



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΙ
ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΜΑΥΡΙΔΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΤΣΙΝΤΖΟΥΡΑΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΜΑΥΡΙΔΗΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΤΣΙΝΤΖΟΥΡΑΣ

Επιβλέπων: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

.....
ΙΩΑΝΝΗΣ Α. ΜΑΥΡΙΔΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Και Μηχανικός Υπολογιστών

.....
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΤΣΙΝΤΖΟΥΡΑΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Ιωάννης Α. Μαυρίδης, 2014
Copyright © Δημήτριος Α. Τσίντζουρας, 2014
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί σημαντική ανάπτυξη στην τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς και στο βαθμό διείσδυσής τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τον περιορισμό της χρήσης συμβατικών πηγών και της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, κάτι που επιβεβαιώνεται από τη διαρκή αύξηση της εγκατεστημένης τους ισχύος σε Ελλάδα και Ευρώπη, αλλά και παγκοσμίως. Ωστόσο, η διακοπτόμενη φύση και η έντονη μεταβλητότητα της ηλιακής και αιολικής παραγωγής καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωσή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η πρόβλεψη της ισχύος τους κρίνεται ως ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο για τη διαχείριση και την ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο. Στο πλαίσιο αυτό, έχει καταβληθεί ιδιαίτερη προσπάθεια για την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης και για τα δύο είδη ισχύος, απασχολώντας έντονα πολλούς επιστημονικούς κλάδους.

Η πλειοψηφία των μοντέλων πρόβλεψης ισχύος δέχονται ως είσοδο δεδομένα από μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού, τα οποία παρέχουν εκτιμήσεις για τις μελλοντικές τιμές των καιρικών μεταβλητών στο επίπεδο του ηλιακού ή αιολικού πάρκου. Αντίστοιχα, στην έξοδό τους εξάγουν προβλέψεις της ηλιακής ή της αιολικής παραγωγής για δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Ωστόσο, δεδομένου ότι συνήθως η περιοχή ενδιαφέροντος σε ένα μοντέλο είναι μια ευρύτερη περιφέρεια και όχι ένα μεμονωμένο πάρκο, επιχειρείται η πραγματοποίηση προβλέψεων για όλα τα πάρκα της περιφέρειας συνδυαστικά. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει η περιφερειακή πρόβλεψη της ηλιακής ή της αιολικής ισχύος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ελέγχονται δύο μοντέλα περιφερειακής πρόβλεψης ηλιακής και αιολικής ισχύος με χρήση νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα βασίζονται στη θεωρία των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBF) και των αυτό-οργανούμενων χαρτών (SOM). Για την είσοδό τους χρησιμοποιούνται δεδομένα αριθμητικών προβλέψεων καιρού από το μοντέλο SKIRON, ενώ στην έξοδό τους παρέχεται η περιφερειακή πρόβλεψη.

Στην κατεύθυνση αυτή, γίνεται αρχικά περιγραφή της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, καθώς και της ηλιακής ακτινοβολίας και του ανέμου αντίστοιχα. Παρουσιάζονται τα κυριότερα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού, όπως επίσης τα πιο διαδεδομένα μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής και αιολικής ισχύος τεχνολογίας αιχμής. Έπειτα, γίνεται μια αναφορά στα χαρακτηριστικά των σφαλμάτων πρόβλεψης, ενώ ακολουθεί η θεωρία των νευρωνικών δικτύων και η περαιτέρω περιγραφή των RBF και SOM. Τέλος, περιγράφεται αναλυτικά η ανάπτυξη των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, για την περιφερειακή πρόβλεψη της ηλιακής και αιολικής ισχύος στην περιοχή της Κρήτης, ενώ γίνεται ανασκόπηση του ελέγχου του αριθμού των πάρκων με τον οποίο αυτή γίνεται βέλτιστη μέσω ενός προσαρμοστικού αλγορίθμου. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η τελική αποτίμηση των προτεινόμενων μεθόδων.

Λέξεις Κλειδιά: αιολική ισχύς, ηλιακή ισχύς, περιφερειακή πρόβλεψη, αριθμητικές προβλέψεις καιρού, γενετικοί αλγόριθμοι, νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης, αυτό-οργανούμενοι χάρτες, σφάλμα πρόβλεψης.

Abstract

Recent decades have witnessed a significant development of the technology of renewable energy sources (RES) and their percentage of participation in power production, in order to limit the use of conventional energy sources and the pollution of the environment. Solar and wind energy are the most widely used forms of alternative energy, and this is confirmed by the continuous increase of their installed capacity not only in Greece and in Europe, but worldwide as well. However, the intermittent nature and the strong variability of solar and wind power render their integration in power systems difficult. Therefore, power forecasting is seen as a very important tool for managing and integrating them into the grid. In this context, a great effort has been made, in order to develop prediction models for both types of power.

The majority of power forecasting models use as input data from numerical weather prediction models, which provide estimates of the future values of weather variables at the region of the solar or wind farm. Their output produces forecasts of solar or wind power for a given time horizon. However, since the model is usually interested in a wider area and not a single park, combined forecasts for all parks of a region are attempted, resulting in regional forecasting of solar or wind power.

This diploma thesis develops two regional forecasting models for solar and wind power, using neural networks. These models are based on the theory of radial basis function neural networks (RBFNN) and self-organizing maps (SOM). Their input uses numerical weather prediction data from the model SKIRON, while their output gives the regional forecast.

In this respect, the main features of solar and wind energy are described, in addition to solar radiation and wind respectively. The most used numerical weather prediction models are presented, as well as the most important prediction models of solar and wind power. A reference is made to the prediction error, followed by the theory of neural networks and further analysis of RBF and SOM. Finally, details are given for the development of the models being used in this diploma thesis, concerning regional forecasting of solar and wind power in the area of Crete, with the eventual presentation of the corresponding results and the final assessment of the proposed methods.

Keywords: wind power, solar power, regional forecasting, numerical weather predictions, genetic algorithms, radial basis function neural networks, self-organizing maps, prediction error.

*Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον κ. Γ. Σιδεράτο για την υπομονή
του και τη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας*

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	15
1.2 Η ηλιακή ενέργεια.....	16
1.2.1 Η εξέλιξη της ηλιακής ενέργειας.....	17
1.2.2 Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα.....	21
1.3 Η αιολική ενέργεια.....	24
1.3.1 Η εξέλιξη της παραγωγής αιολικής ισχύος.....	26
1.3.2 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	29
1.4 Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	32
1.4.1 Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (TSO).....	32
1.4.2 Η σημασία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	33
1.5 Δομή της εργασίας.....	34

Κεφάλαιο 2: Κύρια χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου και αριθμητικές προβλέψεις καιρού

2.1 Στοιχεία θεωρίας ηλιακής ακτινοβολίας.....	37
2.1.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	37
2.1.2 Φωτοβολταϊκή μετατροπή.....	41
2.1.2.1 Θερμοκρασιακή επίπτωση.....	43
2.1.2.2 Επίδραση της σκίασης.....	44
2.1.2.3 Επίδραση της νέφωσης.....	45
2.2 Στοιχεία θεωρίας του ανέμου.....	45
2.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου.....	47
2.2.1.1 Δυνάμεις και τύποι ανέμου.....	48
2.2.1.2 Παράγοντες επίδρασης της τοπολογίας εδάφους στον άνεμο.....	49
2.2.1.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου.....	50
2.2.2 Μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.....	52
2.2.2.1 Η θεωρητική μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.....	52
2.2.2.2 Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας από τον κατασκευαστή.....	53
2.3 Αριθμητικές προβλέψεις καιρού.....	55
2.3.1 Γενικά.....	55
2.3.2 Μοντέλα NWP.....	56
2.3.3 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις.....	59
2.3.3.1 Αφομοίωση δεδομένων για την αρχικοποίηση των μοντέλων.....	59
2.3.3.2 Τυποποίηση των μοντέλων (Model formulation).....	60
2.3.3.3 Πακέτα φυσικών διεργασιών των μοντέλων.....	61
2.3.3.4 Πρότυπα λειτουργίας.....	62
2.3.4 Τοπικά και μεσαίας κλίμακας μοντέλα.....	63

