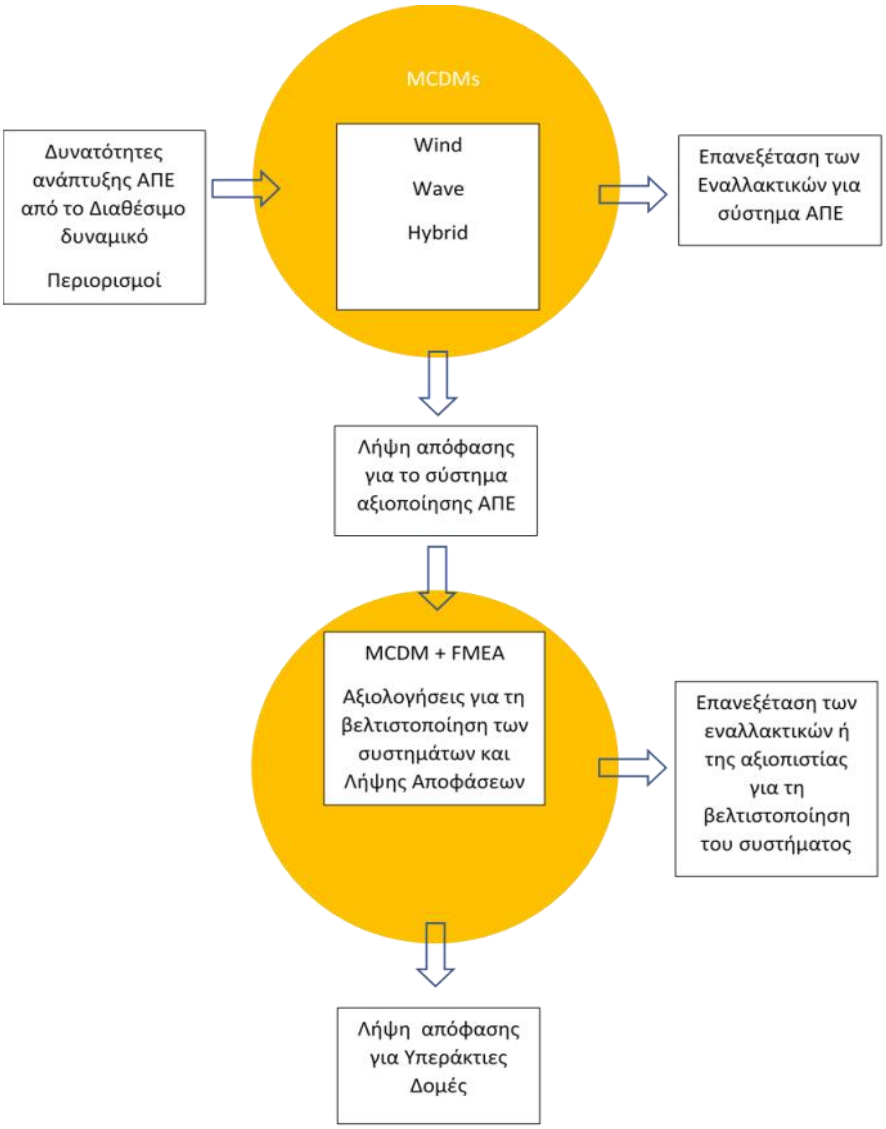

**Διάγραμμα 6.1 Αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ.**

Η προσέγγιση με τη δημιουργία της *Εργαλειοθήκης (tool-kit) Μεθοδολογιών για τη Στήριξη στη λήψη Αποφάσεων* σκοπό έχει να απαντά σε ερωτήματα που ενδέχεται να τεθούν στα πλαίσια της αξιολόγησης υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, όπως:

1. Η επαύξηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας ενός συστήματος, αξιοποιώντας την υφιστάμενες κατασκευές ΑΠΕ;
2. Την ανάπτυξη ενός καταλληλότερου συστήματος ανάλογα με τα δεδομένα του ενεργειακού δυναμικού ΑΠΕ της περιοχής. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, που περιέχουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς, να αξιολογηθεί η καταλληλότητα της τεχνολογίας που πρόκειται να αναπτυχθεί και με ποιο τρόπο.
3. Αν γίνει αποδεκτή (ΝΑΙ) να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του επιλεγμένου συστήματος και με βάση τις συνθήκες λειτουργίας να αξιολογηθούν εναλλακτικά προγράμματα συντήρησης και ελέγχου
4. Να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της τεχνολογίας αξιοποίησης ΑΠΕ και πώς επηρεάζεται η αξιοπιστία της υπεράκτιας κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τα εναλλακτικά σενάρια πώς μπορούν να βελτιώσουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, ενισχύοντας την υιοθέτηση των υπεράκτιων συστημάτων ως μέσα στην προσπάθεια για βιώσιμη ανάπτυξη

Τα βήματα που υιοθετούνται με τη δημιουργία της Εργαλειοθήκης (tool-kit) Μεθοδολογιών για τη Στήριξη στη λήψη Αποφάσεων αποτελούνται από:

1. Αξιολόγηση της αξιοπιστίας σε υφιστάμενες κατασκευές
2. Εκτίμηση των δυνατοτήτων ανάπτυξης νέων υπεράκτιων συστημάτων με βάση τις διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.
3. Αξιολόγηση της αξιοπιστίας στις μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων
4. Αξιολόγηση στη λήψη αποφάσεων σχετικά με προγράμματα συντήρησης και λειτουργικού ελέγχου υπεράκτιων συστημάτων με πειραματικές εφαρμογές των πολυκριτηριακών μεθοδολογιών στη λήψη αποφάσεων
5. Επιλογή Εναλλακτικών
6. Υποστήριξη των υπευθύνων ενσωματώνοντας εργαλεία αξιολόγησης στη λήψη αποφάσεων




**Διάγραμμα 6.2 Εφαρμογή τεχνικών αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας με ενοποιημένη πολυκριτηριακή ανάλυση στα πλαίσια της ΕΜΣΑ.**

Επομένως, στο πλαίσιο της διερεύνησης η εφαρμογή τεχνικών αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας στα πλαίσια της ΕΜΣΑ (Βλέπε Διάγραμμα 6.1) λαμβάνει χώρα:

- Σε εγκατεστημένες κατασκευές για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας με σκοπό την βελτιστοποίηση των συστημάτων
- Σε νέες κατασκευές, όπου γίνεται χρήση των μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης σε δύο διακριτά επίπεδα (Διάγραμμα 6.2). Τα δύο επίπεδα αφορούν :
  1. Εκτιμήσεις στη λήψη αποφάσεων για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας

2. Τη στήριξη λήψης αποφάσεων για τον έλεγχο και τη λειτουργία των συστημάτων σε συνδυασμό με την τεχνική αξιολόγησης υπό το πλαίσιο των μεταβλητών λειτουργικών συνθηκών και σε υβριδικές εφαρμογές με πολυκριτηριακή ανάλυση.

Στη διερεύνηση που αφορά την εκτίμηση της αξιοπιστίας εγκατεστημένων συστημάτων, η προσέγγιση αφορά την εξέταση των επι μέρους συστημάτων που αποτελείται μια υπεράκτια κατασκευή αξιοποίησης ΑΠΕ. Τις πιθανές προτάσεις για τη βελτιστοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος (Δάγκινης Νικητάκος , 2011), με περαιτέρω αξιολόγηση της αυτόνομης λειτουργίας του συστήματος (Δάγκινης Νικητάκος , 2012). Η αξιολόγηση οδηγεί σε λήψεις αποφάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν είτε κατά το σχεδιασμό του ολοκληρωμένου συστήματος, είτε να αποτελέσουν επιμέρους βελτιώσεις με μετατροπές.

Στην ερευνητική προσέγγιση ανάπτυξης νέων δομών:

Σε *πρώτο επίπεδο,* γίνεται ο προσδιορισμός των επιλογών που αφορούν τα διαθέσιμα συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ σε υπεράκτιες κατασκευές. Στο σημείο αυτό ενσωματώνονται δυνατότητες, κριτήρια και περιορισμοί, με σκοπό να εκτιμηθούν οι τεχνολογίες και οι δυνατότητες εφαρμογής τους, ενισχύοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το όφελος είναι σημαντικό, διότι δίνεται η ευχέρεια να προσδιορισθούν οι πραγματικές δυνατότητες ανάπτυξης των συστημάτων ΑΠΕ. Να εξεταστεί η συμβατότητα των προτεινόμενων στρατηγικών με τις συνολικότερες τεχνολογικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες, και να διασφαλιστεί η επιτυχής εφαρμογή των προτεινόμενων μεσοπρόθεσμων σχεδίων.

Στο *δεύτερο επίπεδο***,** πραγματοποιείται διερεύνηση των επιλογών που ενσωματώνουν τις εκτιμήσεις που έχουν τεθεί από το πρώτο επίπεδο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός ορθολογικού πλαισίου για την ενοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων με την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και τις πιθανές ενέργειες βελτιστοποίησης των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ. Στη συνέχεια διερευνάται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του ζητήματος της ανάπτυξης των δομών αξιοποίησης ΑΠΕ. Στην ουσία προτείνεται ένα πλαίσιο στρατηγικής στην ανάπτυξη αυτόνομων υπεράκτιων συστημάτων που μπορεί να προκύψουν με βάση την αξιολόγηση από μια σειρά κριτηρίων επιλογής. Έτσι η λήψη της απόφασης αποτελεί πλέον μια διεργασία ανάλυσης που περιλαμβάνει αξιολογήσεις για την αποδοτικότητα των συστημάτων με κριτήρια

που ενσωματώνουν τα τεχνολογικά, τα οικονομικά τα περιβαλλοντικά και τα κοινωνικά ζητήματα.

## 6.4 Δοκιμές –Βελτιώσεις

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις του ερευνητικού πλαισίου της διατριβής όπου με την εφαρμογή τεχνολογιών αξιοπιστίας και μεθοδολογιών πολυκριτηριακής ανάλυσης σε τεχνολογικά συστήματα διαφαίνονται οι δυνατότητες των εργαλείων, η ικανότητα και η αποτελεσματικότητά τους στην επίτευξη του στόχου για την ανάπτυξη της εργαλειοθήκης.

### 6.4.1 Διερεύνηση αξιοπιστίας σε εγκατεστημένα συστήματα

Η διερεύνηση της αξιοπιστίας σε εγκατεστημένα συστήματα προσεγγίζεται με τη μελέτη της Πλωτής Αυτόνομης Οικολογικής Μονάδας Αφαλάτωσης. Η ανάπτυξη αυτού του υπεράκτιου συστήματος αποτελεί ερευνητικό αντικείμενο που σχετίζονται με τη σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση από τις υπάρχουσες συμβατικές μορφές πηγών ενέργειας.

Η έρευνα από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των πηγών οδηγούν στη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι φιλικές προς το περιβάλλον και θα καλύψουν τις διάφορες ανάγκες των ανθρώπων. Η αξιοποίησή τους, παρουσιάζει μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης, ώστε να υλοποιούνται όλο και περισσότερα έργα αυτών των μορφών, συντελώντας με το τρόπο τους, όχι μόνο στην ενεργειακή υποστήριξη μιας περιοχής, αλλά και στην τεχνολογική πρόοδο και την γενικότερη ανάπτυξη μιας χώρας.

Πολλά κράτη ή και ομάδες κρατών, λαμβάνουν αποφάσεις για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με απώτερο σκοπό την κάλυψη ενός σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από το ενεργειακό δυναμικό των ΑΠΕ. Το κόστος, αντίστοιχα, της ανανεώσιμης ενέργειας ενδέχεται να μειωθεί σημαντικά, μέσα από την συνεχόμενη αξιοποίησή τους, καθιστώντας την οικονομικά ελκυστικότερη. Επίσης τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που οι ΑΠΕ παρουσιάζουν σε σχέση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας, με βασικότερη το σεβασμό προς το περιβάλλον, θέτουν γερά θεμέλια για μια βιώσιμη και φιλικά περιβαλλοντική ανάπτυξη.

Περαιτέρω, η αύξηση του πληθυσμού και η ταυτόχρονη αύξηση της βιομηχανίας δημιούργησε

και αύξηση της κατανάλωσης νερού καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη νέων πηγών παραγωγής πόσιμου νερού. Επίσης, ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί σε πολλές περιοχές και σε νησιά για την παραγωγή ενέργειας. Όμως, το κόστος της εγκατάστασης και της μεταφοράς της ενέργειας προς τη μονάδα μιας αφαλάτωσης είναι σημαντικά υψηλό, επειδή η απόσταση μεταξύ της μονάδας παραγωγής ενέργειας και της μονάδας κατανάλωσης είναι μεγάλη. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και οι μονάδες αφαλάτωσης σε πλωτές κατασκευές (π.χ. πλοία, φορτηγίδες), οι οποίες λειτουργούν με ενέργεια που παράγεται από πηγές, όπως το πετρέλαιο, οι οποίες δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον.

Για την αποτελεσματική και οικολογική αντιμετώπιση, έχει αναπτυχθεί για τα νησιά του Αιγαίου η πλωτή αυτόνομη μονάδα αφαλάτωσης με ΑΠΕ, η οποία ενσωματώνει ένα σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση (RO) σε συνδυασμό με ανεμογεννήτρια και βοηθητικά φωτοβολταϊκά πάνελ (Lilas και Nikitakos, 2007). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για την αφαλάτωση με αντίστροφη ώσμωση. Η υπεράκτια αυτή κατασκευή αποτελεί ένα από τα βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στο ερευνητικό πλαίσιο.

Με τη σύζευξη της μονάδας αφαλάτωσης με ανεμογεννήτρια σε μια πλωτή κατασκευή επιτυγχάνονται τα εξής πλεονεκτήματα:

- Μειωμένο κόστος σύνδεσης μεταξύ των μονάδων, δεδομένου ότι δεν απαιτείται να καλυφθεί μεγάλη απόσταση για τη μετάδοση της ενέργειας
- Δυνατότητα τοποθέτησης της μονάδας μακριά από βουνοκορφές και χωριά, ώστε να μην ενοχλεί τους κατοίκους
- Δεν παρεμβαίνει στο περιβάλλον με μόνιμες κατασκευές από σκυρόδεμα

Η πλωτή κατασκευή αποτελείται από τέσσερις περιφερειακούς κυλινδρικούς πλωτήρες και έναν κεντρικό που συνδέονται με κατάλληλο δικτύωμα, ώστε σε συνδυασμό με τη γεωμετρία του να ελαχιστοποιείται η επίδραση των κυμάτων σε αυτό. Μέσα στον κεντρικό πλωτήρα, στους τρείς ορόφους του, βρίσκονται εγκατεστημένα όλα τα συστήματα.

Για να επιτευχθεί αυτό το έργο αναπτύχθηκαν σημαντικές τεχνολογικές καινοτομίες:

- Υιοθέτηση καινοτόμων κατασκευαστικών προσεγγίσεων ώστε να επιτευχθεί η σύζευξη του πλωτού με ανεμογεννήτρια.

- Ενεργειακά και περιβαλλοντικά βέλτιστη διαδικασία αφαλάτωσης, χωρίς χρήση χημικών ουσιών.

- Σύστημα αυτόματου ελέγχου για την παρακολούθηση και τον τηλεχειρισμό της, μειώνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας.

- Ενεργειακά αυτόνομη μονάδα, καθώς δε χρησιμοποιεί καύσιμα και δεν είναι απαραίτητη η σύνδεση με το δίκτυο της ξηράς.

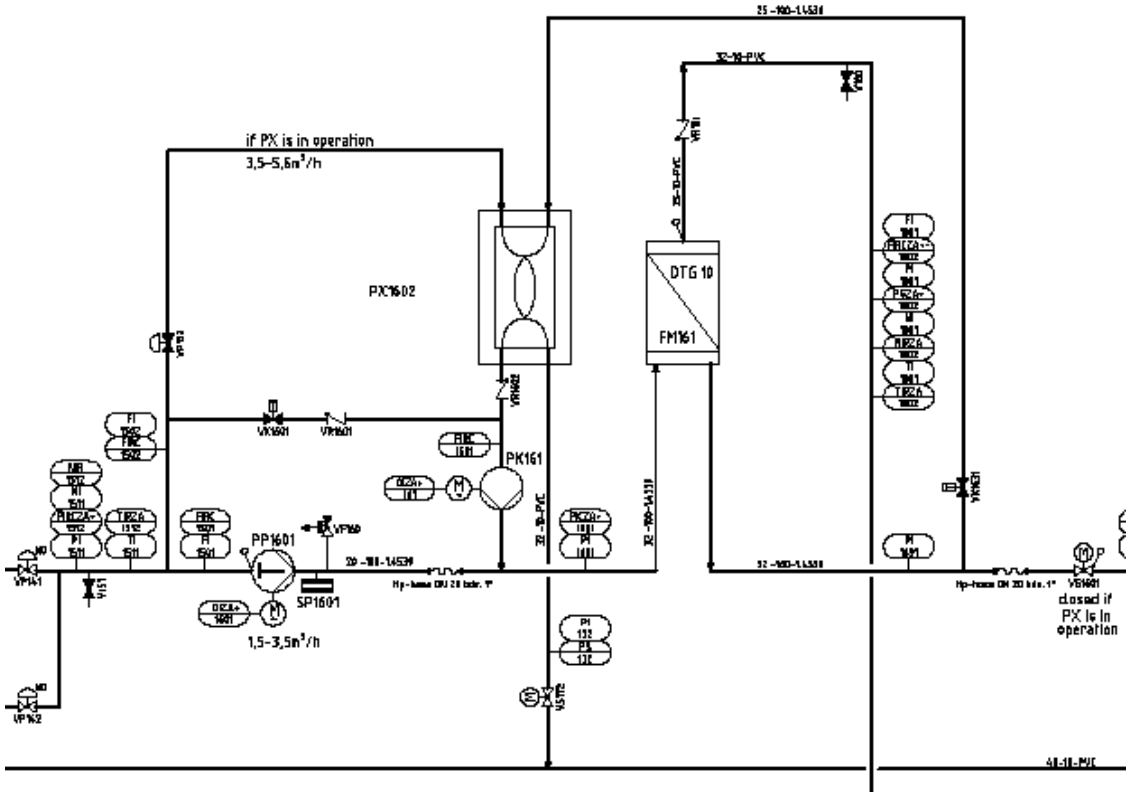
- Ρυμουλκούμενη κατασκευή ώστε να επιτρέπεται η μεταφορά της, παρέχοντας εναλλακτική λύση στην εξυπηρέτηση περισσοτέρων περιοχών.

- Βοηθητικό φωτοβολταϊκό σύστημα ως εναλλακτική πηγή ενέργειας.

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τη μονάδα αφαλάτωσης προέρχεται από την ανεμογεννήτρια δίχως την αξιοποίηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ή οποιουδήποτε άλλου είδους γεννήτριας diesel. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε μια πηγή ενέργειας χωρίς σταθερή συχνότητα και τάση λόγο διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ανέμου. Γι΄αυτό, τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του συστήματος διαθέτουν την ικανότητα να δημιουργούν ένα σταθερό κύκλωμα κατάλληλο για τη λειτουργία όλου του εξοπλισμού, παρά τις σημαντικές διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, η ανεμογεννήτρια παράγει και διαθέτει, μέσω προηγμένων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων μετατροπής της ενέργειας, την απαιτούμενη ισχύ για τη μονάδα της αντίστροφης όσμωσης.

Η αντίστροφη ώσμωση αφαλάτωσης έχει τροποποιηθεί προκειμένου να εξαλειφθεί η χρήση χημικών ουσιών στην επεξεργασία του εισερχόμενου θαλασσινού νερού. Επίσης, η διασπορά της άλμης στη θάλασσα δεν είναι επιζήμια για το περιβάλλον, διότι τα θαλάσσια ρεύματα παρασύρουν την άλμη συνεχώς. Επιπλέον, το σύστημα αντίστροφης ώσμωσης μπορεί να λειτουργεί με τη μεταβαλλόμενη διαθέσιμη ισχύ, σε ένα ευρύ φάσμα ροής και πίεσης για να μεγιστοποιηθεί η σημαντική ενεργειακή εκμετάλλευση αυξάνοντας την απόδοση. Σε όλες τις αντλίες η ενέργεια παρέχεται μέσω μετατροπέων, προκειμένου να προσαρμοστούν σταδιακά σε

όλες τις παραμέτρους λειτουργίας. Επιπλέον διαθέτει σύστημα ανάκτησης ενέργειας, το οποίο βασίζεται στην ανταλλαγή της πίεσης του πυκνού διαλύματος (άλμη) στο νερό με ένα περιστροφικού τύπου μηχάνημα παρέχοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση (σχήμα 6.1).




**Σχήμα 6.1 Υποδομή του συστήματος αφαλάτωσης.**

Κάθε υποσύστημα έχει τοπική μονάδα ελέγχου και όλες αυτές οι μονάδες δέχονται εντολές από ένα υψηλότερο επίπεδο, όπου ένας κύριος ελεγκτικός μηχανισμός συντονίζει όλες τις ενέργειες. Αυτό καθιστά το σύστημα αυτόνομο.

Τα κύρια τμήματα είναι

- η ανεμογεννήτρια
- ο ενεργός ανορθωτής
- ο ελεγκτής της ανεμογαννήτριας

- ο ελεγκτής της αντίστροφης ώσμωσης και
- το σύστημα ελέγχου από την ξηρά με υποστήριξη συστήματος SCADA.

Η διασύνδεση των διαφόρων συστημάτων περιλαμβάνει: σύνδεση χαμηλού επιπέδου ηλεκτρικών ψηφιακών και αναλογικών σημάτων, δίκτυο Modbus, Lonworks, TCR / IP, GPRS και σύνδεση VPN. Μέσω του κεντρικού ελέγχου επιτυγχάνεται η αυτόνομη λειτουργία, ενώ την ίδια στιγμή το σύστημα μπορεί να είναι , εφόσον αυτό απαιτείται, πλήρως τηλε-χειριζόμενο και να παρακολουθείται από απόσταση. Κατά τη διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας των κύριων σημείων ελέγχου πραγματοποιείται η διαχείριση ενέργειας, η αποθήκευση αντιγράφων ασφαλείας και η διαχείριση των εφεδρικών συστημάτων. Επιπρόσθετα, έχουν αναπτυχθεί συστήματα ασφάλειας για την παρακολούθηση των κρίσιμων παραμέτρων και μηχανισμοί για την ενεργοποίηση συναγερμών.

Η αυτονομία στο θαλάσσιο περιβάλλον, δημιούργησε την ανάγκη της ανάπτυξης ενός σύνθετου ελεγκτικού μηχανισμού ο οποίος αποτελείται από αισθητήρες και μηχανισμούς ασφαλείας.

Μελετώντας τη βελτίωση στην αξιοπιστία της μονάδας αφαλάτωσης, με τη χρήση των αυτοματισμών, η προσέγγιση παρουσιάζεται μέσω της εφαρμογής του μοντέλου ανάλυσης της αξιοπιστίας Failure mode and effects analysis (FMEA) όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.

Με το μοντέλο αυτό ποσοτικοποιείται η εκτίμηση των κινδύνων που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του συστήματος από καταγεγραμμένα δεδομένα βλαβών. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύονται οι επιπτώσεις από την εφαρμογή των αυτοματισμών στην αξιόπιστη λειτουργία της Υπεράκτιας Αυτόνομης και Οικολογικής Μονάδας Αφαλάτωσης.

Τα αποτελέσματα αποτυχίας από τα καταγεγραμμένα στοιχεία στην Πλωτή Αυτόνομη Οικολογική Αφαλάτωση εφαρμόζονται στο ενιαίο σύστημα και υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός προτεραιότητας κινδύνου σε σχέση με τη μέθοδο ανίχνευσης και την επίδραση στο σύστημα.

### 6.4.2 Διερεύνηση αξιοπιστίας με FMEA

Τα στοιχεία που αποτελείται το σύστημα αφαλάτωσης που τροφοδοτείται από την ενέργεια που παράγεται με την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού από την εγκατεστημένη ανεμογεννήτρια, καθώς και η λειτουργική διεργασία, εξετάστηκαν για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του. Αναλυτικά όπως παρουσιάζονται και στο διάγραμμα 6.3, είναι:

1. Ο αεροσυμπιεστής ο οποίος χρησιμοποιείται στην παραγωγή συμπιεσμένου αέρα για τις βαλβίδες που ελέγχουν τη ροή στο δίκτυο. (Air compressor)
2. Οι βαλβίδες (επιστόμια) οι οποίες ελέγχονται με συμπιεσμένο αέρα:
    - Βαλβίδα εισαγωγής θάλασσας (FV : Sea Water inlet valve),
    - Βαλβίδα μετά το φίλτρο No1 (VA1: Valve after No1 filter),
    - Βαλβίδα μετά το φίλτρο No2 (VA2: Valve After No2 filter),
    - Βαλβίδα ελέγχου εισαγωγής θαλάσσης στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας VA3 (Valve for feeding water to Energy Recovery Device),
    - Βαλβίδα ελέγχου ροής άλμης από την αντίστροφη ώσμωση για τη λειτουργία του συστήματος ανάκτησης ενέργειας (VA3)

3. Οι βαλβίδες που ελέγχονται από ηλεκτροκινητήρα (Motor valves) :

    - Βαλβίδα που ανοίγει και ελέγχει την πίεση όταν λειτουργεί το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (MV1),
    - Βαλβίδα η οποία είναι κλειστή όταν οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος είναι φυσιολογικές και ανοίγει όταν παρουσιαστεί βλάβη και σταματήσει το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (MV2)

4. Τα φίλτρα (Filters):

    - Feed water filter (FWF): Sea water inlet filter before feed pump,
    - Sand Filter (SF),
    - Filters 1,2 after sand filter (F1,F2).

5. Η αντλία τροφοδοσίας θαλάσσης του συστήματος (Sea water feed pump) (SWFP).

6. Η αντλία εμβολοφόρα υψηλής πιέσεως για τη λειτουργία της αντίστροφης ώσμωσης (High Pressure Pump) (HPP).

7. Το σύστημα προστασίας του δικτύου από τη διακύμανση της πιέσεως μετά την εμβολοφόρα αντλία (Excessive Pressure Fluctuation dumper (EPFD)),

8. Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (Energy Recovery Device (ERD)), που λειτουργεί με την πίεση από την εξαγωγή της άλμης της αντίστροφης ώσμωσης και τροφοδοτεί, παράλληλα με την εμβολοφόρα αντλία, με θάλασσα την αντίστροφη ώσμωση επιτυγχάνοντας την εξοικονόμηση ενέργειας.

9. Η βοηθητική αντλία για την αύξηση της πιέσεως της θαλάσσης από το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (Boosters pump (BPP)).

10. Η αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis (RO)) η οποία αποτελείται από δέκα στοιχεία-μεμβράνες που λειτουργούν παράλληλα.

Οι μηχανισμοί ελέγχου που χρησιμοποιούνται στο σύστημα (διάγραμμα 2) εξασφαλίζοντας την αποδοτική αυτόνομη λειτουργία είναι:

11. Οι πρεσοστάτες:

    - PSA: Ελέγχει τον αεροσυμπιεστή (Air compressor pressure switch)

    - PS1: Ελέγχει την πίεση της αντλίας υψηλής πίεσης, ενεργοποιείται από την πίεση της αντλίας και απενεργοποιείται όταν αυτή γίνει μικρότερη από 0.5 bar

    - PS2: Ελέγχει την πίεση λειτουργίας πριν την αντίστροφη ώσμωση

    - PS3: Ελέγχει την πίεση καθαρού νερού μετά την αντίστροφη ώσμωση και διακόπτει την λειτουργία του συστήματος όταν αυξηθεί πάνω από 3 bar

    - PS4: Ελέγχει την πίεση εξαγωγής της άλμης μετά την αντίστροφη ώσμωση και διακόπτει τη λειτουργία του συστήματος όταν η πίεση αυξηθεί πάνω από 9bar

12. Μετρητές πιέσεως (Pressure transmitter):

- PT: Μετρητής πιέσεως που συγκρίνει τη διαφορά της πιέσεως πριν και μετά το φίλτρο άμμου (Compares pressure before sand filter and after filter 1,2)

13. Θερμόμετρα που προστατεύουν τις μεμβράνες από την αύξηση της θερμοκρασίας , η οποία θα προκαλούσε καταστροφή τους :

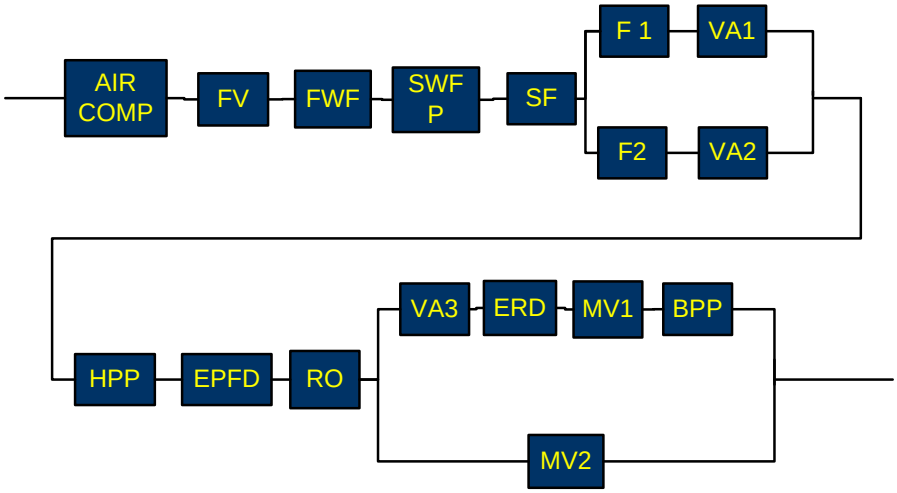
    - TI1: Θερμόμετρο στην εισαγωγή (feed water temperature).
    - TI2: Θερμόμετρο στην εξαγωγή του καθαρού νερού (permeate water temperature).

14. Μετρητές αλατότητας-μέσω αγωγιμότητας (Conductivity indicators):

    - NI1: Μετρητής στην εισαγωγή θαλάσσης (inlet water conductivity meter).
    - NI2: Μετρητής μετά την αντίστροφη ώσμωση (after RO conductivity meter)

15. Ανιχνευτές ροής (Flow indicators):

    - FI1: Ανιχνευτής ροής θαλάσσης στην εισαγωγή (inlet water flow indicator)
    - FI2: Ανιχνευτής ροής μετά το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (flow indicator after REC (Recovery Energy Device))
    - FI3: Ανιχνευτής ροής στην εξαγωγή του καθαρού νερού (flow indicator at pure water line)




**Διάγραμμα 6.3 Το λειτουργικό σύστημα της αφαλάτωσης χωρίς αυτοματισμούς ελέγχου.**

Το λειτουργικό διάγραμμα 6.3, που παρουσιάζεται ως ένα λειτουργικό block diagram με τα

στοιχεία σε παράλληλη διάταξη και σε σειρά ανάλογα με τη λειτουργική διαδικασία, έχει ως εξής:

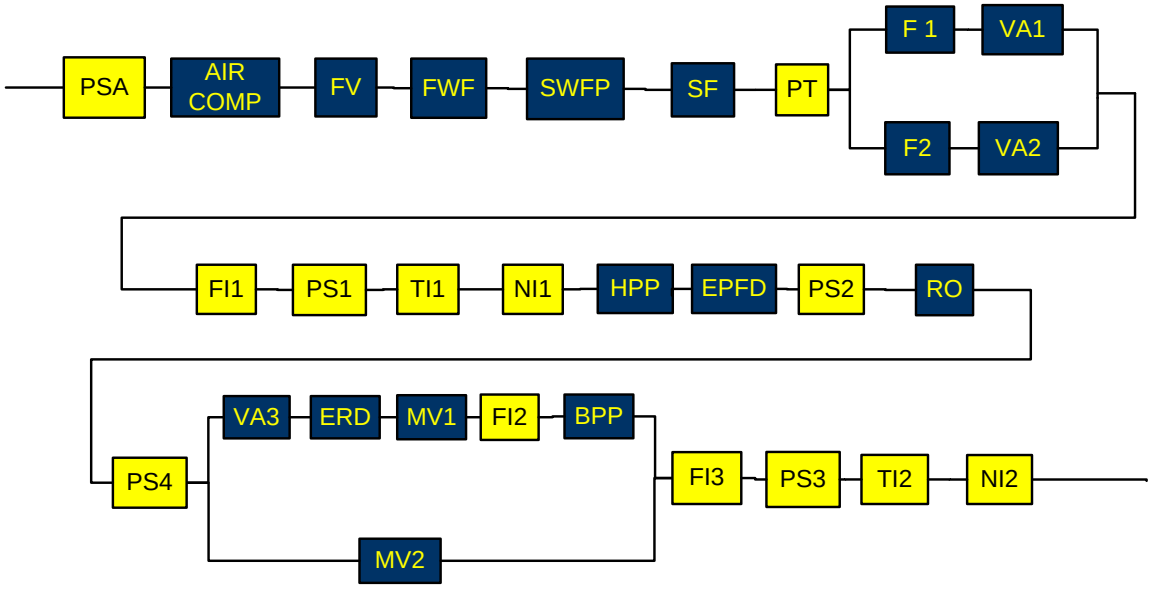
- Αρχικά πρέπει να λειτουργεί ο αεροσυμπιεστής (AIR. COMP.), για να ανοίξει η βαλβίδα θαλάσσης (FV) που παρέχει θάλασσα μέσω του φίλτρου (FWF) στην αντλία (SWFP).
- Στη συνέχεια μετά την αντλία η θάλασσα διέρχεται από το φίλτρο άμμου (SF), από τα φίλτρα (F1 & F2) και τα επιστόμια (VA1 & VA2). Τα φίλτρα (F1 &F2) και τα επιστόμια μπορούν να λειτουργούν εναλλάξ ή παράλληλα μέσω των επιστομίων (VA1 & VA2).
- Ακολουθεί η τροφοδοτική αντλία υψηλής πίεσης (HPP) της αντίστροφης ώσμωσης (RO), μέσω του συστήματος προστασίας από διακύμανσης πιέσεως του δικτύου (EPFD) για την παροχή με θάλασσα της αντίστροφης ώσμωσης (RO) και την τελική παραγωγή καθαρού νερού.
- Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας (ERD) λειτουργεί παράλληλα με την εμβολοφόρα αντλία (HPP), χωρίς να επηρεάζει την λειτουργία της αντλίας υψηλής πίεσης (HPP), διότι μπορεί να υπάρχει ροή προς την αντίστροφη ώσμωση από τη βαλβίδα MV2, άρα και παραγωγή νερού αν για οποιαδήποτε λόγο διακοπεί η ροή θάλασσας στο παράλληλο σκέλος VA3, ERD, MV1, BPP.

Η παρουσίαση των στοιχείων στο διάγραμμα του συστήματος παρέχει την πληροφορία ότι αν ένα στοιχείο για οποιαδήποτε λόγο δεν λειτουργεί η παραγωγή του νερού από την ώσμωση διακόπτεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διακοπή της τελευταίας παράλληλης σύνδεσης επηρεάζει την παραγωγή νερού μόνο η βαλβίδα MV2 που διακόπτει όλο το σύστημα, ενώ με τη διακοπή των VA3, ERD & BPP αυξάνεται μόνο η κατανάλωση ενέργειας.

Στο λειτουργικό block diagram που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.4 η σειρά είναι η ίδια αλλά στο σύστημα προστίθενται ο πρεσσοστάτης του αεροσυμπιεστή (PSA), ο μετρητής της πιέσεως στο δίκτυο (PT), το ροήμετρο (FI1), ο πρεσσοστάτης μετά την τροφοδοτική αντλία (PS1), ο θερμοστάτης (TI1), ο μετρητής αλατότητας (NI1), ο πρεσσοστάτης (PS2) μετά το στοιχείο προστασίας από διακυμάνσεις της πιέσεως, ο πρεσσοστάτης εξαγωγής της αντίστροφης ώσμωσης (PS4), το ροόμετρο (FI3), ο πρεσσοστάτης (PS3), ο θερμοστάτης (TI2), και ο μετρητής αλατότητας (NI2) στην εξαγωγή του παραγόμενου νερού από την αντίστροφη ώσμωση. Αν οποιοδήποτε στοιχείο από τους ελεγκτικούς μηχανισμούς δεν λειτουργεί,

διακόπτεται η παραγωγή νερού από το σύστημα.

Όπως και στο λειτουργικό σύστημα χωρίς αυτοματισμούς το ροήμετρο (FI2) στην παράλληλη σύνδεση δεν επηρεάζει λειτουργικά το σύστημα αλλά αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας διότι διακόπτεται η λειτουργία του συστήματος ανάκτησης ενέργειας και όλη η ενέργεια για την παραγωγή καταναλώνεται από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια.




**Διάγραμμα 6.4 Το λειτουργικό σύστημα της αφαλάτωσης με την προσθήκη αυτοματισμών ελέγχου.**

Με τις πληροφορίες από τα καταγεγραμμένα στοιχεία δημιουργήθηκαν οι πινάκες (4και 5). Σε αυτά παρουσιάζονται μόνο τα στοιχεία που εμφάνισαν βλάβη στο διάστημα μελέτης κατά τη λειτουργία του συστήματος. Τα υπόλοιπα στοιχεία επειδή δεν παρουσίασαν κάποια βλάβη, δεν επηρεάζουν τη μελέτη για τον υπολογισμό του RPN, γι' αυτό και παραλείπονται από τους πίνακες αυτούς.

Οι αριθμητικές τιμές Severity, Occurrence, Detection, (παράρτημα 2) των μηχανημάτων που παίρνουν μέρος στη λειτουργική διαδικασία είναι τα ίδια και στους δυο πίνακες διατηρώντας τον ίδιο βαθμό σοβαρότητας για το σύστημα σε περίπτωση που διακοπεί η λειτουργία τους.

Οι αριθμητικές τιμές σοβαρότητας *Severity* σε κάθε ένα μηχάνημα έχουν δοθεί σε σχέση με το

είδος βλάβης που μπορεί να προκληθεί στο ίδιο το στοιχείο, το κόστος επισκευής ή αποκατάστασης της βλάβης, την διαθεσιμότητα νέου ή ανταλλακτικού, το χρόνο επισκευής, το χρόνο που θα μείνει το σύστημα εκτός λειτουργίας . Με τα ίδια κριτήρια δίνονται οι τιμές Severity και στα πρόσθετα ασφαλιστικά και ελεγκτικά στοιχεία του πίνακα 6.1.

Η συχνότητα βλαβών *Occurrence* είναι σύμφωνα με τα δεδομένα στο διάστημα λειτουργίας της πλωτής αυτόνομης μονάδας αφαλάτωσης.

Οι τιμές ανίχνευσης *Detection* μεταβάλλονται στους πίνακες διότι η πιθανότητα να διαφύγει την έγκαιρη ανίχνευση ένα λειτουργικό στοιχείο όταν εγκαθίστανται οι ελεγκτικοί μηχανισμοί είναι μικρότερη.

**Πίνακας 6.1 Συνολικός Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN) σε απλό σύστημα αφαλάτωσης χωρίς ελεγκτικούς μηχανισμούς.**

| System part | Function | Failure mode | S (Severity rating) | Cause(s) of failure | O (Occurrence rating) | CRIT (Critical charasteristic) =SxO | Detection method/ Current controls | D (Detection rating) | RPN (Risk priority number) SxOXD | End effect on product or Other Systems |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Air compressor | supply air to open air motivated valves | air compressor no rotation or no air supply | 9 | electrical or mechanical failure | 3 | 27 | observe at system press air | 3 | 81 | no start the hole desalination system |
| (FWF): Sea water inlet filter before feed pump | clean & supply sea water | no water across filter | 4 | dirty filter | 1 | 4 | no water to SWFP | 4 | 16 | no start the whole desalination system |
| Sea water feed pump (SWFP) | supply sea water | feed pump no rotation or no water supply | 8 | electrical or mechanical failure | 1 | 8 | no water to SF | 5 | 40 | no start the whole desalination system |
| High Pressure Pump (HPP) | supply sea water to RO | HPP pump no rotation | 8 | electrical or pump failure/ belt broken | 3 | 24 | observe to RO no water | 4 | 96 | no work RO & ERD |
| Reverse Osmosis (RO) | clean sea water to potable | mebrane fail | 9 | ruins or dirty membranes | 5 | 45 | test and observe potable water | 4 | 180 | no drincable water orno work ERD |
| Boosters pump (BPP) | increase the press of water supplied from ERD | BPP pump no rotation | 7 | electrical or mechanical failure | 4 | 28 | observe no water disharge | 3 | 84 | no start RO & ERD |
| | | | | | | | TOTAL RPN | | 497 | |

**Πίνακας 6.2 Συνολικός Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (RPN) στο αυτόνομο σύστημα αφαλάτωσης με ελεγκτικούς μηχανισμούς.**

| System part | Function | Failure mode | S (Severity rating) | Cause(s) of failure | O (Occurrence rating) | CRIT (Critical charasteristic) =SxO | Detection method/ Current controls | D (Detection rating) | RPN (Risk priority number) SxOXD | End effect on product or Other Systems |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Air compressor | supply air to open air motivated valves | air compressor no rotation or no air supply | 9 | electrical or mechanical failure | 3 | 27 | PSA | 1 | 27 | no start the whole desalination system |
| PSA (Pressure Air Switch ) | observe air pressure supply to valves and EPFD | fail to observe the pressure decrease | 7 | defective PS | 1 | 7 | observe from control panel | 1 | 7 | no valves work, fluctuation on system |
| (FWF): Sea water inlet filter before feed pump | clean & supply sea water | no water across filter | 4 | dirty filter | 1 | 4 | FI1,PS1 | 2 | 8 | no start the whole desalination system |
| Sea water feed pump (SWFP) | supply sea water | feed pump no rotation or no water supply | 8 | electrical or mechanical failure | 1 | 8 | FI1,PS2 | 1 | 8 | no start the whole desalination system |
| High Pressure Pump (HPP) | supply sea water to RO | HPP pump no rotation | 8 | electrical or pump failure/ belt broken | 3 | 24 | PS2 | 1 | 24 | no work RO & ERD |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reverse Osmosis (RO) | clean sea water to potable | mebrane fail | 9 | ruins or dirty membranes | 5 | 45 | PS3, PS4, NI2, FI3 | 1 | 45 | no drincable water or no work ERD |
| Boosters pump (BPP) | increase the press of water supplied from ERD | BPP pump no rotation | 7 | electrical or mechanicalfai lure | 4 | 28 | PS2 | 1 | 28 | no start RO & ERD |
| FI3: flow indicator at pure water line | observe flow rate | fail to observe flow rate | 6 | dirty FI3 defective FI3 | 2 | 12 | PS3, observe control panel | 1 | 12 | worng mesures |
| PS3: Permeate water press stop plant above 3 bar | observe potable water press | fail to observe pressure rise | 9 | defective PS3 | 1 | 9 | FI3, PS4, observe of Control panel | 1 | 9 | RO work without correct press |
| TI2: permeate water temperature | observe temperatur of permeate water | fail to observe temperature rise | 9 | defective TI3 | 1 | 9 | observe from control panel | 1 | 9 | RO work with high temperatur e |
| NI2: inlet water conductivity meter | observe water salinity | fail to observe water salinity rise | 9 | defective NI2, dirty NI2 | 1 | 9 | observe from control panel | 1 | 9 | worng mesures |
| | | | | | | | | TOTAL RPN | 186 | |

Τα αποτελέσματα από τη μελέτη και την επεξεργασία των δεδομένων παρέχουν πληροφορίες οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος. Συγκρίνοντας στους πίνακες τις τιμές που λαμβάνουν τα RPN, μεταξύ των δύο συστημάτων, δηλαδή του συστήματος χωρίς αυτοματισμούς και του συστήματος με αυτοματισμούς, ο ολικός αριθμός βλαβών, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού εξαρτημάτων, αυξάνεται. Όμως η παρουσία των αυτοματισμών έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η πιθανότητα διαφυγής (detection) μίας βλάβης. Αντίστοιχα με τη μείωση της πιθανότητας διαφυγής μιας βλάβης μειώνεται ο αριθμός προτεραιότητας κινδύνου σε κάθε τμήμα του συστήματος χωριστά, παρέχοντας πιο αποδοτικό έλεγχο της εγκατάστασης.