2.3.5 Χρησιμοποιούμενα μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.....	65
2.3.5.1 Το μοντέλο ALADIN.....	65
2.3.5.2 Το μοντέλο HIRLAM.....	66
2.3.5.3 Το μοντέλο MM5.....	67
2.3.5.4 Το μοντέλο WAsP.....	68
2.3.5.5 Το μοντέλο WRF.....	69
2.3.5.6 Το μοντέλο ECMWF.....	70
2.3.6 Το μοντέλο SKIRON.....	70
2.3.7 Επιδόσεις των μοντέλων NWP.....	73

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή σημαντικότερων μοντέλων πρόβλεψης ηλιακής και αιολικής ισχύος

3.1 Εισαγωγή.....	75
3.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης.....	76
3.3 Φυσικά μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής ισχύος.....	77
3.3.1 Αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων (Numerical Weather Prediction Models, NWP).....	78
3.3.2 Χαρτογράφηση νεφώσεων (cloud imagery).....	79
3.4 Στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής ισχύος.....	80
3.4.1 Στατιστικά μοντέλα χωρίς χρήση αριθμητικών μοντέλων μετεωρολογικών προβλέψεων και χαρτογράφησης νεφώσεων.....	81
3.4.2 Στατιστικά μοντέλα με χρήση αριθμητικών μοντέλων μετεωρολογικών προβλέψεων και χαρτογράφησης νεφώσεων.....	85
3.5 Φυσικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος.....	87
3.5.1 Μεθοδολογία φυσικής προσέγγισης.....	88
3.5.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικής προσέγγισης.....	90
3.5.2.1 Το μοντέλο Persistence.....	90
3.5.2.2 Το μοντέλο Prediktor.....	90
3.5.2.3 Το μοντέλο Previento.....	92
3.5.2.4 Το μοντέλο eWind.....	94
3.5.2.5 Τα μοντέλα LocalPred και RegioPred.....	95
3.5.2.6 Το μοντέλο HIRPOM.....	95
3.6 Στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος.....	95
3.6.1 Μεθοδολογία στατιστικής προσέγγισης.....	96
3.6.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικής προσέγγισης.....	97
3.6.2.1 Το μοντέλο Wind Power Prediction Tool – WPPT.....	97
3.6.2.2 Το μοντέλο Sipreólico.....	98
3.6.2.3 Το μοντέλο Advanced Wind Power Prediction Tool – AWPPT.....	98
3.6.2.4 Το μοντέλο Advanced Wind Power Prediction System – AWPPTS.....	99
3.6.2.5 Μοντέλα πρόβλεψης τεχνητής νοημοσύνης.....	99
3.7 Συνδυασμένη προσέγγιση φυσικών και στατιστικών μοντέλων.....	100

Κεφάλαιο 4: Χαρακτηριστικά σφαλμάτων πρόβλεψης

4.1 Εισαγωγή.....	103
4.2 Το σφάλμα πρόβλεψης.....	104
4.3 Πλαίσιο εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης.....	105
4.3.1 Εκτίμηση βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος.....	105
4.3.2 Εκτίμηση βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος.....	107
4.3.3 Σύγκριση της ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης.....	109
4.4 Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης.....	110
4.4.1 Κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου.....	110
4.4.1.1 Μορφή της κατανομής.....	110
4.4.1.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά.....	111
4.4.2 Κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	113
4.4.2.1 Μορφή της κατανομής.....	113
4.4.2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά.....	115
4.4.3 Συμπεράσματα για τη μορφή των κατανομών.....	117

Κεφάλαιο 5: Νευρωνικά δίκτυα

5.1 Εισαγωγή.....	119
5.2 Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	119
5.2.1 Από τα βιολογικά στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	119
5.2.2 Ιστορική αναδρομή τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	121
5.2.3 Τα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	123
5.2.4 Το μοντέλο του τεχνητού νευρώνα.....	125
5.2.5 Αρχιτεκτονικές τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	126
5.2.5.1 Τρόπος μετάδοσης παλμού.....	127
5.2.5.2 Επίπεδα νευρώνων.....	128
5.2.6 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	128
5.2.6.1 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης με επίβλεψη (supervised learning).....	128
5.2.6.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning).....	128
5.2.6.3 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης με ενισχυτική μάθηση (reinforced learning).....	129
5.3 Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής βάσης.....	129
5.3.1 Νευρώνες ακτινικών συναρτήσεων βάσης.....	129
5.3.2 Νευρωνικά δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (Radial Basis Function networks).....	131
5.4 Αυτό-οργανούμενοι χάρτες (Self – Organizing Maps).....	134
5.5 Γενετικοί αλγόριθμοι.....	137

Κεφάλαιο 6: Περιφερειακή (Regional) πρόβλεψη αιολικής και ηλιακής ισχύος στην Κρήτη

6.1 Εισαγωγή.....	141
-------------------	-----

6.2 Ανάλυση επιμέρους στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων.....	141
6.2.1 Χρησιμοποιούμενα είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων ακτινικής βάσης (RBFNN).....	141
6.2.2 Βελτιστοποίηση της εκπαίδευσης των RBFNN με χρήση γενετικού αλγορίθμου στο MATLAB.....	145
6.2.3 Εφαρμογή του αναδρομικού αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων RLS στην περιφερειακή πρόβλεψη.....	148
6.3 Περιφερειακή πρόβλεψη παραγωγής ισχύος αιολικών πάρκων στην Κρήτη.....	149
6.3.1 Προετοιμασία των δεδομένων και εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων.....	149
6.3.2 Αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης.....	152
6.4 Περιφερειακή πρόβλεψη παραγωγής ισχύος φωτοβολταϊκών πάρκων στην Κρήτη.....	159
6.4.1 Προετοιμασία των δεδομένων και εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων.....	160
6.4.2 Αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης.....	161
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και παρατηρήσεις.....	167
Βιβλιογραφία.....	169

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ραγδαία μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών ενεργειακών πόρων (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κτλ.), σε συνδυασμό με τη συνεχή υποβάθμιση του περιβάλλοντος και την άνοδο της θερμοκρασίας, έχει οδηγήσει πολλές χώρες παγκοσμίως στην εισαγωγή νέων πολιτικών και μέτρων που αποσκοπούν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του τομέα της ενέργειας και την αύξηση της χρήσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι βασικές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή πράσινης ενέργειας είναι οι εξής:

- Η αιολική ή ηλιακή ενέργεια ή βιομάζα ή βιοαέριο
- Η γεωθερμική ενέργεια
- Η ενέργεια της θάλασσας
- Το υδάτινο δυναμικό με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Μεγάλο πλεονέκτημα των ΑΠΕ είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον, καθώς δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα και ραδιενεργά απόβλητα. Επίσης, για την λειτουργία τους δεν απαιτείται εξόρυξη ή καύση όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας.

Η επιδίωξη από την παγκόσμια κοινότητα να μειωθεί η καταπόνηση του περιβάλλοντος που προέρχεται από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (λιγνιτικοί, πετρελαϊκοί, φυσικού αερίου κλπ.), καθώς και η αυξανόμενη μείωση των αποθεμάτων των φυσικών ενεργειακών πόρων (λιγνίτης, γαιάνθρακας κ.ά.) έκαναν απαραίτητη την εισαγωγή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην ενεργειακή παραγωγή.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση επιδιώκει την υλοποίηση του φιλόδοξου στόχου "20-20-20" ^[1], σύμφωνα με τον οποίο έως το 2020 θα πρέπει να επιτευχθεί: (α) μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% (σε σχέση με τα επίπεδα του 1990), (β) αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο 20% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης, και (γ) μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 20% μέσω της αύξησης της ενεργειακής απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, μεγάλες μονάδες ΑΠΕ έχουν ήδη κατασκευαστεί και λειτουργούν σε όλη την Ευρώπη, ενώ η ένταξη νέων μικρών και μεγάλων έργων ΑΠΕ βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη και αναμένεται να

ολοκληρωθεί στο άμεσο μέλλον. Το μερίδιο των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ΗΕ) αναμένεται να αυξηθεί σε 30-35% έως το 2020 ^[2].

Η αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο μείγμα παραγωγής αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση για την αποτελεσματική λειτουργία των σύγχρονων αγορών ΗΕ και τη διαχείριση των συστημάτων ΗΕ. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι, σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ΗΕ από ορυκτά καύσιμα (π.χ. λιγνίτη, φυσικό αέριο, πετρέλαιο κ.ά.), όπου η παραγωγή μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί και να ελεγχθεί, η περιορισμένη προβλεψιμότητα και η υψηλή μεταβλητότητα των ΑΠΕ καθιστούν την παραγωγή ΗΕ από ανανεώσιμες πηγές μη ελεγχόμενη (μη κατανεμόμενη) από τον Διαχειριστή του Συστήματος, δυσχεραίνοντας έτσι την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων ΗΕ και, κατ' επέκταση, των αγορών ΗΕ.

Συνεπώς, κρίνεται πλέον επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης και χρήσης μοντέλων πρόβλεψης της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες.

1.2 Η ηλιακή ενέργεια

Μεταξύ των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η *ηλιακή ενέργεια* είναι μια από τις πιο υποσχόμενες και αξιόπιστες ενεργειακές πηγές ^[3] και ίσως η πιο ελκυστική, καθώς αυτή η πηγή ενέργειας είναι άμεσα διαθέσιμη ^[4]. *Ηλιακή ενέργεια* χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο. Η βασικότερη επίδρασή της στη γη είναι η συμβολή της στη διατήρηση της θερμοκρασίας σε σταθερά επίπεδα, ώστε να είναι δυνατή η ύπαρξη ζωής. Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που ευθύνεται για την ύπαρξη πολλών άλλων μορφών ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της ^[5]. Κατά τη διάρκεια ενός έτους, ο ήλιος μπορεί να προμηθεύει τη γη με ενέργεια 15.000 φορές περισσότερη από την ατομική και την ενέργεια καυσίμων που πραγματικά χρειάζεται κατά τη διάρκεια του έτους. Επίσης, σε μία ώρα ο ήλιος ακτινοβολεί στη γη τόση ποσότητα ενέργειας όση χρειάζεται η ανθρωπότητα κατά τη διάρκεια ενός έτους ^[4].

Αυτή η ενεργειακή πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Η εκμετάλλευσή της ηλιακής ενέργειας, χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα *παθητικά ηλιακά συστήματα*, τα *ενεργητικά ηλιακά συστήματα* και τα *ηλιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας* (φωτοβολταϊκά και συγκεντρωτικά συστήματα).



Σχήμα 1.1: Κατηγορίες εφαρμογών ηλιακής ενέργειας

Πιο συγκεκριμένα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Την παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά (άμεση παραγωγή) και παθητικά (έμμεση παραγωγή) συστήματα,
- Την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με φωτοβολταϊκά (άμεση παραγωγή) και συγκεντρωτικά (έμμεση παραγωγή) ηλιακά συστήματα.

1.2.1 Η εξέλιξη της ηλιακής ενέργειας

Η υλοποίηση μεγάλης κλίμακας διασυνδεδεμένου δικτύου φωτοβολταϊκών (φ/β) συστημάτων πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 1980 στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Την περίοδο αυτή εγκαταστάθηκαν αρκετά μεγάλης κλίμακας συστήματα και σημειώθηκε μεγάλη ανάπτυξη του κλάδου. Ωστόσο, στο χρονικό διάστημα που ακολούθησε, παρατηρήθηκε μια δραματική απόσυρση του πλαισίου στήριξης και από το 1991 δεν έγινε καμία καινούρια μεγάλη εγκατάσταση φ/β ^[6].

Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών ήταν εντούτοις ραγδαία από το 1990 έως το 2004. Η εκθετική αύξηση της παγκόσμιας αγοράς προκάλεσε το ενδιαφέρον των επενδυτών και τη δημιουργία θεσμών για την υποστήριξή της. Η Γερμανία για πρώτη φορά ξεπέρασε την Ιαπωνική αγορά το 2004, ενώ η νέα βιομηχανική πολιτική για τα φωτοβολταϊκά από την Κίνα ήταν η ευχάριστη έκπληξη εκείνης της χρονιάς. Η αγορά φ/β αυξήθηκε το 2004 κατά 58,5% και σχεδόν το μισό αυτής της υπέρογκης αύξησης θα πρέπει να αποδοθεί στη Γερμανική αγορά. Η Ευρώπη συνεπώς ανακηρύχθηκε ως η πρώτη δύναμη φωτοβολταϊκών στο κόσμο ^[7].

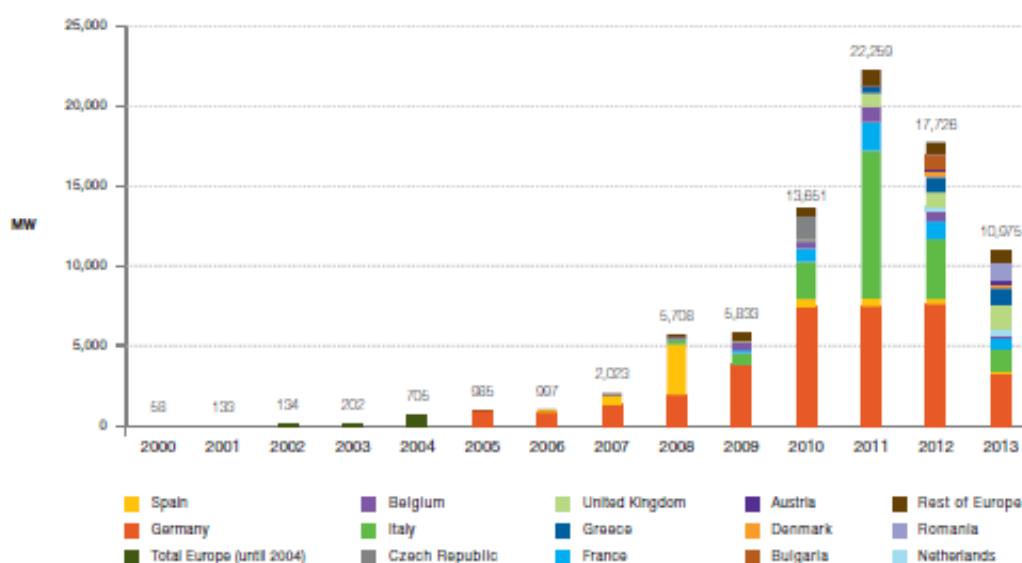
Η αγορά των φωτοβολταϊκών έχει εξελιχθεί κατά την τελευταία δεκαετία σε ένα αξιοπρόσεκτο ποσοστό – ακόμη και κατά τη διάρκεια δύσκολων οικονομικά χρόνων – και είναι στο δρόμο να εξελιχθεί σε κυρίαρχη πηγή ηλεκτρικής παραγωγής σε ολόκληρο τον κόσμο. Το 2013, για τρίτο συνεχόμενο χρόνο, η ενέργεια από φωτοβολταϊκά ήταν μεταξύ των δύο πιο διαδεδομένων εγκατεστημένων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η ηλιακή ενέργεια καλύπτει τώρα το

3% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας και το 6% της μέγιστης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη.