Στη μελέτη των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της FMEA και της επίδρασης στην αξιοπιστία του συστήματος από τις ενέργειες βελτιστοποίησης, διερευνάται η μεταβολή που προκαλείται στο ρυθμό βλαβών (λ) που δίνεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{failures}{t} \qquad (6.1)$$

και την αξιοπιστία του συστήματος (R) που δίνεται ως

$$R_{system}{}^{(t)} = e^{-\lambda_{system}{}^{(t)}} \qquad (6.2)$$

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης με βάση τα αναπτυγμένα block diagrams για τις δύο εναλλακτικές των διαγραμμάτων (1 και 2) είναι:

$$\lambda_{system}{}^{(t)} = 6{,}27854 * 10^{-4}\ (\beta\lambda\acute{\alpha}\beta\varepsilon\varsigma/t) \qquad (6.3)$$

$$R_{system} = e^{-\lambda_{system}} = 0{,}999372 \qquad (6.5)$$

$$\lambda'_{sytem}{}^{(t)} = 7{,}99087 * 10^{-4} \quad (\beta\lambda\acute{\alpha}\beta\varepsilon\varsigma/t) \qquad (6.7)$$

$$R'_{system} = e^{-\lambda'_{system}{}^{(t)}} = 0{,}999201 \qquad (6.8)$$

όπου $R_{system}$ και $\lambda_{system}$ είναι η αξιοπιστία και ο ρυθμός βλαβών αντίστοιχα του συστήματος

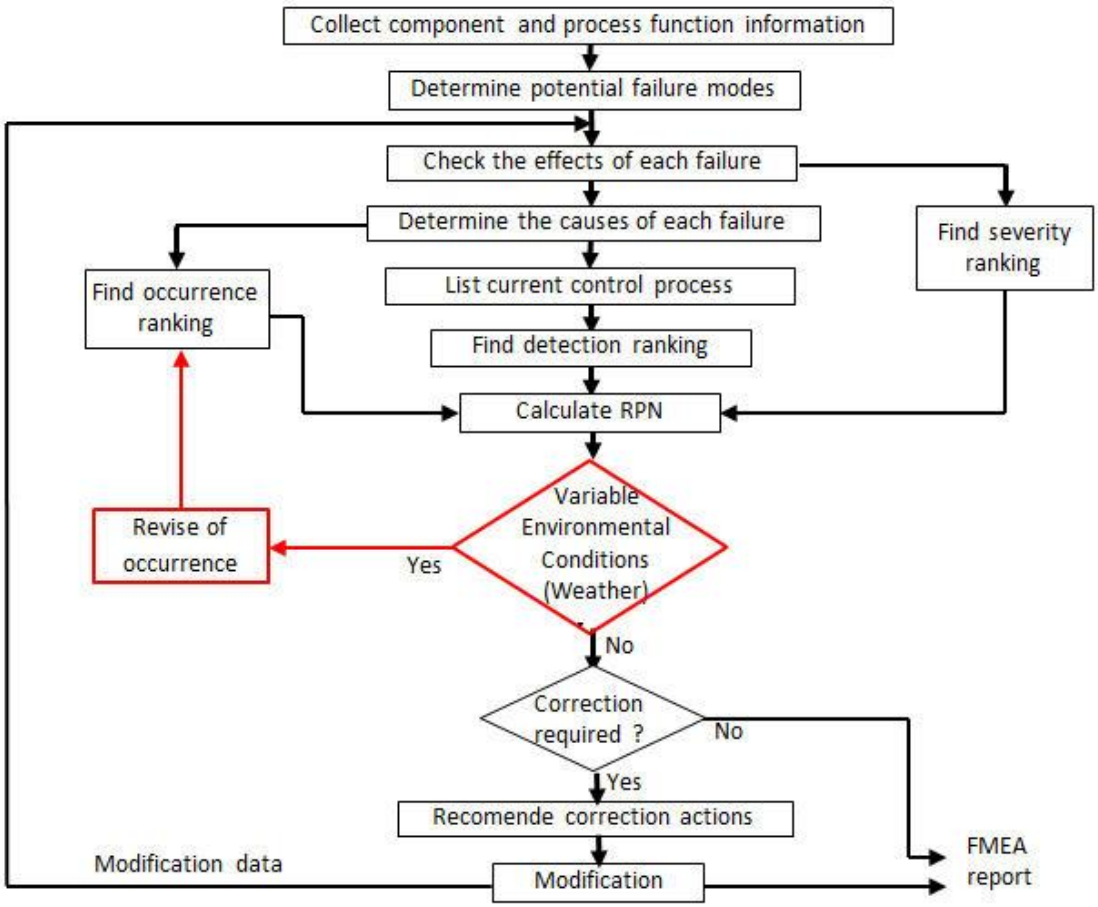
χωρίς ελεγκτικούς μηχανισμούς, ενώ αντίστοιχα $R'_{system}$ και $\lambda'_{system}$ με ελεγκτικούς μηχανισμούς.

Συμπερασματικά, παρατηρώντας τα αποτελέσματα φαίνεται ότι, αν και στην επιλεγμένη λύση σχεδιασμού με τα στοιχεία ασφαλείας του συστήματος η αξιοπιστία (reliability) μειώνεται ελαφρώς, σημαντικό είναι ότι παρατηρείται μείωση του κινδύνου (risk) το οποίο φαίνεται και από τη διαφοροποίηση του ολικού RPN μεταξύ των δύο συστημάτων, όπως προσδιορίζονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με FMEA. Η διαφοροποίηση του κινδύνου όμως αποτελεί σημαντικό παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τα συστήματα που λειτουργούν αυτόνομα στο ιδιαίτερο θαλάσσιο περιβάλλον, οπότε η ανάλυση με FMEA παρέχει πληροφορίες που έχουν θετικό αντίκτυπο στην βελτίωση του συστήματος.

### 6.4.3 Αξιολόγηση αξιοπιστίας υπό μεταβλητές περιβαλλοντικές συνθήκες

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας για μεταβλητές καιρικές συνθήκες στα υπεράκτια αυτόνομα συστήματα και οι εκτιμήσεις που πρέπει να εξεταστούν σχετικά με τις διορθωτικές ενέργειες, μπορούν να διερευνηθούν με την εφαρμογή της FMEA και να προκύψουν συμπεράσματα με βάση τους αριθμούς προτεραιότητας κινδύνου. Τα αποτελέσματα αυτής της εξέτασης μπορεί να παρέχουν πολύτιμες εναλλακτικές λύσεις προτεραιότητας και την ευκαιρία βελτίωσης της αξιοπιστίας και της ασφάλειας ενός αυτόνομου υπεράκτιου συστήματος.

Η διαδικασία για τη διεξαγωγή του FMEA μπορεί να χωριστεί σε διάφορα στάδια, όπως εξηγείται λεπτομερώς από τους Anand, et. al. (2003), Garcia, et. al. (2011), Saigal, et. al. (2007). Ωστόσο, για να επιτευχθεί ο στόχος της αξιολόγησης και των διορθωτικών ενεργειών, στο διάγραμμα 6.5 προτείνεται μια τροποποίηση στην παραδοσιακή διαδικασία της FMEA.




**Διάγραμμα 6.5 Προτεινόμενη τροποποίηση στη διεργασία FMEA, (Dagkinis et. al. 2013).**

Η έρευνα σε αυτό το πεδίο, είναι τα αποτελέσματα της ανάπτυξης της FMEA πώς μπορούν να οδηγήσουν σε εκτίμηση ενεργειών οι οποίες πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να αποφευχθεί ή να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα αποτυχιών και να δοθεί προτεραιότητα ξεκινώντας από εκείνη που έχει τη μεγαλύτερη σοβαρότητα για το σύστημα (Villemeur, et. al. 1992).

Η FMEA, βοηθάει στην επιλογή διορθωτικών ενεργειών που μειώνουν τις σωρευτικές επιπτώσεις των συνεπειών (κινδύνων) στον κύκλο ζωής από βλάβες των συστημάτων. Επίσης, τεκμηριώνει τις τρέχουσες γνώσεις και ενέργειες που μπορεί να γίνουν στην αντιμετώπιση των κινδύνων που παρουσιάζονται από αποτυχίες στα συστήματα, και η τεκμηριωμένη γνώση δύναται να αποτελέσει πηγή που θα χρησιμοποιηθεί στις προσπάθειες για συνεχή βελτίωση.

Η προτεινόμενη τροποποίηση της FMEA αναφέρεται, στην επαναξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη τις Μεταβαλλόμενες Περιβαλλοντικές Συνθήκες και την εκτίμηση μιας νέας αξιολόγησης

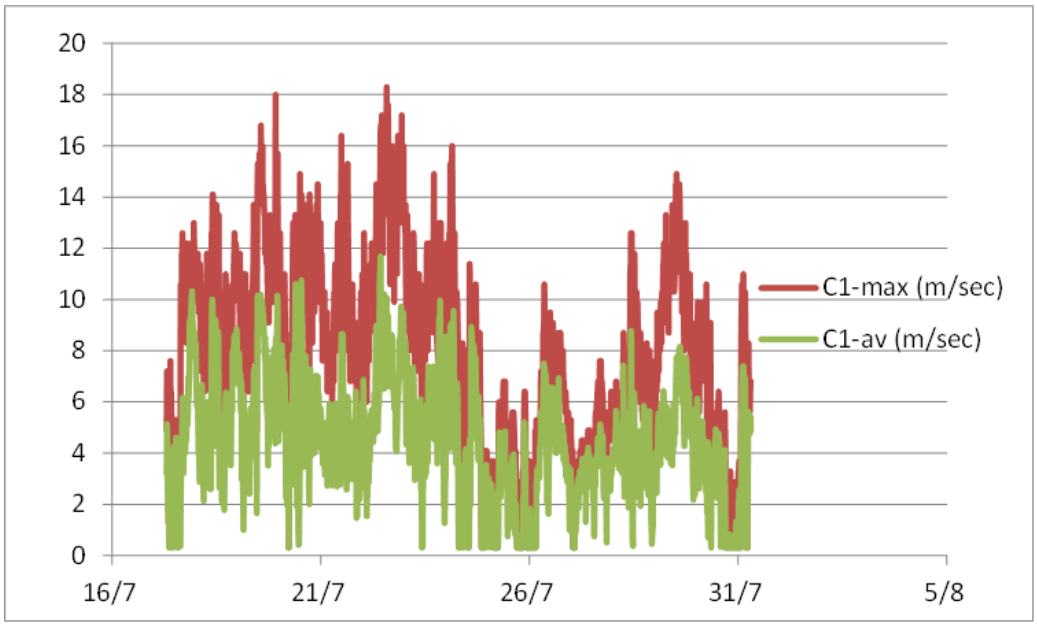
της πιθανότητας εμφάνισης περιστασιακών και την ανίχνευσή τους. Αυτό σημαίνει ότι, εάν οι καιρικές συνθήκες στην περιοχή της θέσης εγκατάστασης της κατασκευής δεν παρουσιάζουν υπερβολικές διακυμάνσεις, η διαδικασία κατά την αξιολόγηση ακολουθεί τη διαδρομή που εμφανίζεται στο διάγραμμα μέσω των διορθωτικών ενεργειών. Έπειτα, ακολουθώντας τις συνιστώμενες διορθωτικές ενέργειες και τροποποιήσεις, όπου αυτό απαιτείται, εκτελείται η ανάλυση μέχρι να ολοκληρωθεί η έκθεση FMEA.

Στην περίπτωση που υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της ταχύτητας του άνεμου ή οι καιρικές συνθήκες δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν και υπό την προϋπόθεση ότι για τη συγκεκριμένη περιοχή, από ιστορικά δεδομένα, αναμένεται υπερβολική διάρκεια σοβαρών καιρικών φαινομένων, η πιθανότητα εμφάνισης πρέπει να επανεκτιμηθεί πριν εφαρμοστεί το επόμενο βήμα των διορθωτικών ενεργειών. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 6.5, το πραγματικό πεδίο εφαρμογής της τροποποίησης στην διαδικασία της FMEA, είναι να επανεκτιμηθούν οι προτεραιότητες κινδύνου για την αξιολόγηση της τιμής του RPN και η επίδραση των μεταβλητών καιρικών συνθηκών με περαιτέρω μελέτη των επιπτώσεων από τις αποτυχίες στην αξιολόγηση της εμφάνισης των συμβάντων.

Η αξιολόγηση του κινδύνου, με βάση το νέο RPN, προσδιορίζει μια στρατηγική δράσεων βασισμένη σε προκαθορισμένες περιγραφές ενεργειών για τις κατηγορίες κινδύνου. Για παράδειγμα:

- για μικρούς κινδύνους, δεν γίνεται καμία ενέργεια.
- για μέτριο κίνδυνο, μπορεί να αναληφθεί κάποια ενέργεια μετριασμού των κινδύνων
- για υψηλό κίνδυνο, πρέπει να πραγματοποιηθούν διορθωτικές ενέργειες, και
- για κρίσιμες καταστάσεις με πολύ μεγάλο κίνδυνο, ακολουθούνται διορθωτικές ενέργειες οι οποίες πιθανόν να απαιτούν-προσδιορίζουν εκτεταμένες αλλαγές στη διαδικασία.

Η εφαρμογή της τροποποιημένης FMEA δεν προκαλούνται μεταβολές στο σχεδιασμό ενός υφιστάμενου προϊόντος ή του μηχανήματος, οπότε για κάθε αποτυχία η τιμή της σοβαρότητας παρέμεινε σταθερή, ενώ οι διορθωτικές ενέργειες μεταβάλλουν - αυξάνοντας ή μειώνοντας - μόνο τις τιμές εμφάνισης και ανίχνευσης των αποτυχιών.




**Σχήμα 6.2 Παράδειγμα μέγιστης και μέσης ταχύτητας ανέμου σε διαστήματα 10 λεπτών για δύο εβδομάδες.**

Από την ανάλυση των τρόπων αστοχίας και των επιπτώσεων, με δείγμα των διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου που επιδρά στην λειτουργικότητα του συστήματος στην σχήμα 6.2, τα αποτελέσματα των παραδοσιακών RPN τροποποιούνται μετά την επανεκτίμηση του περιστατικού. Το νέο RPNv που παράγεται από τους υπολογισμούς, δίνει διαφορετικές τιμές στην προτεραιότητα του κινδύνου RPN (Dagkinis και Nikitakos, 2012).

Η ανάλυση με την εφαρμογή της τροποποίησης που προτείνεται κατά την ανάλυση με FMEA και λαμβάνει υπόψη τις μεταβλητές καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μια περιοχή παρουσιάζει το ακόλουθο συμπέρασμα. Η αξιολόγηση συμβάντων όσο και την προτεραιότητα του κινδύνου σε σύγκριση με τις τιμές λάμβαναν πριν την τροποποίηση, επηρεάζονται. Δηλαδή, μια αποτυχία και ο κίνδυνος προτεραιότητας που ήταν ίσος ή μικρός μεταξύ των συνιστωσών ή των διαδικασιών, αποκτά μια νέα τιμή, η οποία είναι πιο κρίσιμη για την αποδοτικότητα του συστήματος.

Επομένως, η στρατηγική μιας βελτίωσης που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της προσέγγισης με τροποποιημένη FMEA επηρεάζει τις εκτιμήσεις των συνιστομένων ενεργειών που αποσκοπούν στη μείωση των επιμέρους RPN και του ολικού επιπέδου κινδύνου του

συστήματος. Με την ανάλυση αποτυχίας και επιπτώσεων (FMEA) που ερευνάται, επιτυγχάνεται ο εντοπισμός δυνητικών ή πραγματικών συνθηκών βλάβης και εντοπίζονται διορθωτικές ενέργειες για την αποφυγή πιθανής αιφνίδιας διακοπής της λειτουργίας του συστήματος. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα ταξινόμησης των βλαβών ανάλογα με τον αντίκτυπό τους στη λειτουργία μιας μονάδας και του εξοπλισμού ασφαλείας.

## 6.5 Εισαγωγή Πολυκριτηριακών Μεθόδων στην ΕΜΣΑ

Για την ολοκλήρωση της προσέγγισης με την ΕΜΣΑ, που ερευνάται στο πλαίσιο της διατριβής, απαιτείται να ληφθούν υπόψη μία σειρά διαφορετικά κριτήρια. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα που παρουσιάζεται στην ανάπτυξη της διαδικασίας, κατά την διερεύνηση υπαράκτιων συστημάτων, ενισχύεται με τη συμμετοχή πολλών αποφασιζόντων που σχηματίζουν τις ομάδες υπευθύνων στη λήψη αποφάσεων οι οποίοι έχουν ή ενδέχεται να έχουν αντικρουόμενες προτιμήσεις.

Ως εκ τούτου με δεδομένη την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης υπαράκτιων δομών αξιοποίησης ΑΠΕ οι Πολυκριτηριακές Αναλυτικές Μέθοδοι καθίστανται ένα απαραίτητο διαχειριστικό εργαλείο για τη λήψη των αποφάσεων σε όλα τα επίπεδα (Pohekar et. al.).

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια με την παράλληλη ανάπτυξη των τεχνολογιών σε όλους τους κλάδους, και ειδικότερα στην αξιοποίηση των ΑΠΕ, έχουν χρησιμοποιηθεί μια σειρά από *συνδυασμοί αναλυτικών μεθόδων είτε* σε πραγματικά είτε σε πιθανά προβλήματα, που σχετίζονται κυρίως με τον ενεργειακό σχεδιασμό αλλά και τη εκτίμηση βιωσιμότητας προγραμμάτων-σχεδίων (Greening, et. al. 2004).

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούν ειδικότερα κάποια ζητήματα σχετικά με τη χρήση των μεθόδων MCDM, που θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία ολοκλήρωσης της Εργαλειοθήκης (tool-kit) Μεθοδολογιών για τη Στήριξη στη λήψη Αποφάσεων.

Η προσέγγιση στο προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο στηρίζεται κύρια σε αντικειμενικές κρίσεις και επιτρέπει στον ερευνητή να αξιοποιήσει εκείνα τα στοιχεία των πολυκριτηριακών μεθόδων που θεωρούνται σημαντικά για μια ολοκληρωμένη πρόταση σε λείψεις αποφάσεων που σχετίζονται με την ανάπτυξη, την *αξιολόγηση* ή την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας υπεράκτιων συστημάτων *αξιοποίησης ΑΠΕ, με προεκτάσεις εφαρμογής στην* παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στην κατασκευή ολοκληρωμένων συστημάτων (Δάγκινης, Νικητάκος, 2012).

Όπως έχει αναφερθεί στο τέταρτο κεφάλαιο, στη διεθνή βιβλιογραφία βρίσκουμε αρκετές προτάσεις για συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών πολυκριτηριακής ανάλυσης σε θέματα *αξιολόγησης και σχεδιασμού συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ*, όπου διακρίνεται κάποιες μέθοδοι να *επικρατούν* έναντι άλλων, διότι συγκεντρώνουν περισσότερο *αξιόλογες εκτιμήσεις κατά την αξιολόγηση*. Παρόλα αυτά η τελική επιλογή για την ποιο κατάλληλη μέθοδο σε κάθε επί μέρους πρόβλημα λήψης αποφάσεων εξαρτάται από τη *φύση και τα χαρακτηριστικά* του ίδιου του προβλήματος, παράλληλα με τη *διαθεσιμότητα των δεδομένων*. Οποιαδήποτε όμως περίπτωση και αν εξετάζεται, η εμπεριστατωμένη δόμηση της διαδικασίας αξιολόγησης διασφαλίζει τη συνοχή των μεθόδων εκτίμησης έναντι του πραγματικού προβλήματος προς αυτό που αντιμετωπίζεται.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι αναπτύσσονται πλήθος μεθοδολογιών MCDM καμία δε θεωρείται κατάλληλη στη λύση όλων των κατηγοριών προβλημάτων απόφασης, δεδομένου ότι για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα που προσεγγίζεται με διαφορετικές μεθόδους κάθε μια καταλήγει σε διαφορετικές προτάσεις. Αυτό, δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως εγγενές μειονέκτημα των μεθοδολογιών, αλλά ένα χαρακτηριστικό που προβάλλει τις δυνατότητες των MCDM να προσαρμόζονται και να αναδεικνύουν τις διαφορετικές προτιμήσεις των συμμετεχόντων (Loken, 2007).

Οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης και αξιολόγησης δεδομένων στην ανάπτυξη συστημάτων ΑΠΕ είναι κυρίαρχο στοιχείο ποιότητας και εκσυγχρονισμού των μελετών και της έρευνας. (Singh, et. al. 2012, Chawla, 2015).Οι διαρκείς διαφοροποιήσεις των προβλημάτων ενεργειακής αξιοποίησης, οι νέες τεχνολογίες και η διεπιστημονική πολυπλοκότητα των προβλημάτων οδηγούν στην ανάγκη εκσυγχρονισμού και καινοτομίας στα εργαλεία και στις μεθόδους αξιολόγησης και ανάλυσης (Δάγκινης, Νικητάκος 2012).

Στην παρούσα διατριβή υιοθετείται ένας συνδυασμός μεθόδων MCDM εξαρτώμενο από το είδος του προβλήματος και την περιοχή μελέτης, που ενισχύεται όποτε αυτό είναι απαραίτητο με τεχνικές ανάλυσης της αξιοπιστίας, βλέπε Διάγραμμα 6.1.

## 6.6 Διεργασίες στη Λήψη Αποφάσεων για υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης ΑΠΕ

Η ιδιομορφία των ΑΠΕ - όπως ο αποκεντρωμένος χαρακτήρας των κατασκευών, τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από την εγκατάστασή τους, η γενικά πολυκριτηριακή δόμηση, κ.λ.π. - σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας προϋποθέτει τη συμμετοχή πολλών εμπλεκομένων κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και αξιολόγησής τους (Beccali, et al. 2003).

Επιπλέον, η επιλογή των κριτηρίων θα πρέπει να είναι εύστοχη και πλήρης ώστε να οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα και θα αποτελεί βάση σύγκλισης των διαφορετικών προτιμήσεων και απόψεων από τους αποφασίζοντες. Ως εκ τούτου η επιλογή κριτηρίων η μοντελοποίηση και η εμπλεκόμενοι στη λήψη αποφάσεων πρέπει να προσδιοριστεί για την ολοκλήρωση της μελέτης.

### 6.6.1 Επιλογή των Κριτηρίων

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κριτηρίων για την αξιολόγηση συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, που μπορεί να ομαδοποιηθούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους που εξαρτώνται από την προσέγγιση του κάθε ερευνητή. Επίσης είναι σαφές ότι τα περισσότερα κριτήρια δεν αποτελούν πάντοτε τη βέλτιστη λύση για την αποτελεσματική αξιολόγηση τέτοιου είδους συστημάτων. Όμως λιγότερα κριτήρια ενδέχεται να λειτουργούν ευεργετικά στην αξιολόγηση των συστημάτων, διότι σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των κριτηρίων, που μπορεί να δημιουργήσουν αντικρουόμενες απόψεις και ασάφειες στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Ως εκ τούτου η επιλογή των κριτηρίων θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω αρχές με σκοπό την αξιοποίηση των πλέον «σημαντικών» κριτήριων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων στην ανάπτυξη συστημάτων (Wang, J. J et. al.).

1. *Αρχή συστημικής διάρθρωσης*, όπου τα κριτήρια θα πρέπει:
    - να απεικονίζουν ολοκληρωμένα τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος και να προσδιορίζουν τη συνολική απόδοση των συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ

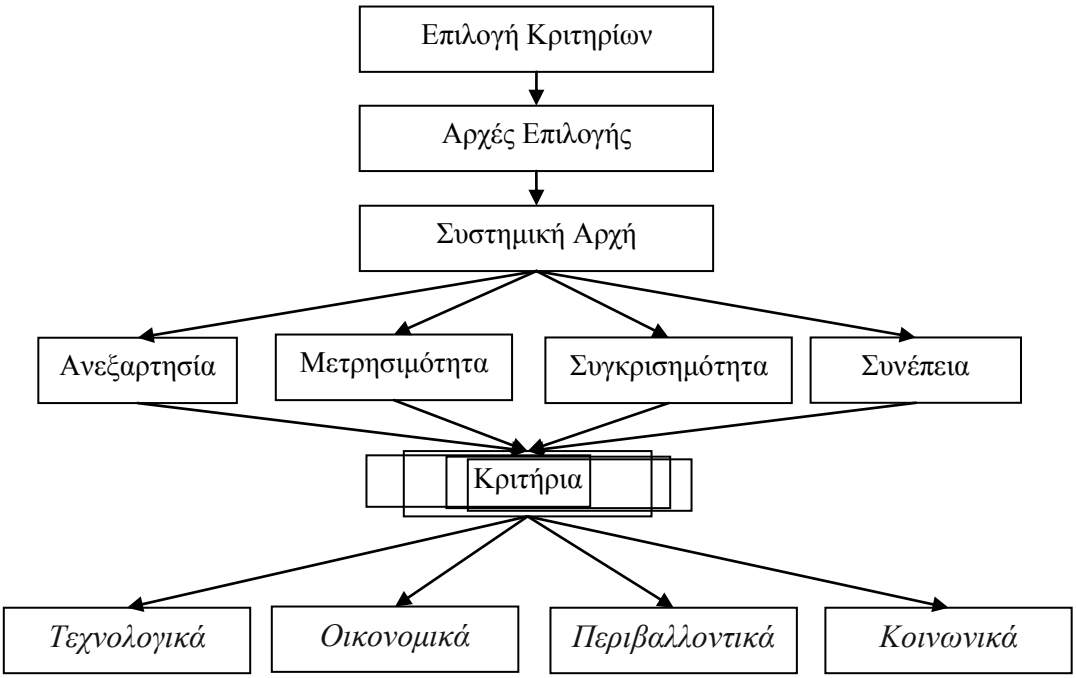
- να αποτελούν διεπιστημονικό γνωστικό πεδίο ικανό να παρέχει έναν κοινό τρόπο σκέψης, με στόχο την ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου με εσωτερική δομή για τη μελέτη των συστημάτων στο υπεράκτιο

Προφανώς η περιεκτικότητα των μεθόδων αξιολόγησης με πολλαπλά κριτήρια μπορούν να επιτύχουν καλύτερα αποτελέσματα από αξιολογήσεις που στηρίζονται σε μεμονωμένα κριτήρια.

2. *Αρχή ανεξαρτησίας,* δηλαδή τα κριτήρια δεν θα πρέπει να αλληλεπικαλύπτονται με άλλα κριτήρια του ίδιου επιπέδου. Το κάθε κριτήριο θα πρέπει να απεικονίζει από διαφορετικές πτυχές την απόδοση των εναλλακτικών λύσεων.
3. *Αρχή μετρησιμότητας,* με την οποία εκφράζεται η αναγκαιότητα τα κριτήρια να είναι μετρήσιμα μέσω ποσοτικών τιμών και ποιοτικών αξιών.
4. *Αρχή συγκρισιμότητας,* διότι η αποτελεσματικότητα και η αντικειμενικότητα των μεθόδων λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια ενισχύεται όταν η συγκρισιμότητα μεταξύ των κριτηρίων είναι προφανής. Επιπλέον, τα κριτήρια θα πρέπει να ομαλοποιούνται ώστε να συγκρίνονται και να αποφέρουν άμεσα σαφή αποτέλεσμα, όταν υπάρχουν κριτήρια επιδόσεων, απόδοσης και κόστους.
5. *Αρχή συνέπειας,* το σύνολό των κριτηρίων δεν θα πρέπει να παρουσιάζει υπερβολές, είτε στο περιεχόμενο, είτε την ποσότητα, είτε στη σαφήνεια. Δηλαδή θα πρέπει να είναι συνεπές με το στόχο της μεθόδου λήψης αποφάσεων.

Οι αρχές αυτές δύναται να δώσουν κατευθυντήριες γραμμές στους υπεύθυνους κατά την επιλογή των κριτηρίων. Όμως, είναι δύσκολο να ακολουθηθούν πάντα με συνέπεια σε όλες τις περιπτώσεις εφόσον ενδέχεται να επιλεχτούν κριτήρια με δευτερεύουσα σημασία ή να τεθούν ερωτηματικά όπως για ποιο λόγο επιλέχθηκαν αυτά τα κριτήρια και όχι κάποια άλλα. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβληματισμών δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι επιλογής των κριτηρίων όπως, η μέθοδος με συντελεστή συσχετισμού. Υιοθετώντας ένα συντελεστή συσχετισμού παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των κριτηρίων για την ορθότερη επιλογή εκείνων που παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση και σαφήνεια. Γενικά, η αρχή για όλες τις μεθόδους κατά την επιλογή κριτηρίων είναι να εξαλειφθεί η αλληλοεπικάλυψη

μεταξύ των κριτηρίων ώστε να επιλέγουν ανεξάρτητα κριτήρια (Stoica, et. al. 2004, Guyon, et. al. 2003). Στον διάγραμμα 6.6 παρουσιάζεται οι διαδικασίες επιλογής κριτηρίων.




**Διάγραμμα 6.6 Διαδικασίες επιλογής κριτηρίων.**

### 6.6.2 Τεκμηρίωση Κριτηρίων Επιλογής

Η διερεύνηση στην ανάπτυξη της εργασίας εστιάζει στη δόμηση μίας ΕΜΣΑ σε θέματα αξιολόγησης υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ. Με δεδομένο, από την διερεύνηση του πεδίου των ΑΠΕ, την πολυκριτηριακή διάσταση και την πολυφωνία που διαμορφώνεται από την εμπλοκή των υπευθύνων από διάφορους τομείς γύρω από αξίες και απόψεις, δημιουργούνται διαφόρων ειδών πιέσεις για την ανάπτυξη υπεράκτιων δομών οι οποίες αφορούν τεχνολογία, οικονομία, περιβάλλον, κοινωνία, διαθεσιμότητα πόρων, βιώσιμη ανάπτυξη, κ.λπ..

Ως εκ τούτου, μετά τον ορισμό του συγκεκριμένου στόχου, πρέπει να τεθούν τα κριτήρια για την αξιολόγηση της επίτευξης των στόχων, στα πλαίσια συγκεκριμένων εναλλακτικών σεναρίων.

Για την περίπτωση της αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων υπεράκτιων δομών αξιοποίησης ΑΠΕ, το σύνολο των κριτηρίων, που έχουν επιλεγεί, είναι σε θέση να τεκμηριώσουν πλήρως τις ορθές επιλογές διότι:

1. *Τα Τεχνολογικά κριτήρια* αφορούν στην ευελιξία προσαρμογής στην πρόοδο της τεχνολογίας, η οποία περιλαμβάνει την αξιοπιστία του συστήματος ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής ωριμότητας και της ικανότητας προσαρμογής του στις βελτιώσεις της τεχνολογίας. Επίσης με βάση την πολυπλοκότητα των δομών περιλαμβάνονται ζητήματα διαθέσιμου τεχνικού δυναμικού ικανού να ανταπεξέλθει στις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε τεχνολογίας, την αντοχή των τεχνολογιών στις συνθήκες λειτουργίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
2. Τα *Οικονομικά κριτήρια* εισάγονται με βάση την οικονομική αξιολόγηση για την ανάπτυξη της κατασκευής, το κόστος επένδυσης και την πρόκληση επενδυτικής δραστηριότητας, την λειτουργική διαχείριση κόστους αναλωσίμων, ανταλλακτικών και επισκευών. Στην περίπτωση του λειτουργικού και διαχειριστικού κόστους καθώς και η επενδυτική δραστηριότητα αξιολογούνται μέσω του υπολογισμού μεγεθών άμεσα μετρήσιμων, με δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικής φύσης εξόδων και επενδύσεων αντίστοιχα που είναι κατανοητά από τους εκάστοτε αποφασίζοντες.
3. Τα *Περιβαλλοντικά κριτήρια* είναι, και λόγω της φύσης τους, τα πλέον δύσκολα να εκτιμηθούν. Η υψηλή αβεβαιότητα σε συνδυασμό με την έντονα ποιοτική και υποκειμενική φύση τους καθιστά δυσχερή τον προσδιορισμό τους. Για τις ανάγκες όμως της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης υιοθετήθηκε η αποδόμηση του περιβαλλοντικού κριτηρίου σε περισσότερες συνιστώσες που περιλαμβάνουν την επίδραση από την εγκατάσταση μιας υπεράκτιας κατασκευής στο οικοσύστημα της περιοχής, το αποτύπωμα από την εγκατάσταση του συστήματος, τις επιπτώσεις από αποτυχία-βλάβη του συστήματος, το ισοδύναμο από την ωφέλεια μείωσης ρίπων. Έτσι η κάθε συνιστώσα μπορεί να αποτιμηθεί άμεσα και να χαρακτηριστεί με βάση συγκεκριμένους δείκτες.
4. Τα *Κοινωνικά κριτήρια* αποτελούνται ουσιαστικά από όλες τις παραμέτρους που σχετίζονται με την αποδοχή της τοπικής κοινωνίας, τις συγκρούσεις με τον παραδοσιακό πρότυπο ζωής της περιοχής και οι επιπτώσεις στην απασχόληση από τις νέες θέσεις εργασίας που δημιουργούνται για το εργατικό δυναμικό της περιοχής, και την ανάπτυξη της περιοχής. Επίσης λόγω της πιθανής επίδρασης στην ασφαλή θαλάσσια κυκλοφορία ή

πιθανές αλλαγές στον τρόπο ζωής στην περιοχή, τα ζητήματα αυτά εξετάζονται μέσω της ενσωμάτωσης τους στα κοινωνικά κριτήρια και ως γνώμη της τοπικής κοινωνίας στη διαδικασία λήψης απόφασης.

**Διάγραμμα 6.7 Διαδικασία μοντελοποίησης προβλήματος απόφασης τεσσάρων σταδίων (Roy 1968).**

Προκειμένου να αναλύσει σε βάθος το σύνολο των δραστηριοτήτων του σχεδιαστή του πλαισίου στη λήψη αποφάσεων, ο Roy (1968) προτείνει ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης της πολυκριτήριας υποστήριξης αποφάσεων το οποίο περιγράφει μια δραστηριότητα που περιλαμβάνει τέσσερα διαδοχικά στάδια, διάγραμμα 6.7. Παρατηρώντας τα στάδια είναι δυνατό να διαπιστωθεί έλλειψη στην πληροφορία ή ακόμα και λάθη τα οποία δύναται να διορθωθούν ανατρέχοντας σε προηγούμενα στάδια. Αναλύοντας τα στάδια χωριστά είναι απαραίτητο να ολοκληρωθούν οι παρακάτω ενέργειες:

*Στάδιο Ι.* Αντικείμενο Απόφασης στο οποίο περιλαμβάνονται:

- Επεξεργασία του συνόλου αποφάσεων και αυστηρό ορισμό του συνόλου (Α) των εναλλακτικών ενεργειών, δηλαδή ένα διακριτό ή συνεχές σύνολο δράσεων. Το σύνολο Α δεν είναι πάντα εύκολο να καθοριστεί διότι ενδέχεται να μοντελοποιηθεί με διαφορετικά σύνολα Α. Επομένωςτο σύνολο Α δεν εξαρτάται, μόνο από το συγκεκριμένο πρόβλημα απόφασης και από τους εμπλεκόμενους στη διαδικασία λήψης απόφασης, αλλά αλληλεπιδρά και με άλλα στάδια που ακολουθούν, όπως ο καθορισμός των κριτηρίων, η μοντελοποίηση

των προτιμήσεων, ο καθορισμός της προβληματικής, καθώς και η πολυκριτηριακή μέθοδος αποφάσεων που θα εφαρμοσθεί.

- *Καθορισμός μιας προβληματικής*[7]. *Στην πολυκρητηριακή ανάλυση διακρίνονται τέσσερις προβληματικές που αφορούν την* επιλογή, την ταξινόμηση, την κατάταξη και την περιγραφή. Για παράδειγμα στην επιλογή τεχνολογίας σε υπεράκτια συστήματα ΑΠΕ ή τη χωροθέτιση ενός συστήματος υπεράκτιας ΑΠΕ, το αντικείμενο της απόφασης πρέπει να αναλυθεί σε ένα πεπερασμένο ή συνεχές σύνολο δράσεων και να δώσει επιχειρησιακό ρόλο στο έργο της υποστήριξης της απόφασης. Άμεσα σχετίζεται με το ερώτημα: «πώς θα διαχειριστούμε τις δράσεις;» ή πιο γενικά «τι θέλουμε να επιτύχουμε».

  Καθορίζοντας τις 4 προβληματικές αναφοράς:

  - *Επιλογή (Choice*) – Προβληματική α: Επιλογή μιας και μόνης δράσης από το σύνολο Α
  - *Ταξινόμηση (Sorting*) – Προβληματική β: Διαχωρισμός σε κατηγορίες , ταξινόμηση των δράσεων σε ομοιογενείς προκαθορισμένες κατηγορίες
  - *Κατάταξη (Ranking*) – Προβληματική γ: Τοποθέτηση σε ιεραρχική σειρά, κατάταξη των δράσεων του συνόλου Α από την καλύτερη μέχρι τη χειρότερη, και
  - *Περιγραφή (Description*) – Προβληματική δ: περιγραφή των δράσεων και των συνεπειών τους στη γλώσσα των ληπτών αποφάσεων.

*Στάδιο ΙΙ*. Συνεπής Ομαδοποίηση Κριτηρίων

Σε αυτό το στάδιο δίνονται με σαφήνεια οι επιπτώσεις των διαφορών ενεργειών του συνόλου Α και στη συνέχεια πραγματοποιείται μοντελοποίηση των κριτηρίων βάση των οποίων θα ληφθεί η απόφαση. Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός συνόλου κριτηρίων που ονομάζεται συνεπής οικογένεια κριτηρίων (famille coherente de criteres).

Κάθε δυνατή δράση από το σύνολο Α αντανακλά ένα *σύνολο στοιχειωδών επιπτώσεων, που περιλαμβάνουν* χαρακτηριστικά, ιδιότητες, πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση από τον αποφασίζοντα. Διευκρινίζεται ότι κριτήριο είναι κάθε μονότονη μεταβλητή, δηλωτική των προτιμήσεων ενός αποφασίζοντα. Το κριτήριο μπορεί να είναι είτε ποιοτικό, είτε ποσοτικό και να εκφράζεται από μια συνεχή κλίμακα (χρόνου, κόστους).

[7] Οι αιτίες, οι συνθήκες και οι ιδιότητες ενός προβλήματος

Για τη μοντελοποίηση των κριτηρίων υιοθετείται μια συμβατική κλίμακα διακεκριμένων τιμών. Μια ομάδα κριτηρίων, για να αποτελέσει συνεπή οικογένεια κριτηρίων, πρέπει να πληροί τρεις (3) συνθήκες (Roy, 2013), οι οποίες ορίζονται ως εξής:

1. *Μονοτονία*: Για την περίπτωση της αύξουσας κλίμακας, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κριτηρίου για μία εναλλακτική ενέργεια, τόσο η ενέργεια αυτή προτιμάται, ενώ για την περίπτωση της φθίνουσας κλίμακας, όσο μικρότερη είναι η τιμή του κριτηρίου για μία εναλλακτική ενέργεια, τόσο η ενέργεια αυτή προτιμάται. Έτσι για ένα ζεύγος δράσεων (α,β), για gi(α) η τιμή του κριτηρίου gi, είναι αποτέλεσμα της ενέργειας α. Για τη μονοτονία ισχύει ότι:
    i. αν gi(α) > gi(β) ↔ α > β (η α προτιμάται της β: αύξουσα κλίμακα)
    ii. αν gi(α) > gi(β) ↔ β >α (η β προτιμάται της α: φθίνουσα κλίμακα)
    iii. αν gi(α) = gi(β) ↔ α ~ β (αδιαφορία)

Η μονοτονία αναφέρεται σε κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Κάθε χαρακτηριστικό, που δεν πληροί τη συνθήκη της μονοτονίας, δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο.

2. *Επάρκεια***:** Μέσα σε μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων, να υπάρχουν όλα τα κριτήρια. Δηλαδή το πρόβλημα της απόφασης εξετάζεται με πλήρη και σφαιρικό τρόπο, ώστε να μη λείπει κάποιο σημαντικό κριτήριο. Η επάρκεια αναφέρεται στο σύνολο των κριτηρίων.
3. *Μη πλεονασμός:* Μέσα σε μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων, δεν πρέπει να υπάρχουν παρόμοια ή ίδια κριτήρια και να μην είναι αλληλεξαρτώμενα (αρχή της ανεξαρτησίας). Σε περίπτωση πλεονασμού σημαίνει ότι κάποιο από τα κριτήρια δίνεται μεγάλη σημαντικότητα σε βάρος των υπόλοιπων κριτηρίων.

Σημειώνεται ότι μια συνεπής οικογένεια κριτηρίων μπορεί να περιέχει μέχρι 10 κριτήρια. Συνιστάται, όμως, σε μια συνεπή οικογένεια, ο αριθμός κριτηρίων να μην υπερβαίνει τον αριθμό επτά (7).