Ύστερα από την αύξηση ρεκόρ το 2011, η παγκόσμια αγορά των φωτοβολταϊκών σταθεροποιήθηκε το 2012 και αυξήθηκε πάλι σημαντικά το 2013.

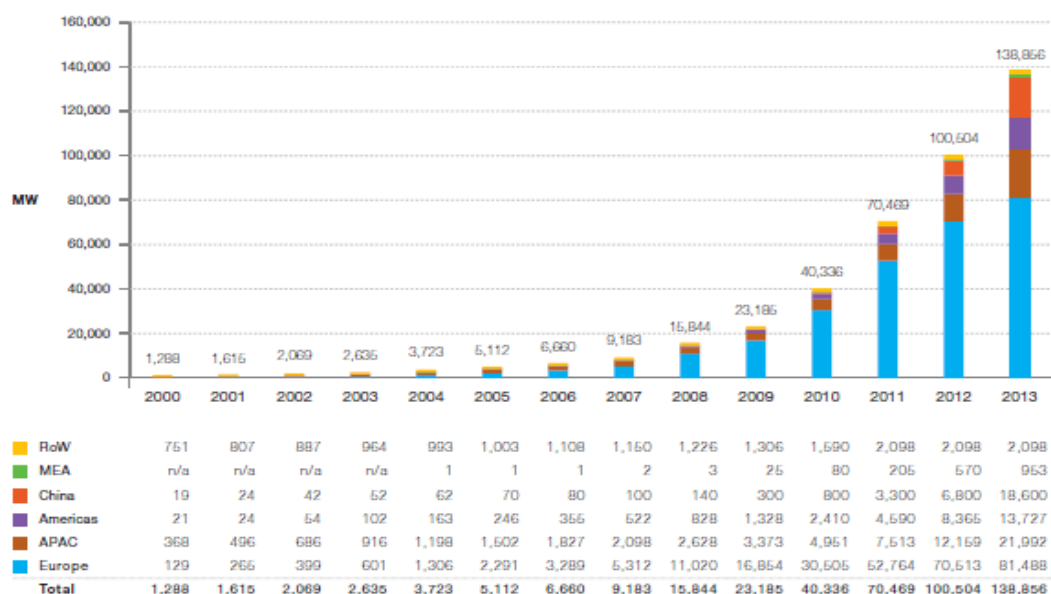
Στα τέλη του 2009 η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ήταν περισσότερη από 23GW. Ένα έτος αργότερα ήταν 40,3GW και στο τέλος του 2011 ήταν 70,5GW. Το 2012 το όριο των 100GW επιτεύχθηκε και μέχρι το 2013 σχεδόν 138,9GW φωτοβολταϊκής ισχύος ήταν συνολικά εγκατεστημένη – ένα ποσό ικανό για τουλάχιστον 160TWh ηλεκτρικής ενέργειας κάθε έτος. Αυτός ο ενεργειακός όγκος είναι επαρκής για να καλύψει τις ετήσιες ανάγκες παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για πάνω από 45 εκατομμύρια ευρωπαϊκά νοικοκυριά. Αυτό είναι επίσης το ισοδύναμο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από 32 μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από άνθρακα. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς θα μπορούσε να έχει φθάσει ακόμα και σε 140GW το 2013 εάν τα πρόσθετα 1,1GW στην Κίνα είχαν ληφθεί υπόψη.

Η Ευρώπη παραμένει η παγκόσμια κυρίαρχη περιοχή σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ με 81,5GW από το 2013. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 59% της παγκόσμιας συνολικά εγκατεστημένης φ/β ισχύος, αντίστοιχα κάτω από το 70% το 2012 και περίπου το 75% της παγκόσμιας ικανότητας το 2011. Η ανάγκη να αποφευχθούν τα αμετάκλητα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης να δεσμευτούν στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε 80-95% κάτω από τα επίπεδα του 1990 ως το 2050. Αυτό υπονοεί σχεδόν πλήρη απεξάρτηση από τον άνθρακα στο τομέα της ενέργειας μέχρι τα μέσα του αιώνα. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα έχει σημαντικές συνέπειες για ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα της ηπείρου. Η ανά έτος εγκατεστημένη ισχύς για κάθε χώρα της Ευρώπης παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 1.2: Εξέλιξη νέων ευρωπαϊκών συνδέσεων Φ/Β στο δίκτυο 2000 – 2013

Οι Ειρηνικο-Ασιατικές χώρες αναπτύσσονται γρήγορα, με 40,6GW εγκατεστημένα αυτή τη στιγμή και έπεται η Αμερική (13,7GW). Στο ακόλουθο διάγραμμα δίνεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά ήπειρο.



RoW: Rest of the World, MEA: Middle East and Africa, APAC: Asia Pacific.
Methodology used for RoW data collection has changed in 2012.

Σχήμα 1.3: Εξέλιξη παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β 2000 – 2013

Πολλές από τις αγορές εκτός της Ε.Ε. – συγκεκριμένα οι ΗΠΑ ή η Ινδία – έχουν εκμεταλλευτεί μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της τεράστιας δυνατοτήτάς τους. Το 2013 οι ασιατικές χώρες πήραν το προβάδισμα και άρχισαν να αναπτύσσονται γρηγορότερα από τις παραδοσιακές ευρωπαϊκές αγορές. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς εκτός Ευρώπης διπλασιάστηκε σχεδόν από 30GW το 2012 κοντά σε 60GW το 2013, καταδεικνύοντας την τρέχουσα εξισορρόπηση μεταξύ της Ευρώπης και του υπόλοιπου κόσμου και περισσότερο την απεικόνιση των σχεδίων στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνολικά, το μέλλον της ευρωπαϊκής αγοράς είναι αβέβαιο για τα ερχόμενα έτη. Η ισχυρή ανάπτυξη της ευρωπαϊκής αγοράς φ/β έως το 2012 ήταν αποτέλεσμα μερικών χωρών που χρόνο με το χρόνο κατάφεραν να αυξάνουν την εγκατεστημένη ισχύ τους, με τους Γερμανούς να παρουσιάζουν μια σταθερή δέσμευση για την υποστήριξη της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών. Μετά από την ισπανική έκρηξη το 2008, μόνο η Γερμανία ήταν η κύρια αγορά το 2009, και συνεπώς η ευρωπαϊκή αύξηση συνολικά ήταν περιορισμένη. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως συνέπεια της πρώτης φάσης της οικονομικής κρίσης αλλά και ως ένα έτος σταθεροποίησης μετά την έκρηξη του 2008. Σημαντική αύξηση επέστρεψε το 2010, με τη Γερμανία να επιτυγχάνει τους πρωτοφανείς αριθμούς εγκαταστάσεων, και την Ιταλία και την Τσεχία να προσθέτουν μαζί κοντά στα 3,8GW των φ/β συστημάτων. Το 2012, έτος ρεκόρ για τη Γερμανία, επέτρεψε στην ευρωπαϊκή αγορά να διατηρήσει ένα λογικό επίπεδο εγκατεστημένης ισχύος της τάξης των 17,7GW, με 11,4GW προερχόμενα

από τη Γερμανία και την Ιταλία μόνο. Εκτός από αυτές τις δύο, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ελλάδα, η Βουλγαρία και το Βέλγιο παρείχαν ένα μεγάλο μέρος της ανάπτυξης της ευρωπαϊκής αγοράς. Το 2013, η πτώση της Γερμανίας και της Ιταλίας ως κύριοι οδηγοί της ευρωπαϊκής αγοράς επιβεβαιώθηκε. Ενώ το ποσό της αγοράς σε άλλες χώρες παρέμεινε περίπου 6GW, η πτώση στις εγκαταστάσεις στη Γερμανία και την Ιταλία μείωσε τη συνολική ευρωπαϊκή αγορά σε σχεδόν 11GW. Το 2013, η πτώση των αγορών που απέδωσε καλά τα τελευταία χρόνια, όπως το Βέλγιο ή η Γαλλία, αντισταθμίστηκε από την ανάπτυξη στην Ελλάδα και τη Ρουμανία.