*Σταδιο ΙΙΙ: Μοντελοποίηση των προτιμήσεων*

Είναι το επίπεδο της μοντελοποίησης των προτιμήσεων του αποφασίζοντα. Συνίσταται, κυρίως, στην επιλογή ενός τύπου κριτηρίων και μιας μεθόδου σύνθεσης, που μπορεί να είναι :

1. Σε ένα και μοναδικό κριτήριο → Μέθοδος Πολυκριτήριας Χρησιμότητας

2. Μερική σύνθεση, σε μία ή περισσότερες σχέσεις υπεροχής → Μέθοδοι Σχέσεων Υπεροχής
3. Τοπική και αλληλεπιδραστική σύνθεση →Αλληλεπιδραστικές Μέθοδοι
4. Μονότονη παλινδρόμηση → Ανάλυση Προτιμήσεων

*Στάδιο IV: Υποστήριξη της απόφασης*

Στο στάδιο αυτό, αναζητούνται και οργανώνονται τα στοιχεία απάντησης σε συγκεκριμένα ερωτήματα που θέτει το ίδιο το πρόβλημα. Δηλαδή με βάση τα λαμβανόμενα αποτελέσματα, ο αναλυτής αναζητεί και οργανώνει τα στοιχεία που απαντούν σε συγκεκριμένα ερωτήματα, που έχει θέσει το ίδιο το πρόβλημα, αλλά και ο αποφασίζων.

### 6.6.3 Εμπλεκόμενοι στη λήψη αποφάσεων

Η εξασφάλιση της τεχνολογικής αξιοπιστίας υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ είναι βασική προϋπόθεση για την βιωσιμότητα των έργων. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα αποτελεί επίσης ένα παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη όχι μόνο για την αειφόρο ανάπτυξη, αλλά και τη σχέση που έχει με την αποδοχή του συστήματος από τις τοπικές κοινωνίες. Κατά συνέπεια η όποια προσέγγιση δεν πρέπει να κλονίζει την εμπιστοσύνη μεταξύ επενδυτών, σχεδιαστών συστημάτων, λειτουργών, τοπικών κοινωνιών και άλλων κατά περίπτωση εμπλεκομένων όπως οργανώσεις και μεμονωμένοι φορείς.

Οι εμπλεκόμενοι και η διερεύνηση της συμπεριφοράς τους αποτελεί πρωταρχικό στάδιο της μελέτης προκειμένου να γίνει μια αρχική αποτύπωση του ευρύτερου, τεχνολογικού, οικονομικού, περιβαλλοντικού και κοινωνικού προφίλ της υπό εξέτασης κατασκευής (Giaoutzi, et. al. 2013).

Η οριστική αποτύπωση των εμπλεκομένων σε κάθε πεδίο είναι διαφορετική και σχετίζεται με τις ιδιαιτερότητες που πρέπει να αντιμετωπιστούν καθώς και η ύπαρξη περιεκτικού πλαισίου που να επιτρέπει την ουσιαστική ανάμιξη όλων των σχετικών εμπλεκομένων στο σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων.

Η προσέγγιση για την αξιολόγηση υπεράκτιων κατασκευών πρέπει να περιλαμβάνει:

- Κατασκευαστές, σχεδιαστές, τεχνολόγους-μηχανικούς
- Επενδυτές, Λειτουργούς
- Επιστημονικές Ενώσεις-Ερευνητές, περιβαλλοντικές και πολιτιστικές ομάδες
- Ομάδες κατοίκων, Δημοτικές αρχές

Η *δόμηση της έρευνας στην αξιολόγηση των υπαράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ με εμπλοκή* των επιστημονικών, οικονομικών, θεσμικών, κοινωνικών ζητημάτων που επιδρούν σε λήψεις αποφάσεων με χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ακολουθεί την εξής πορεία:

1. Συλλογή δεδομένων σε πρώτο στάδιο
2. Επαφές με εμπλεκομένους και εμπειρογνώμονες – συλλογή ειδικότερων χαρακτηριστικών και προβολή πολυκριτηριακού πλαισίου
3. Επεξεργασία – Αξιολόγηση κριτηρίων και εναλλακτικών
4. Δημιουργία πλαισίου στη λήψη αποφάσεων

Η διαδικασία με πορεία παράλληλης επιστημονικής επεξεργασίας των διαδικασιών με τους εμπειρογνώμονες μπορεί να προσδώσει θετικά χαρακτηριστικά από τα πρώτα στάδια (Polatidis et. al. 2013).

Αυτού του είδους η προσέγγιση προτείνεται και επιχειρείται με τη χρήση πολυκριτηριακών αναλυτικών εργαλείων για να ερευνηθούν:

- η καταλληλότητα των τεχνολογιών για υπεράκτιες κατασκευές
- η αξιοπιστία και η ασφάλεια των συστημάτων
- οι κίνδυνοι και οι δυνατότητες ελέγχου καθώς και η αυτονομία των συστημάτων
- οικονομικοί παράγοντες όπως επενδύσεις, κόστος συντήρησης και επισκευών
- τάσεις έναντι επενδύσεων αξιοποίησης ΑΠΕ
- η περιβαλλοντική επιβάρυνση
- το ποσοστό κοινωνικής αποδοχής
- η συνέπεια των χρησιμοποιούμενων μοντέλων ως προς τις τάσεις αυτές

Όπως είναι προφανές οι συμμετέχοντες συμπεριλαμβάνουν επιστημονικές ομάδες, μεμονωμένα άτομα, κοινωνικές ομάδες και θεσμικά όργανα που δύνανται να επηρεάσουν έμμεσα ή άμεσα τη

διαδικασία επιλογής και τη λήψη αποφάσεων. Ταυτόχρονα συνθέτουν ένα βασικό πλέγμα για τη δημιουργία και αξιολόγηση αξιόπιστων σεναρίων αλλά και στρατηγικών επιλογών στην ανάπτυξη υπεράκτιων δομών ΑΠΕ.

## 6.7 Εφαρμογές πολυκριτηριακών μεθόδων σε Υπεράκτια συστήματα

Εμβαθύνοντας στο ερευνητικό πλαίσιο της ΕΜΣΑ σχετικά με το σχεδιασμό της ανάπτυξης νέων υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ, παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθοδολογικής προσέγγισης στα δύο επίπεδα της διερεύνησης.

### 6.7.1 Περιοχή μελέτης πρώτου επιπέδου της ΕΜΣΑ σε νέα συστήματα

Σε *πρώτο επίπεδο* εφαρμόζονται μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης για την αξιολόγηση των συστημάτων που πρόκειται να αναπτυχθούν, ώστε να απαντηθούν προβληματισμοί σχετικά με την ικανότητα των προς εξέταση τεχνολογιών να ανταποκριθούν στις πολλαπλές λειτουργικές και διαχειριστικές απαιτήσεις, την αλληλεπίδραση των εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με τα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη και παράγοντες όπως η ασφάλεια και η αξιοπιστία που θα πρέπει να συνυπολογιστούν από τους λήπτες αποφάσεων.

Η παρουσίαση του πρώτου επιπέδου ως τμήμα της ΕΜΣΑ εστιάζεται στη διερεύνηση τεχνολογιών αξιοποίησης του αιολικού και του κυματικού δυναμικού οι οποίες αποτελούν δύο τις κυριότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς. Επίσης, για τις τεχνολογίες αυτές υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός εναλλακτικών σεναρίων, κριτηρίων, εμπλεκομένων και συνολικά περισσότερων αντικρουόμενων στόχων και συμφερόντων, στην υλοποίηση των σχετικών υποδομών αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Με στόχο την ολοκληρωμένη προσέγγιση του αντικειμένου των υπεράκτιων δομών οι πολυκριτηριακές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής, εφαρμόστηκαν στη λήψη αποφάσεων και για συστήματα πλοίων. Η προσέγγιση αυτή οφείλεται στη φύση των πλοίων, τα οποία αποτελούν πολύπλοκα σύνολα από τεχνολογικά συστήματα τα οποία υπόκεινται στις ιδιαίτερες λειτουργικές συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Περαιτέρω, η αξιοπιστία καθώς και η ασφάλεια, από τη λειτουργία των ΑΠΕ και τη διαχείρισή τους, αποτελούν πρωταρχικούς προβληματισμούς για τους λήπτες αποφάσεων του κλάδου. Δεδομένου ότι, οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί που διέπουν το διαχειριστικό πλαίσιο στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ιδιαίτερα αυστηροί, θεσπίζονται και ελέγχονται από διεθνείς οργανισμούς, ενώ παράλληλα αποτελούν αποτέλεσμα μεγάλου αριθμού υπευθύνων στη λήψη αποφάσεων.

Σημειώνεται ότι η ηλιακή ενέργεια με την υιοθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων, ως εναλλακτική των τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ, λαμβάνεται υπόψη ως βοηθητικό σύστημα, διότι η ανάπτυξη δομών για παραγωγή ενέργειας σε υπεράκτια συστήματα δεν αποτελούν αποδοτικές λύσεις σύμφωνα με τα συστήματα που μέχρι σήμερα χρησιμοποιούνται για την αξιοποίησή της. Περαιτέρω διαπιστώθηκε ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί σήμερα να παράσχει μόνο ένα μικρό μέρος της ισχύος που απαιτείται στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις , κυρίως λόγω περιορισμών χώρου και βάρους των συστημάτων (Tawiah, et. al. 2016).

Επίσης, δεν λαμβάνονται υπόψη, ως εναλλακτικές, οι τεχνολογίες αξιοποίησης θαλασσίων ρευμάτων, διότι, η βασική τεχνολογία μπορεί να φαίνεται διαθέσιμη αλλά εξακολουθούν να υφίστανται αρκετοί τεχνικοί περιορισμοί, ενώ τα συστήματα αφορούν στην εγκατάσταση σε περιοχές κάτω από ειδικές συνθήκες (Van Hertem, et. al., 2010) που δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της διατριβής.

#### 6.7.1.1 Αξιολόγηση τεχνολογιών υπεράκτιων πλωτών κατασκευών με πολυκριτηριακές μεθόδους

Η κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων έχει επεκταθεί σε πολλές χώρες της Ευρώπης, και θα πρέπει σύντομα να αντιμετωπιστεί η εγκατάστασή τους σε περιοχές με μεγαλύτερο βάθος, πέρα από τις περιοχές με ρηχά νερά, δεδομένου ότι το δυναμικό των ΑΠΕ είναι μεγαλύτερο. Όμως, οι βαθύτερες θαλάσσιες περιοχές με υψηλό δυναμικό καθιστούν τα σταθερά θεμέλια αντιοικονομικά.

Η ανάπτυξη του τομέα υπεράκτιων συστημάτων στην Ελλάδα είναι αρκετά ανεπαρκής. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει υπό εκμετάλλευση υπεράκτιο αιολικό πάρκο, ενώ 37 μελέτες περιμένουν

έγκριση, τρεις βρίσκονται στο στάδιο του πρώιμου σχεδιασμού και 5 έχουν ήδη απορριφθεί (Van Hertem, et. al. 2010).

Στον τομέα υπεράκτιων συστημάτων στην Ελλάδα, ανήκει η μονάδα αφαλάτωσης ανοικτής θάλασσας που λειτουργεί αυτόνομα σε πιλοτικά στο Αιγαίο με ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτρια.

### 6.7.1.2 Διερεύνηση με τη μεθοδολογία AHP και καθορισμός κριτηρίων

Τα υπεράκτια συστήματα βέβαια είναι πολύ μεγάλα και πολύπλοκα και στην λήψη αποφάσεων για την κατασκευή και τη λειτουργία τους περιλαμβάνονται τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά στοιχεία (Vagiona, et. al. 2012). Επιπλέον, οι σημερινές εγκαταστάσεις υπεράκτιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω εκμετάλλευσης (FAME Project Report WavEC Offshore Renewables, 2012).

Ως εκ τούτου, οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, κατά την επιλογή μιας τεχνολογίας, για τη βιωσιμότητα των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές περιλαμβάνουν τεχνολογικές εξελίξεις, την προσαρμοστικότητα των συστημάτων σε νέες τεχνολογίες, την οικονομική βιωσιμότητα και την κοινωνική αποδοχή.

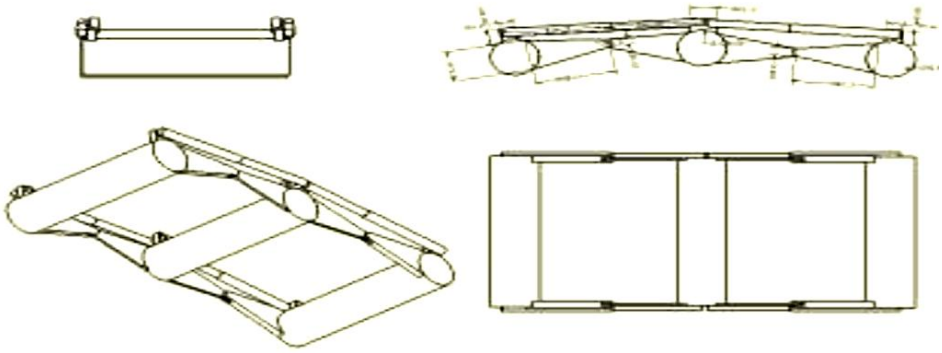
Η παρουσίαση του τμήματος αυτού της ΕΜΣΑ, είναι εστιασμένη στην στήριξης αποφάσεων για την επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας στην παραγωγή ενέργειας για υπεράκτια κατασκευή, μέσα από μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της αξιοπιστίας του συστήματος, με χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης της ιεραρχικής διαδικασίας (AHP), ως εργαλείο ικανό να ενισχύσει τους λήπτες αποφάσεων.

Η εφαρμογή της μεθόδου Διαδικασία Αναλυτικής Ιεραρχίας (AHP), βασίζεται σε ποιοτικά χαρακτηριστικά που προέρχονται από ιστορικά στοιχεία και ποσοτικές αξιολογήσεις σύμφωνα με τη γνώμη εμπειρογνωμόνων.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ενός υπεράκτιου συστήματος είτε στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην ηπειρωτική χώρα, είτε για την διερεύνηση της κατανάλωσης σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής πόσιμου νερού.

Κατά συνέπεια, το πρώτο μέρος εισάγει τις πτυχές που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες, συστήματα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας καθώς και το συνδυασμό των τεχνολογιών, ενώ η δεύτερη απεικονίζει την εφαρμογή της μεθόδου AHP για κάθε τεχνολογία.

Ως ενεργειακό ισοδύναμο στη μελέτη των συστημάτων που αξιολογήθηκαν είναι η παραγωγή νερού. Με αυτό τον τρόπο συμπεριλαμβάνονται πιθανές αποτυχίες του συστήματος αφαλάτωσης ώστε η μελέτη να αφορά το ολοκληρωμένο στο σύστημα.



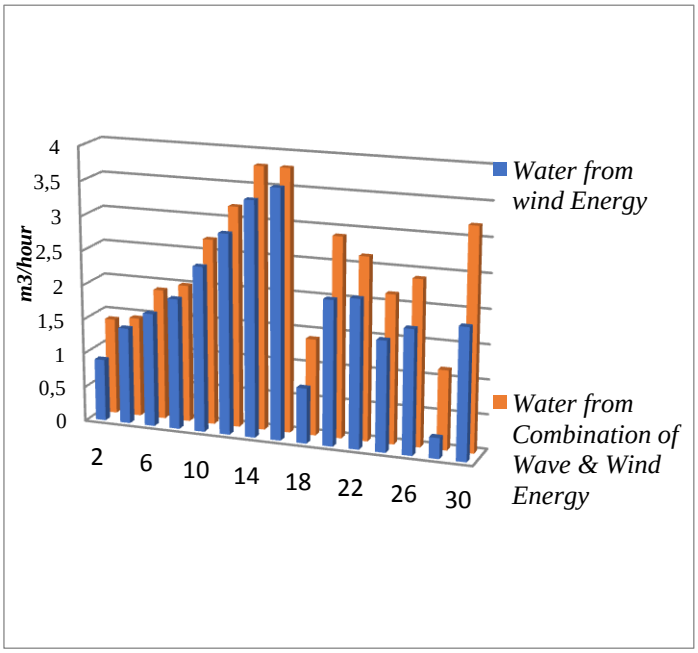
**Σχήμα 6.3 Σύστημα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας.**

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπο διερεύνηση συστημάτων που συγκρίθηκαν και η παραγωγή νερού είναι:

- Ανεμογεννήτρια εγκατεστημένη σε πλωτή κατασκευή, η οποία έχει ισχύ 30 kW, μεταβλητό βήμα πτερυγίων και μεταβλητή ταχύτητα (ασύγχρονη γεννήτρια). Ο ρόλος της ανεμογεννήτριας είναι η παροχή ενέργειας για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος, όταν η ταχύτητα ανέμου είναι υψηλή, αυξάνεται η διαθέσιμη ενέργεια και το σύστημα παράγει περισσότερο νερό. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή, η παραγωγή ενέργειας μειώνεται και προκύπτει λιγότερη παραγωγή νερού, με χαμηλότερο όριο λειτουργίας τα 5KW. Η μέση παραγωγή νερού στην περίπτωση αυτή στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος ήταν 2,49 m3 / h. Αυτό είναι το αποτέλεσμα που βασίζεται στα καταγεγραμμένα δεδομένα του πιλοτικού συστήματος.
- Σύστημα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας, σχήμα 6.3. Το εξεταζόμενο σύστημα έχει τα εξής χαρακτηριστικά: ικανότητα διαχείρισης κυμάτων ύψους 8 μέτρων, ενέργεια που

παράγεται από την υδραυλική ισχύ 25 kW. Επίσης, αν και τα κύματα έχουν περισσότερη ισχύ το σύστημα αξιοποιεί το 11% της διαθέσιμης ενέργειας των κυμάτων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ενώ ο άνεμος ποικίλει σημαντικά ακόμη και σε διαστήματα πέντε λεπτών, τα κύματα παραμένουν αρκετά σταθερά για μεγάλες περιόδους (Dagkinis, Nikitakos, 2013). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη πιλοτική λειτουργία αυτού του συστήματος, στην παραγωγή νερού από το σύστημα αφαλάτωσης, κατά την εξεταζόμενη περίοδο των πέντε ετών λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις των καιρικών συνθηκών στης περιοχής, ήταν 2,14 m3 / h.

- Υβριδικό σύστημα της ανεμογεννήτριας σε συνδυασμό με συσκευή εκμετάλλευσης ενέργειας των κυμάτων σε μια πλατφόρμα. Με το υβριδικό σύστημα πραγματοποιείται διαφοροποίηση στην παραγωγή ενέργειας, άρα και στην παραγωγή νερού από το σύστημα αφαλάτωσης. Τα πλεονεκτήματα της υβριδικής εφαρμογής σε ένα ενιαίο σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι η μείωση των ωρών μηδενικής παραγωγής ισχύος και μείωση στη διαχρονική μεταβλητότητα. Επομένως, η παραγωγή νερού είναι μεγαλύτερη, όπως παρατηρούμε από το ακόλουθο σχήμα 6.4.



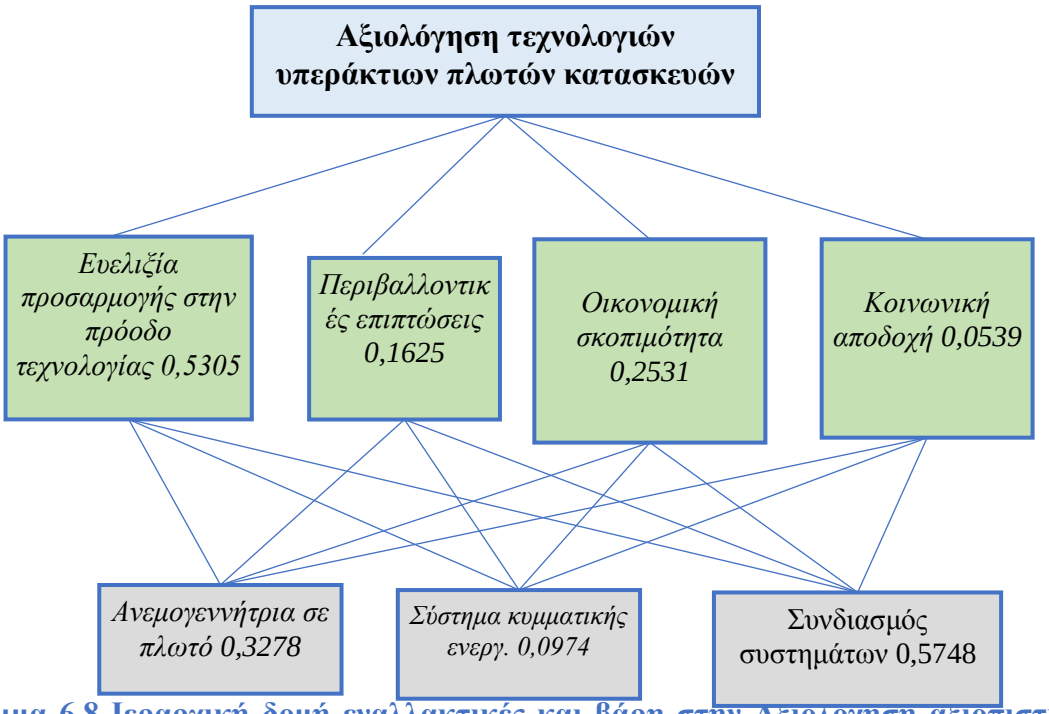

**Σχήμα 6.4 Μέση παραγωγή νερού σε ένα μήνα με μετρήσεις κάθε 3 ώρες.**

Στα ευρήματα από το συνδυασμό τεχνολογιών στην παραγωγή ισχύος είναι η ομαλότερη λειτουργία, η μεγαλύτερη διαθεσιμότητα μειώνοντας το ποσοστό χρόνου με μηδενική παραγωγή που παράλληλα μειώνει τη μεταβλητότητα της λειτουργίας του συστήματος έως και 31%. Το ποσοστό μηδενικής παραγωγής μειώνεται στο 6% (Fernández, 2013). Η ποσότητα του παραγόμενου νερού όταν χρησιμοποιείται συνδυασμός κυματικού και αιολικού ενεργειακού συστήματος αυξάνεται σε σύγκριση με τα προηγούμενα συστήματα και μπορεί να δώσει μια μέση παραγωγή νερού 3,26 m3 / h.

Τα υπεράκτια ανανεώσιμα και αποδοτικά ενεργειακά συστήματα προτιμώνται επειδή παράγουν καθαρή ενέργεια, αλλά δυστυχώς κανένα από τα εναλλακτικά συστήματα δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις απαιτήσεις. Προκειμένου να εκτιμηθεί η αξιοπιστία των διαφόρων συστημάτων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας που χρησιμοποιούνται και κάθε τεχνολογία συγκρίνεται με τις άλλες. Τα κριτήρια που εξετάζονται για την αξιολόγηση αυτή είναι:

- Η *ευελιξία προσαρμογής στην πρόοδο της τεχνολογίας*, η οποία περιλαμβάνει την αξιοπιστία του συστήματος ως αποτέλεσμα της τεχνολογικής ωριμότητας και της ικανότητας προσαρμογής κάθε συστήματος στις βελτιώσεις της τεχνολογίας.
- Οι *περιβαλλοντικές επιπτώσεις* της εγκατάστασής τους στα οικοσυστήματα και η συμβατότητα σε νέες περιβαλλοντικές απαιτήσεις οι οποίες θα μπορούν να πραγματοποιούνται χωρίς πολύ δαπανηρές τροποποιήσεις.
- Η *Οικονομική σκοπιμότητα* που περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης σε σύγκριση με τη διάρκεια ζωής, το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης, καθώς και τάσεις που σχετίζονται με τις πιθανότητες της οικονομικής ανάπτυξης της περιοχής.
- Η *κοινωνική αποδοχή,* από την εφαρμογή των τεχνολογιών, η οποία μπορεί να ποικίλει επειδή οι υπεράκτιες κατασκευές ΑΠΕ ενδέχεται να προκαλούν οπτική όχληση στους κάτοικους ή την ασφάλεια όταν διαταράσσουν τις διαδρομές των πλοίων.

Στο προτεινόμενο μοντέλο αναπτύχθηκε μια τυπική AHP με σκοπό την αξιολόγηση των υπεράκτιων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για αξιόπιστη λειτουργία και μέσω της σύγκρισης ανά ζεύγη προτείνεται το ποιο κατάλληλο μοντέλο σε σχέση με τις εκτιμήσεις των εμπειρογνωμόνων όπως φαίνεται στο διάγραμμα 6.8.




**Διάγραμμα 6.8 Ιεραρχική δομή εναλλακτικές και βάρη στην Αξιολόγηση αξιοπιστίας για υπεράκτιες κατασκευές.**

Τα κριτήρια αξιολογούνται από πέντε εμπειρογνώμονες σε τομείς έρευνας και ανάπτυξης για υπεράκτιες κατασκευές και σε τεχνικά τμήματα. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τα καταγεγραμμένα δεδομένα, συγκρίνονται τα κριτήρια one-to-one χρησιμοποιώντας την κλίμακα του πίνακα 6.3. Όσον αφορά τα βάρη που προκύπτουν από το διάγραμμα 6.8, η ευελιξία προσαρμογής στις τεχνολογικές εξελίξεις φαίνεται να είναι το πιο σημαντικό κριτήριο για τον προσδιορισμό των εναλλακτικών λύσεων. Οι τιμές σπουδαιότητας παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3 και η τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4.

**Πίνακας 6.3 Κλίμακα που χρησιμοποιείται για συγκρίσεις ανά ζεύγη.**

| Τιμές | Ερμηνεία |
|---|---|
| 1 | Οι στόχοι i και j είναι εξίσου σημαντικοί |
| 3 | Ο στόχος i είναι ελαφρώς πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 5 | Η εμπειρία και οι κρίσεις δείχνουν ότι ο στόχος i είναι πολύ πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 7 | Ο στόχος i είναι πολύ ισχυρός ή αποδεδειγμένα πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 9 | Ο στόχος i είναι απολύτως πιο σημαντικός από τον στόχο j |
| 2,4,6,8 | Οι ενδιάμεσες τιμές, για παράδειγμα, μια τιμή 8 σημαίνουν ότι ο στόχος i είναι στο μέσο μεταξύ ισχυρού και απολύτως πιο σημαντικός από τον στόχο j |

**Πίνακας 6.4 Τιμές για την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.**

| **Σύστημα αξιοποίησης ΑΠΕ** | **Κατάταξη** |
|---|---|
| Ανεμογεννήτρια | 2 |
| Σύστημα αξιοποίησης κυματικής ενέργειας | 3 |
| Συνδυασμός συστημάτων | 1 |

Συμπερασματικά, από την τελική κατάταξη απεικονίζεται ότι από τις τρεις τεχνολογικές εναλλακτικές λύσεις ο συνδυασμός ανέμου και κύματος φαίνεται να είναι ο καλύτερος για βιώσιμη και αξιόπιστη επιλογή διότι μειώνεται ο χρόνος της μη διαθεσιμότητας του συστήματος, και με την υιοθέτηση υβριδικού συστήματος μειώνεται το αρχικό επενδυτικό κόστος μέσω οικονομιών κλίμακας. Η οπτική όχληση και η ασφάλεια είναι η ίδια εφόσον η εγκατάσταση της κατασκευής αφορά το ίδιο σημείο εγκατάστασης.

Η εφαρμογή στη λήψη αποφάσεων με AHP εφαρμόζεται περαιτέρω στο ερευνητικό πλαίσιο της διατριβής στην ενίσχυση αποφάσεων που σχετίζονται με την αξιολόγηση των εκλεκτικών μηχανισμών. Η διερεύνηση, αφορά την αξιολόγηση του συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου των επιδόσεων στα πλοία (remote performance monitoring RPM) SCADA, όπου εξετάζεται ο εντοπισμός και η εξέταση χαρακτηριστικών που μπορεί να επηρεάσουν την ασφάλεια των πλοίων και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στις ενέργειες που εφαρμόσουν στην ασφαλή διαχείριση του πλοίου. Η εφαρμογή συστημάτων απομακρισμένου ελέγχου ενισχύεται από τις πρόσφατες τεχνολογικές βελτιώσεις των πλοίων.

Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με τη μέθοδο της αναλυτικής ιεραρχίας (AHP). Η AHP επιλέχθηκε διότι η αξιολόγηση του συστήματος απομακρυσμένου ελέγχου χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα στη κατασκευή και η μέθοδος είναι ικανή να χειρίζεται μετρήσεις σε κλίμακα αναλογιών. Η αξιολόγηση απαντά στην ερώτηση, πώς ο απομακρυσμένος έλεγχος των επιδόσεων μέσω του διαδικτύου μπορεί να αξιοποιηθεί για την περαιτέρω βελτίωση όσον αφορά την απόδοση των εγκατεστημένων μηχανισμών επί του πλοίου, την ενεργειακή αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία του πλοίου, την περιβαλλοντική διαχείριση των πλοίων και όλα αυτά με ασφάλεια.

Η προσέγγιση της έρευνας περιγράφει την Αξιολόγηση Κινδύνων κατά τη μετάδοση δεδομένων από το σύστημα SCADA λόγω επιθέσεων στον κυβερνοχώρο. Η εφαρμογή της μεθόδου AHP επέτρεψε τη μοντελοποίηση διαφόρων πτυχών κινδύνου που επηρεάζουν τον συνολικό κίνδυνο ενός πλοίου που αντιμετωπίζει απειλή.

Στο μοντέλο, κάθε κριτήριο κινδύνου έχει σταθμιστεί με βάση τη γνώμη των εμπειρογνωμόνων και εισήχθη σε μήτρα όπου οι υπολογισμοί και η σύνθεση στην επίλυση με AHP πραγματοποιήθηκε με συγκρίσεις ανα ζεύγη.

Η κατάταξη των κριτηρίων του κινδύνου που διερευνήθηκαν, παρέχουν υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων προκειμένου να αποφευχθεί η επιλογή μιας ακατάλληλης απόφασης κατά τη διάρκεια μιας ενδεχόμενης επιθέσεις στο σύστημα μετάδοσης πληροφοριών στη διάρκεια του ταξιδιού του πλοίου.

Τα αποτελέσματα από την επιλογή μεταξύ εναλλακτικών ενεργειών υπό την απειλή μιας ηλεκτρονικής επίθεσης στο σύστημα SCADA που μελετήθηκε, απέδειξαν ότι η χρήση της μεθόδου AHP μπορεί να βελτιώσει και να αντιπροσωπεύσει μια αποτελεσματική προσέγγιση για τη λήψη αποφάσεων. Μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου, ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων μπορεί να βρει ένα εργαλείο για την ενίσχυση των αποφάσεών του, προκειμένου να εξαλείψει τον αντίκτυπο μιας πιθανής ηλεκτρονικής επίθεσης στα συστήματα ελέγχου, με δεδομένο ότι η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων αναμένεται να διευρυνθεί τα επόμενα χρόνια με την εφαρμογή έξυπνων συστημάτων.

#### 6.7.1.2 Αξιολόγηση συνδυασμού συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών με TOPSIS

Τα οφέλη από το συνδυασμό τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ δεν περιορίζονται σε λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, αλλά επιτυγχάνεται αύξηση της περιόδου λειτουργίας ενός ενεργειακού καταναλωτή π.χ. ενός συστήματος αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση που σε ετήσια βάση αυξάνεται η παραγωγή νερού.

Σε περαιτέρω ανάλυση των μεθοδολογιών που προτείνονται με την προσέγγιση της ΕΜΣΑ, για την αξιολόγηση των κινδύνων που προκύπτουν μεταξύ της διασύνδεσης συστημάτων από επιλεγμένες τεχνολογίες, πραγματοποιείται περαιτέρω ανάλυση με την εφαρμογή της Τεχνικής

για τον προσδιορισμό προτιμήσεων με βάση την ομοιότητα στην ιδεατή λύση TOPSIS. Μέσω της χρήσης του TOPSIS τα επιχειρησιακά και οικονομικά δεδομένα σταθμίζονται σε σχέση με άλλα δεδομένα τεχνολογίας (Kohanestani, et. al. 2013).

Επιπλέον, η ανάλυση πραγματοποιείται με σκοπό να εξακριβωθεί η συνέπεια των αποτελεσμάτων της AHP, ενώ εμπλουτίζεται περισσότερο το ερευνητικό πεδίο της χρήσης πολυκριτηριακών μεθόδων με ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια κατά τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών συνδυασμών τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ. Επίσης, επιχειρείτε η εισαγωγή στο υβριδικό σύστημα της υπεράκτιας κατασκευής η εναλλακτική λύση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (Choi, 2014). Αυτό δίνει την ευχέρεια να αξιολογηθεί η αιτία αποκλεισμού του στην προηγούμενη μελέτη και να αποδειχθεί, ενώ ταυτόχρονα να ποσοτικοποιηθεί.

Στις περιπτώσεις εκτίμησης της ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται από το σύστημα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, η παραγωγή της πραγματοποιείται από τέσσερα διαφορετικά ενεργειακά συστήματα , που αποτελούν και τις εναλλακτικές για τους λήπτες αποφάσεων.

Τα συστήματα αυτά είναι:

- μια υπεράκτια πλωτή ανεμογεννήτρια
- μια συσκευή αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων
- ένας συνδυασμός των προηγούμενων όπου μια συσκευή αξιοποίησης ενέργειας των κυμάτων είναι εγκατεστημένη μαζί με μια ανεμογεννήτρια σε μια πλατφόρμα και τέλος
- ένας συνδυασμός όπου ένα σύστημα PV συνδυάζεται με ανεμογεννήτρια
- Σε όλες τις περιπτώσεις η διαχείριση της ενέργειας είναι πολύ σημαντική και έχει τρεις κύριους στόχους:
- να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα του συστήματος σε περίπτωση παρατεταμένης περιόδου χωρίς σημαντική παραγωγή ενέργειας
- η μεγιστοποίηση του δυναμικού που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο, τα κύματα ή τον ήλιο ώστε αντίστοιχα να βελτιωθεί η παραγωγή νερού
- η μείωση του κόστους συντήρησης

### 6.7.1.3 Ανάλυση δεδομένων στην εφαρμογή της TOPSIS

Τα δεδομένα και τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τα ενεργειακά συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ βασίζονται στα μεγέθη της προηγούμενης μελέτης, όμως σε αυτή την αξιολόγηση έχουν αυξηθεί ισοδύναμα σε ίδια κλίμακα για κάθε τεχνολογία. Έτσι τα συμπεράσματα μπορούν να αντικατοπτρίσουν την εφαρμογή τεχνολογιών για εμπορικούς σκοπούς.

Σημειώνεται ότι η αρχική ικανότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε, λόγο των περιορισμών στο μέγεθος που μπορεί να εγκατασταθεί στην πλατφόρμα της υπεράκτιας κατασκευής είναι 10KW. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελς σε υπεράκτια κατασκευή έχουν αύξηση στην παραγωγή ενέργειας που φτάνει το 11% σε σχέση με αυτά που είναι εγκατεστημένα στην ξηρά, ενώ η παραγωγή νερού με αξιοποίηση μόνο της ηλιακής ενέργειας μπορεί να φτασει το 1,246 m3/h.

Με την αύξηση σε κλίμακα ώστε να αντικατοπτρίζονται συστήματα που μπορούν να αξιοποιηθούν για επιχειρηματική δραστηριότητα και εμπορικούς σκοπούς τα μεγέθη μεταβάλλονται ως εξής: η ανεμογεννήτρια αυξάνεται από 30KW σε 1MW, το σύστημα ενέργειας κύματος αυξάνεται από 25KW σε 760KW, και η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση από 10 σε 330KW. Το αντίστοιχο κόστος επόμενος θα αυξηθεί για κάθε σύστημα καθώς και η παραγωγή νερού.

Οι εναλλακτικές που αξιολογούνται στην προσέγγιση με TOPSIS είναι ένα ενιαίο σύστημα με ανεμογεννήτρια, ένα ενιαίο σύστημα κυματικής ενέργειας, ένας συνδυασμός του ανεμογεννήτριας με σύστημα αξιοποίησης κυμάτων, και τέλος, ένας συνδυασμός ανεμογεννήτριας και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.

Τα κριτήρια της αξιολόγησης που θα επηρεάσουν την επιλογή της κατάλληλης εναλλακτικής λύσης είναι τα εξής:

- Η *παραγωγή του νερού*, δεδομένου ότι αποτελεί μέτρο σύγκρισης της αποδοτικότητας καθώς και κίνητρο για τους ωφελούμενους και τους δυνητικούς επενδυτές.
- Ο *κίνδυνος που προκύπτει μεταξύ της διασύνδεσης συστημάτων* (Risk arising Between Systems Interconnection - RBSI), ο οποίος συγκρίνει τη διαθεσιμότητα των συστημάτων

στην παραγωγή ενέργειας και τη διασύνδεση με το σύστημα αφαλάτωσης. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η εγγενής φυσική μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών που επηρεάζει την αξιοπιστία των επιλεγμένων τεχνολογιών.

- Τα *Περιβαλλοντικά κριτήρια,* δηλαδή η επίδραση κάθε τεχνολογικής εφαρμογής στο περιβάλλον. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν τους κινδύνους που ενέχει η πιθανή αποτυχία ενός συστήματος, η οπτική ενόχληση και ο αντίκτυπος στη θαλάσσια κυκλοφορία, εφόσον οι ανάγκες παραγωγής νερού ενός μεγαλύτερου συστήματος ενδιαφέρον παρουσιάζει όταν πρόκειται να εγκατασταθεί σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.
- Το *κόστος κατασκευής* όπου ως αρχικό κόστος επένδυσης επηρεάζει το επενδυτικό ενδιαφέρον.

Μετά τον καθορισμό των εναλλακτικών και των κριτηρίων πραγματοποιείται η ανάπτυξη της TOPSIS με αξιολόγηση των δεδομένων από απαντήσεις εμπειρογνωμόνων (οι οποίοι θα μπορούσαν να είναι k1, k2, ... .ki), ενώ τα συλλεχθέντα ποσοτικοποιημένα δεδομένα μεταφράζονται σε μια βαθμολογία μέσω της χρήσης διακριτών κλιμάκων 9 σημείων πίνακας 6.5.

**Πίνακας 6.5 Κλίμακα τιμών βαθμολογίας δεδομένων.**

| Τιμές βαρύτητας(Intensity of value) | Περιγραφή των τιμών (Value description) |
|---|---|
| 1 | Δεν προτιμάται - Δεν είναι σημαντικό (Not preferred - Not important) |
| 3 | Ελαφρώς περισσότερο προτιμώμενη / σημαντικό (slightly more preferred/ important) |
| 5 | Προτιμάται έντονα / σημαντικό (strongly preferred/important) |
| 7 | προτιμάται πολύ έντονα / σημαντικό (very strongly preferred/important) |
| 9 | Απολύτως προτιμώμενο-σημαντικό (absolutely preferred- important) |
| 2,4,6,8 | Όταν απαιτείται συμβιβασμός στην αξιολόγηση (When a compromise in evaluation is needed) |

Οι βαθμολογίες εισάγονται σε πίνακες αποφάσεων. Οι πίνακες για τη διενέργεια της μεθοδολογίας TOPSIS σχηματίστηκαν με βαρύτητες που δόθηκαν από εμπειρογνώμονες . Οι εμπειρογνώμονες k1, k2, k3 είναι πεπερασμένος αριθμός από διαφορετικούς τομείς. Στην προκειμένη περίπτωση δύο μηχανικοί για υπεράκτιες κατασκευές (συμβολίζονται ως k1), τρεις επενδυτές (k2) και επτά κάτοικοι της περιοχής εγκατάστασης (k3), που αξιολογούν τα κριτήρια και ενοποιούνται στον Πίνακα 6.6.

**Πίνακας 6.6 Μήτρα αποφάσεων με στάθμιση των κριτηρίων σε σχέση με κάθε εναλλακτική λύση.**

| | | *Κριτήρια* | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *Παραγωγή νερού* | *Κίνδυνοι διασύνδεσης συστημάτων* | *Περιβαλλοντικά κριτήρια* | *Κόστος κατασκευής* |
| *Εναλλακτικές* | *Υπεράκτια ανεμογεννήτρια* | *7* | *7* | *8* | *7* |
| | *Σύστημα κυμματικής ενεργέργειας* | *6* | *8* | *3* | *5* |
| | *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμογεν. & Κυματ.* | *9* | *8* | *7* | *6* |
| | *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμ. & Φωτοβολτ.* | *1* | *7* | *7* | *8* |

Με την κανονικοποίηση αυτών των δεδομένων, δημιουργείται η μήτρα του πίνακα 6.7 με τις βαρύτητες κάθε κριτηρίου, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στη μήτρα αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.

**Πίνακας 6.7 Κανονικοποιημένα βάρη σχετικά με τη στάθμιση των εμπειρογνωμόνων για κάθε κριτήριο.**

| *Κριτήρια* | *K1* | *K2* | *K3* | *Βαρύτητα Κριτηρίων* |
|---|---|---|---|---|
| *Παραγωγή νερού* | *9* | *8* | *9* | *8,67* |
| *Κίνδυνοι διασύνδεσης συστημάτων* | *10* | *9* | *5* | *8,00* |
| *Περιβαλλοντικά κριτήρια* | *9* | *7* | *9* | *8,33* |
| *Κόστος κατασκευής* | *7* | *10* | *1* | *6,00* |

Η αξία κάθε εναλλακτικής λύσης σε σχέση με κάθε κριτήριο που αξιολογείται από εμπειρογνώμονες εισάγεται χωριστά και ομαλοποιείται με κριτήριο στάθμισης στο πίνακα αποφάσεων πίνακας 6.8.

**Πίνακας 6.8 Κανονικοποιημένη μήτρα αποφάσεων.**

| | *Παραγωγή νερού* | *Κίνδυνοι διασύνδεσης συστημάτων* | *Περιβαλλοντικά κριτήρια* | *Κόστος κατασκευής* |
|---|---|---|---|---|
| *Υπεράκτια ανεμογεννήτρια* | *0,516* | *0,4656* | *0,6117* | *0,5306* |
| *Σύστημα κυμματικής ενεργέργειας* | *0,4642* | *0,5321* | *0,2294* | *0,3790* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμογεν. & Κυματ.* | *0,6964* | *0,5321* | *0,5353* | *0,4548* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμ. & Φωτοβολτ.* | *0,0773* | *0,4656* | *0,5353* | *0,6064* |

Στη συνέχεια, η μέθοδος προσδιορίζει τη θετική και την αρνητική ιδανική λύση πίνακες 6.9 & 6.10, υπολογίζονται τα μέτρα διαχωρισμού, η σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση και τέλος προσδιορίζεται η απόσταση από τη θετική ιδανική λύση και η μεγαλύτερη απόσταση από την αρνητική ιδανική λύση που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.11 προτιμώμενων εναλλακτικών.

**Πίνακας 6.9 Προσδιορισμός θετικής ιδανικής λύσης.**

| *A(+)* | *Παραγωγή νερού* | *Κίνδυνοι διασύνδεσης συστημάτων* | *Περιβαλλοντικά κριτήρια* | *Κόστος κατασκευής* | $Si^+$ |
|---|---|---|---|---|---|
| *Υπεράκτια ανεμογεννήτρια* | *0,00025* | *0,00071* | *0,0000* | *0,0009* | *0,0432* |
| *Σύστημα κυμματικής ενεργέργειας* | *0,4642* | *0,0000* | *0,01326* | *0,0000* | *0,1175* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμογεν. & Κυματ.* | *0,0000* | *0,0000* | *0,00054* | *0,00022* | *0,0277* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμ. & Φωτοβολτ.* | *0,00387* | *0,00071* | *0,00054* | *0,00205* | *0,0848* |

### Πίνακας 6.10 Προσδιορισμός της αρνητικής ιδανικής λύσης.

| *A(-)* | *Παραγωγή νερού* | *Κίνδυνοι διασύνδεσης συστημάτων* | *Περιβαλλοντικά κριτήρια* | *Κόστος κατασκευής* | $Si^-$ |
|---|---|---|---|---|---|
| *Υπεράκτια ανεμογεννήτρια* | *0,00213* | *0,0000* | *0,01311* | *0,00022* | *0,1243* |
| *Σύστημα κυμματικής ενεργέργειας* | *0,00147* | *0,0007* | *0,0000* | *0,00204* | *0,0651* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμογεν. & Κυματ.* | *0,00379* | *0,00072* | *0,00838* | *0,0009* | *0,1175* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμ. & Φωτοβολτ.* | *0,0000* | *0,0000* | *0,00838* | *0,0000* | *0,0915* |

Σημειώνεται ότι οι τιμές 0.0000 σε πίνακες προσδιορισμού της θετικής και αρνητικής ιδανικής λύσης προκύπτουν ως αποτέλεσμα των υπολογισμών ή είναι τόσο μικρές τιμές που δεν μπορούν να γραφούν από τέσσερα ψηφία.

### Πίνακας 6.11 Σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση.

| $c_i = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}$ | | *Κατάταξη επιλογής* |
|---|---|---|
| *Υπεράκτια ανεμογεννήτρια* | *0,7417* | *2* |
| *Σύστημα κυμματικής ενεργέργειας* | *0,3564* | *4* |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμογεν. & Κυματ.* | *0,8087* | ***1 (best)*** |
| *Συνδιασμός συστημάτων Ανεμ. & Φωτοβολτ.* | *0,5192* | *3* |

Στην προσέγγιση με τη μέθοδο TOPSIS και τα αποτελέσματα που προκύπτουν ορίζεται ότι ο συνδυασμός ανέμου και κύματος αποτελεί την καλύτερη τεχνολογία στη λήψη αποφάσεων, σε σχέση με τη σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση.

Συμπερασματικά, η TOPSIS προτείνεται ως αποτελεσματική μεθοδολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Αυτή η μέθοδος είναι απλή στην κατανόηση και επιτρέπει την επιδίωξη των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων μέσω του κριτηρίου που απεικονίζεται από ένα απλό μαθηματικό υπολογισμό που μπορεί και καταλήγει σε ένα συγκεκριμένο συμπέρασμα και να ενισχύσει τους προβληματισμούς που αντιμετωπίζουν οι λήπτες αποφάσεων.

Η μεθοδολογία TOPSIS ως εργαλείο στη λήψη αποφάσεων εφαρμόστηκε περαιτέρω στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής στη διερεύνηση διαχείρισης την λειτουργίας πλοίων και της επιλογής την καλύτερης εναλλακτικής μεταξύ των τεχνικών που χρησιμοποιούνται στα πλοία για την μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων άρα και του λειτουργικού κόστους.

### 6.7.2 Περιοχή μελέτης δεύτερου επιπέδου της ΕΜΣΑ

Η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων. Η ανάλυση του δεύτερου επιπέδου της προσέγγισης με την ΕΜΣΑ, αφορά στην αξιολόγηση και την βελτιστοποίηση των συστημάτων που επιλέγονται ως αποτελέσματα του πρώτου επιπέδου, καθώς και τις υβριδικές προσεγγίσεις. Για να αξιολογηθούν τα συστήματα προτείνεται η ένταξη μιας μεθόδου πολλαπλών κριτηρίων που θα ενισχύσει την λήψη αποφάσεων σε λειτουργικούς και διαχειριστικούς προβληματισμούς με ταυτόχρονη ή ως εναλλακτική την ένταξη μιας τεχνικής αξιολόγησης της αξιοπιστίας των συστημάτων.

Στόχος είναι, η διερεύνηση της λήψης αποφάσεων που προκύπτει από το πρώτο επίπεδο ως η ποιο κατάλληλη τεχνολογική λύση, πως μπορεί να βελτιστοποιηθεί και η διαχείρισή της να οδηγήσει σε βιώσιμα, ασφαλή και αποδοτικά υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ.

#### 6.7.2.1 Βελτίωση της ασφάλειας βάση στρατηγικών συντήρησης εξοπλισμού με εφαρμογή AHP

Η στρατηγική συντήρησης του μηχανολογικού εξοπλισμού είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφάλεια και τη συνολική επιχειρησιακή διαχείριση γενικά των μηχανολογικών συστημάτων (ΜΣ), σε κατασκευές στην ξηρά τη θάλασσα και τον αέρα. Στα συστήματα αυτά ανήκουν οι υπεράκτιες κατασκευές με τεχνολογίες που αξιοποιούν ΑΠΕ, καθώς και Υπεράκτια Μηχανολογικά Συστήματα (ΥΜΣ) που εξυπηρετούν διεργασίες όπως εξόρυξη και διαχείρηση πετρελαικών προιόντων, φυσικού αερίου, FSRU (Floating Storage Regasification Unit -Πλωτές μονάδες αποθήκευσης επαναεριοποίησης), πλοία, και άλλα μηχανολογικά συστήμτα, που λειτουργούν υπό τις ιδιαιτερότητες που επικρατούν στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Η υιοθέτηση εσφαλμένων ή αβέβαιων στρατηγικών συντήρησης σε ΥΜΣ μπορεί να προκαλέσει απώλεια στο χρόνο ολοκλήρωσης μιας διαδικασίας, κόστος και απώλεια πόρων, ενώ παράλληλα επιδρούν στη διατήρηση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού. Επιπλέον, ανακριβείς στρατηγικές συντήρησης  επιδρούν αρνητικά στις προσπάθειες βελτιστοποίησης του εξοπλισμού (Kerzner, et. al. 2017).

Η προσέγγιση με AHP της *κατάλληλης στρατηγικής συντήρησης* εφαρμόζεται σε υπεράκτιες κατασκευές, εφόσον στη λήψη αποφάσεων οι υπεύθυνοι που εμπλέκονται είναι πολλοί και τα πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν έχουν πολλές εναλλακτικές.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η συνεχής διαδικασία της παγκοσμιοποίησης οδηγεί στον ανταγωνισμό μεταξύ των ερευνητών και των κατασκευαστών. Ως αποτέλεσμα, είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας κατασκευής των μηχανημάτων, το κόστος γίνεται πιο ανταγωνιστικό και οι κατασκευές ποιο φιλικές προς το περιβάλλον.

Επιπλέον, οι περισσότερες τεχνικές και εμπορικές δραστηριότητες στις βιομηχανίες που δραστηριοποιούνται στο υπεράκτιο περιβάλλον, ελέγχονται συνεχώς από διεθνείς οργανισμούς όπως, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), η Διεθνής Ομοσπονδία Μεταφορών (ITF), η Διεθνής Οργάνωση Εργασίας (ILO) και άλλοι κυβερνητικοί καθώς και μη κυβερνητικοί οργανισμοί όπως, τα κράτη σημαίας, οι αρχές λιμένων, τα ναυτιλιακά επιμελητήρια, κλπ.

Οι οργανισμοί εξασφαλίζουν την εκτέλεση και την εφαρμογή των διεθνών κανονισμών και άλλων απαιτήσεων που σχετίζονται με την ασφάλεια και την αξιοπιστία στο πλαίσιο της λειτουργικότητας των συστημάτων κατά τις διάφορες δραστηριότητές τους. Η υιοθέτηση αυστηρών περιβαλλοντικών προτύπων, σε παγκόσμιο επίπεδο, υποχρεώνει τις εταιρείες διαχείρησης των υπεράκτιων κατασκευών να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων από τη λειτουργία των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να μειώσουν την πιθανή ρύπανση από τις δραστηριότητές τους.

Σήμερα με την αύξηση της τεχνολογικής ανάπτυξης, την ανάπτυξη αυτοματισμών και την αύξηση του αριθμού των μηχανημάτων, ο όγκος των επενδύσεων σε ενσώματα πάγια και μηχανήματα στις υπεράκτιοες κατασκευές έχει αυξηθεί σημαντικά.

Επομένως, η συντήρηση είναι μια αναπόφευκτη αιτία κόστους, με την αναλογία της στο λειτουργικό κόστος μιας κατασκευής να αντιπροσωπεύει από 15 έως 70% του συνολικού κόστους ανάλογα τον τύπο της βιομηχανίας (Sarkar et al., 2011). Περαιτέρω, η αύξηση του αριθμού των μηχανημάτων και η πολυπλοκότητα των υποδομών, απαιτεί ένα βέλτιστο μίγμα πολιτικών διαχείρισης, προκειμένου να αυξηθεί η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και ταυτόχρονα να μειωθούν τα λειτουργικά έξοδα.

Αυτό οδηγεί τους υπεύθυνους λειτουργίας των υπεράκτυων συστημάτων, με σκοπό να αντιμετωπίσουν το αναπόφευκτο κόστος συντήρησης, να προσπαθούν να υιοθετήσουν στρατηγικές συντήρησης του εξοπλισμού ικανές να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις αξιοπιστίας, τη διατήρηση της ασφάλειας με μείωση του ρίσκου και φυσικά στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Βέβαια η επιλογή του ποιο αποδοτικού μίγματος πολιτικών συντήρησης σε ΥΜΣ είναι ιδιαίτερα δύσκολη και αυτό διότι είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες.

Στην προσπάθεια αυτή, με την ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των προηγούμενων απαιτήσεων, οι υπεύθυνοι διαχείρισης των υπεράκτιων κατασκευών προσπαθούν να επιλέξουν την καλύτερη στρατηγική συντήρησης για κάθε εξάρτημα του εξοπλισμού ή του συστήματος από μια σειρά πιθανών εναλλακτικών λύσεων. Σε αυτές περιλαμβάνονται:

- η *προγνωστική*-καθορισμένη-προγραμματισμένη στρατηγική συντήρησης (predictive)
- η *προλυπτική*-αυτή που βασίζεται σε συνθήκες (preventive-condition based) και

- η *διορθωτική* συντήρηση (corrective ή Run to Failure)

Ακολουθώντας οποιαδήποτε από αυτές τις στρατηγικές διερευνώνται οι πιθανότητες εξασφάλισης της αξιοπιστίας, η ακεραιότητα των συστημάτων και του εξοπλισμού σε μια υπεράκτια κατασκευή. Περαιτέρω, μέσω της αποτελεσματικότητας από την εφαρμογή της στρατηγικής συσντήρησης επιτυγχάνονται τα σημερινά βασικά πρότυπα ασφάλειας και πρόληψης της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Ως εκ τούτου, η ανάλυση και η αιτιολόγηση της επιλογής της στρατηγικής συντήρησης για ΥΜΣ αποτελεί ένα κρίσιμο και περίπλοκο έργο, λόγω του μεγάλου αριθμού χαρακτηριστικών που πρέπει να ληφθούν υπόψη, πολλά από τα οποία είναι άυλα. Ενώ η εφαρμογή στρατηγικών συντήρησης είναι ζωτικής σημασίας για τους διαχειριστές και τους φορείς εκμετάλλευσης. Ειδικά όταν η συντήρηση του εξοπλισμού αποτελεί προφανή στόχο στην προσπάθεια μείωσης των λειτουργικών κινδύνων και της βελτιστοποίησης της αξιοπιστίας μακροπρόθεσμα.

Για τη διευκόλυνση της επίλυσης αυτού του προβλήματος, στη βιβλιογραφία προτείνονται μια σειρά από προσεγγίσεις πολλαπλών κριτηρίων για τη λήψη αποφάσεων (MCDM). Οι Almeida και Bohoris (1995), συζητούν την εφαρμογή της θεωρίας λήψης αποφάσεων στη συντήρηση, προσεγγίζοντας το αντικείμενο μέσω της θεωρίας χρησιμότητας πολλαπλών χαρακτηριστικών (MADM). Οι Triantaphyllou et al. (1997) προτείνουν τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP), λαμβάνοντας υπόψη τέσσερα κριτήρια συντήρησης: κόστος, δυνατότητα αποκατάστασης, αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Η μεθοδολογία της Συντήρησης με Εστίαση στην Αξιοπιστία (Reliability Centered Maintenance- RCM) είναι μια τεχνική που παρέχει ένα πλαίσιο για την πιο συστηματική αξιοποίηση της επιχειρησιακής εμπειρίας. Η RCM αντιπροσωπεύει μια μέθοδο για τη διατήρηση της λειτουργικής ακεραιότητας και έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί το κόστος συντήρησης εξισορροπώντας το υψηλότερο κόστος της διορθωτικής συντήρησης με το κόστος της προληπτικής συντήρησης, (Rausand, 1998). Πολλές άλλες προσεγγίσεις εξετάζουν τις εναλλακτικές στρατηγικές συντήρησης στη φάση σχεδιασμού και κατασκευής, όπως στην αεροναυπηγική βιομηχανία, που αργότερα προσαρμόστηκαν σε αρκετούς άλλους βιομηχανικούς τομείς (Al-Najjara et. al., 2003), (Wang et al., 2007), (Sarkar et al. (2011).

Στην διερεύνηση για την εισαγωγή μεθόδων αξιολόγησης στην ΕΜΣΑ, η προσέγγιση με AHP προτείνεται ως τεχνική λήψης αποφάσεων σε ΥΜΣ, διότι επιτρέπει τον χειρισμό τόσο ποιοτικών αξιολογήσεων όσο και ποσοτικών μετρήσεων από εκτιμήσεις ή καταγεγραμμένα δεδομένα προκειμένου να βελτιωθούν οι τελικές κρίσεις για την επιλογή της στρατηγικής συντήρησης (Dagkinis et al., 2012).

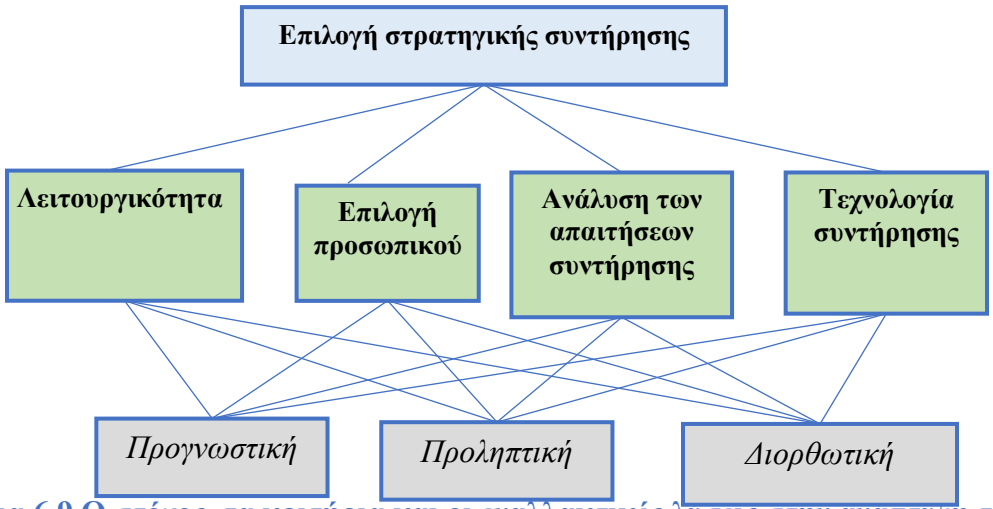
Οι ορισμοί για τις στρατηγικές συντήρησης βασίζονται σε δεδομένα από τη βιβλιογραφία και σε τεχνικά βιβλία χαρακτηριστικών των μηχανημάτων. Οι πληροφορίες αυτές επικαιροποιούνται, με βάση τα δεδομένα που έχουν αποκτηθεί από εμπειρογνώμονες κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του εξοπλισμού του συστήματος. Η ανάλυση έχει διαρθρωθεί κατά τρόπο ορθολογικό, ώστε να διατηρηθεί όσο είναι δυνατό πιο αντικειμενική η διαδικασία ενημέρωσης.
Επιπλέον, για να αξιολογηθεί η καλύτερη στρατηγική συντήρησης, λόγω του μεγάλου αριθμού μηχανημάτων που αποτελούν το λειτουργικό σύστημα σε μια υπεράκτια κατασκευή (αντλίες, συμπιεστές, εναλλάκτες θερμότητας, κλπ.), ο μηχανολογικός εξοπλισμός χωρίζεται σε ομάδες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια, αυτές οι ομάδες αντιστοιχούνται στις διαφορετικές στρατηγικές συντήρησης. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ομάδων είναι τα εξής:

- *Ομάδα μηχανημάτων 1*. Η πιθανή αποτυχία σε αυτή την ομάδα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες όσον αφορά την ασφάλεια των εργαζομένων, επηρεάζει την λειτουργικότητα της υπεράκτιας κατασκευής, προκαλεί περιβαλλοντικές ζημιές κλπ. Η *προγνωστική* συντήρηση (δηλαδή η συντήρηση με σταθερό χρόνο ή προγραμματισμένη) μπορεί να οδηγήσει σε καλά επίπεδα προστιθέμενης αξίας για τη λειτουργία του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να αξιολογηθεί σοβαρά αν εξυπηρετεί κάποιο σκοπό η μείωση εξόδων για τη συντήρηση. Σε αυτή την ομάδα περιλαμβάνεται ο κρίσιμος εξοπλισμός και το μεγαλύτερο ποσοστό των μηχανημάτων του υπεράκτιου μηχανολογικού συστήματος, δεδομένου ότι σε υπεράκτια αυτόνομα συστήματα η λειτουργικότητα ενός μηχανήματος αρκετά συχνά επιδρά στη διαθεσιμότητα της όλης κατασκευής.
- *Ομάδα μηχανημάτων 2*. Οι πιθανές αποτυχίες που ενδέχεται να εμφανίσουν αυτά τα μηχανήματα μπορεί να είναι σοβαρές, αλλά γενικά, δεν επηρεάζουν το περιβάλλον ή την ασφάλεια της υπεράκτιας κατασκευής. Μπορεί να επιτευχθεί μείωση του μέσου κόστους, αλλά για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να γίνουν σχετικά δαπανηρές συντηρήσεις.

- *Ομάδα μηχανημάτων 3.* Οι βλάβες δεν επηρεάζουν τη γενική διαθεσιμότητα του υπεράκτιου μηχανολογικού συστήματος και δεν εγκυμονούν κινδύνους για το ΥΜΣ, το περιβάλλον ή το προιόν που διαχειρίζονται. Τα ανταλλακτικά δεν είναι δαπανηρά, ώστε μπορεί να επιτευχθεί μικρή μείωση των εξόδων μέσω της μείωσης των αποθεμάτων-ανταλλακτικών. Αυτή η ομάδα περιέχει το χαμηλότερο ποσοστό των μηχανημάτων.

Σε αυτό το σημείο της έρευνας παρουσιάζονται οι τρεις εναλλακτικές στρατηγικές συντήρησης που αξιολογούνται και είναι οι ακόλουθες:

- *Προγνωστική συντήρηση ή Προγραμματισμένη συντήρηση*. Πρόκειται για μια στρατηγική συντήρησης βασισμένη στο χρονικό διάστημα. Οι πρακτικές σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνουν τη διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, η οποία είναι προγραμματισμένη. Είναι μια ενέργεια που μπορεί να εκτελεστεί σε οποιοδήποτε κρίσιμο ή μη κρίσιμο εξοπλισμό και βασίζεται σε χαρακτηριστικά αξιοπιστίας του εξοπλισμού.
- *Προληπτική ή Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες*. Προϋπόθεση για την εφαρμογή συντήρησης βάσει συνθηκών, είναι η διαθεσιμότητα ενός συνόλου συσκευών ελέγχου και συλλογής δεδομένων για την παρακολούθηση της απόδοσης του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο. Η συνεχής επισκόπηση των λειτουργικών συνθηκών δύναται εύκολα και με σαφήνεια να επισημάνει μια ανώμαλη κατάσταση (π.χ. υπέρβαση ενός ορίου παραμέτρων), επιτρέποντας στο διαχειριστή της διαδικασίας να εκτελέσει με ακρίβεια τους απαραίτητους ελέγχους και, εάν είναι απαραίτητο να διακόψει τη λειτουργία του μηχανήματος προτού παρουσιαστεί βλάβη.
- *Διορθωτική συντήρηση ή Συντήρηση μετά από αποτυχία.* Το κύριο χαρακτηριστικό της διορθωτικής στρατηγικής συντήρησης είναι ότι οι ενέργειες εκτελούνται μόνο όταν ένα μηχάνημα σταματήσει να λειτουργεί σε απροσδόκητο χρόνο. Εδώ, δεν υπάρχουν παρεμβάσεις μέχρι να υπάρξει αποτυχία. Η διορθωτική προτείνεται ειδικά στις περιπτώσεις όπου είτε το κόστος συντήρησης είναι μεγαλύτερο από το κόστος αντικατάστασης του εξοπλισμού ή μέρους του μετά από την αποτυχία, είτε σε εξοπλισμό που δεν σχετίζεται με την ασφάλεια του ΥΜΣ ή τη διαθεσιμότητά του.




**Διάγραμμα 6.9 Ο στόχος, τα κριτήρια και οι εναλλακτικές λύσεις στην ανάπτυξη του AHP.**

Στην ανάπτυξη του διαγράμματος της ιεράρχησης των διαδικασιών στη λήψη αποφάσεων με AHP (διάγραμμα 6.9), ο στόχος είναι να προσδιοριστεί το γενικό πλαίσιο που θα ικανοποιεί τις ανάγκες των υπευθύνων λήψης αποφάσεων για την επίλυση του προβλήματος επιλογής της βέλτιστης στρατηγικής συντήρησης.

Οι πληροφορίες στη δημιουργία της κατασκευής βασίστηκαν στην έρευνα στοιχείων από τις απατήσεις των κατασκευαστών, των κανονισμών και σε υποδείξεις του προσωπικού της διαχειρίστριας εταιρείας. Από τα συμπεράσματα της έρευνας, η ιεραρχία AHP αναπτύσσεται σε τρία επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αντιπροσωπεύει τον κύριο στόχο της επιλογής συντήρησης, ενώ το χαμηλότερο επίπεδο περιλαμβάνει τις εναλλακτικές στρατηγικές συντήρησης. Τα κριτήρια αξιολόγησης που επηρεάζουν τον πρωταρχικό στόχο συμπεριλαμβάνονται στο δεύτερο επίπεδο και σχετίζονται με τέσσερις διαφορετικές πτυχές που επιδρούν στην ανάπτυξη μιας συντήρης και εγκυμονούν κινδύνους. Αυτές είναι:

1. Η λειτουργικότητα – Κίνδυνοι που σχετίζονται με τη λειτουργική διαδικασία
2. Η Επιλογή Προσωπικού
3. Η Ανάλυση Απαιτήσεων Συντήρησης και
4. Η Επιλογή Τεχνολογίας στο πλαίσιο πραγματοποίησης της Συντήρησης

Τα κριτήρια αυτά θα μπορούσαν να χωριστούν περαιτέρω σε διάφορα επιμέρους υποκριτήρια.

Για την οριοθέτηση της μεθοδολογικής ιεράρχησης που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία καταιγισμού ιδεών (*brainstorming)* (Bevilacqua, et. al. 2000). Στη διαδικασία συμπεριλαμβάνονται οι αξιολογήσεις όλων των ανθρώπων που αντιμετωπίζουν προβλήματα λήψης αποφάσεων σχετικά με συντηρήσεις σε ΥΜΣ και στην ξηρά. Συγκεκριμένα, σε αυτή τη μελέτη λήφθηκαν υπόψη οι πληροφορίες του προσωπικού των τεχνικών τμημάτων (από ΥΜΣ και στην ξηρά που εκτελεί τις αναλύσεις συντήρησης και αναπτύσσει τις διαδικασίες βελτίωσης της συντήρησης), του προσωπικού που διαχειρίζεται τις εργασίες συντήρησης και του προσωπικού που αποτελεί το τμήμα που ασχολείται με τις ασφαλείς διαδικασίες επί του ΥΜΣ και αναλύει το βαθμό επικινδυνότητας από μια διεργασία.

Οι παράγοντες που περιέχονται στα τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη μελέτη είναι:

- *Λειτουργικότητα*, προσδιορίζεται η απώλεια ηλεκτρικής ισχύος και αποτυχίες των μηχανημάτων χειρισμού και ελέγχου του ΥΜΣ. Αυτά σχετίζονται με την επιχειρησιακή αξιοπιστία του, τη περιβαλλοντική βλάβη-ρύπανσή οποιαδήποτε άλλη περιβαλλοντική επιβάρυνση (π.χ. διαρροής, σύγκρουσης, κ.α.), την επίδραση στην ασφάλεια του προσωπικού και στην φήμη της εταιρείας διαχείρησης του υπεράκτιου συστήματος. Η απώλεια ηλεκτρικής ισχύος συνδέεται με τη διακοπή διαθεσιμότητας της κατασκευής που προέρχεται από μια αποτυχία, τον χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση, την επισκευή ή την αποκατάσταση των συνθηκών λειτουργίας και την εκ νέου επαναφορά του συστήματος στη λειτουργική κατάσταση (Mean Time Between Failures – MTBF). Επιπλέον, οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και οι απώλειες των εγκαταστάσεων διαχείρισης χωρίζονται σε άμεσες και έμμεσες: η άμεση βλάβη-ζημιά σχετίζεται με τα απτά αποτελέσματα της βλάβης στο μηχάνημα, η έμμεση βλάβη-ζημία λαμβάνει υπόψη τις πιθανές επιδράσεις της βλάβης στο σύστημα ως αποτέλεσμα ενός "ντόμινο" σε άλλες εγκαταστάσεις και μέσα.
- Οι κίνδυνοι του κριτηρίου *επιλογής προσωπικού***,** αφορούν την αξία-βαρύτητα της επιλογής προσωπικού. Η βέλτιστη σκέψη είναι ότι το ΥΜΣ είναι επανδρωμένο με το ικανότερο προσωπικό για τις εργασίες συντήρησης και το χειρισμό των διαδικασιών. Είναι όμως δυνατόν στην βιομηχανία να υπάρχει πάντα προσωπικό με την ικανότητα να επιθεωρεί και να επισκευάζει κάθε νέο εξοπλισμό με την όλο και περισσότερο πολυπλοκότητα από την εφαρμογή νέας τεχνολογίας; Η απάντηση έγκειται στην πολιτική επισκευών που ακολουθεί η εταιρεία διαχείρησης του ΥΜΣ, όπου είτε το πλήρωμα που επανδρώνεται είναι ακριβότερο

αλλά έχει μεγάλη εμπειρία και γνώση ή τα πληρώματα είναι φθηνότερα και οι επισκευές εκτελούνται από εξειδικευμένες ομάδες που επισκέπτονται τα ΥΜΣ για προγραμματισμένες συντηρήσεις. Επίσης, η τάση στη βιομηχανία κατά την ανάπτυξη των συστημάτων να μειώσει τον αριθμό του προσωπικού αυξάνοντας τις αυτοματοματοποιημένες λειτουργίες, θα μπορούσε να επηρεάσει την ασφάλεια όταν το προσωπικό πρέπει να πραγματοποίηση όλες τις επισκευές. Τότε ιδιαίτερη σημασία δίδεται στον παράγοντα κόπωση. Ως εκ τούτου, όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν διαφορετικό βάρος και επιρροή για κάθε μια από τις στρατηγικές συντήρησης στις ανά ζεύγη συγκρίσεις.

- Το κριτήριο *της ανάλυσης των απαιτήσεων συντήρησης,* λαμβάνει υπόψη το κόστος που απαιτείται για την εφαρμογή της στρατηγικής και τη διαθεσιμότητα των μηχανημάτων. Αυτό περιγράφεται από τις απαιτήσεις συντήρησης βάσει των αναγκών της στρατηγικής συντήρησης, των διαθέσιμων πόρων, της διαθεσιμότητας ενός ανταλλακτικού ή των απαιτήσεων της εφοδιαστικής αλυσίδας που πρέπει αναλυθεί και να υπολογιστεί η αξία του εφοδιασμού του ΥΜΣ σε ανταλλακτικά, της προσβασιμότητας των μηχανημάτων προς επισκευή, κ.λπ.
- Το κριτήριο της *τεχνολογίας συντήρησης*. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν ενσωματωθεί πολλές προηγμένες τεχνολογίες που καλύπτουν εκτεταμένα πεδία, όπως απομακρισμένη (σε απευθείας σύνδεση-online) ανάλυση απόδοσης εξοπλισμού, ανάλυση ανωμαλιών λόγο φθοράς, τεχνολογίες ακριβούς ευθυγράμμισης, εξελιγμένα όργανα μετρήσεων, κλπ. Η τεχνολογία επιλογής συντήρησης επιτυγχάνει βελτίωση των αποτελεσμάτων συντήρησης και παρέχει προβλεπτικότητα των βλαβών, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πλήρη αστοχία ενός μηχανήματος.

Στην ανάπτυξη του προβλήματος λήψης αποφάσεως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χαρακτηριστικά των κριτηρίων και των διαθέσιμων εναλλακτικών, μελετήθηκε η επιλογή της στρατηγικής συντήρησης για το σύστημα *ηλεκτρικής παραγωγής*. Η μελέτη αυτού του συστήματος περιέχει όλα τα στοιχεία που πρέπει να συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση εφόσον σε πιθανή βλάβη επηρεάζεται:

- η ασφάλεια του ΥΜΣ,
- του προσωπικού που εργάζεται σε αυτό,
- του προιόντος που διαχειρίζεται

- του περιβάλλοντος
- η διαθεσιμότητα της υπεράκτιας κατασκευής
- υπάρχουν τεχνολογικές απαιτήσεις λόγο πολυπλοκότητας του συστήματος
- απαιτείται εμπειρία και γνώση από τους εμπλεκόμενους

Σύμφωνα με αυτούς τους παράγοντες καθορίζεται το διάγραμμα ιεραρχίας στο οποίο εισάγονται όλα τα διαθέσιμα δεδομένα. Στη συνέχεια, ο μαθηματικός αλγόριθμος της διεργασίας αναλυτικής ιεράρχησης (AHP) χρησιμοποιείται στη σύνθεση των αποτελεσμάτων και την κανονικοποίηση-ομαλοποίηση των τιμών. Οι προτεραιότητες για τις εναλλακτικές λύσεις καθορίζονται σε σχέση με καθένα από τα κριτήρια απόφασης. Οι προτεραιότητες για καθένα από τα κριτήρια σε σχέση με τη σημασία τους για την επίτευξη του στόχου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ζεύγη συγκρίσεων. Οι συγκρίσεις των εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με τους κινδύνους που σχετίζονται με τη λειτουργική διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις των εμπειρογνωμόνων, επεξεργάζονται σύμφωνα με τις βαρύτητες και τα αποτελέσματα προτεραιότητας παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

**Πίνακας 6.12 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της λειτουργικότητας.**

| *Λειτουργικότητα* | *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | *Προτεραιότητα (Priority)* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | 1 | 4 | 9 | 0,6939 |
| *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | 1/4 | 1 | 7 | 0,2533 |
| *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | 1/9 | 1/7 | 1 | 0,0528 |

**Πίνακας 6.13 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της επιλογής προσωπικού.**

| *Επιλογή προσωπικού* | *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | *Προτεραιότητα (Priority)* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | 1 | 1/3 | 1/7 | 0,0810 |
| *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | 3 | 1 | 1/5 | 0,1884 |
| *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | 7 | 5 | 1 | 0,7306 |

**Πίνακας 6.14 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της ανάλυσης των απαιτήσεων συντήρησης.**

| *Ανάλυση των απαιτήσεων συντήρησης* | *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | *Προτεραιότητα (Priority)* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | 1 | 1/3 | 1/7 | 0,0810 |
| *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | 3 | 1 | 1/5 | 0,1884 |
| *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | 7 | 5 | 1 | 0,7306 |

**Πίνακας 6.15 Προτεραιότητα εναλλακτικών σε σχέση με το στόχο λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της τεχνολογίας συντήρησης.**

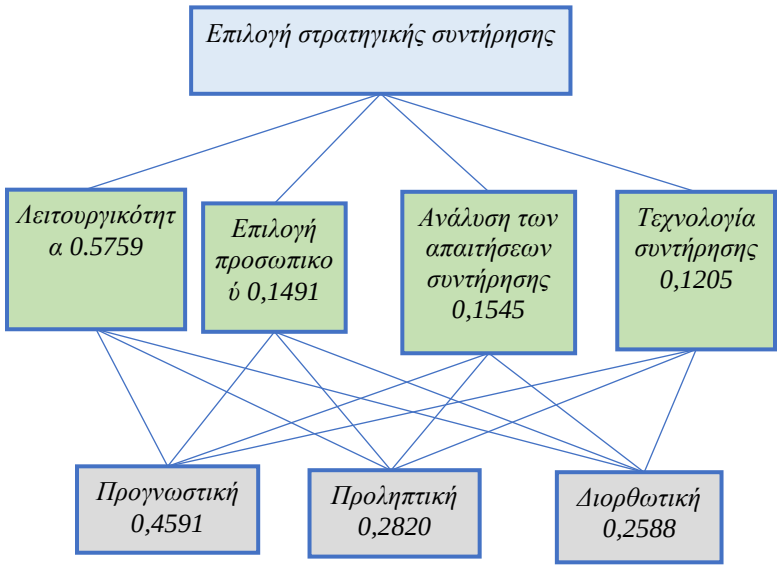
| *Τεχνολογία συντήρησης* | *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | *Προτεραιότητα (Priority)* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | 1 | 1/3 | 7 | 0,2897 |
| *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | 3 | 1 | 9 | 0,6554 |
| *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | 1/7 | 1/9 | 1 | 0,0549 |

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα κριτήρια σε σχέση με την επίτευξη του στόχου και με συγκρίσεις ανά ζεύγη, το κριτήριο υψηλότερης κατάταξης είναι αυτό που χρησιμοποιείται για την επίτευξη του στόχου.

Στον πίνακα 6.16 και την διάγραμμα 6.10, παρουσιάζεται η τελική κατάταξη για το σύστημα *ηλεκτρικής παραγωγής*. Με βάση την επιλογή των εμπειρογνωμόνων σχετικά με τα κριτήρια λήψης αποφάσεων, τις κρίσεις τους σχετικά με τη σχετική σημασία καθενός και τις εκτιμήσεις τους σχετικά με τη στρατηγική συντήρησης σε σχέση με κάθε ένα από τα κριτήρια τα αποτελέσματα για τη στήριξη στη λήψη αποφάσεων προτείνεται η προληπτική συντήρηση ως η κατάλληλη εναλλακτική για την επίτευξη του στόχου.

**Πίνακας 6.16 Αποτελέσματα για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης με την ανάπτυξη της AHP.**

| *Επιλογή στρατηγικής συντήρησης* | *Λειτουργικότητα* | *Επιλογή προσωπικού* | *Ανάλυση των απαιτήσεων συντήρησης* | *Τεχνολογία συντήρησης* | *Στόχος* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση (Predictive)* | *0,3996* | *0,0121* | *0,0125* | *0,0349* | *0,4591* |
| *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες (Preventive)* | *0,1459* | *0,0281* | *0,0291* | *0,0790* | *0,2820* |
| *Διορθωτική συντήρηση (Corrective)* | *0,0304* | *0,1089* | *0,1129* | *0,0066* | *0,2588* |
| *Σύνολο* | *0,5759* | *0,1491* | *0,1545* | *0,1205* | *1,0000* |




**Διάγραμμα 6.10 Τελική κατάταξη για την επιλογή στρατηγικής συντήρησης του συστήματος ηλεκτρικής παραγωγής.**

Τα συμπεράσματα από την εφαρμογή της μεθόδου AHP, παρουσιάζουν ότι είναι δυνατή η μοντελοποίηση διαφόρων πτυχών κινδύνου. Στο μοντέλο, κάθε βάρος κριτηρίου κινδύνου το οποίο βασίζεται στη γνώμη των εμπειρογνωμόνων, εισάγεται σε μήτρα όπου υπολογίζει και πραγματοποιούνται κατά ζεύγη συγκρίσεις. Τα αποτελέσματα της κατάταξης των στοιχείων παρέχουν υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων προκειμένου να αποφευχθεί η επιρροή μιας ακατάλληλης στρατηγικής συντήρησης σε ένα σύστημα ώστε να μειωθεί η πιθανότητα των κινδύνων.

Τα αποτελέσματα από την επιλογή στρατηγικής συντήρησης του συγκεκριμένου εξοπλισμού που προκύπτει με τη μέθοδο AHP επιβεβαιώνει ότι μπορεί η AHP μπορεί να βελτιώσει και να αντιπροσωπεύσει μια αποτελεσματική προσέγγιση για να ενισχύσει τη λήψη αποφάσεων.

#### 6.7.2.2 Υβριδική ανάλυση για την ενίσχυση στη λήψη αποφάσεων με σύνθεση πολυκριτηριακών μεθοδολογιών

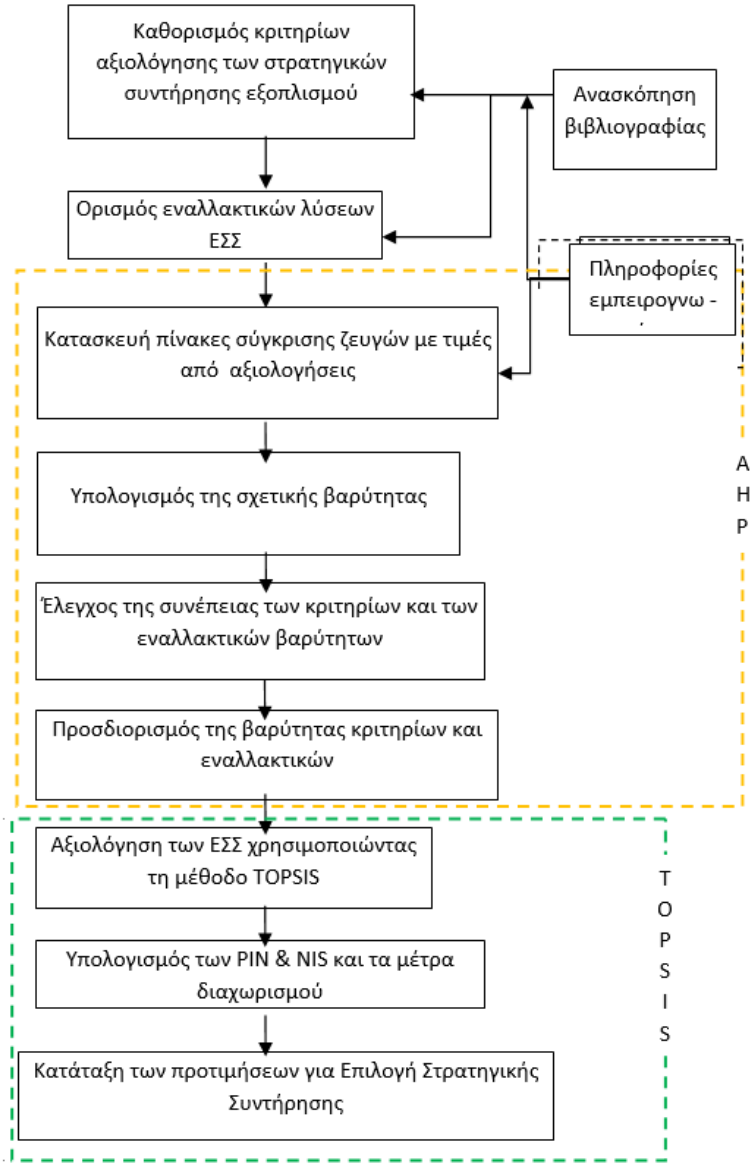
Η λήψη αποφάσεων με σκοπό της επαύξηση αξιοπιστίας μπορεί να ενισχυθεί με το συνδυασμό πολυκριτηριακών μεθοδολογιών (διάγραμμα 6.11). Όπως διαπιστώθηκε στη βιβλιογραφική ανασκόπηση υβριδικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν και να εξαλείψουν τις αδυναμίες που μπορεί να έχει κάποια μέθοδος στην αρχική της μορφή. Όμως, αξιολογήσεις υπεράκτιων τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ με συνδυασμό πολυκριτηριακών μεθόδων δεν διαπιστώθηκαν. Το κενό αυτό στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής διερευνάται με την ανάπτυξη ανάλυσης υβριδικής εφαρμογής των AHP και TOPSIS, ώστε ένα ολοκληρωμένο εργαλείο να εισαχθεί ως εναλλακτική των εργαλείων που συνθέτουν την προσέγγιση με ΕΜΣΑ.

Στην ανάλυση της υβριδικής προσέγγισης για τη μέθοδο AHP αξιοποιήθηκαν δεδομένα της προηγούμενης μελέτης.

Δηλαδή, στο πρώτο βήμα χρησιμοποιείται η AHP για τον υπολογισμό των βαρών των ιδιοτήτων ή των κριτηρίων καθώς και των συνολικών βαρών των εναλλακτικών επιλογών σε κάθε χαρακτηριστικό. Στη συνέχεια στο σύνθετο βάρος των κριτηρίων που προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την AHP, εξετάζεται η ασυνέπεια κάθε ζεύγους μήτρας σύγκρισης με το συντελεστή συνοχής (Consistency Index - CI) για να ελεγχθεί η συνοχή των κριτηρίων και

εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με τον στόχο ώστε στο τέλος να προκύψουν οι τελικές προτεραιότητες. Όταν το επίπεδο της συνέπειας δεν κρίνεται αποδεκτό, τα στοιχεία του σχετικού πίνακα επαναπροσδιορίζονται από τους εμπειρογνώμονες.

Στη συνέχεια κατά τη σύνθεση των μεθοδολογιών εφαρμόζεται η TOPSIS (Sennaroglu, et. al. 2012), (Wu, 2007) για το πρόβλημα της αξιολόγησης και το αποτέλεσμα που προκύπτει προσδιορίζει την τάξη προτεραιότητας της στρατηγικής συντήρησης εξοπλισμού σε μηχανήματα πλοίων.




**Διάγραμμα 6.11 Προτεινόμενο υβριδικό μοντέλο επιλογής στρατηγικής συντήρησης (ΕΣΣ) εξοπλισμού (PIS, NIS Positive & Negative Ideal Solution).**

Κατά την διερεύνηση της AHP και σύμφωνα με τις κρίσεις εμπειρογνωμόνων οι οποίοι δίνους τιμές σύμφωνα με την κλίμακα Saaty, με σύγκρισης ζευγών για τα κριτήρια *της Επιλογής στρατηγικής συντήρησης* ΕΣΣ (maintenance strategy) προκύπτει ο πίνακας 6.17.