Έκθεση της EPIA με τίτλο "Connecting the Sun: Solar photovoltaics on the road to large-scale grid integration" ^[7], που δημοσιεύτηκε το 2012, προσδιορίζει διάφορα πιθανά σενάρια επέκτασης των φωτοβολταϊκών έως το 2020 και το 2030 που αντιπροσωπεύουν τη δυνατότητα της τεχνολογίας σύμφωνα με το τρέχον οικονομικό και ρυθμιστικό περιβάλλον.

- Το **σενάριο βασικών γραμμών** προβλέπει ένα μερίδιο 4% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε. να παρέχεται από φωτοβολταϊκά το 2020. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου 130GW της εγκατεστημένης ικανότητας μέχρι το 2020. Το 2030, η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει μέχρι και το 10% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το **επιταχυνόμενο σενάριο** προβλέπει την ηλιακή ενέργεια να ικανοποιεί το 8% της ζήτησης, που αντιπροσωπεύει περίπου 200GW της εγκατεστημένης ικανότητας μέχρι το 2020. Το 2030, θα μπορούσε να στοχεύσει και στο 15% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με έρευνα της EPIA προέκυψαν τα ακόλουθα σημαντικά συμπεράσματα για το 2013:

- Τουλάχιστον 38,4GW φ/β συστημάτων εγκαταστάθηκαν συνολικά το 2013, πάνω από 30GW το 2012. Τα φωτοβολταϊκά παραμένουν, μετά από τα υδροηλεκτρικά και τις ανεμογεννήτριες, η τρίτη σημαντικότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας από την άποψη της εγκατεστημένης ισχύος.
- Σχεδόν 11GW φ/β ισχύος συνδέθηκαν στο δίκτυο της Ευρώπης το 2013, σε σύγκριση με τα 17,7GW το 2012 και τα περισσότερα από 22,4GW το 2011.
- Για πρώτη φορά από το 2003 η Ευρώπη έχασε την ηγεσία από την Ασία, όσον αφορά στο τομέα των νέων εγκαταστάσεων.
- Η Κίνα ήταν η κορυφαία αγορά το 2013 με 11,8GW, εκ των οποίων τα 500MW αντιπροσωπεύουν το μη-συνδεδεμένο σύστημα. Οι στατιστικές που δημοσιεύτηκαν το Μάιο του 2014 αναφέρουν ότι έχει τη δυνατότητα να εγκαταστήσει πρόσθετα 1,1GW πάνω από τα 11,8GW που υπολογίζονται από την EPIA. Δεδομένου ότι είναι αβέβαιο εάν αυτές οι εγκαταστάσεις συνδέθηκαν με το δίκτυο, η EPIA δεν τις έλαβε υπόψη. Η Κίνα ακολουθήθηκε από την Ιαπωνία με 6,9GW και τις ΗΠΑ με 4,8GW.
- Η Γερμανία ήταν η κορυφαία ευρωπαϊκή αγορά με 3,3GW. Διάφορες άλλες ευρωπαϊκές αγορές υπερέβησαν το όριο του ενός GW: το Ηνωμένο Βασίλειο (1,5GW), η Ιταλία (1,4GW), η Ρουμανία (1,1GW) και η Ελλάδα (1,04GW).

- Διάφορες ευρωπαϊκές αγορές που απέδωσαν καλά στο παρελθόν παρουσίασαν πτώση το 2013, σαν συνέπεια των πολιτικών αποφάσεων να μειωθούν τα κίνητρα για τα φωτοβολταϊκά. Οι βελγικές εγκαταστάσεις πήγαν από 600MW σε 215MW, στη Γαλλία πήγαν από 1.115MW σε 613MW, και στη Δανία πήγαν από 300MW σε περίπου 200MW.
- Εκτός από τη σημαντική πτώση στη Γερμανία και την Ιταλία, το μέγεθος της υπόλοιπης ευρωπαϊκής αγοράς φωτοβολταϊκών ήταν σταθερό, με περίπου 6GW το χρόνο τα τελευταία τρία χρόνια.
- Εκτός Ευρώπης, διάφορες αγορές συνέχισαν να αυξάνονται με ένα λογικό ρυθμό: η Ινδία με 1.115MW, η Κορέα με 442MW, η Ταϊλάνδη με 317MW, ο Καναδάς με 444MW και πολλοί άλλοι.

1.2.2 Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, στην προσπάθειά της να ηγηθεί της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής και να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια, έχει θέσει δεσμευτικούς στόχους για τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μέχρι το 2020. Αυτό σημαίνει ότι και η Ελλάδα είναι υποχρεωμένη να αναδιαρθρώσει την υφιστάμενη προέλευση των ενεργειακών της πηγών και να εφαρμόσει πολιτικές που θα παρέχουν κίνητρα για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων τεχνολογιών, που σημειωτέον υπάρχουν σε αφθονία στον Ελλαδικό χώρο.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται ότι είναι από τις τεχνολογίες εκείνες που θα συμβάλλουν καθοριστικά στην επίτευξη των στόχων που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για τη χώρα μας. Εντούτοις δεν έχουν την ίδια εμπορική απήχηση με αυτή των άλλων μορφών ενέργειας, συμβατικών και ανανεώσιμων. Επίσης, το σχετικά χαμηλό επίπεδο των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα εμποδίζει την εξάπλωσή τους, μεγεθύνοντας το πρόβλημα. Αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία στη χώρα μας είναι 30% υψηλότερη από ότι στις άλλες ευρωπαϊκές χώρες, γίνεται κατανοητή η ανάγκη να δοθούν κίνητρα για την εγκατάσταση των φ/β συστημάτων.

Μέχρι το 2006 υπήρχε μια νομοθετική αδυναμία σε ό,τι αφορούσε τις ΑΠΕ γενικότερα, αλλά και τη διάδοση των φωτοβολταϊκών ειδικότερα. Ο νόμος όμως 3468/2006 (ΦΕΚ 129/27.6.2006) που ψηφίστηκε τον Ιούνιο του 2006 άλλαξε το μέχρι τότε σκηνικό, με την παράγραφο 14 να αναφέρεται στα φωτοβολταϊκά. Με το νέο νόμο προβλέπεται "φωτοβολταϊκό" πρόγραμμα για την εισαγωγή των φ/β συστημάτων στην Ελλάδα, το οποίο θα έχει ισχύ μέχρι το τέλος του 2019. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς που προβλέπεται είναι τουλάχιστον 500MWp στο διασυνδεδεμένο δίκτυο και τουλάχιστον 200MWp για τα αυτόνομα συστήματα στις νησιωτικές περιοχές.

Η Ελλάδα όχι μόνο έχει εξαιρετικά υψηλό δυναμικό σε ηλιακή ενέργεια (από τα υψηλότερα στην Ευρώπη), αλλά χρειάζεται και τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, καθώς ειδικά στα νησιά οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται ως επί το πλείστον από

μονάδες πετρελαίου με αποτέλεσμα την οικονομική αλλά και περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ειδικά τα τελευταία χρόνια η αγορά των φωτοβολταϊκών έχει επεκταθεί γρήγορα, σε αντίθεση με τα αρχικά αδύναμα βήματά της.