**Πίνακας 6.17 Συγκρίσεισα ανα ζεύηη για Επιλογή στρατηγικής συντήρησης.**

| *Επιλογή στρατηγικής συντήρησης* | *Προγνωστική Συντήρηση* | *Προληπτική Συντήρηση βασισμένη σε συνθήκες* | *Διορθωτική συντήρηση* | *Διάνυσμα προτεραιότητας* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση* | 1 | 3 | 7 | 0,6491 |
| *Προληπτική Συντήρηση* | 1/3 | 1 | 5 | 0,2790 |
| *Διορθωτική συντήρηση* | 1/7 | 1/5 | 1 | 0,0719 |
| *Σύνολο* | 1,47 | 4,2 | 13 | 1 |

Το διάνυσμα προτεραιότητας λαμβάνεται από το κανονικοποιημένο ιδιοδιάνυσμα του πίνακα, και στη συνέχεια, υπολογίζεται το $\lambda_{max}$από τον πίνακα σύγκρισης (πίνακα 2) το οποίο είναι $\lambda_{max} = 3{,}0967$.

Υπολογίζοντας το συντελεστή συνέπειας υπολογίζεται ο λόγος συνέπειας (*Consistency Ratio-CR*) λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή συνέπειας (Consistency Index -CI) τα οποία δίνονται από τις σχέσεις:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} = 0{,}04836 \qquad (6.9)$$

και

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0{,}0833 \qquad (6.10)$$

Αυτή η τιμή του λόγου *συνέπειας* **(**CR) είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τιμή του 0,10. Επομένως, η συνοχή της μήτρας των κριτηρίων βρίσκεται εντός αποδεκτής ανοχής. Σύμφωνα με την ανάπτυξη της AHP τα βάρη για κάθε εναλλακτική λύση έναντι των άλλων κριτηρίων και των τιμών στόχων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.18.

**Πίνακας 6.18 Αποτελέσματα για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης με την ανάπτυξη της AHP**

| *Επιλογή στρατηγικής συντήρησης* | *Λειτουργικότητα* | *Επιλογή προσωπικού* | *Ανάλυση των απαιτήσεων συντήρησης* | *Τεχνολογία συντήρησης* | *Στόχος* |
|---|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση* | 0,3890 | 0,0184 | 0,0048 | 0,0320 | 0,4442 |
| *Προληπτική Συντήρηση* | 0,1672 | 0,0429 | 0,0082 | 0,0724 | 0,2907 |
| *Διορθωτική συντήρηση* | 0,0431 | 0,1662 | 0,0497 | 0,0061 | 0,2651 |
| *Σύνολο* | 0,5993 | 0,2275 | 0,0627 | 0,1105 | 1,0000 |

Στη συνέχεια, σχηματίζεται ο πίνακας αποφάσεων για τη μέθοδο TOPSIS με τα βάρη που προέκυψαν από την AHP. Με την ομαλοποίηση αυτών των δεδομένων, κατασκευάζεται η σταθμισμένη μήτρα αποφάσεων (πίνακας 6.19) και από αυτά καθορίζονται οι ιδανικές και οι αρνητικές ιδανικές λύσεις (πίνακας 6.20). Υπολογίζονται τα μέτρα διαχωρισμού για κάθε εναλλακτική λύση μέχρι να υπολογιστεί η σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.

**Πίνακας 6.19 Ομαλοποιημένος πίνακας αποφάσεων με TOPSIS.**

| *Επιλογή στρατηγικής συντήρησης* | *Λειτουργικότητα* | *Επιλογή προσωπικού* | *Ανάλυση των απαιτήσεων συντήρησης* | *Τεχνολογία συντήρησης* |
|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση* | 0,914006 | 0,106586 | 0,094861 | 0,403067 |
| *Προληπτική Συντήρηση* | 0,392858 | 0,248507 | 0,162055 | 0,911939 |
| *Διορθωτική συντήρηση* | 0,101269 | 0,962748 | 0,982212 | 0,076835 |
| *Σύνολο* | 0,59930 | 0,22750 | 0,06270 | 0,11050 |

**Πίνακας 6.20 Μέτρο διαχωρισμού από θετική (Positive Ideal Solution PIS) και αρνητική ιδανική λύση (Negative Ideal Solution NIS).**

| *Επιλογή στρατηγικής συντήρησης* | *Λειτουργικότητα* | *Επιλογή προσωπικού* | *Ανάλυση των απαιτήσεων συντήρησης* | *Τεχνολογία συντήρησης* | $S_i^+$ | $S_i^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Προγνωστική Συντήρηση* | 0,54776 | 0,02425 | 0,00595 | 0,04454 | 0,206 | 0,490 |
| *Προληπτική Συντήρηση* | 0,23544 | 0,05654 | 0,01016 | 0,10077 | 0,368 | 0,178 |
| *Διορθωτική συντήρηση* | 0,06069 | 0,21903 | 0,06158 | 0,00849 | 0,487 | 0,223 |

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν τη σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση $c_i$ σχέση (6.11) και την αντίστοιχη της κατάταξης των στρατηγικών συντήρησης.

$$c_i = \frac{s_i^-}{(s_i^+ + s_i^-)} \quad 0 < c_i < 1 \qquad (6.11)$$

**Πίνακας 6.21 Σχετική εγγύτητα και κατάταξη των στρατηγικών συντήρησης εξοπλισμού.**

| Επιλογή στρατηγικής συντήρησης | $c_i$ | Κατάταξη |
|---|---|---|
| *Προγνωστική* Συντήρηση | 0,7044 | 1 |
| *Προληπτική* Συντήρηση | 0,3260 | 2 |
| *Διορθωτική* συντήρηση | 0,3137 | 3 |

Η συνολική κατάταξη για κάθε στρατηγική συντήρησης παρουσιάζεται στον πίνακα 6.21 όπου η υψηλότερη κατάταξη αντιπροσωπεύεται από τη στρατηγική προληπτικής συντήρησης.

Το μοντέλο δύο σταδίων μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα στις καταστάσεις λήψης αποφάσεων όπου υπάρχουν πολλές επιλογές και τα κριτήρια για την τελική απόφαση είναι αβέβαια και διφορούμενα. Η εκτεταμένη έρευνα σε πλοία θα μπορούσε να εισαγάγει μια προσέγγιση με την ικανότητα να αντιμετωπίζονται αβέβαια κριτήρια, με ποιοτικά και ποσοτικά μέτρα απόδοσης. Επιπλέον, μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα αξιολόγησης υπεράκτιων δομών, όπου υπάρχουν πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια.

### 6.7.2.3 Πρόληψη λειτουργικών βλαβών σε υπεράκτια συστήματα με συνδυασμό MCDM & FMEA

Σε σύνθετα λειτουργικά συστήματα όπως οι υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης δυναμικού ΑΠΕ είναι σαφές ότι απαιτούνται τόσο ποσοτικές όσο και ποσοτικές κρίσεις. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύχθηκαν αρκετοί αλγόριθμοι. Στο σημείο αυτό ένα μοντέλο απόφασης προτείνεται που μπορεί να ενισχύσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και εφαρμόζεται στην αυτόνομη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης η οποία αποτελεί ένα υπεράκτιο σύστημα τεχνολογιών αξιοποίησης ΑΠΕ.

Η λήψη απόφασης βασισμένη στην εμπειρία των προηγούμενων αποτυχιών με την εφαρμογή μεθοδολογίας πολλαπλών κριτηρίων παρέχει μια γενική προσέγγιση για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων με σκοπό τη βελτιστοποίηση σε λειτουργικό και σχεδιαστικό επίπεδο υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης ΑΠΕ.

Στην διερεύνηση πρόληψης λειτουργικής αποτυχίας πραγματοποιείται ανάλυση με μια τροποποιημένη FMEA (Chen, 2013), (Ilangkumaran, et. al. 2014), η οποία προσδιορίζεται ως g-ανάλυση. Με την τροποποίηση αυτή προκύπτουν ποσοτικά δεδομένα, τα οποία συνδυάζονται με υποκειμενικές εκτιμήσεις σε μια διαδικασία AHP. Το μοντέλο που προτείνεται για τη λήψη αποφάσεων προσφέρει μια ευέλικτη προσέγγιση για κατάλληλες βελτιώσεις αλλά και στήριξη αποφάσεων για την λειτουργική διαχείριση της υπεράκτιας πλατφόρμας, η οποία χρησιμοποιείται στην εφαρμογή της παρούσας προσέγγισης.

Η χρήση του AHP σε συνδυασμό με την FMEA παρέχει μια ενισχυμένη μέθοδο αξιολόγησης (Jih-Kuang, et. al. 2007) . Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων απαιτεί τροποποίηση του FMEA, ώστε να επιτευχθεί η άμεση εισαγωγή των τιμών του RPN στο AHP. Αυτό εφαρμόζεται διότι τα δεδομένα τόσο των μεμονωμένων RPN όσο και του συνολικού λαμβάνουν τιμές μεταξύ 1 και 1000. Όμως για την εισαγωγή των δεδομένων RPN στο AHP πρέπει η τιμή τους να μειωθεί σε κλίμακα μεταξύ 0 και 1. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια αλγοριθμική σχέση για τη μεταβολή των αποτελεσμάτων RPN (Saaty, 2008).

Η αρχή της FMEA παραμένει η ίδια ώστε να βρεθεί το RPN για ένα δεδομένο στοιχείο ή το συνολικό σύστημα. Οι τροποποιήσεις των τιμών πραγματοποιούνται μετά τον πρώτο

υπολογισμό της αιτίας της αποτυχίας σε μια δεύτερη φάση υπολογισμού του RPN και στη συνέχεια τα δεδομένα εισάγονται στην AHP.

Για τον υπολογισμό της νέα τιμής του RPN, προστίθεται μια νέα στήλη στον πίνακα FMEA και αφορά την πιθανότητα αιτίας της αποτυχίας. Αυτό ονομάζεται προϊόν πιθανότητας (Probability product) και αξιολογείται σε κλίμακα από 1 έως 10. Τα αποτελέσματα για το προϊόν πιθανότητας δίδονται χρησιμοποιώντας τη σχέση (6.12):

$$Prob.product = \frac{Prob.of\ cause}{10} * Prob.of\ the\ effect \qquad (6.12)$$

Ένα νέο τροποποιημένο RPN (που συμβολίζεται ως rpn στον πίνακα ) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το προϊόν πιθανότητας ανίχνευσης και της σοβαρότητας, το οποίο επιτρέπει να υπολογίζεται μια νέα τιμή για το rpn σε κάθε αποτυχία λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα της αιτίας. Ο υπολογισμός αυτός δίνεται από τη σχέση:

$$rpn = Sever * Detect\ rate * Pro.product \qquad (6.13)$$

Ο μέσος όρος αυτών των τροποποιημένων $rpn_{av}$ (το σύνολο του rpn διαιρούμενο με τα τμήματα του συστήματος ***n*** που αξιολογούνται) χρησιμοποιείται στον ακόλουθο τύπο (6.14) της ανάλυσης g και το αποτέλεσμα εισάγεται απευθείας στο AHP ως κριτήριο.

$$g = 1 - \left[\frac{log_2(rpn_{av}+1)}{10}\right] \qquad (6.14)$$

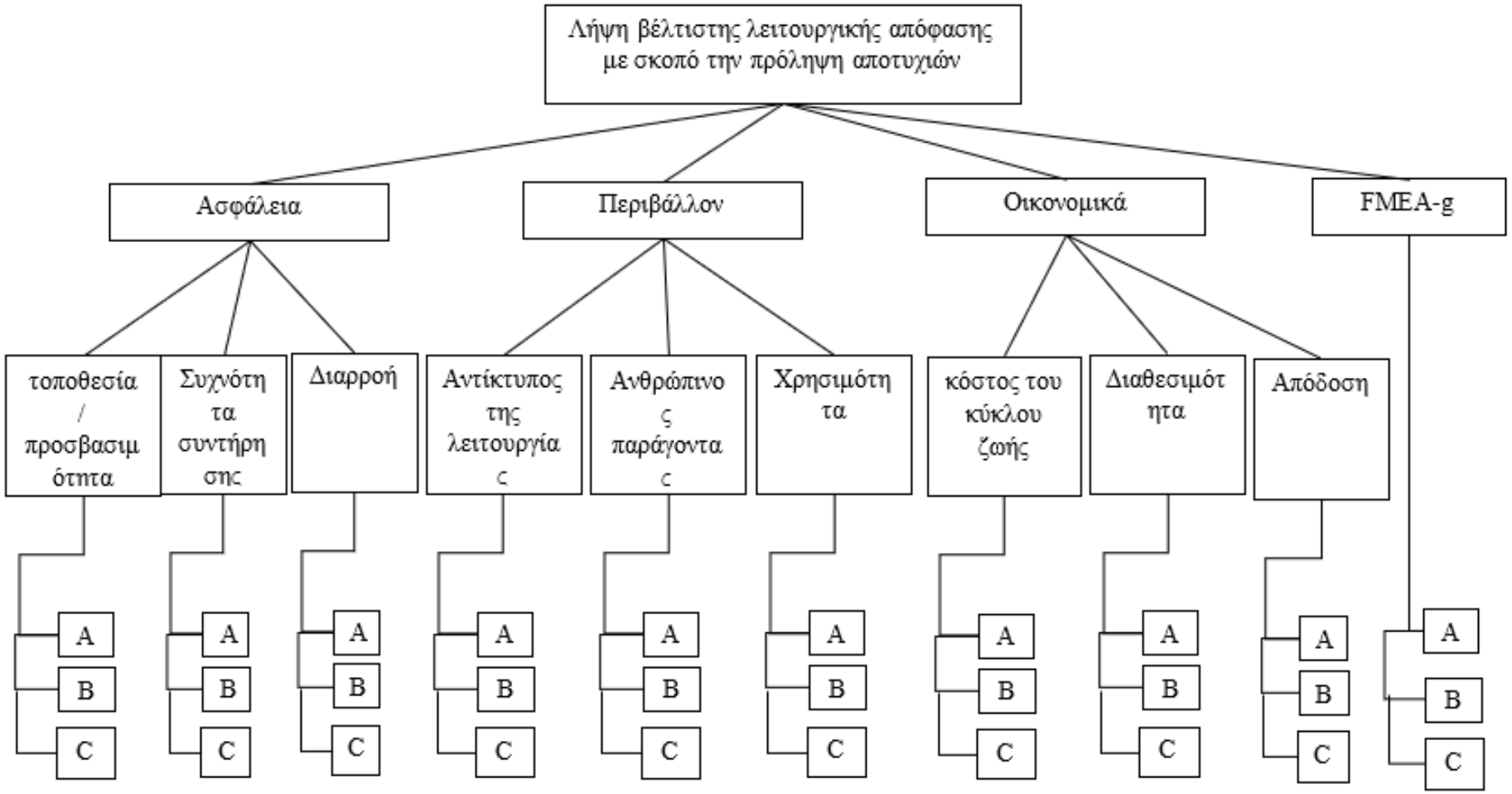
Για να πραγματοποιηθεί η επίλυση της σχέσης του g, χρησιμοποιείται η τιμή του $rpn_{av}$ με μια βάση λογαρίθμου ~ 2 στο δεύτερο μέρος της σχέσης (6.14). Με αυτό το $\log_2 (rpn_{av}+1)$, το εύρος των τιμών των αποτελεσμάτων μειώνονται από το μέσο όρο μεταξύ 1 και 10 και στη συνέχεια διαιρούμενο με το 10 δίνει την απαιτούμενη τιμή σε ένα εύρος μεταξύ 0 και 1. Η προσθήκη με την άθροιση της τιμής 1 για το $rpn_{av}$ αποτρέπει τον αποκλεισμό της ανάλυσης σε περίπτωση όπου πρέπει να υπολογιστεί ένας log του 0.

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα μέθοδο τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα του $rpn_{av}$ παρουσιάζονται στον πίνακα 6.22. Η εισαγωγή του αποτελέσματος *(g)* γίνεται στην AHP ως κριτήριο, και στη συνέχεια, η αξιολόγηση πραγματοποιείται όπως σε μια κανονική μέθοδο AHP με τη στάθμιση της σπουδαιότητάς της να αποφασίζεται μέσω της χρήσης συγκρίσεων ανα ζεύγη.

## Πίνακας 6.22 *FMEA* και τροποποιημένο *rpn*.

| System part | Function | Failure mode | S (Severity rating) | Cause(s) of failure | O (Occurrence rating) | Occurrence/Probability of effect | Detection method/ Current controls | D (Detection rating) | Probability Product | modified *rpn* (Risk priority |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Air compressor | supply air to open air motivated valves | air compressor no rotation or no air supply | 9 | electrical or mechanical failure | 5 | 10 | PSA | 10 | 5 | 450 |
| PSA (Pressure Air Switch) | observe air pressure supply to valves and EPFD | fail to observe the pressure decrease | 7 | defective PS | 1 | 10 | observe from control panel | 10 | 1 | 70 |
| Sea Water inlet valve | supply sea water | no open/ no sea water supply | 8 | no air supply to open valvestack valve from corrosion | 1 | 10 | FI1, PS1 | 10 | 1 | 80 |
| (FWF): Sea water inlet filter before feed pump | clean & supply sea water | no water across filter | 4 | dirty filter | 3 | 10 | FI1, PS1 | 10 | 3 | 120 |
| Sea water feed pump (SWFP) | supply sea water | feed pump no rotation or no water supply | 8 | electrical or mechanical failure | 2 | 10 | FI1, PS2 | 10 | 2 | 160 |
| Sand Filter (SF) | clean & supply sea water | no water across filter | 3 | dirty filter | 0 | 1 | FI1, PS1 | 10 | 0 | 0 |
| PT: Compares pressure before sand filter and after filter 1,2 | observe press before and after filters | fail to observe the press difference | 8 | defect PT | 0 | 1 | FI1 PS1 | 10 | 0 | 0 |
| Filter 1 | remove dirty after SF | no water across filter | 3 | dirty filter | 2 | 1 | PT, PS1, FI1 | 10 | 0,2 | 6 |
| VA1 : Valve after No1 filter | supply sea water to HPP | no open | 5 | no air supply to open valve | 0 | 1 | PT, PS1, FI1 | 10 | 0 | 0 |
| Filter 2 | remove dirty after SF | no water across filter | 3 | dirty filter | 3 | 1 | PT, PS1, FI1 | 10 | 0,3 | 9 |
| VA2: Valve After No2 filter | supply sea water to HPP | no open | 5 | no air supply to open valve | 0 | 1 | PT, PS1, FI1 | 10 | 0 | 0 |
| FI1: inlet water flow indicator | observe flow rate | fail to observe flow rate | 3 | defect, dirty FI1 | 0 | 1 | PS1 | 10 | 0 | 0 |
| PS1 : Activate by water pressure before HHP | observe pressure before HPP | fail to observe the pressure increase | 8 | defective PS1 | 2 | 10 | PS2, FI2 | 10 | 2 | 160 |
| TI1: feed water temperature | observe water tempreture | fail to react water temp rise | 9 | defective TI1 | 0 | 1 | observe in control panel | 10 | 0 | 0 |
| NI1: inlet water conductivity meter | observe water salinity | fail to react water salinity | 7 | defective NI1 | 0 | 1 | observe in control panel | 10 | 0 | 0 |
| High Pressure Pump (HPP) | supply sea water to RO | HPP pump no rotation | 8 | electrical or pump failure/ belt broken | 5 | 10 | PS2 | 10 | 5 | 400 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| High Pressure Pump (HPP) | supply sea water to RO | HPP pump no rotation | 8 | electrical or pump failure/ belt broken | 5 | 10 | PS2 | 10 | 5 | 400 |
| Excessive Press Fluctuation (EPF) DUMPER | reduce fluctuation to system press after reciprocating HPP | no open | 4 | stack valve from corrosion | 0 | 1 | PS2 | 10 | 0 | 0 |
| PS2: control operating pressure | observe RO operating pressure | fail to observe the pressure rise | 6 | defective PS | 0 | 1 | PS4, FI3, PS3 | 10 | 0 | 0 |
| Reverse Osmosis (RO) | clean sea water to potable | mebrane fail | 9 | ruins or dirty membranes | 8 | 9 | PS3, PS4, NI2, FI3 | 10 | 7,2 | 648 |
| PS4: discharge brine press | observe brine press | fail to observe pressure fluctuation | 8 | defective PS | 0 | 10 | PS3 | 10 | 0 | 0 |
| MV2: closed at normal operation, opens when ERD fail | closed to supply brine in press to work ERD | no closed | 9 | motor failure | 1 | 10 | PS3, PS4 | 10 | 1 | 90 |
| VA3: this valve open for feed water the Energy Recovery Device | supply sea water ERD for feed RO | no open | 5 | no air supply to open valve | 0 | 10 | FI2 | 10 | 0 | 0 |
| Energy Recovery Device (ERD) | use the dump press energy of brine disharge from RO to Increase the feed | no rotation | 7 | mechanical failure to ceramic rotating impeller | 0 | 10 | FI2 | 10 | 0 | 0 |
| MV1: Opens and control press when working ERD | control press when working ERD | no open | 7 | motor failure | 0 | 5 | PS3, PS4 | 10 | 0 | 0 |
| FI2: flow indicator after REC | observe flow rate | fail to observe flow rate | 5 | dirty FI2 defective FI2 | 0 | 1 | observed of control panel | 10 | 0 | 0 |
| Boosters pump (BPP) | increase the press of water supplied from ERD | BPP pump no rotation | 7 | electrical or mechanicalfai lure | 5 | 10 | PS2 | 10 | 5 | 350 |
| FI3: flow indicator at pure water line | observe flow rate | fail to observe flow rate | 6 | dirty FI3 defective FI3 | 0 | 1 | PS3, observe control panel | 10 | 0 | 0 |
| PS3: Permeate water press stop plant above 3 bar | observe potable water press | fail to observe pressure rise | 9 | defective PS3 | 0 | 5 | FI3, PS4, observe of Control panel | 10 | 0 | 0 |
| TI2: permeate water temperature | observe temperatur of permeate water | fail to observe temperature rise | 9 | defective TI3 | 1 | 1 | observe from control panel | 10 | 0,1 | 9 |
| NI2: inlet water conductivity meter | observe water salinity | fail to observe water salinity rise | 9 | defective NI2, dirty NI2 | 1 | 1 | observe from control panel | 10 | 0,1 | 9 |
| | | | | | | | | *Total rpn* | | 2561 |




**Διάγραμμα 6.12 Σύνθεση AHP και εναλλακτικές λύσεις.**

Προσεγγίζοντας την κατασκευή ιεραρχίας της μεθόδου AHP για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του υπεράκτιου συστήματος στο διάγραμμα 6.12 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός σχετικά με το στόχο και τη λήψη αποφάσεων. Για τη λήψη αποφάσεων ώστε να προληφθούν οι αποτυχίες από τη λειτουργική διαχείριση του συστήματος αξιολογούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

- Ασφάλεια. Σχετίζεται με τη λειτουργία, την τοποθεσία εγκατάστασης του υπεράκτιου συστήματος και την ασφάλεια από το πρόγραμμα συντήρησης. Αφορά την προσβασιμότητα, τη χρηστικότητα, το πρόγραμμα συντήρησης και τη σχέση με θέματα ασφάλειας.
- Περιβάλλον. Η κατασκευή να είναι φιλική προς το περιβάλλον. Η αύξηση της ανησυχίας για το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής υποδεικνύει τη συμβατότητα του συστήματος με αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα.
- Οικονομικά. Η κατασκευή να είναι οικονομικά βιώσιμη
- FMEA-g, όπου η τιμή εισάγεται άμεσα από του υπολογισμούς της ανάλυσης με FMEA σε αντίθεση με τα άλλα κριτήρια

Σύμφωνα με τη φιλοσοφία των κριτηρίων, το μοντέλο αναπτύσσεται περαιτέρω σε υπο-κριτήρια που αξιολογούνται για την εκτέλεση αυτού του πλαισίου της AHP, και αφορούν:

- Υπο-κριτήρια για την ασφάλεια:
    - Η τοποθεσία / προσβασιμότητα περιλαμβάνει π.χ. την τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος, την αλληλεπίδραση με άλλους χρήστες της θάλασσας, στα οποία συμπεριλαμβάνονται η πιθανότητα κυκλοφορούν άλλα πλοία, η έλλειψη προσωπικού και η εφοδιαστική αλυσίδα.
    - Συχνότητα συντήρησης, σχετικά με τις τεχνικές απαιτήσεις, το πρόγραμμα επιθεώρησης, τις επισκευές, για την αποδοτική λειτουργία της κατασκευής.
    - Διαρροή, σχετίζεται με την πιθανότητα εμφάνισης διαρροής του συστήματος εμποδίζοντας την αποδοτικότητά του σύμφωνα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού.
- Υπο-κριτήρια για το Περιβάλλον:
    - Αντίκτυπος της λειτουργίας του συστήματος σε σχέση με το περιβάλλον, η απόρριψη λειτουργικών αποβλήτων (π,χ, η άλμη από ένα σύστημα αφαλάτωσης που ενδέχεται να επιβαρύνει το περιβάλλον εάν δεν υπάρχει η πρόβλεψης

διάλυσης), η επιλογή της θέσης εγκατάστασης του συστήματος σε σχέση με τη οπτική όχληση τη διατάραξη των κατοίκων ή άλλους παράγοντες.

- Ανθρώπινος παράγοντας, όσον αφορά την ευκολία, την ευχρηστία, την εργονομία, τις συνθήκες εργασίας, που επηρεάζονται από την κίνηση της πλωτής κατασκευής από τα κύματα και μπορούν να προκαλέσουν τραυματισμό σε προσωπικό, βλάβες στο συστήματα, κλπ.
- Χρησιμότητα κατά τη λειτουργική ζωή του συστήματος και επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη διάλυσή του.

- Οικονομικά Υπο-κριτήρια:
  - Το κόστος του κύκλου ζωής, είναι το κόστος του συνολικού συστήματος σε σχέση με την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του. Ο αριθμός αυτός περιλαμβάνει το κόστος κατασκευής, τα γενικά και διοικητικά έξοδα, το προσωπικό, το κόστος συντήρησης, τα ανταλλακτικά, κλπ.
  - Διαθεσιμότητα, η οποία αντιπροσωπεύει τις περιόδους λειτουργίας, τις περιόδους διακοπής της, το μέσο χρόνο μεταξύ αποτυχιών κ.λπ.
  - Απόδοση, σύμφωνα με τα διαθέσιμα κεφάλαια και τις προσδοκίες από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Οι προτεινόμενες εναλλακτικές λύσεις στην επιλογή της λήψης για την βέλτιστη λειτουργική απόφαση με σκοπό την πρόληψη αποτυχιών περιλαμβάνουν:

A. Την αύξηση (μεγιστοποίηση) της παραγωγής κατά 25%. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την εγκατάσταση του συστήματος σε θέση υψηλότερου ενεργειακού δυναμικού, πιθανώς με δυσκολίες προσέγγισης της κατασκευής, μεγαλύτερα φορτία στην ανεμογεννήτρια και προσαρμογή ενός αλγορίθμου λειτουργίας για τη μεγιστοποίηση αξιοποίησης της διαθέσιμης ενεργειακής, η οποία όμως οδηγεί σε περισσότερους κύκλους εκκίνησης και κράτησης του συστήματος αφαλάτωσης, άρα περισσότερους κύκλους εκφόρτισης σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες) και αύξηση της συχνότητας των επισκευών.
B. Μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής και ελαχιστοποίηση του κόστους. Αυτό απαιτεί να λειτουργήσει με τρόπο ο οποίος περιλαμβάνει πιο ομαλή λειτουργία, λιγότερες στάσεις και εκκινήσεις, με περισσότερες επισκευές αντί αντικαταστάσεις μηχανημάτων. Αυτό μπορεί να μειώσει την παραγωγικότητα κατά 25%.

C. Η διατήρηση των τρεχουσών συνθηκών λειτουργίας, ανάλογα με την ποικιλομορφία των αναγκών των πολιτών στην περιοχή της εγκατάστασης του συστήματος.

Κάθε αξιολόγηση των κριτηρίων γίνεται σε σχέση με τις εναλλακτικές λύσεις λαμβάνοντας υπόψη παλαιότερες αποτυχίες και απαιτήσεις της λειτουργίας του συστήματος, επειδή είναι παράγοντες που θα επηρεάσουν τις αποφάσεις και τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για αξιόπιστη λειτουργία. Το μαθηματικό μοντέλο της διαδικασίας αναλυτικής ιεραρχίας (AHP), "τρέχει" για να συνθέσει τα αποτελέσματα και να ομαλοποιήσει τις τιμές. Η τιμή του g που προστέθηκε στην AHP σε αυτό το στάδιο επιτρέπει στο λογισμικό να ληφθεί υπόψη κατά τη σύνθεση των αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της σύνθεσης της AHP με την εισαγωγή στην αξιολόγηση τα δεδομένα που προέκυψαν από την τροποποιημένη FMEA απεικονίζουν ως λύση στο πρόβλημα λήψης αποφάσεως την εναλλακτική Β ως καλύτερη (με συνολική αξία 0.4059 πίνακας 6.23). Η εναλλακτική Β αντιπροσωπεύει τη μείωση της παραγωγικότητας ως προτεινόμενη ευνοϊκή εναλλακτική λύση.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στην ανάπτυξη και λειτουργία των υπεράκτιων έργων αξιοποίησης ΑΠΕ:

- αξιολογεί την αποτελεσματική κατανομή πόρων
- υιοθετεί τεχνικές που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και
- παρέχει έναν μηχανισμό για την επίτευξη χρηστικότητας και αποτελεσματικότητας από τη διαχείριση των συστημάτων, επίσης
- ενσωματώνει κατάλληλα, με ορθολογικό και κατανοητό τρόπο εναλλακτικές και αξιολογήσεις σε ένα ενιαίο εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη λήψη αποφάσεων.

**Πίνακας 6.23 Κατάταξη αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της σύνθεσης της AHP με την εισαγωγή στην αξιολόγηση τα δεδομένα που προέκυψαν από την τροποποιημένη FMEA στο πρόβλημα λήψης αποφάσεως.**

| | Ασφάλεια | | | Περιβάλλον | | | Οικονομικά | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Εναλλακτικές | Τοποθεσία / προσβασιμότητα | Συχνότητα συντήρησης | Διαρροή | Αντίκτυπος από τη λειτουργία | Ανθρώπινος παράγοντας | Χρησιμότητα / λειτουργική ζωή | Κόστος του κύκλου ζωής | Διαθεσιμότητα | Απόδοση | FMEA-g Ανάλυση | Σύνολα |
| A | 0,0058 | 0,0051 | 0,0028 | 0,0660 | 0,0099 | 0,0058 | 0,0065 | 0,0484 | 0,0450 | 0,0571 | 0,2525 |
| B | 0,0499 | 0,0346 | 0,0350 | 0,0133 | 0,1066 | 0,0501 | 0,0346 | 0,0059 | 0,0059 | 0,0701 | 0,4059 |
| C | 0,0506 | 0,0173 | 0,0121 | 0,0312 | 0,0454 | 0,0194 | 0,0717 | 0,0147 | 0,0164 | 0,0628 | 0,3416 |
| Σύνολα | 0,1063 | 0,0570 | 0,0498 | 0,1105 | 0,1619 | 0,0753 | 0,1128 | 0,0690 | 0,0673 | 0,1900 | 1,0000 |
| | 0,2131 | | | 0,3477 | | | 0,2491 | | | | 1,0000 |
| | 1,0000 | | | | | | | | | | |

Κατά την σύνθεση των μεθοδολογιών ως εργαλεία αξιολόγησης ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα. Τα αποτελέσματα της τροποποιημένης rpn εισήχθησαν απευθείας στη διαδικασία AHP για να συγκριθούν με άλλα κριτήρια που έχουν διαταχθεί σε ένα ιεραρχικό μοντέλο. Η χρήση της AHP, όπως έχει εφαρμοστεί σε εκατοντάδες παραδείγματα τόσο πραγματικών όσο και υποθετικών αναλύσεων, επιτρέπει μια πλήρως τεκμηριωμένη και διαφανή απόφαση σαφώς τεκμηριωμένη. Τα αποτελέσματα και οι συνθετικές πληροφορίες για τον προσδιορισμό της σχετικής κατάταξης των εναλλακτικών επιλογών και των ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων συγκρίνονται με τη αξιολόγηση εμπειρογνωμόνων για την εξαγωγή βαρών και προτεραιοτήτων. Η μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στην εφαρμογή του μοντέλου στο σύστημα αφαλάτωσης με τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ και μετά την ανάλυση η αξιολόγηση διασφαλίζει αν η τρέχουσα απόφαση μπορεί να είναι ισχυρή ή θα πρέπει να επαναπροσδιοριστεί.

#### 6.7.2.4 Αξιολόγηση αξιοπιστίας υπεράκτιας πλατφόρμας ΑΠΕ με TOPSIS και FMEA

Η πρόληψη της αποτυχίας ή η επαύξηση της αξιοπιστίας και η διαχείριση των κινδύνων είναι μια διαδικασία που διευκολύνει την αξιολόγηση μιας κατασκευής ώστε να καταστεί βιώσιμη. Ειδικά οι υπεράκτιες κατασκευές που βασίζουν τη λειτουργία τους στην εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό καθιστά έντονο και ασαφές το πεδίο έρευνας για έναν υπεύθυνο λήψης αποφάσεων κατά το σχεδιασμό του τρόπου που συσχετίζονται οι υψηλές προτεραιότητες που πρέπει να δοθούν προκειμένου να μειωθεί ή να αποτραπεί μια αποτυχία.

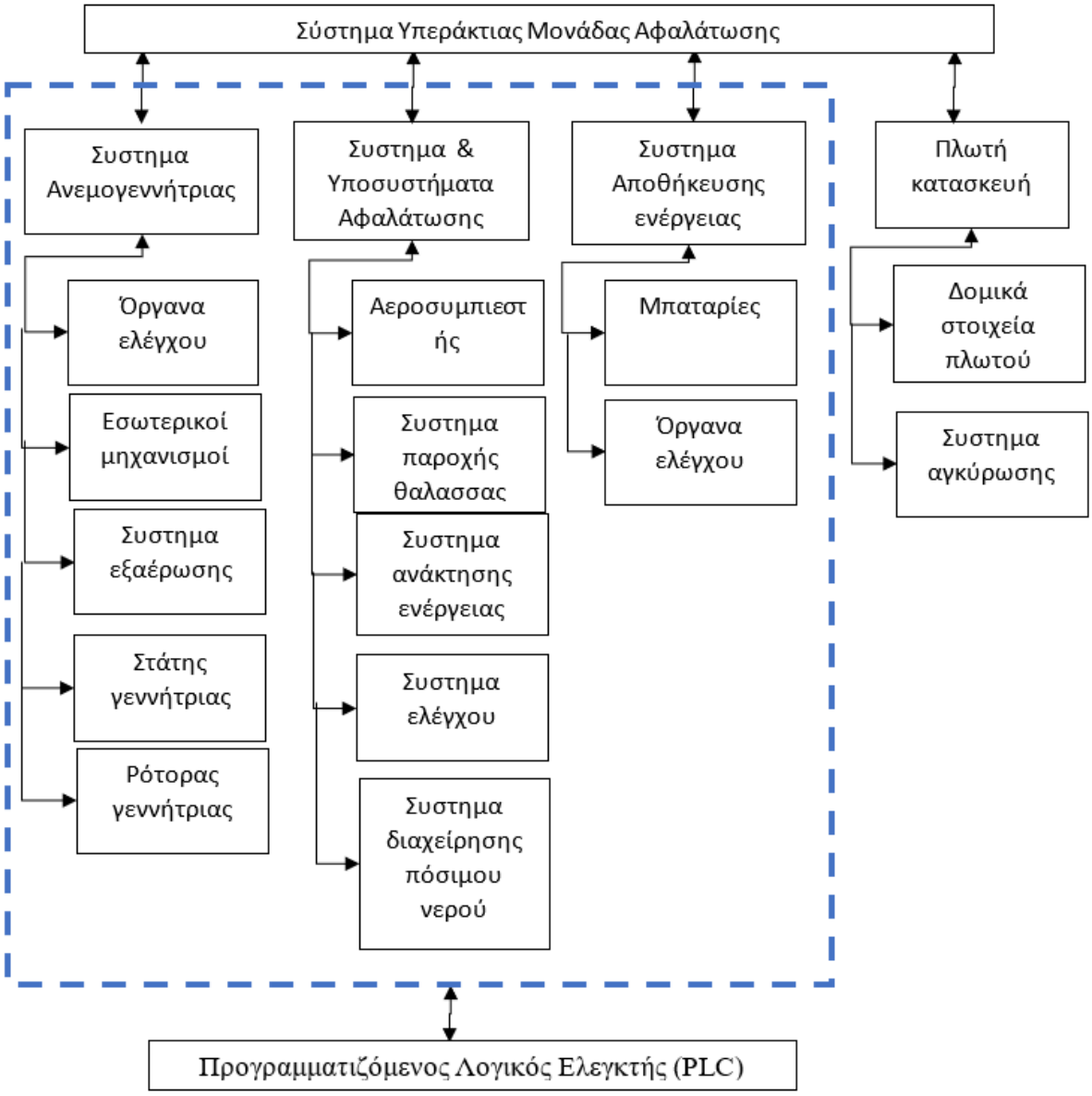
Προκειμένου να εξαλειφθεί η επίδραση της ευαισθησίας ποιοτικών και ποσοτικών παραγόντων η προσέγγιση σε συνδυασμό με FMEA, που χρησιμοποιείται ώστε να εκτιμηθούν οι κίνδυνοι μιας υπεράκτιας κατασκευής, και της TOPSIS (Τεχνική για τη σειρά προτιμήσεων με την ομοιότητα με την ιδανική λύση) ενισχύεται η μεθοδολογική αξιολόγηση της σοβαρότητας των επιπτώσεων και της δυνατότητας ανίχνευσης των τρόπων αστοχίας σε πολύ μικρό σφάλμα.

Η υποδομή του συστήματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.13 και για την μελέτη του χωρίζεται σε τέσσερα κύρια συστήματα.

- Τη Μονάδα παραγωγής ενέργειας, αποτελούμενη από γεννήτρια ισχύος ανεμογεννήτριας
- Την πλωτή κατασκευή
- Τη μονάδα αφαλάτωσης που παράγει πόσιμο νερό

- Τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για την ασφαλή τροφοδοσία του κρίσιμου εξοπλισμού σε περίπτωση αιφνίδια διακοπής της λειτουργίας του συστήματος

Κάθε σύστημα αποτελείται από ολοκληρωμένα υποσυστήματα των οποίων οι λειτουργίες με σκοπό την επίτευξη μιας αποστολής / διαδικασίας. Η κατανομή του κάθε υποσυστήματος διαιρείται σε συγκροτήματα και υποσυγκροτήματα. Η λειτουργία του συστήματος και η διαχείριση ενέργειας επιτυγχάνεται από τοπικούς Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (PLC) οι οποίοι εποπτεύουν τη λειτουργικότητα του συστήματος.




**Διάγραμμα 6.13 Διαμόρφωση κατασκευής του συστήματος αφαλάτωσης ανοικτής θάλασσας με αξιοποίηση δυναμικού ΑΠΕ.**

Μετά την υποδιαίρεση του συστήματος κατηγοριοποιούνται οι καταγεγραμμένες βλάβες και εκτιμώνται καταστάσεις πιθανών βλαβών. Οι παρατηρούμενες αποτυχίες και οι αναμενόμενοι τρόποι αστοχίας εξετάζονται για όλα τα μέρη του συστήματος αφαλάτωσης ανοικτής θάλασσας που τροφοδοτούνται από WT, ώστε να βρεθούν τα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ των διαφόρων συστημάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6.24, όπου οι κοινές λειτουργικές βλάβες χωρίζονται σε τρεις σχετικές στήλες.

**Πίνακας 6.24 Κατάταξη ανίχνευσης.**

| **Υλικά** | **Μηχανικά** | **Ηλεκτρικά** |
|---|---|---|
| Δομικά | Μηχανικά | Ηλεκτρική μόνωση |
| Κόπωση | Ευθυγράμμιση | Ηλεκτρική αποτυχία |
| Υλικά | Διάρρηξη Σπάσιμο | Εσφαλμένο σήμα εξόδου |
| | Αποκόλληση | Σφάλμα λογισμικού |
| | Φράξιμο | Διακυμάνσεις εξόδου |
| | Θερμικό | |
| | Ρωγμές | |

Μετά την αναγνώριση των τρόπων αποτυχίας, τα δεδομένα των αποτυχιών και οι πιθανές αναμενόμενες βλέβες που μπορεί να προκάλεσουν την αποτυχία του συστήματος κατηγοριοποιούνται σε νέο πίνακα όπου σύμφωνα με τα κοινά αίτια αποτυχιών, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.25.

**Πίνακας 6.25 Αιτίες βλαβών.**

| **Δομικά** | **Φθορλα - Μηχανικά** | **Ηλεκτρικά** |
|---|---|---|
| Σφάλμα σχεδιασμού | Μηχανική Κόπωση | Ηλεκτρικοί ελεγκτές |
| Εξωτερικές ζημιές | Διάτρηση σωλήνα | Απώλεια εισόδου ισχύος |
| Σφάλμα εγκατάστασης | Υπερβολική φθορά αντίστρωφης όσμωσης | Βραχυκύκλωμα |
| Σφάλμα συντήρησης | Δονήσεις | Αποτυχία μόνωσης |
| Μηχανική υπερφόρτωση | Διάβρωση | Ηλεκτρική υπερφόρτωση |

Τότε με την εφαρμογή της FMEA συσχετίζεται κάθε κατάσταση αστοχίας με την αιτία και στη συνέχεια υπολογίζει τη συχνότητα εμφάνισης για κάθε αιτία βλάβης. Με τη χρήση των πινάκων 6.24 και 6.25 και των αποφάσεων εμπειρογνωμόνων εκτελείται η διαδικασία της FMEA. Για κάθε λειτουργία αποτυχίας με διάφορες αιτίες βλαβών, ο πολλαπλασιασμός των τιμών εμφάνισης, ανίχνευσης και σοβαρότητας για κάθε αιτία αποτυχίας έχει ως αποτέλεσμα τον πίνακα 6.26 στον οποίο παρουσιάζονται οι σχετικές τιμές του αριθμού προτεραιότητας κινδύνου RPN.

**Πίνακας 6.26 Αριθμοί προτεραιότητας κινδύνου (RPN) από την εφαρμογή της FMEA.**

| **Τυπικά υποσύνολα** | **RPN** |
|---|---|
| Ηλεκτρικοί ελεγκτές (Electrical Controls) | 250 |
| Μηχανική υπερφόρτωση (Mechanical overload) | 190 |
| Διάτρηση σωλήνα (Pipe puncture) | 140 |
| Διάβρωση (Corrosion) | 135 |
| Εξωτερικές ζημιές (External damage) | 100 |
| Δονήσεις (Vibration) | 50 |
| Σφάλμα συντήρησης (Maintenance fault) | 60 |
| Υπερβολική φθορά RO (Excessive RO wear) | 23 |
| Αποτυχία μόνωσης (Insulation failure) | 182 |
| Βραχυκύκλωμα (Electrical short) | 20 |
| Απώλεια εισόδου ισχύος (Loss of power input) | 112 |
| Ηλεκτρική υπερφόρτωση (Electrical overload) | 80 |
| Σφάλμα εγκατάστασης (Installation defect) | 40 |
| Σφάλμα σχεδιασμού (Design fault) | 5 |
| Μηχανική Κόπωση (Fatigue) | 147 |

Δεδομένου ότι οι τιμές RPN είναι παρούσες σε όλες τις (τρεις) ομάδες, η ανάλυση TOPSIS εφαρμόζεται για τρόπους αστοχίας σε κατασκευαστικά-δομικά στοιχεία του συστήματος, σε μηχανήματα και για ηλεκτρικά συστήματα. Επομένως, σταθμίζοντας αυτές τις ομάδες σύμφωνα με τις εκτιμήσεις ως εναλλακτικές οι οποίες συμπεριλαμβάνουν το αρχικό κόστος, την ανταπόκριση σε αποτυχίες λόγω της απόστασης της υπεράκτιας πλατφόρμας από την

πλησιέστερη γη, το κόστος της περιόδου διακοπής λειτουργίας του συστήματος και το κόστος περιβαλλοντικού κινδύνου, εκτελείται η αξιολόγηση με την μέθοδο TOPSIS.

**Πίνακας 6.27 Σχετική εγγύτητα με την ιδανική λύση.**

| | | |
|---|---|---|
| αρχικό κόστος | 0.30 | |
| κόστος περιόδου διακοπής λειτουργίας | 0.60 | |
| απόκριση σε αποτυχίες | 0.71 | Καλύτερη λύση |
| κόστος περιβαλλοντικού κινδύνου | 0.47 | |

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS (πίνακας 6.27) σύμφωνα με τα προτεινόμενα κριτήρια ορίζουν ως την καλύτερη εναλλακτική λύση σε σχέση με τη σχετική εγγύτητα στην ιδανική λύση την ανταπόκριση στις αποτυχίες βλάβες, διότι είναι ζωτικής σημασίας για το σύνολο του συστήματος, για τον χρήστη του παραγόμενου προϊόντος (πόσιμο νερό), για την ασφάλεια του συστήματος καθώς και του περιβάλλοντος.

Από την παρούσα προσέγγιση συμπεραίνεται ότι:

- η FMEA έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την αξιοπιστία των αυτόνομων συστημάτων, ειδικά για το υπεράκτιο περιβάλλον, όπου η αξιοπιστία έχει κρίσιμο ρόλο στην πιθανή σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και
- η μέθοδος TOPSIS ενισχύει την ικανότητα βελτίωσης των αποφάσεων στο υπεράκτιο αμφίβολο περιβάλλον.

Ως εκ τούτου, στην ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων, τα οποία απαιτούν ελάχιστη ή καθόλου συντήρηση σε μερικά από τα μέρη τους, καθιστώντας την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πιο αποδοτική από πλευράς κόστους και βιώσιμη ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων δύναται να αποτελέσει αποδοτικό εργαλείο στην ενίσχυση των υπευθύνων στη λήψη αποφάσεων.

## 6.8. Τελικό Πλαίσιο Αξιολόγησης

Ένας από τους σημαντικούς στόχους σε κάθε περίπτωση ανάπτυξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων είναι η επιλογή των κατάλληλων εργαλείων που μπορούν να τις αξιολογήσουν λαμβάνοντας υπόψη τις δυσκολίες στην δημιουργία ους και τις αντιθέσεις των απόψεων των διαφορετικών ομάδων ενδιαφέροντος που συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία, πράγμα που μπορεί να καθυστερήσει ή να εμποδίσει την κατασκευή των νέων δομών.

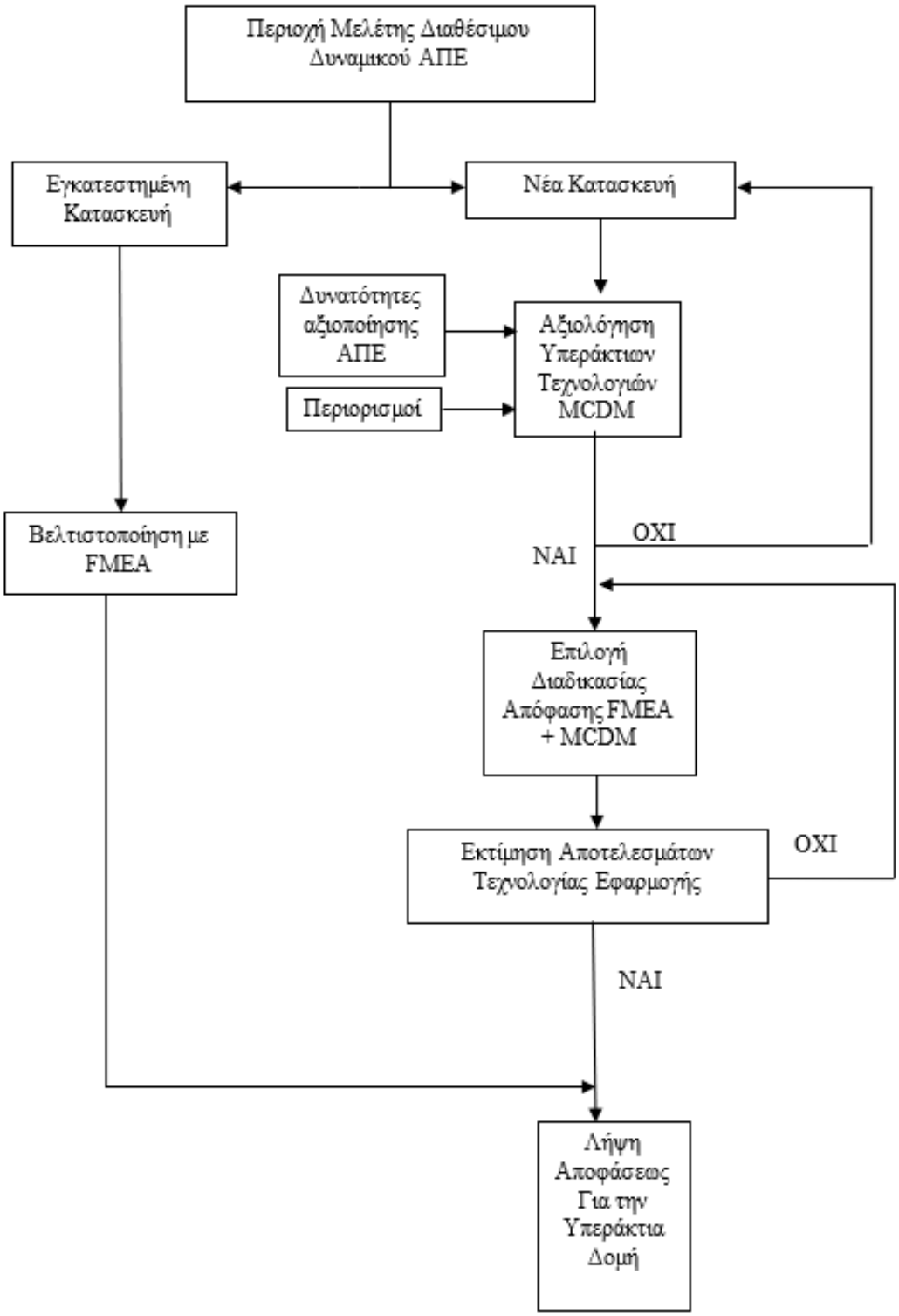
Περαιτέρω, να μετουσιωθούν οι διαθέσιμες τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ σε πραγματικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις αξιοπιστίας και αποδοτικότητας από την εγκατάστασή τους στο υπεράκτιο περιβάλλον. Ένα περιβάλλον, που ενώ διατίθεται μεγάλο ενεργειακό δυναμικ οι αποφασίζοντες βρίσκονται αντιμέτωποι με τα δύσκολα προβλήματα επιλογής των κατάλληλων εργαλείων για να αξιολογήσουν την ανάπτυξη των δομών σε ένα πλαίσιο που θα οδηγήσει στην αειφόρο ανάπτυξη.

Στις παραγράφους του κεφαλαίου που έχουν προηγηθεί έγινε εφαρμογή διαφόρων μεθοδολογιών αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων ώστε να διαπιστωθούν τα πεδία που μπορούν να διαχειριστούν και η ικανότητά τους να παράγουν έγκυρα αποτελέσματα σε περιβάλλοντα με αβεβαιότητα.

Λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή των μεθοδολογιών αξιολόγησης, όπως αυτές αξιοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία για τη διαχείριση προβλημάτων, τον αρχικό σχεδιασμό πλαισίου που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 7.3 και το διεπιστημονικό χαρακτήρα που απαιτείται στην επιτυχή ανάπτυξη ενός υπεράκτιου έργου αξιοποίησης του διαθέσιμου δυναμικού ΑΠΕ, η ολοκληρωμένη προσέγγιση στη δημιουργία της εργαλειοθήκης ΕΜΣΑ παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.14. Η εργαλειοθήκη που αναπτύχθηκε, με εργαλεία στα οποία ο χρήστης δύναται να διαμορφώσει τα κριτήρια και τις εναλλακτικές γρήγορα και εύκολα.

Πιο αναλυτικά, η μεθοδολογία που ακολουθείται για την αξιολόγηση συστημάτων ΑΠΕ στηρίζεται σε ένα σύστημα στήριξης αποφάσεων, που ξεκινά από το διαθέσιμο δυναμικό από τις ανανεώσιμες πηγές.

.




Διάγραμμα 6.14 Η εργαλειοθήκης ΕΜΣΑ και τα εργαλεία που αξιοποιούνται στα διάφορα επίπεδα.

Η *διαδικασία χωρίζεται σε δυο μέρη*.

Για *εγκατεστημένες κατασκευές*, στο ένα μέρος, όπου η διερεύνηση της αξιολόγησης πραγματοποιείται με την εφαρμογή FMEA. Έτσι δύναται, να οριστεί το πλαίσιο που μπορεί κάθε υπεράκτια κατασκευή να βελτιστοποιηθεί και να αντιμετωπιστούν οι κίνδυνοι από την λειτουργία των συστημάτων. Η τεχνική FMEA χρησιμοποιείται διότι, εντοπίζονται λειτουργικές αστοχίες των εξαρτημάτων, τα αίτια και οι επιπτώσεις μιας αστοχίας στο σύστημα παρουσιάζοντάς τις με ευανάγνωστη μορφή. Επίσης αποφεύγονται δαπανηρές τροποποιήσεις των εξαρτημάτων του εξοπλισμού, παρέχοντας πληροφορίες στο πρόγραμμα παρακολούθησης και ανάπτυξης του προϊόντος. Σε υπεράκτια ΣΑΔ-ΑΠΕ, η εισαγωγή των ιδιαίτερων λειτουργικών συνθηκών, ενισχύει την προσπάθεια για βελτιστοποίηση του συστήματος από τον εντοπισμό των αποτυχιών λόγω της μεταβλητότητας που χαρακτηρίζει τις ΑΠΕ και της επίδρασής της στον ολικό αριθμό προτεραιότητας κινδύνου.

Το *δεύτερο μέρος αφορά τη δημιουργία νέων κατασκευών* και ακολουθείτε η εξής διαδικασία.

Σε *πρώτο επίπεδο*, αξιολογούνται οι διαθέσιμες τεχνολογίες σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα της ΑΠΕ, ώστε:

1. να προσδιορισθούν οι πραγματικές δυνατότητες ανάπτυξης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που υπάρχουν,
2. να εξεταστεί η συμβατότητα των προτεινόμενων στρατηγικών με τις συνολικότερες τεχνολογικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες, και
3. να διασφαλιστεί η επιτυχής εφαρμογή του προτεινόμενου σχεδίου.

Για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται η AHP, η TOPSIS ή συνδυασμός των δύο μεθοδολογιών σε υβριδική εφαρμογή. Η χρήση της κάθε μεθοδολογικής προσέγγισης εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων και το βαθμό αβεβαιότητας και της καταλληλότητας στην αντιμετώπιση υψηλού βαθμού σύγκρουσης. Η μη ικανοποίηση των κριτηρίων που τίθενται σε αυτό το επίπεδο οδηγεί στη εκ νέου αξιολόγηση των συστημάτων, ενώ η αποδοχή ενός τεχνολογικού συστήματος που περιλαμβάνει τις διαθέσιμες τεχνολογίες και το συνδυασμό τους σε ολοκληρωμένα συστήματα θα οδηγήσει στο δεύτερο επίπεδο.

Στο *δεύτερο επίπεδο*, διερευνώνται όλες οι πτυχές του προβληματισμού της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας του συστήματος. Η ικανοποίηση σε κάθε πεδίο της διεργασίας οδηγεί σε αποδοχή του σχεδίου άρα στη λήψη απόφασης και την ολοκλήρωση. Διαφορετικά η διαδικασία επαναλαμβάνεται με επανεξέταση των δεδομένων, των εναλλακτικών και των κριτηρίων. Ποιο αναλυτικά η διαδικασία αξιολόγησης επαναλαμβάνεται εφόσον κάποιο από τα σενάρια στην ανάπτυξη της υπεράκτιας κατασκευής δεν ικανοποιούνται.

Η πρόβλεψη για τα εργαλεία που θα αξιολογήσουν την ικανοποίηση των υπευθύνων στη λήψη αποφάσεως αφορά:

- Προβλήματα αξιοπιστίας που σχετίζονται με απαιτήσεις για τεχνολογική βελτίωση, οπότε μέσω της αξιολόγησης με FMEA επαναπροσδιορίζονται οι κίνδυνοι που απαιτείται να αντιμετωπιστούν ώστε το σύστημα να είναι ποιο αξιόπιστο.
- Όταν η φύση του προβλήματος αφορά την αποτίμηση διαχωριστικών διαδικασιών με κοινωνικοοικονομικές προεκτάσεις, ο προσδιορισμός της στήριξης στη λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται με πολυκριτηριακές μεθόδους, οι οποίες για την εργαλειοθήκη της ΕΜΣΑ προτείνονται η AHP και η TOPSIS.
- Για συστήματα που προκύπτει αβεβαιότητα και δεν ικανοποιούνται συνθήκες ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών, απαιτείται από τον προσδιορισμό των κριτηρίων ανάλυση της αξιοπιστίας με σκοπό την βελτιστοποίηση του συστήματος ή υπάρχουν πολλές επιλογές και τα κριτήρια για την τελική απόφαση είναι αβέβαια και διφορούμενα χρησιμοποιούνται συνδιασμοί των μεθοδολογιών.

Στην διερεύνηση με AHP, δημιουργείται ένα διάγραμμα ιεραρχικής δομής τριών επιπέδων, στο οποίο στο πρώτο επίπεδο βρίσκεται ο τελικός στόχος, στο δεύτερο επίπεδο βρίσκονται τα κριτήρια αξιολόγησης, και στο τρίτο επίπεδο οι εναλλακτικές επιλογές, δηλαδή οι διαθέσιμες τεχνολογίες που έχουν την ικανότητα να αξιοποιήσουν το δυναμικό ΑΠΕ της περιοχής εγκατάστασης της νέας υπεράκτιας δομής. Για την TOPSIS, αξιολογούνται οι εναλλακτικές λύσεις, κανονικοποιούνται, υπολογίζεται η στάθμιση στον κανονικοποιημένο πίνακα και προσδιορίζονται μέσα από τον αλγόριθμο η θετική ιδανική και η αρνητική λύση, ώστε να βαθμολογηθούν οι εναλλακτικές σε μια φθίνουσα σειρά που προσδιορίζει την λύση για τη λήψη αποφάσεως.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τεχνολογίας που αξιολογείται πόσο αποδοτική είναι, εάν είναι αποδεκτή και οικονομικά βιώσιμη χρησιμοποιείται ένα σύνολο τεχνοοικονομικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών, κριτηρίων αξιολόγησης, βάση καταγεγραμμένων δεδομένων αλλά και στοιχείων από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τα δεδομένα (κριτήρια αξιολόγησης) σε ποσοτικές και ποιοτικές κλίμακες ταξινόμησης μετασχηματίζονται σε μια ενιαία τακτική κλίμακα. Το επόμενο βήμα σχετίζεται με την ομογενοποίηση και την ποσοτικοποίηση των κριτηρίων αξιολόγησης. Ένα από τα ιδιαίτερα κρίσιμα χαρακτηριστικά της πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην εφαρμογή της μεθόδου της σύγκρισης ανά ζεύγη (pairwise comparisons) στο πλαίσιο της Διαδικασίας της Αναλυτικής Ιεράρχησης, όπου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των συντελεστών στάθμισης των κριτηρίων, προκειμένου να καθοριστεί η επιρροή τους στην αξιολόγηση των τεχνολογιών. Σκοπός είναι να επιτευχθεί η δυνατόν μικρότερη υποκειμενικότητα των αποφάσεων, κατά συνέπεια ενίσχυση της αξιοπιστίας της συγκεκριμένης προσέγγισης, και σύνθεση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου στήριξης λήψης απόφασης.

Για την AHP, εφαρμόζεται ο λόγος συνέπειας (Consistency Ratio) που υπολογίζεται το μέτρο απόκλισης από τη συνέπεια, ώστε να ελεγχθεί η συνοχή των κριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με το στόχο, κατά τέτοιο τρόπο ώστε αν $CR<0.10$ τότε η αξιολόγηση βρίσκεται στο πλαίσιο της αντικειμενικότητας. Για τον έλεγχο που πραγματοποιήθηκε κατά την εφαρμογή επιλογής στρατηγικής συντήρησης στο συνδυασμό των AHP με TOPSIS ισχύει ότι είναι $0.0833<0.10$, που σημαίνει ότι βρίσκεται στο πλαίσιο της αντικειμενικότητας.

Η πρόταση για σύνθεση μεθοδολογιών πραγματοποιείται, με την τροφοδότηση της TOPSIS με αποτελέσματα από την AHP. Έτσι, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αξιολόγησης που πραγματοποιήθηκε και να προσδιοριστεί περαιτέρω η συνέπεια της λήψης αποφάσεως ιδιαίτερα λόγω της καταλληλότητάς της στην αντιμετώπιση υψηλού βαθμού σύγκρουσης. Με την εισαγωγή της TOPSIS, λαμβάνεται υπόψη η ένταση των προτιμήσεων και δίνει στους εμπειρογνώμονες τη δυνατότητα να αξιολογούν εναλλακτικές λύσεις υπό αβεβαιότητα, εκφράζοντας τις κρίσεις τους χρησιμοποιώντας γλωσσικές μεταβλητές που περιλαμβάνουν ποιοτικές ετικέτες. Επίσης η απόσταση των εναλλακτικών από την ιδανική λύση μετριάζεται και

έτσι μπορεί να προσδιοριστεί εάν είναι απαραίτητη η επανεξέταση των κριτηρίων που υιοθετήθηκαν στο αρχικό στάδιο της μελέτης.

## 6.9 Σύνοψη

Το παρόν Κεφάλαιο επικεντρώθηκε στην παρουσίαση και ανάλυση της εργαλειοθήκης των μεθοδολογιών που προτείνεται για τη στήριξη στη διαμόρφωση και αξιολόγηση προτάσεων υπεράκτιων κατασκευών αξιοποίησης ΑΠΕ. Επίσης πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση και αξιολόγηση των τεχνολογικών συστημάτων, σε συνάρτηση της ιδιαιτερότητες των χαρακτηριστικών που αξιολογούνται, και πως αυτά διαμορφώνεται από την ανάπτυξη προηγμένων διαχειριστικών και λειτουργικών διαδικασιών.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο το οποίο παρουσιάσθηκε αποτελείται από δυο συνιστώσες που αφορούν στην διερεύνηση λήψης αποφάσεων για εγκατεστημένες και ανάπτυξη νέων υπεράκτιων δομών. Περαιτέρω ανάλυση και συσνδιασμός μεθοδολογιών διερευνήθηκε

- στην οργάνωση των χαρακτηριστικών του προβλήματος
- στην επιλογή των εργαλείων για την ανάπτυξη νέων δομών ΑΠΕ με βάση τις επιδιώξεις του σύγχρονου περιβάλλοντος λειτουργίας τους και
- στη σύνθεση και αξιολόγηση των νέων προτεινόμενων συστημάτων αξιοποίησης, με βάση τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των εμπλεκομένων ανάπτυξης συστημάτων, καθώς και αναγκών που προκύπτουν από την απαίτηση για ασφαλή λειτουργία μετριάζοντας τις πιθανότητες του κινδύνου.

Η μεθοδολογία αποτυπώθηκε επιτυχώς με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων στην εργαλειοθήκη ΕΜΣΑ, η οποία αποσκοπεί να υποστηρίξει ουσιαστικά τους λήπτες αποφάσεων στην ανάπτυξη διαχείριση και βελτιστοποίηση υπεράκτιων συστημάτων αξιοποίησης των ΑΠΕ.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διατυπώνει μια εργαλειοθήκη που βασίζεται σε ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο, για να υποστηρίζει τους αποφασίζοντες στην αναγνώριση όλων των παραμέτρων του προβλήματος στην εμπεριστατωμένη ανάλυση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων κατά τη διαδικασίες σχεδίασης ανάπτυξης βελτιστοποίησης και διαχείρισης ΑΠΕ.

Ουσιαστικά, η εργαλειοθήκη ΕΜΣΑ δεν έχει ως στόχο να υποδείξει τις επιλογές για την ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ που θα πρέπει να προωθηθούν αλλά να υποστηρίξει τους αποφασίζοντες, ενσωματώνοντας στη διαδικασία λήψης αποφάσεων:

- Τον *πολυδιάστατο χαρακτήρα των ΑΠΕ*, που εκ φύσεως είναι μεταρρυθμιστικός και καινοτομικός.
- Το *ιδιαίτερο περιβάλλον λειτουργίας των υπεράκτιων δομών*, μέσω της αποτελεσματικής σύνθεσης της οικονομικής, τεχνολογικής και κοινωνικής διάστασης και της εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων των εργαλείων που έχουν στη διάθεσή τους οι εμπλεκόμενοι στον τομέα αξιοποίησης ΑΠΕ.
- Τους *εμπλεκόμενους*, που η συμμετοχή τους είναι καταλυτική στον τρόπο που διαμορφώνεται η ανάπτυξη, μέσω της επιπλέον εκτίμησης σε θέματα που έχουν να κάνουν με το ποιοι θα επηρεαστούν από τις υπεράκτιες κατασκευές αξιοποίησης ΑΠΕ και τις τεχνολογίες που τις υποστηρίζουν.

Επιπρόσθετα, επιμέρους πρωτότυποι συνδυασμοί από μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν και εμπλουτίστηκαν ώστε να ανταποκρίνονται:

- ουσιαστικά στους προβληματισμούς από τις απαιτήσεις ανάπτυξης των υπεράκτιων συστημάτων,
- στην ορθολογική διαχείριση πληροφοριών, που πολλές φορές είναι από τη φύση τους ποιοτικές και χαρακτηρίζονται από υποκειμενισμό και έλλειψη ακρίβειας
- στην επεξεργασία και αξιολόγηση σε διακριτή και διατεταγμένη κλίμακα των εναλλακτικών και των κριτηρίων με τρόπο διαφανή και αξιόπιστο.

Με την εργαλειοθήκη μεθοδολογιών ΕΜΣΑ παρέχεται η δυνατότητα αποτίμησης των επιλογών βελτιστοποίησης και ανάπτυξης υπεράκτιων συστημάτων ΑΠΕ και των επιπτώσεων τους σε κάθε διάσταση, με τρόπο άμεσο και κατανοητό.

# Κεφάλαιο 7

## 7.1 Συμπεράσματα

Με στόχο την αειφόρο ενεργειακή ανάπτυξη, τα προβλήματα από τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών σε υπεράκτια *ΣΑΔ-ΑΠΕ* απαιτούν κρίσιμες αποφάσεις, σε εναλλακτικές ποικίλες δυναμικές και περίπλοκες σε σχέση με αντικρουόμενα κριτήρια. Επιπλέον, τα προβλήματα αυτά περιλαμβάνουν συνήθως πολλούς φορείς στη λήψη αποφάσεων, και ζητήματα που αφορούν στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας συστημάτων. Επομένως, απαιτείται η χρήση προσεγγίσεων τόσο με τεχνικές αξιολόγησης της αξιοπιστίας και βελτιστοποίησης συστημάτων, όσο και μεθοδολογίες MCDM, ως εργαλεία στα προβλήματα λήψης αποφάσεων για υπεράκτιες δομές και ως προς την αξιολόγηση της βιωσιμότητάς τους.

Στο πλαίσιο της έρευνας μελετήθηκαν βιβλιογραφικές αναφορές με βάση τις μεθόδους αξιολόγησης της αξιοπιστίας και MCDM σχετικές με το αντικείμενο των υπεράκτιων συστημάτων και του δυναμικού των ΑΠΕ. Επιπλέον, διερευνήθηκαν τα κριτήρια που επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων.

Το συμπέρασμα που εξήχθη είναι ότι λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές, τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές πτυχές, είναι σημαντικό να αναλυθούν και να ποσοτικοποιηθούν διάφοροι τύποι μεταβλητών που περιλαμβάνουν ανακριβή στοιχεία. Ιδιαίτερα οι κοινωνικοί παράγοντες, δεν είναι πάντα ακριβείς, καθώς η αβεβαιότητα είναι χαρακτηριστικό του πραγματικού κόσμου. Αντίστοιχα για τους τεχνολογικούς παράγοντες θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αξιοπιστία των συστημάτων και η δυνατότητα της βελτιστοποίησής τους.

Επομένως, προκειμένου να παρασχεθούν χρήσιμα στοιχεία από τις αξιολογήσεις των εμπειρογνωμόνων, στη λήψη αποφάσεων παρουσιάζεται η εργαλειοθήκη αξιολόγησης της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας για υπεράκτια συστήματα αξιοποίησης του δυναμικού των ΑΠΕ με τη συντομογραφία ΕΜΣΑ (Εργαλειοθήκη Μεθοδολογιών για τη Στήριξη στη λήψη Αποφάσεων).

Με την προτεινόμενη εργαλειοθήκη αξιολογούνται και βελτιστοποιούνται συστήματα μέσα από τη διερεύνηση της καταλληλότητας μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών που εφαρμόζονται κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή νέων υπεράκτιων συστημάτων, με προεκτάσεις στην

αξιολόγηση της λειτουργικής και διαχειριστικής βελτιστοποίησής τους, καθώς και την εφαρμογή τεχνικών αξιολόγησης για τη βελτιστοποίηση ήδη εγκατεστημένων συστημάτων.

Οι τεχνολογίες που διερευνώνται είναι, ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες σε πλωτές κατασκευές, συστήματα αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού των κυμάτων, η πιθανή σύζευξη συστημάτων από διαφορετικές τεχνολογίες σε υβριδικά συστήματα, και περαιτέρω η δυνατότητα ενεργειακής υποστήριξης συστημάτων παραγωγής τελικού προϊόντος. Στα τελευταία συστήματα ανήκει και η αυτόνομη πλωτή μονάδα αφαλάτωσης με αντίστροφη ώσμωση, που έχει δημιουργηθεί και χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής σε πιλοτικές εφαρμογές των μεθοδολογικών προσεγγίσεων.

Επομένως, με σκοπό τη στήριξη στη λήψη αποφάσεων από την προσπάθεια ανάπτυξης υπεράκτιων δομών με ΣΑΔ-ΑΠΕ, στο μεθοδολογικό πλαίσιο συνδυάζονται εργαλεία, μέθοδοι και τεχνικές τόσο από την *Αξιοπιστία και Αξιολόγηση Κινδύνων* όσο και από την *Πολυκριτηριακή Ανάλυση*. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της εργαλειοθήκης μεθοδολογιών αφορούν:

1. τη βελτιστοποίηση και την επαύξηση της αξιοπιστίας ήδη εγκατεστημένων συστημάτων, για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες αξιοποίησης ΑΠΕ και
2. την αξιολόγηση κατά τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση σε δεύτερο επίπεδο νέων κατασκευών.

Η έρευνα υποδεικνύει ότι η τεχνική αξιολόγησης κινδύνων FMEA και η τροποποιημένη FMEA όπου λαμβάνεται υπόψη το μεταβλητό ενεργειακό δυναμικό στην διαθεσιμότητα των συστημάτων θεωρείται ένα κατάλληλο εργαλείο για την επαύξηση της αξιοπιστίας. Επιπλέον, προσδιορίζει, κατηγοριοποιεί και σταθμίζει τους κινδύνους, αποδίδοντας τιμές στην προτεραιότητα κινδύνων που πρέπει να αποδοθεί σε κάθε λειτουργικό στοιχείο του συστήματος.

Στην ανάπτυξη νέων δομών, η εφαρμογή *AHP και TOPSIS* είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό με τεχνικές αξιολόγησης της αξιοπιστίας, σε υβριδικά συστήματα, διαχειρίζεται κατάλληλα τα δεδομένα και παρέχει αποτελέσματα για υπεράκτια ΣΑΔ-ΑΠΕ, όπως:

1. ο προσδιορισμός της κατάλληλης τεχνολογίας που θα είναι βιώσιμη και αποδεκτή από το κοινωνικό σύνολο,

2. η στήριξη στη λήψη αποφάσεων ως προς την καταλληλότερη επιλογή σε στρατηγική συντήρησης και
3. η υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων από τις εναλλακτικές που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία συστημάτων, με δεδομένα που λαμβάνονται μέσω καινοτόμων και σύγχρονων συστημάτων παρακολούθησης των λειτουργικών διεργασιών και ελέγχου των κατασκευών.

Είναι χαρακτηριστικό ότι στα αποτελέσματα των μεθοδολογιών που επιλέγονται κάποια από τα συστήματα για την καταλληλότητα της τεχνολογίας ανάπτυξης νέων δομών έχουν μικρή απόκλιση από τον στόχο λόγω των προτιμήσεων του κοινωνικού συνόλου, ενώ άλλα λόγω της απόδοσής τους, του κόστους ανάπτυξης, της ωριμότητας της τεχνολογίας και του επενδυτικού ενδιαφέροντος.

Βασικό παράγοντα στις αποφάσεις αποτελεί η προσβασιμότητα σε πιθανή αποτυχία, η οποία επηρεάζει τη διαθεσιμότητα του συστήματος και το μέσο χρόνο μεταξύ των αποτυχιών (MTBF), που τελικά εκφράζεται σε αύξηση του κόστους εφόσον απαιτούνται περισσότερα στοιχεία υποστήριξης της αυτονομίας άρα σε αύξηση στο αρχικό κόστος κεφαλαίου. Άλλα συστήματα αποκλείονται λόγω της ύπαρξης κάποιου κριτηρίου αποκλεισμού, όπως η επιφάνεια εγκατάστασης που απαιτείται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα για να καλυφθεί η απαιτούμενη ισχύ, σε συγκριτική κλίμακα απόδοσης με άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες, δηλαδή των ανεμογεννητριών και των μετατροπέων ενέργειας των κυμάτων (wave energy converters - WECs).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει στον αναλυτή να εξετάσει και να λάβει υπόψη τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά, τις αδυναμίες αλλά και την πιθανότητα αποτυχίας, που μπορεί να οφείλεται σε αυτά, καθώς και την επίδραση στην τελική απόφαση, ώστε να μειωθεί η επικινδυνότητα των κατασκευών. Η μείωση της επικινδυνότητας των κατασκευών που επηρεάζει τον αντίκτυπο από τη λειτουργία τους στο περιβάλλον, στην ασφάλεια της ίδιας της δομής και στην βιωσιμότητα του έργου.

Η αξιοπιστία από τεχνική άποψη *θα μπορούσε συμπερασματικά να οριοθετεί τον Δείκτη Καταλληλότητας από την υιοθέτηση μίας εκ των διαθέσιμων τεχνολογιών και την προσαρμοστικότητά της στις μελλοντικές βελτιώσεις από τις εξελίξεις σε κάθε συγκεκριμένο τομέα*.

Επίσης η κοινωνική αποδοχή θα μπορούσε να αποκλείει το χαρακτηρισμό των κατάλληλων τεχνολογιών και να προκύψουν ακατάλληλες οι περισσότερες τεχνολογίες για την ανάπτυξη υπεράκτιων συστημάτων. Όμως με τη συμμετοχή υπευθύνων από όλους τους κλάδους ποσοτικοποιείται ο βαθμός καταλληλότητας, μειώνοντας τον *Δείκτη Ακαταλληλότητας*. Παράδειγμα αποτελεί η θεώρηση του αιολικού δυναμικού ως το καταλληλότερο σύστημα λόγω της μεγάλης αποδοτικότητας μεταξύ των συστημάτων. Με δεδομένη όμως την ενέργεια που παράγεται λόγω της σταθερότητας των κυμάτων για μεγάλες περιόδους, σε αντίθεση με την αιολική ενέργεια που ποικίλει σημαντικά ακόμη και σε διαστήματα πέντε λεπτών, και την δυνατότητα να εγκαθίστανται είτε σε μεγαλύτερα βάθη λόγω του μικρού ύψους των δομών και της οπτικής όχλησης σε ορισμένες περιοχές, το σύστημα κυματικής ενέργειας προκύπτει ως εξίσου κατάλληλο, έχοντας περισσότερα μειονεκτήματα (π.χ. ωριμότητα της τεχνολογίας, τεχνικές δυσκολίες, απαιτήσεις μεγάλης επιφάνειας ανάπτυξης του συστήματος σε σχέση με μια ανεμογεννήτρια κ.λπ.) εντός αποδεκτού επιπέδου.

Σε κάθε περίπτωση η επικύρωση του μοντέλου σχετίζεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων-εκτιμήσεών του, σε σχέση με την πραγματική κατάσταση ανάλογα με τα δεδομένα και την περιοχή που έχει αποφασιστεί για την εγκατάσταση μιας υπεράκτιας δομής. Συνεπώς, η μεμονωμένη αξιολόγηση περιοχών μελέτης σε συνδυασμό με την έρευνα πεδίου και εξέταση όλων των επιμέρους παραμέτρων θεωρείται σημαντική, προκειμένου να καταρτιστεί η τελική πρόταση για στήριξη αποφάσεων στην επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη των συστημάτων, τις προσπάθειες βελτιστοποίησης των συστημάτων και των διαχειριστικών διαδικασιών.

Σε αυτή τη λογική, η προσέγγιση της διατριβής θα μπορούσε να θεωρηθεί ως εργαλειοθήκη μεθοδολογιών στη στήριξη λήψης απόφασης για την επιλογή αρχικά της τεχνολογίας στην περιοχή ενδιαφέροντος, επί της οποίας πραγματοποιούνται στη συνέχεια περαιτέρω αναλυτικές μελέτες σε ζητήματα, αξιοπιστίας και βελτιστοποίησης του επιλεγόμενου συστήματος.

Επιπλέον, πραγματοποιείται διερεύνηση σε λειτουργικούς και διαχειριστικούς προβληματισμούς που απαιτούν λήψεις αποφάσεων με την αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων και εναλλακτικών από πολλούς εμπλεκόμενους. Οι στόχοι που τέθηκαν και διερευνήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής είναι σαφείς, και θεωρείται ότι τελικά επιτεύχθηκαν.

Τα πεδία που διερευνήθηκαν αφορούσαν, μελέτη των υφιστάμενων μεθοδολογιών με σκοπό την ανεύρεση κενών ή παραλείψεών τους. Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, καθίσταται φανερό ότι το αντικείμενο των υπεράκτιων ΣΑΔ-ΑΠΕ παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, για την ανάπτυξη σύγχρονων μεθοδολογικών εργαλείων.

Αυτό οφείλεται σε παράγοντες όπως η θεώρηση ότι οι τεχνολογίες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οικονομικά ανταγωνιστικές και λειτουργικά φιλικές προς το περιβάλλον, ικανές να παρέχουν *βιώσιμες απαντήσεις στην παγκόσμια ανησυχία* που προκύπτει από την κλιματική αλλαγή και της προσπάθειας απεξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, προσφέροντας συγχρόνως ποικίλα οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα.

Ωστόσο, παρά τον μεγάλο αριθμό μεθοδολογικών εργαλείων, η βιβλιογραφία ανέδειξε ότι *πέρα από τις αναλύσεις που έχουν αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές κυρίως για αξιολόγηση στην εγκατάσταση συστημάτων ΑΠΕ από όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες στην ξηρά, και νεότερες έρευνες σχετικές με υπεράκτια αιολικά πάρκα, διαπιστώθηκε* έλλειψη ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου στήριξης της λήψης αποφάσεων για υπεράκτια συστήματα αξιολόγησης των διαθέσιμων τεχνολογιών. Συγκεκριμένα διαπιστώθηκε η ανάγκη ενός πλαισίου, πέρα του χωροταξικού και του ενεργειακού σχεδιασμού, που να λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης μελέτης ανάπτυξης υπεράκτιας δομής σε περιοχή με διαθέσιμο δυναμικό ΑΠΕ. Αυτό το πλαίσιο θα λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τις τεχνολογικές προκλήσεις για την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων συστημάτων, την αξιολόγηση συστημάτων αξιοποίησης κυματικής ενέργειας με συνδυασμούς τεχνολογιών, καθώς και την χρήση των απαραίτητων κριτηρίων σε τεχνολογικό, οικονομικό, κοινωνικό, διαχειριστικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Ένα τέτοιο πλαίσιο θα ενισχύσει τη λήψη αποφάσεων στην ανάπτυξη υπεράκτιων ΣΑΔ-ΑΠΕ σήμερα, αλλά και μελλοντικά, που το ενδιαφέρον ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων συνεχώς αυξάνει και παρουσιάζει έντονο επιχειρηματικό ενδιαφέρον.

Η προτεινόμενη εργαλειοθήκη μεθοδολογιών που παρουσιάζεται στη παρούσα διατριβή, βασίζεται ως επί το πλείστων σε εργαλεία της αξιολόγησης κινδύνων και της *Πολυκριτηριακής Ανάλυσης*. Συνοπτικά, στην Εργαλειοθήκη Μεθοδολογιών στη Στήριξη για τη λήψη Αποφάσεων ΕΜΣΑ, με τη βοήθεια των σχετικών εργαλείων αναλύεται το πολυσύνθετο *πρόβλημα* της

αξιολόγησης αξιοπιστίας, της αποδοτικότητας και της καταλληλότητας των τεχνολογιών στην ανάπτυξη υπεράκτιων κατασκευών, και αφορά:

1. Τη διερεύνηση της δυνατότητας βελτιστοποίησης σε εγκατεστημένα συστήματα, όπου ουσιαστικά πραγματοποιείται αξιολόγηση κινδύνων για την βελτίωση εγκατεστημένων συστημάτων.
2. Τη διερεύνηση στην ανάπτυξη νέων δομών, σε περιοχές που διατίθεται το σχετικό δυναμικό ΑΠΕ, αξιολογώντας τις διαθέσιμες τεχνολογίες σε δύο επίπεδα:
    1) Στο πρώτο πραγματοποιείται ο σαφής διαχωρισμός στις τεχνολογίες μελέτης, ώστε να βρεθεί η πιο κατάλληλη βάσει *πολλαπλών* κριτηρίων, που καθορίζονται βάσει των χαρακτηριστικών της κάθε τεχνολογίας.
    2) Στο δεύτερο επίπεδο, η προτεινόμενη τεχνολογία, που προκύπτει ως αποτέλεσμα του πρώτου επιπέδου, διερευνάται στο πλαίσιο της αξιολόγησης της αξιοπιστίας, και σε ζητήματα που αφορούν στη διαχείριση αλλά και στη λειτουργία των ΣΑΔ-ΑΠΕ. Η διαδικασία που ακολουθείται και οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από το πρόβλημα που παρουσιάζεται και αναζητάται η αρωγή μιας μεθόδου στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Τότε πραγματοποιείται η επιλογή της διαδικασίας απόφασης, ώστε να χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο εργαλείο στην προβληματική που παρουσιάζεται. Η ικανοποίηση κατά την εκτίμηση των αποτελεσμάτων καθορίζει εάν είναι ή όχι απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός με κάποιο από τα εργαλεία της ΕΜΣΑ.

Το πλεονέκτημα από τη χρήση αυτής της εργαλειοθήκης, είναι ότι επιτρέπει οι πολλαπλές πληροφορίες να εκφράζονται σε ενοποιημένο πλαίσιο χωρίς να χάνεται η αξία τους. Η τελική κατάταξη συγκεντρώνει αυτόματα όλες τις πληροφορίες που παρέχουν οι εμπειρογνώμονες, κατόπιν επεξεργάζονται εναλλακτικές με διαφορετικά χαρακτηριστικά, και τέλος συνδυάζοντάς τις σχηματίζουν τη στήριξη μιας συλλογικής γνώμης.

Τα κύρια οφέλη των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται στην προτεινόμενη εργαλειοθήκη είναι ότι:

1. Λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικοί βαθμοί αυστηρότητας των απόψεων των αξιολογητών.

2. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται από ομάδες εμπειρογνωμόνων και φορέων λήψης αποφάσεων.
3. Μπορεί και λαμβάνεται υπόψη η αξιολόγηση των συστημάτων στις μεταβλητές λειτουργικές συνθήκες
4. Οι αξιολογητές μπορούν να προσδώσουν βαρύτητα σε όλες τις εναλλακτικές και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση για επιλογή της καταλληλότερης τεχνολογίας
5. Η μέθοδος καθιστά δυνατή την εκχώρηση διαφορετικού επιπέδου επίδρασης των κριτηρίων από κάθε εμπειρογνώμονα και διαφορετικών βαρών και
6. δεν απαιτεί αλληλεπίδραση μεταξύ εμπειρογνωμόνων, ώστε να αποφεύγεται η πιθανή υποκειμενικότητα που προκαλείται από συγκρούσεις συμφερόντων μεταξύ των αξιολογητών.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο ΕΜΣΑ το οποίο παρουσιάστηκε αποτελείται από συνιστώσες που αφορούν στην οργάνωση των χαρακτηριστικών του προβλήματος, στην επιλογή των εργαλείων προώθησης ΑΠΕ με βάση τις επιδιώξεις του σύγχρονου περιβάλλοντος λειτουργίας του ενεργειακού τομέα και στη σύνθεση και αξιολόγηση των προτάσεων προώθησης ΑΠΕ, με βάση τα χαρακτηριστικά των εμπλεκομένων παραγόντων της ενεργειακής αγοράς.