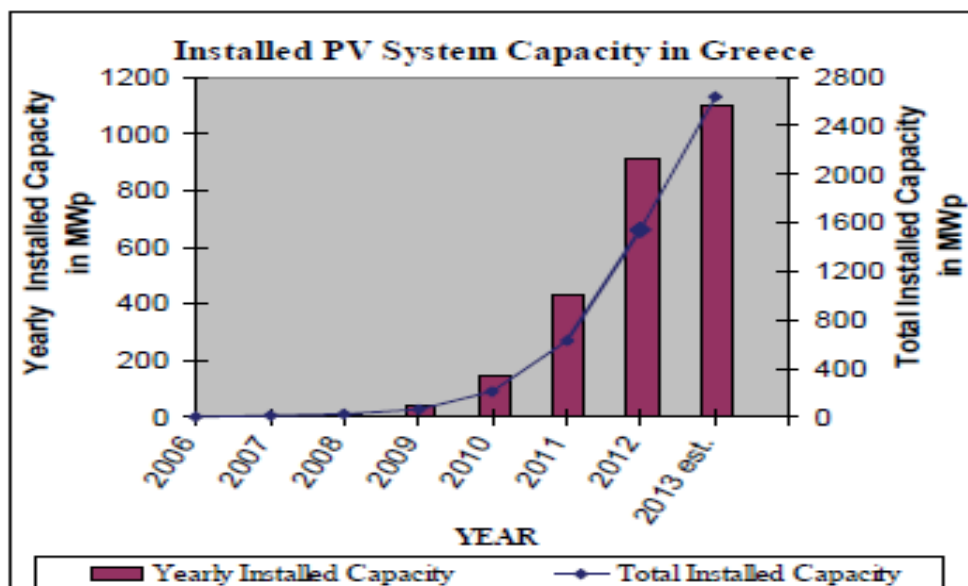
Τα εγκατεστημένα φ/β συστήματα στην Ελλάδα μέχρι το 2006 ήταν κυρίως ιδιόκτητα αυτόνομα συστήματα σε θέσεις όπου δεν υπήρχε κανένα διασυνδεδεμένο δίκτυο. Η αγορά των συνδεδεμένων δικτύων, εκτός από λίγα πειραματικά προγράμματα, ήταν σχετικά μικρή έως το 2006. Αν και υπήρξε ένα νομικό πλαίσιο για την αγορά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το 1994, η έλλειψη ενός σημαντικού μακροχρόνιου σχεδίου υποστήριξης, η συμμετοχή πολλών δημόσιων υπηρεσιών προκειμένου να παραληφθεί ένας μεγάλος αριθμός αδειών και η έλλειψη συγκεκριμένων κανονισμών για τους φορείς αγοράς έχει παρακωλύσει τη μεγαλύτερη εισαγωγή των φ/β συστημάτων. Η ετήσια εγκατεστημένη ικανότητα των φ/β συστημάτων στην Ελλάδα πριν από το νέο νόμο, αποκλείοντας τα προγράμματα επίδειξης και τα ερευνητικά προγράμματα, δεν υπερέβη τα 200 έως 300kWp.

Το 2007, η εγκατεστημένη ικανότητα φ/β συστημάτων αυξήθηκε κατά 2,3MWp, τα μισά από τα οποία προέρχονται από τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα λόγω του νόμου 3468/2006. Για τα έτη 2008 και 2009 μια πρόσθετη εγκατεστημένη και συνδεδεμένη ικανότητα 12MWp και 36,5MWp αντίστοιχα εισήχθη, κυρίως στα διασυνδεδεμένα δίκτυα φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στα έτη 2010 και 2011 και ενώ ο σχετικός νόμος και τα αντίστοιχα κίνητρα είναι ενεργά εδώ και 5 έτη, πραγματοποιείται η πρώτη σοβαρή διείσδυση των διασυνδεδεμένων δικτύων φ/β συστημάτων. Η νέα ικανότητα του διασυνδεδεμένου δικτύου για το 2010 ήταν 150MWp και για το έτος 2011 ήταν 400MWp ¹⁸¹.

Το 2012, λόγω της βαθμιαίας ωριμότητας πολλών προγραμμάτων γύρω από τα φωτοβολταϊκά, των ελκυστικών δασμολογίων τροφοδότησης και παρά την οικονομική κατάσταση, η ετήσια ικανότητα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων έχει φθάσει στην αιχμή της, 912MWp, ενώ για το έτος 2013 με την υπάρχουσα ορμή και τις ελκυστικές συμβάσεις αναμενόταν να ξεπεράσει τα 1000MWp. Όπως αναφέρεται από την HELAPCO, την ελληνική ένωση των φωτοβολταϊκών επιχειρήσεων, η Ελλάδα βρίσκεται 5^η στον κόσμο σε σχέση με την κατά κεφαλήν εγκατεστημένη ικανότητα φωτοβολταϊκών, που φθάνει σε 144W/κάτοικο στο τέλος του 2012. Στο μεταξύ 4,5 δισεκατομμύρια ευρώ επενδύθηκαν στα συστήματα φ/β στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια των τελευταίων 5 ετών. Αυτό είναι 35% υψηλότερο από το συνολικό ποσό που επενδύεται σε όλες τις άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών. Το 2012, τα φωτοβολταϊκά κάλυψαν το 3% της ηλεκτρικής ενεργειακής ζήτησης στην Ελλάδα, ενώ το 2013 το ηλιακό μερίδιο αναμένεται να φθάσει στο 6%.

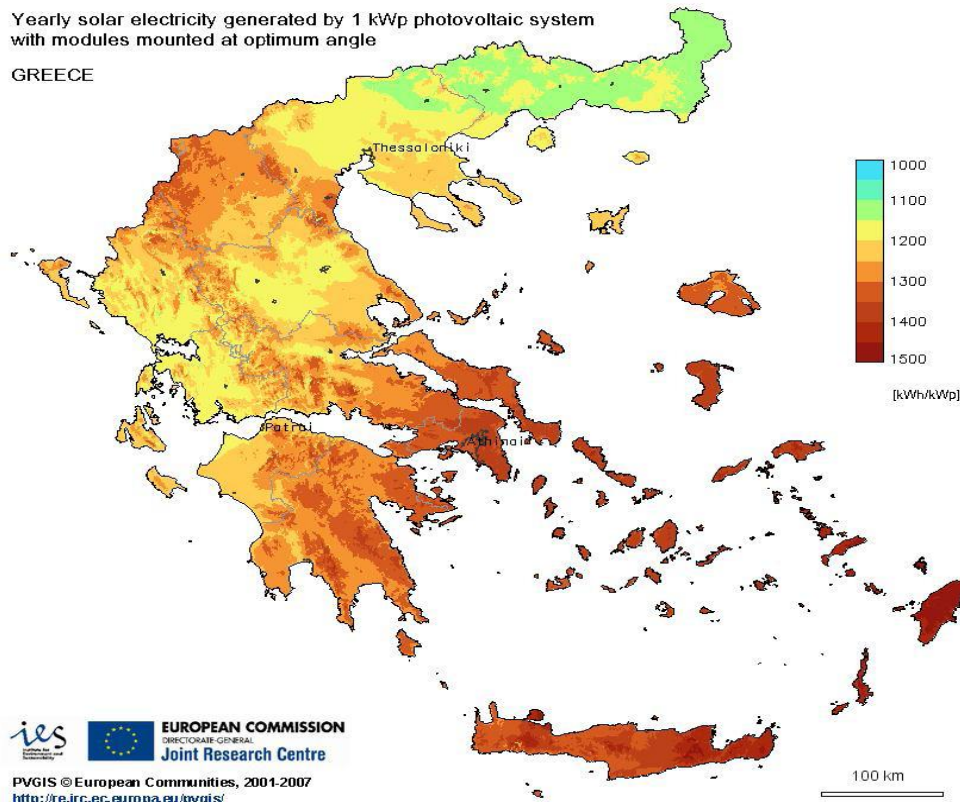
Τα ελκυστικά δασμολόγια και οι δραματικές μειώσεις των δαπανών των φωτοβολταϊκών συστημάτων από το 2011 έχουν οδηγήσει σε μια έκρηξη, την οποία η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να στηρίξει άλλο. Διαπιστώνεται ότι η συνολική ενεργειακή ικανότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, για τα οποία οι συμβάσεις έχουν υπογραφεί, υπερβαίνει το όριο της προγραμματισμένης ικανότητας για το έτος 2014, ενώ ξεπερνά ακόμη και το στόχο για το 2020, δεδομένου ότι έχουν τεθεί από την πολιτεία τα όρια 1.500MW και 2.200MW αντίστοιχα, σύμφωνα με το