Συγκρίνοντας τα σημεία που δίδεται βαρύτητα στην ανάπτυξη της εργαλειοθήκης ΕΜΣΑ, με προβληματισμούς στη λήψη αποφάσεων και εφαρμογές μεθοδολογικών προσεγγίσεων για συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, σχετικά με την συμβολή της διατριβής μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες ***διαπιστώσεις***:

1. *Δημιουργείται ένα ενιαίο μεθοδολογικό πλαίσιο* στην κάλυψη αναγκών για λήψη αποφάσεων κάτω από συνθήκες που αναζητάται η βελτιστοποίηση των ΣΑΔ-ΑΠΕ που αφορούν είτε λειτουργικούς, είτε διαχειριστικούς προβληματισμούς, με έμφαση την ασφάλεια των ίδιων των δομών αλλά και του περιβάλλοντος, καθώς και την διερεύνηση στα τεχνολογικά κριτήρια που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους.
2. Η *ποιότητα (είδος) των κριτηρίων* (*αποκλεισμού/αξιολόγησης*) που λαμβάνονται ως μέρος της δόμησης του *προβλήματος*: α) κατά τη διερεύνηση υπεράκτιων δομών, είτε σε μεμονωμένα, είτε σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, και β) η

διερεύνηση σε ολοκληρωμένα συστήματα όπου εκτός από την παραγωγή πραγματοποιείται κατανάλωση της ενέργειας, όταν πρόκειται για συστήματα όπως η πλωτή αυτόνομη οικολογική μονάδας παραγωγής νερού με ΑΠΕ, που αποτελούν καινοτόμες διαστάσεις της μελέτης.

3. Ο *συνδυασμός εργαλείων* όπως AHP με TOPSIS, FMEA με AHP ή FMEA με TOPSIS και οι εφαρμογές σε υπεράκτια συστήματα. Όπου η προτεινόμενη μοντελοποίηση και εφαρμογή των κριτηρίων αξιολόγησης συνδυαστικά με τους τεχνικούς περιορισμούς, υπό ένα ενοποιημένο πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης, σε συνδυασμό με την αξιοπιστία αποτελεί μια από τις καινοτόμες διαστάσεις της μελέτης.
4. Τα *μεθοδολογικά εργαλεία* που χρησιμοποιούνται, είναι *εύχρηστα* και *κατανοητά* που οδηγούν σε αποτελέσματα εύκολα και κατανοητά από τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων.
5. Η *τεχνολογική διάσταση της προσέγγισης*, διότι όπως έχει ήδη αναφερθεί στη βιβλιογραφία εμφανίζεται ελλιπής όσον αφορά ένα μεθοδολογικό πλαίσιο λήψης απόφασης για τεχνολογίες υπεράκτιων ΣΑΔ-ΑΠΕ. Σε αυτό το πλαίσιο, δεν δύναται να υπάρχει κάποιο μέτρο σύγκρισης. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες γενικότερες κατευθύνσεις που αξιολογούνται με πολυκριτηριακές αναλύσεις σε συστήματα ΑΠΕ κυρίως για τον ενεργειακό προγραμματισμό από την ανάπτυξη μιας δομής σύμφωνα με την χωροταξική προσέγγιση της βιωσιμότητάς της, αλλά χωρίς να ερευνάται η τεχνολογική της διάσταση.
6. Η *προσέγγιση που ακολουθείται* στην προτεινόμενη εργαλειοθήκη διερευνά και λαμβάνει υπόψη τις κατάλληλες παραμέτρους του προβλήματος της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των συστημάτων κάτω από τεχνικά, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, τις αξίες και τις προοπτικές ποικίλων συμμετεχόντων, όπου αυτό τελικά οδηγεί στη διαμόρφωση ενός άμεσου, ευέλικτου και αξιόπιστου πλαισίου στήριξης των υπευθύνων στη λήψη αποφάσεων. Έτσι μεγιστοποιείται η σημασία της ασφάλειας και της βιωσιμότητας της δομής (δηλ. της αξιοπιστίας και αποδοτικότητας) και ελαχιστοποιούνται οι πιθανές επιπτώσεις.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο ΕΜΣΑ, δεδομένου ότι δύναται να ενσωματώνει μεγάλο εύρος κριτηρίων και περιορισμών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί:

1) από τους διαχειριστές, τους λειτουργούς και τους δυνητικούς επενδυτές
2) από τους φορείς ενεργειακού σχεδιασμού, στον προσδιορισμό των βέλτιστων τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη υπεράκτιων κατασκευών αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού των ΑΠΕ και
3) σε άλλα είδη έργων που αφορούν σε υπεράκτια συστήματα, αυτόνομα ή μη αυτόνομα, προσεγγίζοντας το αντικείμενο υπό το πλαίσιο της διαχείρισης και της στρατηγικής επισκευών και αποφάσεων σχετικά με τους κινδύνους που παρουσιάζονται από την παραβίαση της ασφάλειας των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου.

## 7.2 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα

Η ερευνητική προσέγγιση που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα μπορούσε να επεκταθεί και να εξελιχθεί σε πεδία:

1. *Αξιοποίησης επιπλέον τεχνολογικών κριτηρίων* που αφορούν στη μετάδοση δεδομένων και ελέγχου των υπεράκτιων συστημάτων, δεδομένου ότι θα μπορούσαν να εισαχθούν στο παρόν μοντέλο χωρίς κάποιο περιορισμό, και να διερευνηθούν αναλυτικά κατά τη φάση της στρατηγικής περιβαλλοντικής εκτίμησης και ασφάλειας.
2. *Μεθοδολογικής βελτίωσης* της προτεινόμενης εργαλειοθήκης με μελλοντική εφαρμογή της Λογικής της Ασάφειας (*Fuzzy Logic*) σε υπεράκτια συστήματα
3. Αυξανόμενης εμπλοκής της συμμετοχικής διάστασης με την *ένταξη της εργαλειοθήκης σε ένα web-based σύστημα συμμετοχικού σχεδιασμού και αποφάσεων*, όπου θα δίνεται η δυνατότητα να αξιοποιούν τα *Big Data* (Μεγάλα Δεδομένα), και οι ομάδες που συμμετέχουν στη λήψη αποφάσεων να μπορούν να επεξεργαστούν τον τεράστιο όγκο δεδομένων που είναι σχεδόν αδύνατον να επεξεργαστεί με τις παραδοσιακές μεθόδους. Έτσι οι πολίτες και οι ομάδες πίεσης θα μπορούν να συμμετέχουν στη διαδικασία μέσα από τη διαφάνεια και μέσα από τον διάλογο θα επιτυγχάνουν την βέλτιστη λήψη των τελικών αποφάσεων.

# Παραρτήματα

## Παραρτημα 1

### *Π.1.1. Ομαδική Παραγωγή Ιδεών ή καταιγισμός ιδεών (Brainstorming)*

Αποτελεί μια μέθοδο επίλυσης προβλημάτων κυρίως μάνατζμεντ, η οποία διαθέτει την δυνατότητα παραγωγής πολλών ιδεών σε μικρή διάρκειας χρόνο, μέσω της ομαδικής λειτουργίας. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε από τον Osborn το 1938 στις ΗΠΑ. Η δύναμη της brainstorming είναι οι πιθανοί συμμετέχοντες να σχεδιάζουν συσχετισμούς μεταξύ των ιδεών τους σε ένα περιβάλλον ελεύθερης σκέψης, διευρύνοντας έτσι το χώρο λύσης. Η μέθοδος καταιγισμού ιδεών, είναι μια εξαιρετικά δημοφιλής τεχνική ιδεών για τις ομάδες σχεδιασμού, λόγω της ελευθερίας που δίνει τη δυνατότητα να επεκτείνουν προς όλες τις κατευθύνσεις, χρησιμοποιώντας πλευρική σκέψη για την αναζήτηση των πιο αποτελεσματικών λύσεων και ακατέργαστων απαντήσεων που θα βελτιώσουν αργότερα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια διαδικασία όπου μια ομάδα ατόμων, ατομικά ή σε συνεργασία, δρα με σκοπό να παραχθεί ένας μεγάλος αριθμός ιδεών, που στόχο έχουν την επίλυση του προβλήματος. Η διαδικασία συνήθως καθοδηγείτε ως ένα βαθμό από έμπειρο συντονιστή που καθοδηγεί τη συζήτηση στα υπό εξέταση θέματα. Οι πρωτότυπες λύσεις που η μέθοδος έχει την ικανότητα να δίνει την έχει κάνει να χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών όπως προβλήματα μάνατζμεντ, σχεδιασμός προϊόντος, επίλυση πολιτικό-κοινωνικών προβλημάτων κ.α. και έχει διεθνώς αναγνωριστεί (Barker 1997, Kendrick 2004, Osborn 1963).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου καταιγισμού ιδεών, πρέπει να ακολουθούνται οι ακόλουθοι κανόνες (Osborn 1963):

- η απαγόρευση της κριτικής,
- η παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων ιδεών,
- η ελεύθερη και χωρίς περιορισμούς ροή ιδεών,
- ο συνδυασμός και βελτίωση των ιδεών, και
- η αξιολόγηση των προτεινόμενων ιδεών (μέσω μιας λίστας κριτηρίων αξιολόγησης).

### *Π.1.**2** Συνεντεύξεις (Structured or semi-structured interviews)*

Αποτελεί μια απλή και δημοφιλή μέθοδο εντοπισμού κινδύνου, όμως απαιτεί ειδικές δεξιότητες από εκείνους που την χρησιμοποιούν. Εφαρμόζεται συνήθως από ειδικούς (experts), έτσι ώστε να εντοπισθούν οι κίνδυνοι που δύναται να προκαλέσουν κάποιο σημαντικό πρόβλημα. Οι συνεντεύξεις μπορεί να είναι:

δομημένες, σε μορφή δομημένου ερωτηματολογίου το οποίο ακολουθείτε πιστά

μη δομημένες, όταν δεν υπάρχει συγκεκριμένη δομή, απλά ένα θέμα παρατίθεται και ακολουθεί «ανοικτή» συζήτηση.

Στην πράξη, συνήθως χρησιμοποιούνται ημι-δομημένες συνεντεύξεις, οι οποίες περιλαμβάνουν στοιχεία και από τους δύο βασικούς τύπους συνεντεύξεων (Drever, 1995), ενώ για την διεξαγωγή αποτελεσματικών συνεντεύξεων, πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- αναλυτική παρουσίαση του θέματος για συνέντευξη,
- χρήση «ανοικτών» ερωτήσεων,
- δημιουργία κλίματος εμπιστοσύνης,
- παρατήρηση της γλώσσας του σώματος, και
- χρήση διευκρινιστικών ερωτήσεων όπου απαιτείται.

Πολλοί ερευνητές προτιμούν να χρησιμοποιούν ημι-δομημένες συνεντεύξεις, επειδή μπορούν να προετοιμαστούν ερωτήσεις νωρίτερα από την πραγματοποίηση των συνεντεύξεων. Αυτό επιτρέπει στον ερευνητή να προετοιμαστεί και να εμφανιστεί ικανός κατά τη διάρκεια της συνέντευξης. Οι ημι-δομημένες συνεντεύξεις επιτρέπουν επίσης στους συμμετέχοντες την ελευθερία να εκφράζουν τις απόψεις τους με τους δικούς τους όρους (Cohen και Crabtree, 2006). Οι συνεντεύξεις σε ημι-δομή μπορούν να παρέχουν αξιόπιστα, συγκρίσιμα ποιοτικά στοιχεία.

### *Π.1.3 Κατάλογοι Κινδύνων (Check-lists)*

Η μεθοδολογία, περιλαμβάνει λίστες κινδύνων που έχουν εμφανισθεί στο παρελθόν, ή έχουν πιθανότητα να εμφανισθούν μελλοντικά. Οι κίνδυνοι και οι ενέργειες με σκοπό την αντιμετώπισή τους δεν είναι σταθεροί, λόγω της μεταβλητής φύσης κάθε εφαρμογής. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της μεθόδου, εξαρτάται απόλυτα από την τακτική ενημέρωση των εγγράφων-καταλόγων με νέους κινδύνους, όπως και νέους τρόπους αντιμετώπισης (Host και Runeson, 2007).

Για τον εντοπισμό κινδύνων, επιλέγονται κίνδυνοι που θεωρείται ότι μπορούν να επηρεάσουν την εξεταζόμενη εφαρμογή από την σχετική λίστα κινδύνων. Το πλεονέκτημα της μεθοδολογίας είναι ο ελάχιστος χρόνος υλοποίησής της, και η μεταφορά προηγούμενης εμπειρίας σε θέματα κινδύνων. Οι αδυναμίες της προσδιορίζονται στους περιορισμούς που τίθενται από την καθοδήγηση της ομάδας διαχείρισης κινδύνων, ο κίνδυνος λόγω απειρίας, η επιλογή μη κατάλληλων κινδύνων κατά την εφαρμογή της και η έλλειψη ενημέρωσης των καταλόγων που εμποδίζει τη μετάδοση της προηγούμενης εμπειρίας.

### *Π.1.4 Μέθοδος Δελφών (Delphi method)*

Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται για να καταλήξει σε μια ανεξάρτητη και κοινή άποψη, που βασίζεται σε ένα σύνολο απαντήσεων διαφορετικών ειδικών, σε ένα σαφώς καθορισμένο ερώτημα. Δεν εφαρμόζεται συχνά, γιατί συναντά διάφορες δυσκολίες. Περιλαμβάνει τη συλλογή κρίσεων για κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα, μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων ερωτηματολογίων, από ανώνυμους και απομονωμένους συμμετέχοντες. Ο πυρήνας αυτής της μεθόδου αφορά την εξάλειψη της προσωπικής επαφής, έτσι ώστε οι συμμετέχοντες να σκέφτονται χωρίς περιορισμούς που εμφανίζονται στις ομάδες. Προσπαθεί να αντλήσει γνώσεις και εμπειρίες πολλών ειδικών (expert) παράλληλα στο εξεταζόμενο πρόβλημα. Περιλαμβάνει 2 – 5 επαναλήψεις, και σε κάθε επανάληψη, σχεδιάζεται και αποστέλλεται ένα ερωτηματολόγιο, και μετά συλλέγονται και αναλύονται διεξοδικά τα αποτελέσματα. Η ανάλυση κάθε επανάληψης, εισάγεται στην επόμενη. Ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία μιας γενικής συναίνεσης (όχι απαραίτητα καθολική ομοφωνία) μεταξύ των συμμετεχόντων, η οποία είναι και το τελικό αποτέλεσμα (Κηρυττόπουλος 2006, Hiam 1990, Kendrick 2004).

Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ανωνυμία που επιτρέπει στους συμμετέχοντες να εκφράσουν την πραγματική τους γνώμη χωρίς περιορισμούς. Από την άλλη, αυτή η ανωνυμία μπορεί να οδηγήσει σε πρόχειρη συμπλήρωση των ερωτηματολογίων. Επίσης, η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, και υπάρχει κίνδυνος χαμηλής συμμετοχής (Κηρυττόπουλος 2006, Hiam 1990). Τέλος, τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι τα εξής (Κηρυττόπουλος 2006):

- εντοπισμός του προβλήματος,
- σχεδιασμός του ερωτηματολογίου με στόχο οι απαντήσεις να οδηγήσουν στη λύση του προβλήματος ή στη λήψη μιας απόφασης,
- υποβολή του ερωτηματολογίου στους συμμετέχοντες ειδικούς,
- συλλογή απαντήσεων και προ-επεξεργασία των απαντήσεων (διαχωρισμός ακραίων απαντήσεων),
- καλούνται όσοι έδωσαν ακραίες απαντήσεις για επεξήγηση των θέσεων τους, και οι συγκεκριμένες ερωτήσεις αναδιαμορφώνονται,
- κατόπιν ζητείται από όλους τους ειδικούς να επανεξετάσουν τα ερωτήματα,
- τα προηγούμενα βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να βρεθεί μια κοινή συνισταμένη απόψεων.

### *Π.1.5 Μέθοδος HAZOP (Hazard Analysis and Critical Control)*

Η μεθοδολογία, αφορά εντοπισμό κινδύνων για ανθρώπους, εξοπλισμό, περιβάλλον και οργανωτικούς στόχους. Η ομάδα για τη διαχείριση του κινδύνου αναμένεται, όπου είναι εφικτό, να προσφέρει λύση για τη αντιμετώπιση του κινδύνου. Ανήκει στις ποιοτικές τεχνικές, και βασίζεται στη χρήση λέξεων-οδηγών που θέτουν ερωτήματα για το τρόπο που μπορεί να μην επιτευχθεί η πρόθεση από τον αρχικό σχεδιασμό ή οι συνθήκες λειτουργίας σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού, της διαδικασίας ή του συστήματος. Συνήθως

διεξάγεται από μια πολύ-επιστημονική ομάδα σε μια σειρά συνεδριάσεων. Αναγνωρίζει τρόπους αστοχίας μιας διαδικασίας ή συστήματος, τις αιτίες και τις συνέπειές τους.

Η μέθοδος HAZOP αναπτύχθηκε αρχικά, για να αναλύσει τα συστήματα χημικών διεργασιών, αλλά μετέπειτα επεκτάθηκε και σε άλλους τύπους συστημάτων και σύνθετων λειτουργιών όπως μηχανικά και ηλεκτρονικά συστήματα, διαδικασίες, συστήματα λογισμικού κ.α. Συνήθως τα βήματα χρήσης της HAZOP περιλαμβάνουν (IEC/FDIS 3110):

- διορισμός ατόμου με την απαραίτητη ευθύνη και εξουσιοδότηση για τη διεξαγωγή τη; HAZOP για την εξασφάλιση ότι, ότι όλες οι ενέργειες που προκύπτουν από αυτή, ολοκληρώνονται πλήρως.
- καθορισμός των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της μεθόδου.
- δημιουργία μιας σειράς βασικών όρων-οδηγών για τη υλοποίηση της μεθόδου.
- καθορισμός διεπιστημονικής ομάδας υλοποίησης του HAZOP, που πρέπει να περιλαμβάνει σχεδιαστικό και επιχειρησιακό προσωπικό με κατάλληλους ειδικούς (experts) για την αξιολόγηση των επιπτώσεων, των αποκλίσεων από το προβλεπόμενο ή το τρέχον σχέδιο.
- συλλογή της απαιτούμενης τεκμηρίωσης.

Η χρήση της μεθόδου HAZOP προσφέρει πλεονεκτήματα (IEC/FDIS 3110), όπως:

- παροχή των μέσων για συστηματική και διεξοδική εξέταση ενός συστήματος ή διαδικασίας, δημιουργία λύσεων και δράσεων αντιμετώπισης κινδύνου,
- εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων και διαδικασιών,
- επιτρέπει τη ρητή εξέταση των αιτιών και των συνεπειών του ανθρώπινου λάθους, και
- περιλαμβάνει μια διεπιστημονική ομάδα, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που διαθέτουν πραγματική επιχειρησιακή εμπειρία και εκείνους που ενδέχεται να χρειαστεί να προβούν σε ενέργειες αντιμετώπισης του κινδύνου,
- δημιουργεί ένα αρχείο της διαδικασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποδειχθεί η οφειλόμενη επιμέλεια.

Ο περιορισμοί της μεθόδου είναι οι εξής:

- είναι χρονοβόρα και δαπανηρή μέθοδος,
- απαιτεί υψηλό επίπεδο τεκμηρίωσης προδιαγραφών του συστήματος ή της διαδικασίας
- μπορεί να επικεντρωθεί σε λεπτομερή θέματα σχεδιασμού και όχι στο ευρύτερο πλαίσιο, και
- η διαδικασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρογνωμοσύνη των σχεδιαστών που δυσκολεύονται να το κάνουν να είναι επαρκώς αντικειμενικό.

### *Π.1.6 Ανάλυση Σεναρίων (Scenario analysis)*

Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των κινδύνων εξετάζοντας πιθανές μελλοντικές εξελίξεις και διερευνώντας τις επιπτώσεις τους. Στην εφαρμογή της μεθόδου δίνονται ομάδες σεναρίων που αντικατοπτρίζουν την «ιδανική περίπτωση», «ανεπιθύμητη περίπτωση» και την «αναμενόμενη περίπτωση», οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλύσουν τις πιθανές συνέπειες και τις επιπτώσεις (IEC/FDIS 3110).

Η ανάλυση σεναρίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων πολιτικής, σε χρηματοοικονομικά και στο σχεδιασμό των μελλοντικών στρατηγικών, καθώς και για να εξετάσει τις υπάρχουσες δραστηριότητες. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του τρόπου ανάπτυξης των απειλών και των ευκαιριών, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους τύπους κινδύνου, με βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα χρονικά πλαίσια. Βασικά πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- Το μελλοντικό σχεδιασμό - δίνει τις αναμενόμενες αποδόσεις και τους κινδύνους που συνεπάγεται ο σχεδιασμός μελλοντικών επενδύσεων.
- Την πρόληψη – μειώνοντας τις πιθανές απώλειες που προκύπτουν από ανεξέλεγκτους παράγοντες, προειδοποιώντας επιθετικά σε χειρότερα σενάρια, αναλύοντας γεγονότα και καταστάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε δυσμενείς επιπτώσεις
- Την αποφυγή κινδύνου και αποτυχίας - για να αποφευχθούν κακές αποφάσεις

### *Π.1.7 Μέθοδος HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points)*

Η μέθοδος HACCP αφορά τη διαχείριση και ασφάλεια των προϊόντων. Η μέθοδος παρέχει μια δομή για την αναγνώριση των κινδύνων, θέτοντας τους ελέγχους σε εφαρμογή σε όλα τα σχετικά μέρη μιας διαδικασίας για την προστασία από τους κινδύνους, για να διατηρηθεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια. Έχει ως στόχο να διασφαλίσει τους κινδύνους μέσω της ελαχιστοποίησής τους από ελέγχους σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας και όχι μέσω μιας τελικής επιθεώρησης (IEC/FDIS 3110). Το HACCP αναπτύχθηκε για να διασφαλίσει την ποιότητα των τροφίμων για το διαστημικό πρόγραμμα της NASA. Σήμερα χρησιμοποιείται ευρέως από οργανισμούς που διερευνούν κινδύνους της τροφικής αλυσίδας στον έλεγχο κινδύνων από φυσικές, χημικές ή βιολογικές προσμείξεις. Η χρήση της έχει επεκταθεί στην παρασκευή φαρμακευτικών προϊόντων και των τεχνολογικών προϊόντων στην ιατρική.

### *Π.1.8 Ανάλυση Αιτίου Ρίζας (Root Cause Analysis)*

Η ανάλυση μίας μεγάλης απώλειας για την αποτροπή της επανάληψής της αναφέρεται συνήθως ως Ανάλυση Αιτίου Ρίζας (RCA), Ανάλυση Αποτυχίας της Αιτίας Ρίζας (Root Cause Failure Analysis, RCFA) ή ανάλυσης ζημιών. Η RCA επικεντρώνεται στις απώλειες περιουσιακών στοιχείων λόγω διαφόρων τύπων αποτυχιών, ενώ η ανάλυση ζημιών αφορά κυρίως οικονομικές απώλειες λόγω εξωτερικών παραγόντων ή καταστροφών. Προσπαθεί να εντοπίσει τις ρίζες ή τις αρχικές αιτίες αντί να ασχολείται μόνο με τα άμεσα εμφανή συμπτώματα. Αναγνωρίζεται ότι η διορθωτική δράση μπορεί να μην είναι πάντα απολύτως αποτελεσματική και ότι μπορεί να απαιτηθεί συνεχής βελτίωση.

Η RCA εφαρμόζεται συχνότερα στην αξιολόγηση μιας μεγάλης ζημίας, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αναλύσει τις απώλειες σε μια πιο παγκόσμια βάση για να προσδιορίσει πού μπορούν να γίνουν βελτιώσεις. Τα δεδομένα σε ένα RCA είναι όλα τα στοιχεία που συλλέγονται από την αποτυχία ή την απώλεια, ενώ μπορούν να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση δεδομένα από άλλες παρόμοιες αποτυχίες. Άλλα δεδομένα μπορεί να είναι αποτελέσματα από δοκιμές συγκεκριμένων υποθέσεων. Η ανάλυση θα εξετάσει ποιοι έλεγχοι υπήρχαν τη στιγμή που σημειώθηκε η απώλεια και πώς θα μπορούσαν να βελτιωθούν οι έλεγχοι.

Στα πλεονεκτήματα περιλαμβάνονται, η συμμετοχή κατάλληλων εμπειρογνωμόνων που εργάζονται σε ομαδικό περιβάλλον, η δομημένη ανάλυση, η εξέταση όλων των πιθανών υποθέσεων, η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων. Ενώ μειονεκτεί διότι απαιτούνται οι εμπειρογνώμονες που μπορεί να μην είναι διαθέσιμοι, τα κρίσιμα στοιχεία μπορεί να καταστραφούν κατά την αποτυχία ή να αφαιρεθούν κατά την εκκαθάριση, η ομάδα μπορεί να μην έχει επαρκή χρόνο ή πόρους για να αξιολογήσει πλήρως την κατάσταση, μπορεί να μην είναι δυνατή η κατάλληλη εφαρμογή των συστάσεων.

### *Π.1.9 Ανάλυση των τρόπων αποτυχίας και των επιπτώσεων (Failure modes and effects analysis - FMEA)*

Η ανάλυση των τρόπων αποτυχίας και των επιπτώσεων (FMEA) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των τρόπων με τους οποίους τα συστατικά, τα συστήματα ή οι διεργασίες δεν μπορούν να εκπληρώσουν το σκοπό του σχεδιασμού τους.

Ο FMEA προσδιορίζει:

- όλες τις πιθανές καταστάσεις βλάβης των διαφόρων τμημάτων ενός συστήματος (ένας τρόπος αποτυχίας είναι αυτός που παρατηρείται να αποτύχει ή να εκτελεστεί εσφαλμένα).
- τα αποτελέσματα αυτών των αποτυχιών στο σύστημα.
- τους μηχανισμούς της αποτυχίας.

- πώς να αποφευχθούν αστοχίες ή / και να μετριαστούν οι επιπτώσεις των βλαβών στο σύστημα.

Το FMEA εκτελείται από μια ομάδα FMEA και χρησιμοποιείται και ως FMECA όπου για κάθε αναγνωρισμένη λειτουργία σφάλματος ταξινομείται ανάλογα με τη σημασία ή την κρισιμότητα του. Αυτή η ανάλυση είναι συνήθως ποιοτική ή ημι-ποσοτική αλλά μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χρησιμοποιώντας τα πραγματικά ποσοστά αποτυχίας.

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές της FMEA σε τομείς όπως ο σχεδιασμός (ή προϊόν), κατασκευής και συναρμολόγησης. Επίσης χρησιμοποιείτε για να βελτιωθεί η αξιοπιστία, ωστόσο, οι αλλαγές συνήθως υλοποιούνται ευκολότερα στο στάδιο του σχεδιασμού. Το FMEA και το FMECA μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε διαδικασίες και διαδικασίες. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό πιθανών ιατρικών σφαλμάτων στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης και για αποτυχίες στις διαδικασίες συντήρησης.

### *Π.1.10 Δένδρα Σφαλμάτων (Fault tree analysis)*

Η ανάλυση ανίχνευσης ανωμαλιών με δέντρα σφαλμάτων (FTA) εισήχθη για πρώτη φορά από τη Bell Laboratories (1960) και είναι μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους στην αξιοπιστία των συστημάτων, τη συντήρηση και στην ανάλυση ασφάλειας. Πρόκειται για μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των διαφόρων συνδυασμών αποτυχιών υλικού και λογισμικού και ανθρώπινων σφαλμάτων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα συμβάντα (που αναφέρονται ως κορυφαία συμβάντα) σε επίπεδο συστήματος.

Η διεξοδική ανάλυση ξεκινά με ένα γενικό συμπέρασμα και στη συνέχεια επιχειρεί να προσδιορίσει τις συγκεκριμένες αιτίες του συμπεράσματος κατασκευάζοντας ένα λογικό διάγραμμα που ονομάζεται δέντρο σφάλματος. Αυτό είναι γνωστό και ως προσέγγιση από την κορυφή προς τη βάση.

Ο κύριος σκοπός της ανάλυσης δένδρων ανίχνευσης σφαλμάτων είναι να συμβάλει στον εντοπισμό των πιθανών αιτιών βλάβης του συστήματος πριν από την πραγματική εμφάνισή τους. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογήσει την πιθανότητα του συμβάντος κορυφής χρησιμοποιώντας αναλυτικές ή στατιστικές μεθόδους. Αυτοί οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν την ποσοτική αξιοπιστία του συστήματος και πληροφορίες σχετικά με τη συντηρησιμότητα, όπως η πιθανότητα αποτυχίας, ο ρυθμός αποτυχίας και ο ρυθμός επισκευής. Αφού ολοκληρωθεί μια FTA, μπορεί να γίνει εστίαση σε προσπάθειες για τη βελτίωση της ασφάλειας και αξιοπιστίας του συστήματος (Abrecht, 2016).

### *Π.1.11 Δένδρα Γεγονότων και Αποφάσεων (Event tree analysis)*

Τα Δένδρα γεγονότων αναπτύχθηκαν το 1970, με σκοπό την ανάλυση κινδύνων από τις αλυσιδωτές αντιδράσεις σε περίπτωση ατυχήματος σε πυρηνικά εργοστάσια. Μια ανάλυση δένδρων συμβάντων (ETA) είναι μια επαγωγική διαδικασία που δείχνει όλα τα πιθανά αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα ατύχημα (έναρξης) γεγονός, λαμβάνοντας υπόψη εάν λειτουργούν ή όχι τα εγκατεστημένα φράγματα ασφαλείας, καθώς και πρόσθετα γεγονότα και παράγοντες.

Μελετώντας όλα τα σχετικά ατυχήματα (τα οποία εντοπίστηκαν με προκαταρκτική ανάλυση κινδύνου, HAZOP ή κάποια άλλη τεχνική), η ETA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό όλων των πιθανών σεναρίων ατυχημάτων και αλληλουχιών σε ένα πολύπλοκο σύστημα.

Σχεδιασμός και αδυναμίες της διαδικασίας μπορούν να εντοπιστούν και οι πιθανότητες των διαφόρων αποτελεσμάτων από ένα τυχαίο συμβάν μπορούν να προσδιοριστούν. Τα στάδια ανάπτυξης ενός δένδρου γεγονότων είναι τα ακόλουθα (Δούνιας και Μουστάκης 2002), (Rausand και Høyland, 2004):

- Προσδιορίζετε ένα σχετικό τυχαίο (αρχικό) συμβάν που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες συνέπειες
- Προσδιορίζονται τα εμπόδια που έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσουν το τυχαίο συμβάν
- Κατασκευάζετε το δέντρο συμβάντων
- Περιγράφονται οι (πιθανές) ακολουθίες ατυχημάτων που προκύπτουν
- Προσδιορίζετε η συχνότητα του τυχαίου συμβάντος και οι (πιθανές) πιθανότητες των κλάδων στο δέντρο συμβάντων
- Υπολογίζονται οι πιθανότητες / συχνότητες για τις προσδιορισμένες συνέπειες (αποτελέσματα)

Η αξία των δένδρων αποφάσεων ή γεγονότων είναι στο ότι, η ανάλυση δεν περιορίζεται στην γραφική αναπαράσταση, αλλά επεκτείνεται και στην ποσοτική ανάλυση. Τα δένδρα αποφάσεων χρησιμοποιούνται περισσότερο στην αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων.

### *Π.1.12 Μαρκοβιανή ανάλυση (MARKOV analysis)*

Η ανάλυση Markov χρησιμοποιείται όταν η μελλοντική κατάσταση ενός συστήματος εξαρτάται μόνο από την παρούσα κατάσταση του. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τιμής μιας μεταβλητής της οποίας η μελλοντική τιμή επηρεάζεται μόνο από την τρέχουσα θέση ή την κατάσταση, και όχι από οποιαδήποτε προηγούμενη δραστηριότητα που οδήγησε τη μεταβλητή στην τρέχουσα θέση ή κατάσταση. Στην ουσία, προβλέπει τη δραστηριότητα μιας τυχαίας μεταβλητής που βασίζεται αποκλειστικά στις τρέχουσες συνθήκες που περιβάλλουν την τυχαία μεταβλητή. Χρησιμοποιείται συνήθως για την ανάλυση των επισκευασμένων συστημάτων που μπορούν να υπάρχουν σε πολλαπλές εφαρμογές και η χρήση μιας

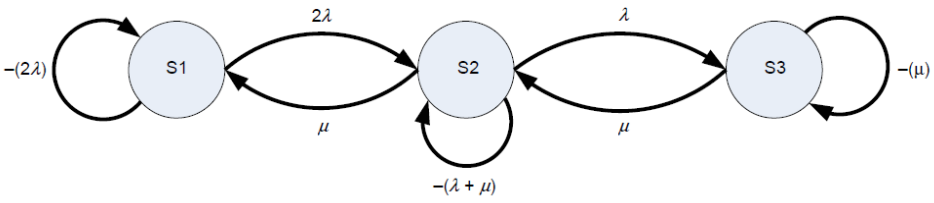
ανάλυσης αποκλεισμού αξιοπιστίας δεν θα ήταν κατάλληλη για την επαρκή ανάλυση του συστήματος. Η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί σε πιο σύνθετα συστήματα με τη χρήση διαδικασιών Markov υψηλότερης τάξης και περιορίζεται μόνο από το μοντέλο, τους μαθηματικούς υπολογισμούς και τις παραδοχές.

Η διαδικασία ανάλυσης Markov είναι μια ποσοτική τεχνική και μπορεί να είναι διακριτή (χρησιμοποιώντας πιθανότητες αλλαγής μεταξύ των καταστάσεων) ή συνεχής (χρησιμοποιώντας ποσοστά αλλαγής στα κράτη).

Η τεχνική ανάλυσης Markov μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες υποδομές συστημάτων τα οποία συμπεριλαμβανομένων:

- ανεξάρτητα εξαρτήματα παράλληλα
- ανεξάρτητα εξαρτήματα σε σειρά.
- συστήματα κατανομής φορτίου ·
- συστήματα αναμονής, συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης όπου μπορεί να συμβεί βλάβη από τη εκκίνηση του συστήματος.
- υποβαθμισμένα συστήματα.

Η τεχνική ανάλυσης Markov μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διαθεσιμότητας, συμπεριλαμβανομένης της συνεκτίμησης των εξαρτημάτων ανταλλακτικών για επισκευές.




Παράδειγμα διαγράμματος μεταβατικής κατάστασης Τα βέλη από μια κατάσταση στην ίδια δεν παρουσιάζονται συνήθως, αλλά παρουσιάζονται σε αυτά τα παραδείγματα για πληρότητα.

### *Π.1.13 Προσομοίωση Monte Carlo (Monte Carlo simulation)*

Η προσομοίωση του Monte Carlo ή η προσομοίωση πιθανότητας είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την κατανόηση του αντίκτυπου του κινδύνου και της αβεβαιότητας στα μοντέλα χρηματοοικονομικής διαχείρισης, διαχείρισης έργων, κόστους και άλλων προβλέψεων.

Όταν αναπτύσσετε ένα μοντέλο πρόβλεψης - κάθε μοντέλο που σχεδιάζεται για το μέλλον – και γίνονται ορισμένες υποθέσεις. Αυτές μπορεί να είναι υποθέσεις σχετικά με την απόδοση επένδυσης σε ένα χαρτοφυλάκιο, το κόστος ενός κατασκευαστικού έργου ή το χρόνο που θα χρειαστεί για την ολοκλήρωση ενός συγκεκριμένου έργου. Επειδή πρόκειται για προβολές στο μέλλον, το καλύτερο που μπορεί να γίναι είναι να εκτιμηθεί η αναμενόμενη αξία (Mahadevan, 1997).

Δεν μπορεί να είναι όμως γνωστή με βεβαιότητα ποια θα είναι η πραγματική αξία, αλλά βάσει ιστορικών δεδομένων ή εμπειρίας στον τομέα ή προηγούμενης εμπειρίας, μπορεί να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση. Αυτή η εκτίμηση είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη ενός μοντέλου, που περιέχει κάποια εγγενή αβεβαιότητα και κίνδυνο, επειδή είναι μια εκτίμηση μιας άγνωστης τιμής.

Σε μια προσομοίωση Monte Carlo, επιλέγεται μια τυχαία τιμή για κάθε μια από τις εργασίες, βάσει του εύρους των εκτιμήσεων. Το μοντέλο υπολογίζεται βάσει αυτής της τυχαίας τιμής. Το αποτέλεσμα του μοντέλου καταγράφεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μια τυπική προσομοίωση Monte Carlo υπολογίζει το μοντέλο εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές, κάθε φορά που χρησιμοποιεί διαφορετικές τυχαία επιλεγμένες τιμές.

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση, προκύπτει μεγάλος αριθμός αποτελεσμάτων από το μοντέλο, με καθένα βασισμένο σε τυχαίες τιμές εισόδου. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την πιθανότητα και να επιτευχθούν διάφορα αποτελέσματα στο μοντέλο.

### *Π.1.14 Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)*

Η μεθοδολογία αυτή, προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι διαφορετικές τιμές μιας ανεξάρτητης μεταβλητής επηρεάζουν μια συγκεκριμένη εξαρτημένη μεταβλητή κάτω από ένα δεδομένο σύνολο παραδοχών. Με τη χρήση της, δύναται να προσδιοριστούν σε ένα πρόβλημα ποιες είναι οι σημαντικές μεταβλητές ώστε να γίνει εστίαση σε αυτές κατά τη διαχείριση κινδύνων. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται όταν θεωρείται παρακινδυνευμένη η μονοσήμαντη και ντετερμινιστική εκτίμηση μιας μεταβλητής. Με τη μαθηματική προσέγγιση, διερευνώνται οι συνέπειες που υφίσταται η βέλτιστη λύση σε ένα σύστημα (γραμμικό μοντέλο), ως συνέπεια αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του (Salteli et al. 1999). Σε οικονομικές αναλύσεις χρησιμοποιείται, σε συγκεκριμένα όρια που εξαρτώνται από μία ή περισσότερες μεταβλητές εισροών, όπως το αποτέλεσμα που έχουν οι μεταβολές των επιτοκίων

(ανεξάρτητη μεταβλητή) στις τιμές των ομολόγων (εξαρτημένη μεταβλητή). Στην ανάλυση κινδύνων, η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υποδείξει τις μεταβλητές εκείνες που πιο σημαντικές, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην ανάλυση ευαισθησίας, χρησιμοποιείται συγκριτικό διάγραμμα ανάλυσης, που λόγω της μορφής του χαρακτηρίζεται διάγραμμα «αράχνη». Η δημιουργία του προκύπτει (συνήθως) μεταβάλλοντας κάθε φορά μια μεταβλητή, κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες στην αρχική εκτίμηση. Επομένως, μέσω της κλίσης των γραμμών που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή , μπορεί να βρεθεί ποια είναι η πιο ευαίσθητη μεταβλητή στην αντικειμενική συνάρτηση. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση, τόσο μεγαλύτερη αναλογικά είναι και η ευαισθησία. Εναλλακτικό στην εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιείται το διάγραμμα Tornado. Στη μελέτη του ένα συγκεκριμένο ποσοστό μεταβολής επιλέγεται, βάση του οποίου υπολογίζεται η ποσοστιαία μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης (Salteli et al. 1999).

## Παράρτημα 2

*Σχετικοί Ορισμοί FMEA*

- *Σοβαρότητα (Severity (S)):* είναι μια αριθμητική υποκειμενική εκτίμηση του πόσο σοβαρή θα είναι για ολόκληρο το σύστημα ή το επόμενο τμήμα του συστήματος το αποτέλεσμα μιας αποτυχίας. Προσδιορίζει όλους τους τρόπους αποτυχίας με βάση τις λειτουργικές απαιτήσεις και τα αποτελέσματά τους. Παραδείγματα των τρόπων αποτυχίας είναι τα εξής: Ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, διάβρωση ή παραμόρφωση κλπ. Κάθε αποτέλεσμα έχει μια δεδομένη τιμή σοβαρότητας (S) από το 1 (όπου δεν υπάρχει κίνδυνος) έως το 10 (μεγάλος κίνδυνος-κρίσιμο) και οι τιμές αναφέρονται στον πίνακα (1).
-

Πίνακας 1: Ταξινόμηση της αριθμητικής εκτίμησης της σοβαρότητας της αποτυχίας.

| Effect | Severity of effect | Ranking |
|---|---|---|
| Hazardous – without warning | Very high, the failure may result unsafe operation and possible injury, product becomes inoperative, without warning. | 10 |
| Hazardous – with warning | Very high, product becomes inoperative, the failure may result unsafe operation and possible injury, with warning. | 9 |
| Very high | Item inoperable, causes a loss of primary function. | 8 |
| High | Item operable, but at reduced level of performance. | 7 |
| Moderate | Item operable, but convenience item(s) inoperable. | 6 |
| Low | Item operable, but convenience item(s) operable at reduced level of performance. | 5 |
| Very low | Affects very little of the system, defect noticed by most | 4 |

| | | |
|---|---|---|
| | customers. | |
| Minor | Affects very little of the system, noticed by average customer | 3 |
| Very minor | Only noticed by discriminating customers. | 2 |
| None | No danger, no effect | 1 |

- *Εμφάνιση ή περιστατικό (Occurrence (O))* ή πιθανότητα, είναι μια αριθμητική υποκειμενική εκτίμηση της πιθανότητας ότι η αιτία, που προκάλεσε την αποτυχία, αν συμβεί, θα είναι απαραίτητο να εξεταστεί. Επίσης, πρέπει να ελεγχθεί ο τρόπος και πόσες φορές η αιτία συμβαίνει, όπως και τις ιδιαίτερες επιπτώσεις της. Αυτό μπορεί να γίνει με την εξέταση παρόμοιων προϊόντων ή διαδικασιών και τους τρόπους αστοχίας που έχουν τεκμηριωθεί. Ένας τρόπος αποτυχίας ταξινομείται, όπως στον πίνακα (2), με την κατάταξη των περιστατικών από το 1-10, και αυτό το βήμα ονομάζεται λεπτομερές τμήμα ανάπτυξης της διαδικασίας FMEA.

Πίνακας 2: Ταξινόμηση της αριθμητικής εκτίμησης εμφάνισης της αποτυχίας.

| Probability of Failure | Possible Failure Rates | Ranking |
|---|---|---|
| Very high: failure I almost inevitable | >= 1 in 2 | 10 |
| | 1 in 3 | 9 |
| High: repeated failures | 1 in 8 | 8 |
| | 1 in 20 | 7 |
| Moderate: occasional failures | 1 in 80 | 6 |
| | 1 in 400 | 5 |
| Low: relatively few failures | 1 in 2000 | 4 |
| | 1 in 15000 | 3 |
| Remote: failure is unlikely | 1 in 150000 | 2 |
| | <= 1 in 1500000 | 1 |

- *Ανίχνευση (Detection D):* Η ανίχνευση ονομάζεται μερικές φορές και αποτελεσματικότητα. Πρόκειται για μια αριθμητική υποκειμενική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των ελέγχων για την πρόληψη ή τον εντοπισμό της αιτίας αποτυχίας πριν αυτή συμβεί ή κατά τη λειτουργία. Ο αριθμός αυτός μετράει την πιθανότητα η αιτία αποτυχίας να διαφύγει την ανίχνευση. Ένας μεγάλος αριθμός ανίχνευσης δείχνει ότι οι πιθανότητες είναι υψηλές μια αποτυχία να διαφύγει την ανίχνευση ή με άλλα λόγια ότι οι πιθανότητες ανίχνευσης είναι χαμηλές. Επίσης η ανίχνευση ταξινομείται από το 1-10 όπως εικονίζεται στον πίνακα (3)

Πίνακας 3: Ταξινόμηση της αριθμητικής εκτίμησης ανίχνευσης της αποτυχίας.

| Detection | Criteria: likelihood of detection by design control | Ranking |
|---|---|---|
| Absolute uncertainty | Design Control will not and/or cannot detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode, or these is no Design Control. | 10 |
| Very remote | Very remote chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 9 |
| Remote | Remote cause the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 8 |
| Very low | Very low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 7 |
| Low | Low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 6 |
| Moderate | Moderate chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 5 |
| Moderately high | Moderately high chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 4 |
| High | High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 3 |
| Very high | Very high chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 2 |
| Almost certain | Design Control will almost certainly detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode. | 1 |

- *Αριθμός Προτεραιότητας Κινδύνου (Risk Priority Number (RPN)):* Παρέχει μια εναλλακτική προσέγγιση στην αξιολόγηση ανάλυσης της κρισιμότητας. Ο αριθμός προτεραιότητας κινδύνου παρέχει μια ποιοτική αριθμητική εκτίμηση των κινδύνων σχεδιασμού. RPN ορίζεται ως το προϊόν των τριών προηγούμενων ανεξάρτητων παραγόντων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αιτίας αποτυχίας δηλαδή: Σοβαρότητα (S), εμφάνιση (O) και Ανίχνευση (D). σε μία σχέση που

δίνεται ως

RPN = (S) * (O) * (D)

Κανονικά μεγάλες τιμές RPN δείχνουν τους πιο κρίσιμους τρόπους αστοχίας, αλλά θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την αξιολόγηση του κινδύνου δεν είναι αρκετό να ληφθεί υπόψη μόνο η υψηλή τιμή RPN επειδή μπορεί να οδηγήσει σε δαπανηρά λάθη. Μια υψηλή τιμή της σοβαρότητας (S) θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη και σύμφωνα με αυτό να αξιολογηθεί το σύστημα ανεξάρτητα από το συνολικό RPN του.

## Βιβλιογραφία


Abaei, M. M., Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., & Penesis, I. (2017). Developing a novel risk-based methodology for multi-criteria decision making in marine renewable energy applications. Renewable Energy, 102, 341-348.

Abrecht, B. R. (2016). Systems Theoretic Process Analysis Applied to an Offshore Supply Vessel Dynamic Positioning System (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

Afgan, N. and M. Carvalho, (2002) "Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants," Energy, vol. 27, pp. 739-755.

Ahmad, S., & Tahar, R. M. (2014). Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia. Renewable energy, 63, 458-466.

Akbari, N., Irawan, C. A., Jones, D. F., & Menachof, D. (2017). A multi-criteria port suitability assessment for developments in the offshore wind industry. Renewable Energy, 102, 118-133.

Alexander, C. (1999), *Risk Management and Analysis: Measuring and Modeling Financial Risk*, John Wiley & Sons Ltd.

Almeida A.T. and Bohoris G.A., (1995). Decision theory in maintenance decision making. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 1 Iss: 1, pp: 39 - 45.

Al-Najjara, B. and Alsyoufb, I., (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. International Journal of Production Economics Volume 84, Issue 1, 11, pp: 85–100.

Alnatheer, O. (2005) "The potential contribution of renewable energy to electricity supply in Saudi Arabia" Energy Policy, 33 (18) (2005), pp. 2298–2312

Alquier, A.M. Cagno, E. Caron, P. Leopoulos, V. and Ridao, M.A. (2000). Analysis of external and internal risks in project early phase. PMI research conference 2000, Paris, France.

Anand, P., and J. Wang. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering and System Safety, 2003; 79: 69–85.

Anderson David R., Sweeney Dennis J., Williams Thomas A., Martin Kipp, Διοικητική επιστήμη «Ποσοτικές μέθοδοι για τη λήψη επιχειρηματικών αποφάσεων», ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΕ. 2014

Badri, Masood A. (2001). "A combined AHP–GP model for quality control systems." International Journal of Production Economics72.1 27-40.

Balmat, J. F., Lafont, F., Maifret, R., & Pessel, N. (2011). A decision-making system to maritime risk assessment. *Ocean Engineering*, *38*(1), 171-176.

Barda, O. H., Dupuis, J., & Lencioni, P. (1990). Multicriteria location of thermal power plants. European Journal of Operational Research, 45(2-3), 332-346.

Barin, A., L. N. Canha, A. da Rosa Abaide, and K. F. Magnago, (2009)"Selection of storage energy technologies in a power quality scenario - The AHP and the fuzzy logic," in Proc. 35th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics, Porto, November.

Barnard, C. and H. A. Simon. (1947). Administrative behavior. A study of decision-making processes in administrative organization. Macmillan, New York.

Barzilai, J. (2008). Avoiding MCDA evaluation pitfalls. In *Real-Time and Deliberative Decision Making* (pp. 349-353). Springer, Dordrecht.

Barzilai, J. (2008). Avoiding MCDA evaluation pitfalls. In *Real-Time and Deliberative Decision Making* (pp. 349-353). Springer, Dordrecht.

Bas, E. (2013). The integrated framework for analysis of electricity supply chain using an integrated SWOT-fuzzy TOPSIS methodology combined with AHP: The case of Turkey. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 44(1), 897-907.

Baysal, M., A. Sarucan, C. Kahraman, and O. Engin,( 2011) "The selection of renewable energy power plant technology using fuzzy data envelopment analysis," in Proc. the World Congress on Engineering, vol. II, London.

Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2003). Decision-Making in Energy Planning. Application of the ELECTRE Method at Regional Level for the Diffusion of Renewable Energy Technology. Renewable Energy, 28(13), 2063- 2087.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European journal of Operational research*, *200*(1), 198-215.

Bell, D.E., H. Raiffa, and A. Tversky. (1988). Decision making: Descriptive, normative, and prescriptive interactions. Cambridge: Cambridge University Press. isbn: 9780521368513.

Belton V, Stewart T (2002) Muliple criteria decision analysis: an integrated approach. Kluwer Academic, Dordrecht

Berg, Heinz-Peter. "Risk management: procedures, methods and experiences."Risk Manage 1 (2010): 79-95.

Bertolini, M., & Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. Reliability Engineering & System Safety, 91(7), 839-848.

Bevilacqua, M. and Braglia, M., (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. Reliab. Eng. Syst. Saf., 70, pp: 71-83.

Bier, V. 2001. 'On the state of the art: risk communication to the public', *Reliability Engineering and System Safet*y, vol.71, pp.139-50.

Boulmetis, John, and Phyllis Dutwin. The ABCs of evaluation: Timeless techniques for program and project managers. Vol. 56. John Wiley & Sons, 2014.

Bouyssou, D. (1993). Décision multicritère ou aide multicritère. Newsletter of the European Working Group—Multicriteria Aid for Decisions, 1-2.

Brower, Michael C. Evaluating the Risk.. Reduction Benefits of Wind Energy. Diss. National Renewable Energy Laboratory, 1997.

Büyüközkan, G., & Çifçi, G. (2012). A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry. Expert Systems with Applications, 39(3), 2341-2354.

Chakladar, N. D., & Chakraborty, S. (2008). A combined TOPSIS-AHP-method-based approach for non-traditional machining processes selection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 222(12), 1613-1623.

Chakladar, N. D., & Chakraborty, S. (2008). A combined TOPSIS-AHP-method-based approach for non-traditional machining processes selection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 222(12), 1613-1623.

Chapman, R.J., (1998), Effectiveness of working group risk identification and assessment techniques, International Journal of Project Management, Vol. 16, No. 6, pp. 333-43.

Chawla, K. (2015). Use of Multi-Criteria Decision Analysis for Energy Planning.

Chen, P. S., & Wu, M. T. (2013). A modified failure mode and effects analysis method for supplier selection problems in the supply chain risk environment: A case study. Computers & Industrial Engineering, 66(4), 634-642.

Chen, Y., Okudan, G. E., & Riley, D. R. (2010). Sustainable performance criteria for construction method selection in concrete buildings. *Automation in construction*, *19*(2), 235-244.

Choi, Y.K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. International Journal of Software Engineering and Its Applications Vol.8, No.1, pp.75-84

Chu, M.-T. (2007). "Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis,"; Expert Systems with Applications, vol. 33, pp. 1011-1024. (Pubitemid 46497773)

Ciang, C. C., Lee, J. R., & Bang, H. J. (2008). Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. Measurement Science and Technology, 19(12), 122001.

Cinelli, M. (2017). Advancing Sustainable Nanotechnology with Multiple Criteria Decision Aiding (Doctoral dissertation, University of Warwick).

Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. Ecological Indicators, 46, 138-148.

Cohen, D., & Crabtree, B. (2006). Qualitative research guidelines project.

Cornett, A. M. (2008). A global wave energy resource assessment. International offshore (ocean) and polar engineering conference, (ISOPE, Paper No. ISOPE-2008–579), Canada, Vancouver.

Cradden, L., Mouslim, H., Duperray, O., & Ingram, D. (2011). Joint exploitation of wave and offshore wind power. In *Proceedings of the Nineth European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC), Southampton, UK* (pp. 5-9).

Daengdej, J., Lukose, D., & Murison, R. (1999). Using statistical models and case-based reasoning in claims prediction: experience from a real-world problem. In *Applications and Innovations in Expert Systems VI* (pp. 217-229). Springer, London.

Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE. Journal of intelligent manufacturing, 19(4), 397-406.

Dagkinis, I. and Nikitakos, N. (2013) Journal of Economics and Business. Enhance of ship safety based on maintenance strategies by applying of Analytic Hierarchy Process. Vol 63, No 3-4

Diakoudaki D. (2014). Ο ενεργειακός τομέας στην Ελλάδα της κρίσης: προκλήσεις και προοπτικές

Dincer, Ibrahim. "Renewable energy and sustainable development: a crucial review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 4.2 (2000): 157-175.

Dinmohammadi, A., & Shafiee, M. (2017). Determination of the most suitable technology transfer strategy for wind turbines using an integrated AHP-TOPSIS decision model. Energies, 10(5), 642.

Ditlevsen, Ove, and Henrik O. Madsen. Structural reliability methods. Vol. 178. New York: Wiley, 1996.

Doukas, Haris Ch. & Andreas, Botsikas M. & Psarras, John E., (2007). "Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables," European Journal of Operational Research, Elsevier, vol. 182(2), pages 844-855

Drever, E. (1995). Using Semi-Structured Interviews in Small-Scale Research. A Teacher's Guide.

Duic, N. , M. Graca Carvalho "Increasing renewable energy sources in island energy supply: case study Porto Santo" Renewable Sustainable Energy Rev, 8 (4) (2004), pp. 383–399

Elishakoff I., Safety Factors and Reliability: Friends or Foes?, (2004). Kluwer Academic Publishers, Boston.

Falnes, J. (2002). Ocean waves and oscillating systems. Cambridge: Cambridge University Press.

FAME Project Report WavEC Offshore Renewables (2012) Guidelines for a sustainable exploitation of offshore renewable energy - Account on seabird species.

Fernández-Chozas, J. (2013) Aalborg University Department of Civil Engineering. Predictability and Variability of Wave and Wind - Wave and Wind Forecasting and Diversified Energy Systems in the Danish North Sea

Fetanat, E. Khorasaninejad. (2015). A Novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran Ocean Coast Manage., 109, pp. 17-28

Flippen, A. A., Navarro, R. J., Larsen, A. M., & Stamatelatos, M. (2002). The Application of Probabilistic Risk Assessment to Habitable Payloads: Utilization of Risk-Based and Traditional Rule-Based Methodologies: A "First" for NASA. In ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. 1-6). American Society of Mechanical Engineers.

French, S. (1993) Decision Theory - An Introduction to the Mathematics of Rationality, Ellis Horwood Limited.

Gandibleux, X. (1999). Interactive multicriteria procedure exploiting a knowledge-based module to select electricity production alternatives: The CASTART system. European Journal of Operational Research, 113(2), 355-373.

Garcia, A., and E. Gilabert. (2011).Mapping FMEA into Bayesian Networks. International Journal of Performability Engineering,; 7(6): 525-537.

Garfì M, Ferrer-Martí L, Bonoli A, Tondelli S. (2011). Multi-criteria analysis for improving strategic environmental assessment of water programmes. A case study in semiarid region of Brazil. J Environ Manag;92:665–75.

Georgopoulou, E., Lalas, D., & Papagiannakis, L. (1997). A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: the case of renewable energy option. European Journal of Operational Research, 103(1), 38-54.

Gerber, J. F. (2013). Guide on multicriteria evaluation for Environmental Justice Organisations.

Gerwick Jr, B. C. (2007). Construction of marine and offshore structures. CRC press.

Geuna, Aldo, and Ben R. Martin. "University research evaluation and funding: An international comparison." Minerva 41.4 (2003): 277-304.

Ghanadan, R., J.G. Koomey. "Using energy scenarios to explore alternative energy pathways in California" Energy Policy, 33 (9) (2005), pp. 1117–1142

Ghosh, S., Chakraborty, T., Saha, S., Majumder, M., & Pal, M. (2016). Development of the location suitability index for wave energy production by ANN and MCDM techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1017-1028.

Ghosh, S., Chakraborty, T., Saha, S., Majumder, M., & Pal, M. (2016). Development of the location suitability index for wave energy production by ANN and MCDM techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1017-1028.

Giaoutzi, M., & Sapio, B. (2013). In search of foresight methodologies: Riddle or necessity. In Recent developments in foresight methodologies (pp. 3-9). Springer, Boston, MA.

Gibson, Robert B. Specification of sustainability-based environmental assessment decision criteria and implications for determining" significance" in environmental assessment. Diss. University of British Columbia, 2001.

Goh, H. H., Lee, S. W., Chua, Q. S., Goh, K. C., & Teo, K. T. K. (2016). Wind energy assessment considering wind speed correlation in Malaysia. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 1389-1400.

Greco, S., Figueira, J., & Ehrgott, M. (2016). Multiple criteria decision analysis. New York: Springer.

Greening, L. A., & Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. Energy policy, 32(6), 721-735.

Guitouni, A., Martel, J. M., & Bélanger, M. (1999). A multiple criteria aggregation procedure for the evaluation of courses of action in the context of the Canadian Airspace Protection. DREV TR, 1999-215.

Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An introduction to variable and feature selection. Journal of machine learning research, 3(Mar), 1157-1182.

Gwo-Hshiung, T. (2010). Multiple attribute decision making: methods and applications. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. ISBN: 1439861579

Habicht, Jean-Pierre, C. G. Victora, and J. Patrick Vaughan. (1999). "Evaluation designs for adequacy, plausibility and probability of public health programme performance and impact." International journal of epidemiology 28.1: 10-18.

Haimes YY, Hall WA. (1977). Sensitivity, responsivity, stability and irreversibility as multiple objectives in civil systems. Adv Water Resour;1:71–81.

Hajkowicz, S. A., McDonald, G. T., & Smith, P. N. (2000). An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management. Journal of Environmental Planning and Management, 43(4), 505-518. ISSN: 09640568.

Hale, A. 2002, 'Risk contours and risk management criteria for safety at major airports, with particular reference to the case of Schiphol', Safety Science, vol.40, pp. 299-323.

Hameed, Z., Hong, Y. S., Cho, Y. M., Ahn, S. H., & Song, C. K. (2009). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. Renewable and Sustainable energy reviews, 13(1), 1-39.

Han, Jingyi. Renewable energy development in China: policies, practices and performance. [PhD Thesis].[Wageningen, the Netherlands]: Wageningen University, 2009.

Hanne, T. (2012). Intelligent strategies for meta multiple criteria decision making (Vol. 33). Springer Science & Business Media. ISBN 978-1-4615-1595-1.

Haralambopoulos D, Polatidis H.( 2003) Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework. Renew Energy;28:961–73.

Hattis, D. and Anderson, E. (1999). "What should be the implications of Uncertainty, variability, and inherent Biases/Conservatism for Risk Management Decision Making?, Risk Analysis, vol.19, no.1, pp. 95-107.

Henderson, A. R., Morgan, C., Smith, B., Sørensen, H. C., Barthelmie, R. J., & Boesmans, B. (2003). Offshore wind energy in Europe—a review of the state- of- the- art. Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology, 6(1), 35-52..

Henley, E. J., & Kumamoto, H. (1981). Reliability engineering and risk assessment (Vol. 568). Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall.

Herva, M., & Roca, E. (2013). Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. Journal of Cleaner Production, 39, 355-371.

Hobbs, B. F. and G. T. F. Horn,. (1997). "Building public confidence in energy planning: a multimethod MCDM approach to demand-side planning at BC gas,"; Energy Policy, vol. 25, pp. 357-375.

Hockings, Marc. (2006). Evaluating Effectiveness: A framework for assessing management effectiveness of protected areas. IUCN.

Host, M., & Runeson, P. (2007, September). Checklists for software engineering case study research. In Empirical Software Engineering and Measurement, 2007. ESEM 2007. First International Symposium on (pp. 479-481). IEEE.

Huacuz, J.M. (2005). "The road to green power in Mexico—reflections on the prospects for the large-scale and sustainable implementation of renewable energy" Energy Policy, 33 (16), pp. 2087–2099

Humphreys, P. K., Y. K. Wong, and F. T. S. Chan. "Integrating environmental criteria into the supplier selection process." Journal of Materials Processing Technology 138.1 (2003): 349-356.

IEA Special_Report OffshoreEnergyOutlook, 2017

IEA: Renewables Will Overtake Coal's Share in World Power Mix by 2040

Ilangkumaran, M., Shanmugam, P., Sakthivel, G., & Visagavel, K. (2014). Failure mode and effect analysis using fuzzy analytic hierarchy process. International Journal of Productivity and Quality Management, 14(3), 296-313.

Ishfaq, S., Ali, S., & Ali, Y. (2018). Selection of optimum renewable energy source for energy sector in Pakistan by using MCDM approach. Process Integration and Optimization for Sustainability, 2(1), 61-71.

Jih-Kuang Ch. & Yu-Cheng L. (2007). Risk Priority Evaluated by ANP in Failure Mode and Effects Analysis. RoC, Going for Gold Quality Tools and Techniques.

Jin,, J., Y.M. Wei, (2008). Generalized intelligent assessment methods for complex systems and applications Science Press, Beijing

Jones, M., Hope, C., & Hughes, R. (1990). A multi-attribute value model for the study of UK energy policy. Journal of the Operational Research Society, 41(10), 919-929.

Josimović B, Marić I, Milijić S. (2014). Multi-criteria evaluation in strategic environmental assessment for waste management plan, a case study: the city of Belgrade. Waste Manag.

JRCI, (2012). Analysis of past accidents in offshore oil and gas operations, European Commission Joint Research Centre Institute for Energy and Transport.

Just, Richard E., Darrell L. Hueth, and Andrew Schmitz. The welfare economics of public policy: a practical approach to project and policy evaluation. Edward Elgar Publishing, 2005.

Kahraman, C. (2008). Fuzzy multi-criteria decision making: theory and applications with recent developments (Vol. 16). Springer Science & Business Media. ISBN 978-0-387-76813-7

Kaiser, Mark J., and Brian Snyder. "Offshore wind energy installation and decommissioning cost estimation in the US outer continental shelf." Energy Research Group LLC, Louisiana (2010).

Kambezidis, H. D., Kasselouri, B., & Konidari, P. (2011). Evaluating policy options for increasing the RES-E penetration in Greece. Energy Policy, 39(9), 5388-5398.

Kangas J, Kangas A (2002) Multiple criteria decision support methods in forest management. An overview and comparative analyses. In: Pukkala T (ed.). Multi-objective forest planning. Kluwer Academic Publishers. Managing Forest Ecosystems 6:37–70

Kannan D, Khodaverdi R, Olfat L, Jafarian A, Diabat A. (2013). Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain. J Clean Prod;47:355–67

Kaplan, S. 1990. Bayes is for eagles. IEEE Transactions on Reliability 39: 130-131.
Kristiansen, S. (2013). Maritime transportation: safety management and risk analysis. Routledge.

Karahalios, H. (2017). The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52, 172-184.

Karimirad, Madjid. (2014). " Offshore Energy Structures - For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms" Springer International Publishing Switzerland

Kaukonen, E. (1997). 'Evaluation of Scientific Research in Finland', in OECD (ed.), The Evaluation of Scientific Research: Selected Experiences (Paris: OECD), 12–25

Kaya T, Kahraman C. (2011). An integrated fuzzy AHP–ELECTRE methodology for environmental impact assessment. Expert Syst Appl;38:8553–62.

Kerzner, H., & Kerzner, H. R. (2017). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.

Kirwan, B. 1998 'Human error identification techniques for risk assessment of high risks systems – Part 1: review and evaluation of techniques', Applied Ergonomics, vol.29, no.3, pp. 157-77.

Kleindorfer, P.R., H.C. Kunreuther, and P.J.H. Schoemaker. (1993). Decision sciences: An integrative perspective. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-32867-5.

Kliem, R. and Ludin, I. (1997). Reducing Project Risk, Gower Publishing Ltd, UK, Hamphshire.

Kohanestani Z.M. Ghorbani,R. & A. Fazel. (2013). Evaluation of water quality using TOPSIS method in the Zaringol Stream. International Journal of Aquatic Biology. Vol. Issue 5, pp. 202-208.

Konidari, P., & Mavrakis, D. (2007). A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. Energy Policy, 35(12), 6235-6257.

Korhonen P, Moskowitz H,Wallenius J (1992) Multiple criteria decision support-A review. Eur J Oper Res 63(3):361–375

Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 69, 596-609.

Kumar, R., (2002). Managing risks in IT projects: an options perspective, Information & Management, Vol. 40, Issue 1, pp. 63 – 74.

Labuschagne, L., and Eloff, J.H.P., (2000). Electronic commerce: the information-security challenge, Information Management & Computer Security, Vol. 8, No. 3, pp. 154-157.

Lilas, T. & Nikitakos, N.(2007). Floating, Autonomous, Environmentally Friendly Desalination. Middle East Forum, Issue 6, 73-85.

Lin, M. C., Wang, C. C., Chen, M. S., & Chang, C. A. (2008). Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process. Computers in industry, 59(1), 17-31.

Lior, N. (2010) 10th International Conference on Environmental Science and Technology. Sustainable energy development: The present (2009) situation and possible paths to future. Energy, 30, 1-19.

Liu G. (2014). Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: a review. Renew Sustain Energy Rev;31:611–21.

Liu Y, Yao C, Wang G, Bao S. (2011). An integrated sustainable development approach to modeling the eco-environmental effects from urbanization. Ecol Indic;11:1599–608.

Løken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(7), 1584-1595.

Lootsma, F. A., Boonekamp, P. G. M., Cooke, R. M., & Van Oostvoorn, F. (1990). Choice of a long-term strategy for the national electricity supply via scenario analysis and multi-criteria analysis. European Journal of Operational Research, 48(2), 189-203.

Lozano-Minguez, E., A.J. Kolios, F.P. (2011). Brennan Multi-criteria assessment of offshore wind turbine support structures Renew Energy, 36 , pp. 2831-2837

Lund, H., E. Munster. (2006). "Integrated transportation and energy sector CO2 emission control strategies" Transport Policy, 13 (5), pp. 426–433

Mahadevan, S. (1997). Monte carlo simulation. Mechanical engineering-new york and basel-marcel dekker-, 123-146.

Majumder, M. (2015). Multi criteria decision making. In Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations (pp. 35-47). Springer, Singapore.

Mardani, A., Jusoh, A., Zavadskas, E. K., Cavallaro, F., & Khalifah, Z. (2015). Sustainable and renewable energy: An overview of the application of multiple criteria decision making techniques and approaches. Sustainability, 7(10), 13947-13984.

Marttunen, M., Lienert, J., & Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. European Journal of Operational Research, 263(1), 1-17.

Maslow, A. H. (1943). A theory of human motivation. Psychological review, 50(4), 370.

Massei G, Rocchi L, Paolotti L, Greco S, Boggia A. (2014). Decision support systems for environmental management: a case study on wastewater from agriculture. J. Environ Manag;146:491–504

Ming Z, Song X, Mingjuan M, Xiaoli Z. (2013). New energy bases and sustainable development in China: a review. Renew Sustain Energy Rev;20:169–85

Mirrazavi, S. K., Jones, D. F., & Tamiz, M. (2003). MultiGen: an integrated multiple-objective solution system. Decision Support Systems, 36(2), 177-187.

Misra, Krishna B. Reliability analysis and prediction: A methodology oriented treatment. Vol. 15. Elsevier, 2012. βοοκ

Moan, T. (2005). Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures. Structure and Infrastructure Engineering, 1(1), 33-62.

Moan, Torgeir. (2005). "Safety of offshore structures." Center for Offshore Research and Engineering, National University of Singapore, Singapore, Report 2005-04.

Mocia, J., Arapogianni, A., Wilkes, J., Kjaer, C., & Gruet, R. (2011). Pure power. Wind energy targets for 2020 and 2030. Brussels: European Wind Energy Association.

Molak, V. (1996). Fundamentals of risk analysis and risk management. CRC Press.

Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Teresa Pontes, M. (2010). Assessing the global wave energy potential. 29th international conference on ocean, offshore mechanics and arctic engineering (Shanghai, China). OMAE2010–20473.

Morrissey, A. J., & Browne, J. (2004). Waste management models and their application to sustainable waste management. Waste management, 24(3), 297-308.

Mousiopoulos, N., Ntziachristos, L., Slini, T., (2015). Environmental Engineering. [ebook] Athens:Hellenic Academic Libraries Link. Available Online at: http://hdl.handle.net/11419/1009

Muetze, A., & Vining J. G. (2006). Ocean wave energy conversion—A survey. University of Wisconsin-

Multon, Bernard. (2013). Marine renewable energy handbook. John Wiley & Sons.

Musial, W.D.; Butterfield, C.P.; Boone, A. (2004). "Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines", NREL/CP-500-34874, 23rd ASME Wind Energy Symposium Proceedings, Reno, Nevada.

Musial, Walt, et al. (2007). Engineering challenges for floating offshore wind turbines. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory.

Musial, Walter, and Bonnie Ram. (2011). Large-scale offshore wind power in the United States: Assessment of opportunities and barriers. No. NREL/TP-500-40745. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2010 and DIANE Publishing.

Musial, Walter, Sandy Butterfield, and Bonnie Ram. (2006). "Energy from offshore wind." Offshore technology conference. Offshore Technology Conference.

Musson A. (2012). The build-up of local sustainable development politics: a case study of company leaders in France. Ecol Econ;82:75–87

Mysiak J, Giupponi C, Rosato P. (2005). Towards the development of a decision support system for water resource management. Environ Model Softw;20:203–14

Ness, B., E. Urbel-Piirsalu, S. Anderberg, and L. Olsson, (2007). “Categorising tools for sustainability assessment,” Ecological Economics, vol. 60, pp. 498-508.

Nie X, Huang G, Li Y, Liu L. (2007). IFRP: a hybrid interval-parameter fuzzy robust programming approach for waste management planning under uncertainty. J Environ Manag;84:1–11.

O'dell, Carla, and C. Jackson Grayson. (1998). "If only we knew what we know: Identification and transfer of internal best practices." California management review 40.3 : 154-174.

OECD, (2006). Evaluation (of a Development Activity, Development Cooperation Directorate (DAC), Glossary, Retrieved from: http://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=7097

OECD, (2009), Framework for the Evaluation of SME and Entrepreneurship Policies and Programmes. Retrieved from: http://www.oecd-ilibrary.org/industry- 408 and-services/oecd-framework-for-the-evaluation-of-sme-and-entrepreneurshippolicies-and-programmes_9789264040090-en

OECD, (2013). Evaluating Development Activities 12 Lessons from the OECD DAC, Retrieved from: http://www.oecd.org/dac/evaluation/ , http://www.oecd.org/dac/peer-reviews/12%20Less%20eval%20web%20pdf.pdf

OGP (2010) Quantitative risk assessment, datasheet directory. London: OGP; 2010 March, report no.: 434

Optehostert, F., Müller, D., & Jussen, P. (2017). Dispositioning Strategies of Maintenance Tasks in Offshore Wind Farms. In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (pp. 101-108). Springer, Cham.

Owen, John M., and Patricia Rogers. Program evaluation: Forms and approaches. Sage, 1999.

Pan, J., & Rahman, S. (1998). Multiattribute utility analysis with imprecise information: an enhanced decision support technique for the evaluation of electric generation expansion strategies. Electric Power Systems Research, 46(2), 101-109.

Papaioannou, M. and I. Mavroidis, (2005) SUSTAINABLE DEVELOPMENT FROM THE INTERNATIONAL AND EU PERSPECTIVE: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES, Heleco ’05, TEE, Αθήνα.

Patton, Michael Quinn. (2008).Utilization-focused evaluation. Sage publications.

Patton, Michael Quinn. (2011). Developmental evaluation: Applying complexity concepts to enhance innovation and use. Guilford Press.

Paulk, Mark. (1993). Capability maturity model for software. John Wiley & Sons, Inc.

Pelc, Robin, and Rod M. Fujita. (2002). "Renewable energy from the ocean." Marine Policy 26.6: 471-479.

Pinna, Bruno, et al. "Deterministic and stochastic dependability analysis of industrial systems using Coloured Petri Nets approach." Annual Conference of the European Safety and Reliability Association, ESREL 2013. Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-138-00123-7, 2013.

PMI, 2004, A Guide to the Project Management Body of Knowledge, Project Management Institute, USA.

Pohekar SD, Ramachandran M (2004) Application of multi-criteria decison-making to sustainable energy planning-A review. Renew Sust Energ Rev 8:365–381

Polatidis, H., Haralambopoulos, D. A., Munda, G., & Vreeker, R. (2006). Selecting an appropriate multi-criteria decision analysis technique for renewable energy planning. Energy Sources, Part B, 1(2), 181-193.

Ponis, S.T. and Koronis, E.J. (2004). "Identifying the Human Supply Chain: Putting Enterprise Supply Chain Management Disciplines to Work', International Conference on Enterprise Integration and Modeling Technology, University of Toronto, Canada, October.

Pressman, R., (1997). Software Engineering - A practitioner's approach, (4th ed), McGraw-Hill, New York.

Qin, Y., Wang, X., & Wang, Z. L. (2008). Microfibre–nanowire hybrid structure for energy scavenging. Nature, 451(7180), 809.

Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1995). Energy resource allocation incorporating qualitative and quantitative criteria: an integrated model using goal programming and AHP. Socio-Economic Planning Sciences, 29(3), 197-218.

Rausand M., (1998). Reliability centered maintenance. Reliability Engineering and System Safety, 60, pp: 121-32.

Rausand, M., and A. Høyland, (2004).''System Reliability Theory Models, Statistical Methods, and Applications'' Wiley.

Reid, Dorraine Diedrie-Ann. (2011). "Environment & Sustainable Development."Available at SSRN 1981400.

Renewables 2015 global status report, renewable energy policy network for the 21st century

Ribrant J., Bertling L. (2007). 'Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005'. IEEE Transactions on Energy Conversion. 22(1), 167–73

Roca J, Padilla E, Farré M, Galletto V. (2001). Economic growth and atmospheric pollution in Spain: discussing the environmental Kuznets curve hypothesis. Ecol Econ ;39:85–99.

Rossi, Peter H., Mark W. Lipsey, and Howard E. Freeman. Evaluation: A systematic approach. Sage publications, 2003.

Roy, B. (1968). Classement et Choix en Presence de Points de vue Multiples. RAIRO-Operations Research-Recherche Operationnelle, 2(V1), 57-75.

Roy, B. (1981). The optimisation problem formulation: Criticism and overstepping. Journal of the Operational Research Society, 32(6), 427–436. ISSN: 14769360.

Roy, B. (1981). The optimisation problem formulation: Criticism and overstepping. Journal of the Operational Research Society, 32(6), 427–436. ISSN: 14769360.

Roy, B. (2013). Multicriteria methodology for decision aiding (Vol. 12). Springer Science & Business Media.

Roy, B., & Bouyssou, D. (1986). Comparison of two decision-aid models applied to a nuclear power plant siting example. European Journal of Operational Research, 25(2), 200-215.

Saaty, T.L. (2008). Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process. Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. Vol. 102 (2), pp. 251–318.

Saigal, R.K., D. Dolan, A. D. Kiureghian, (2007). T. Camp, and C. E. Smith. Comparison of Design Guidelines for Offshore Wind Energy Systems. Offshore Technology, Houston, Texas, U.S.A., April30 –May 3.

Sakthivel, S. (2007). Managing risk in offshore systems development. Communications of the ACM, 50(4), 69-75.

Saltelli, A., Tarantola, S., & Chan, K. S. (1999). A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. Technometrics, 41(1), 39-56.

San Cristóbal J. (2011).Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in spain: the Vikor method. Renew Energy;36:498–502.

Sánchez-Lozano JM, Teruel-Solano J, Soto-Elvira PL, Socorro García-Cascales M. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in southeastern Spain. Renew Sustain Energy Rev;24:544–56

Santos, Sergio P., Valerie Belton, and Susan Howick. (2002). "Adding value to performance measurement by using system dynamics and multicriteria analysis." International Journal of Operations & Production Management 22.11: 1246-1272.

Santos, Sérgio P., Valerie Belton, and Susan Howick. (2008). "Enhanced performance measurement using OR: a case study." Journal of the Operational Research Society 59.6: 762-775.

Sarkar, A., Behera, D.K. and Sarkar, B., (2011). The Maintenance Strategy Selection of a Gas Turbine Power Plant System. Journal of Information and Operations Management IOM, Volume 2, Issue 1, pp: 09-16.

Schetke S, Haase D. Multi-criteria assessment of socio-environmental aspects in shrinking cities. Experiences from eastern Germany. Environ Impact Assess Rev 2008;28:483–503.

Scriven, Michael. "KEY EVALUATION CHECKLIST." (2007).

Sen R, Bhattacharyya SC. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: an application of HOMER. Renew Energy 2014;62:388–98.

Sennaroglu, B. & Şen, S. (2012). Integrated AHP and TOPSIS Approach for Supplier Selection. 2nd International Conference Manufacturing Engineering & Management, pp- 19-22.

Shafiee, M. (2015). A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms. Expert Systems with Applications, 42(4), 2143-2152.

Shaw, Ian, et al., eds. The Sage handbook of evaluation. Sage, 2006.

Shen, Y. C., Lin, G. T., Li, K. P., & Yuan, B. J. (2010). An assessment of exploiting renewable energy sources with concerns of policy and technology. Energy Policy, 38(8), 4604-4616.

Silvestre, B. S., & Gimenes, F. A. P. (2017). A sustainability paradox? Sustainable operations in the offshore oil and gas industry: The case of Petrobras. Journal of Cleaner Production, 142, 360-370.

Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2012). An overview of sustainability assessment methodologies. Ecological indicators, 15(1), 281-299.

Singh, R., H. Murty, S. Gupta, and A. Dikshit, (2009). “An overview of sustainability assessment methodologies,” Ecological Indicators, vol. 9, no. 2, pp. 189-212.

Siskos, J., & Hubert, P., (1983). Multi-criteria analysis of the impacts of energy alternatives: a survey and a new comparative approach. European Journal of Operational Research, 13(3), 278-299.

Snyder, B., & Kaiser, M. J. (2009). Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. Renewable Energy, 34(6), 1567-1578.

Spinato F. (2008). The Reliability of Wind Turbines. Doctoral thesis, Durham University

Spouge, John. A guide to quantitative risk assessment for offshore installations. Aberdeen: CMPT, 1999.

Stamatis, D. H. Introduction to Risk and Failures: Tools and Methodologies. CRC Press, 2014.

Stern, P. C., & Dietz, T. (1994). The value basis of environmental concern. Journal of social issues, 50(3), 65-84.

Stoica, P., & Selen, Y. (2004). Model-order selection: a review of information criterion rules. IEEE Signal Processing Magazine, 21(4), 36-47.

Streimikiene D, Balezentis T, Krisciukaitienė I, Balezentis A. Prioritizing sustainable electricity production technologies: mcdm approach. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:3302–11.

Suwignjo, Patdono, Umit S. Bititci, and Allan S. Carrie. "Quantitative models for performance measurement system." International journal of production economics 64.1 (2000): 231-241.

Tam, C. M., Vivian WY Tam, and W. S. Tsui. "Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong."International Journal of Project Management 22.7 (2004): 563-571.

Tang, K. H. D., Dawal, S. Z. M., & Olugu, E. U. (2018). A review of the offshore oil and gas safety indices. Safety science, 109, 344-352.

Tavner P.J., Xiang J.P., Spinato F. (2006). ‘Reliability analysis for wind turbines’. Wind Energy. 10(1), 1–18

Tawiah, S., Marfo, S. A., & Benah, D. (2016). Solar Power for Sustainable Offshore Petroleum Exploration and Production in Africa. Africa Energy and Technology Conference, 2016.

Thanassoulis, E., Kortelainen, M., & Allen, R. (2012). Improving envelopment in data envelopment analysis under variable returns to scale. Eu

Theodosiou, G., Stylos, N., & Koroneos, C. (2015). Integration of the environmental management aspect in the optimization of the design and planning of energy systems. Journal of Cleaner Production, 106, 576-593.

Thoft-Cristensen, P., & Baker, M. J. (2012). Structural reliability theory and its applications. Springer Science & Business Media.

Trainer, F. E. (1995). Can renewable energy sources sustain affluent society?. Energy Policy, 23(12), 1009-1026.

Triantaphyllou, E. (2000). Multi-criteria decision making methods. In Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study (pp. 5-21). Springer US. ISBN-13: 978-0792366072.

Triantaphyllou, E., Kovalerchuk, B., Mann, L., Knapp G.M., (1997). Determining the most important criteria in maintenance decision making. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3(1), pp: 16–24

Tsoutos T, Drandaki M, Frantzeeskaki N et al (2009) Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of crete. Energ Policy 37:1587–1600.

Turcksin, Laurence, Annalia Bernardini, and Cathy Macharis. "A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet." Procedia-Social and Behavioral Sciences 20 (2011): 954-965.

Turner, R.J. 1999 The Handbook of Project Based Management, McGraw Hill, UK.

UNESCO (n.d.). Basic Ideaç. Retrieved from: http://portal.unesco.org/en/ev.phpURL_ID=24427&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

Vagiona, D.G. and Karanikolas, N.M. (2012). Global NEST Journal. A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms sitting in Greece. Vol 14, No 2, pp 235-243

Van Hertem, D., Ghandhari, M., & Delimar, M. (2010). Technical limitations towards a SuperGrid—A European prospective. In Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International (pp. 302-309). IEEE.

Venetsanos, Konstantinos, Penelope Angelopoulou, and Theocharis Tsoutsos. "Renewable energy sources project appraisal under uncertainty: the case of wind energy exploitation within a changing energy market environment." Energy Policy 30.4 (2002): 293-307.

Viebahn, Peter. "Comparison of carbon capture and storage with renewable energy technologies regarding structural, economic, and ecological aspects in Germany." International journal of greenhouse gas control 1.1 (2007): 121-133.

Villemeur, (1992). A.. Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment. Methods and Techniques. John Wiley & Sons, United Kingdom,

Vinnem, J. E. (2013). Offshore risk assessment: principles, modelling and applications of QRA studies. Springer Science & Business Media.

Vose, D. (2008). Risk analysis: a quantitative guide. John Wiley & Sons.

Wanderer T, Herle S. Creating a spatial multi-criteria decision support system for energy related integrated environmental impact assessment. Environ Impact Assess Rev 2014

Wang JJ, Jing YY, Zhang CF et al (2010) Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renew Sust Energ Rev 13:2263–2278

Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2263-2278.

Wang, L., Chu, J. and Wu, J., (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process International Journal of Production Economics, Volume 107, Issue 1, May. pp:151-163.

Wang, Y. M., Greatbanks, R., & Yang, J. B. (2005). Interval efficiency assessment using data envelopment analysis. Fuzzy sets and Systems, 153(3), 347-370.

Widerman, R. Max, & Fellow, PMI,(1992). Project and Program Risk Management: A Guide to Managing Project Risks and Opportunity.

Wilson, Robert Elliot, and Peter BS Lissaman. Applied aerodynamics of wind power machines. No. PB-238595. Oregon State Univ., Corvallis (USA), 1974.

Wiser, Ryan H. "Renewable energy finance and project ownership: the impact of alternative development structures on the cost of wind power." Energy Policy 25.1 (1997): 15-27.

Wu. M. (2007). Topsis-AHP simulation model and its application to supply chain management. World Journal of Modelling and Simulation Vol. 3 No. 3, pp. 196-201.

Y.C. Ye, L.H. Ke, D.Y. Huang, (2006). System synthetical evaluation technology and its application Metallurgical Industry Press, Beijing.

Yuan, Y., Ong, Y. S., Gupta, A., & Xu, H. (2018). Objective reduction in many-objective optimization: evolutionary multiobjective approaches and comprehensive analysis. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 22(2), 189-210.

Zeleny, M. (2008). The KM-MCDM interface in decision design: tradeoffs-free conflict dissolution. International Journal of Applied Decision Sciences, 1(1), 3-23. ISSN: 17558085.

Βαβάτσικος, Α.Π. (2008), 'Ανάπτυξη Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων σε Περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών με Χρήση Ασαφών Πολυκριτήρων Μεθόδων', Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Δ.Π.Θ.

Δούκας Χ. (2008). Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύγχρονο περιβάλλον λειτουργίας του ενεργειακού τομέα

Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός – Οδικός Χάρτης για το 2050, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Μάρτιος 2012

Κηρυττόπουλος, Κ. (2006). Εγχειρίδιο Διαχείρισης Κινδύνων Έργων, η οπτική του μάνατζμεντ. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

Παναγιωτόπουλος Π. (2007). Εφαρμογή πολυκριτήριας μεθοδολογίας AHP για την επιλογή λογισμικού προγραμματισμού επιχειρησιακών πόρων

Τσιάκη, Θ. (2005). Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θες/νίκη.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ - UNIVERSITY OF THE AEGEAN -