εθνικό πρόγραμμα δράσης ανανεώσιμης ενέργειας (NREAP). Η πολιτεία πρέπει να ενημερώσει τους στόχους της και να λάβει τα κατάλληλα μέτρα, έτσι ώστε ο τομέας της αγοράς των φωτοβολταϊκών να συνεχίσει τις δραστηριότητές του. Μία από τις ενέργειες, σύμφωνα με την HELAPCO, είναι ο επαναπροσδιορισμός του στόχου του 2020 της χώρας και η εφαρμογή του προγράμματος Helios, το οποίο στοχεύει στην εγκατάσταση στο δημόσιο έδαφος μέχρι 10GWp και την εξαγωγή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα κράτη μέλη της Ε.Ε., με όφελος τη μείωση του δημόσιου χρέους.



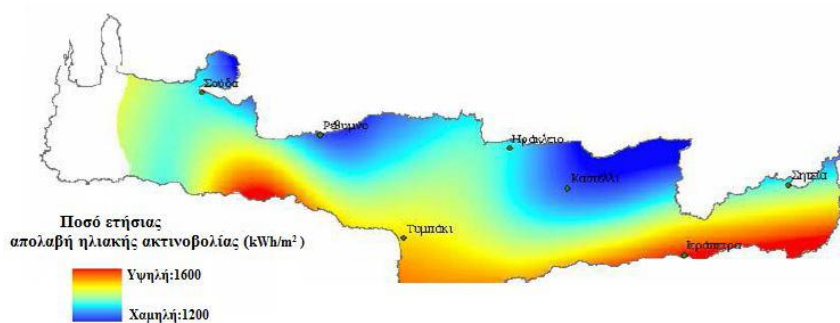
Σχήμα 1.4: Ιστορικά στοιχεία αγοράς Φ/Β, ετήσια και συσσωρευτική εισαγωγή των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα (εκτίμηση CRES για το 2013)

Η Ελλάδα, λόγω της ευνοϊκής γεωγραφικής της θέσης, παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου $1.400 \div 1.800 \text{ kWh/m}^2$ ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 1.5: Το ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα

Αντίστοιχα, το ηλιακό δυναμικό της Κρήτης παρουσιάζεται εξαιρετικά πλούσιο, λόγω της δεδομένης γεωγραφικής θέσης του νησιού. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μια σχηματική άποψη της Κρήτης με τις περιοχές που συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας (σε kWh/m²) [9],[10].



Σχήμα 1.6: Το ηλιακό δυναμικό στην Κρήτη

1.3 Η αιολική ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση των πνεόντων ανέμων. Οι άνεμοι, δηλαδή οι μεγάλες μάζες αέρα που μετακινούνται με ταχύτητα από μία περιοχή σε κάποια άλλη, οφείλονται στην ανομοιόμορφη

θέρμανση της επιφάνειας της Γης από την ηλιακή ακτινοβολία ^[11]. Αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας οφείλονται κυρίως σε δύο παράγοντες. Αφενός, έχει σημασία η διαφορά του γεωγραφικού πλάτους, η οποία συνεπάγεται θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ισημερινού και των πόλων και προκαλεί ανέμους με σχετική σταθερότητα (εποχικοί άνεμοι με μεγάλη περίοδο μεταβολής). Αφετέρου, η διαφορετική μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους (π.χ. θάλασσα, ξηρά) είναι εξίσου σημαντική, δεδομένου ότι διαφέρει η ικανότητα απορρόφησης θερμότητας (δημιουργία ανέμων με μικρές χρονικές διάρκειες) ^[12].

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι τα αντίστοιχα διάφορα τμήματα της ατμόσφαιρας να θερμαίνονται διαφορετικά κατά τόπους, οπότε τα θερμά ρεύματα αέρα ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα, μειώνοντας την ατμοσφαιρική πίεση, και αντικαθίστανται από ψυχρότερα. Η κυκλοφορία του ανέμου θα μπορούσαμε να πούμε ότι συμβάλλει άμεσα στη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια της γης ^[13].

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανέμων ξεκινάει από την αρχαιότητα σε μεγάλο εύρος εργασιών. Για πολλές εκατοντάδες χρόνια η κίνηση των πλοίων στηριζόταν στη δύναμη του ανέμου, ενώ η χρήση του ανεμόμυλου ως κινητήριας μηχανής εγκαταλείπεται μόλις στα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα μια άλλη εξέχουσα εφεύρεση, η αντλία αέρα, διαδόθηκε στην Αμερική και στην Αυστραλία, για την άντληση νερού από βαθιές γεωτρήσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες, η αιολική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εν γένει σημειώνουν αλματώδη ανάπτυξη, μέσω και της χρήσης ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρισμού, κάτι που ενισχύεται και από την επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος. Γίνεται πλέον συνείδηση σε όλο και περισσότερο κόσμο πως ο άνεμος είναι μια καθαρή ανεξάντλητη πηγή ενέργειας ^[11].

Πράγματι, η αιολική ενέργεια θεωρείται ήπια μορφή ενέργειας και συγκαταλέγεται στις «καθαρές» πηγές, αφού δεν προκαλεί ούτε εκπέμπει ρύπους. Αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και είναι μια σχετικά νέα μορφή ενέργειας. Θεωρείται ως η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη τεχνολογία στο πεδίο των εναλλακτικών μορφών ενέργειας και σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, είναι σχετικά φθηνή.

Αν υπήρχε η τεχνολογική δυνατότητα να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο χρονικό διάστημα. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης και σε ύψος 10m πάνω από το έδαφος επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας που ξεπερνά τα 5,1m/sec. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά αυτήν την τιμή, το αιολικό δυναμικό ενός τόπου θεωρείται ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες. Άλλωστε, το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητάς της, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας ^[11].

1.3.1 Η εξέλιξη της παραγωγής αιολικής ισχύος

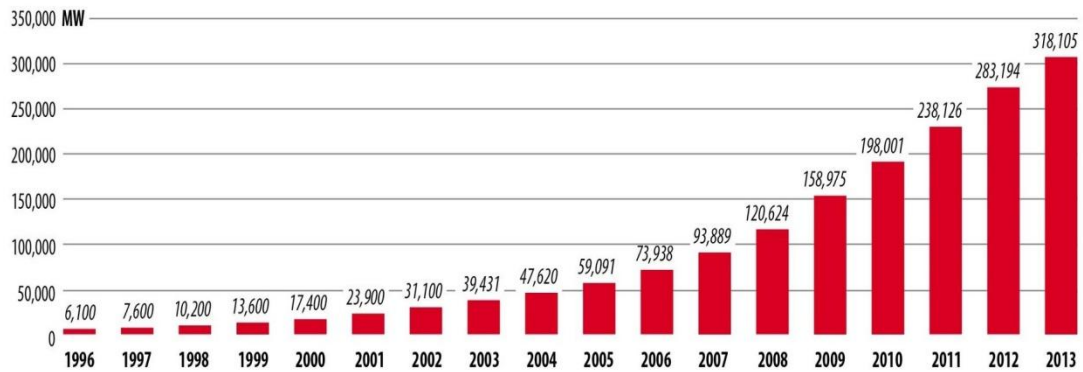
Κατά τη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα, πρώτοι οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο, ενώ στην Αμερική ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται επίσης για ηλεκτροδότηση. Με εξαίρεση όμως την εμφάνιση ανά τον κόσμο μερικών αντίστοιχων τύπων ανεμογεννητριών ποικίλων χρήσεων, δεν παρατηρήθηκε κάποια ιδιαίτερη ανάπτυξη στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Ειδικά μετά τον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο, πολλοί περίμεναν ότι η αιολική ενέργεια θα συνέβαλλε σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, ο οποίος χρησιμοποιούταν ήδη ευρύτατα στην ικανοποίηση των αναγκών του ανθρώπου, λόγω των γνωστών του πλεονεκτημάτων. Ωστόσο, οι προσπάθειες ανάπτυξης ανεμογεννητριών ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970.

Οι προσπάθειες αυτές ξανάρχισαν πιο έντονες μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση (1973) και στηρίχθηκαν κατά μεγάλο μέρος στην σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία. Έτσι, αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών (Α/Γ) και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 διατίθονταν στο εμπόριο συγκροτήματα μικρής ισχύος (μέχρι 20-25kW), ενώ είχαν κατασκευαστεί και Α/Γ μεγαλύτερης ισχύος (3-4MW). Άλλωστε, η τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται σε τέτοιο βαθμό που να μπορεί να υποστηρίξει ηλεκτροπαραγωγή σε υψηλή κλίμακα.

Εξαιτίας των ευνοϊκών ρυθμιστικών πλαισίων, η αιολική ενέργεια γνώρισε μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς το 1992 ήταν 2,5GW και αυξήθηκε σε περίπου 40GW στο τέλος του 2003. Στην Ευρώπη αντίστοιχα, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν 844MW το 1992 και 28,44GW το 2003, αριθμοί που αντιστοιχούσαν στο 36% και 72% της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος.

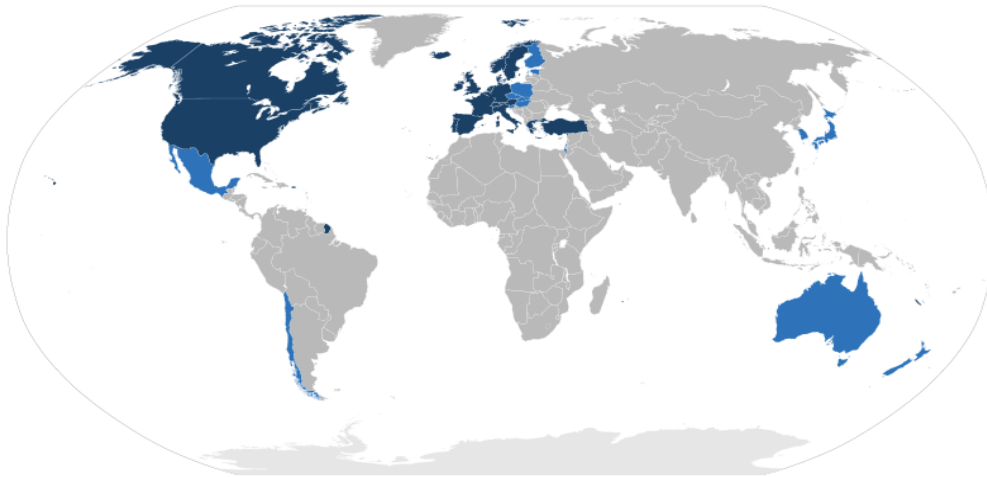
Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του Παγκόσμιου Συμβουλίου Αιολικής Ενέργειας (Global Wind Energy Council – GWEC), μέχρι το 2013 ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως την τελευταία δεκαετία ήταν περίπου 21%, με 318.105MW εγκατεστημένη ισχύ στο τέλος του έτους. Μόνο κατά το 2013, συνδέθηκαν στο παγκόσμιο δίκτυο νέες εγκαταστάσεις αιολικής ισχύος της τάξεως των 35GW· εν τούτοις, η τιμή αυτή υπέστη σημαντική πτώση σε σχέση με τα 45GW του 2012. Τα παραπάνω στοιχεία απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως μέχρι το 2013 ^[14].

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 1996-2013



Σχήμα 1.7: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2013 ^[14]

Η Κίνα, η μεγαλύτερη εν γένει αγορά αιολικής ενέργειας από το 2009, βρέθηκε στην 1^η θέση νέων αιολικών εγκαταστάσεων και για το 2013, με την Ευρώπη και την Β. Αμερική να ακολουθούν στη 2^η και 3^η θέση αντίστοιχα. Αποτέλεσμα αυτού ήταν το 2013, σε αντίθεση με το 2012, η πλειοψηφία των εγκαταστάσεων αυτών να δημιουργηθούν εκτός των χωρών που συναποτελούν τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD). Το ίδιο ίσχυσε και για τις χρονιές 2010 και 2011, ενώ αντίστοιχη κατάσταση προβλέπεται και για το εγγύς μέλλον.

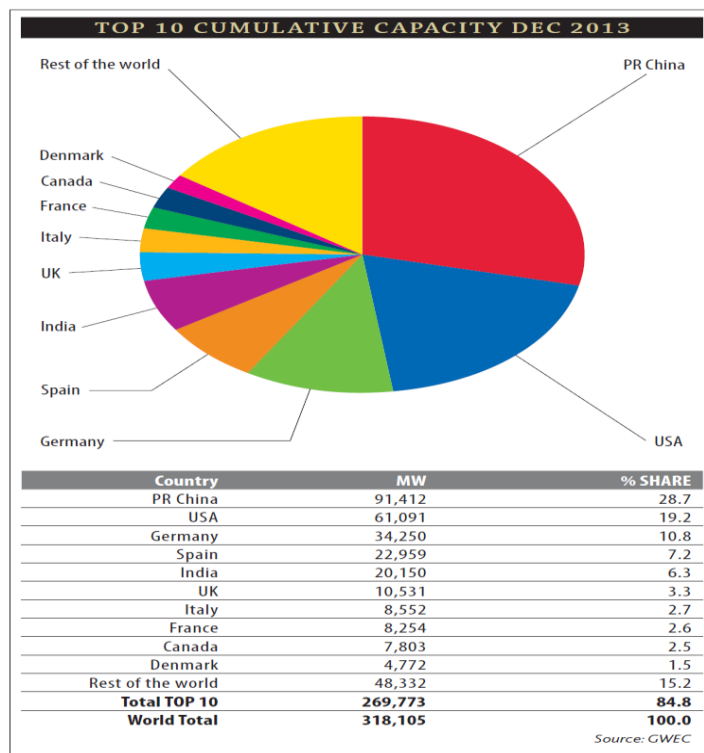


- Founding member states
- Other member states

Σχήμα 1.8: Χάρτης χωρών – μελών του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD)

Με το πέρας του τελευταίου χρόνου, ο αριθμός των χωρών με συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύ που υπερβαίνει τα 1000MW ανήλθε σε 24: περιλαμβάνονται 16 στον Ευρωπαϊκό χώρο, 4 στην Ασία (Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία, Αυστραλία), 3 στη Βόρειο Αμερική (ΗΠΑ, Καναδάς, Μεξικό) και 1 στη Λατινική Αμερική (Βραζιλία). Από τις παραπάνω, μόνο 6 χώρες διέθεταν εγκατεστημένη ισχύ

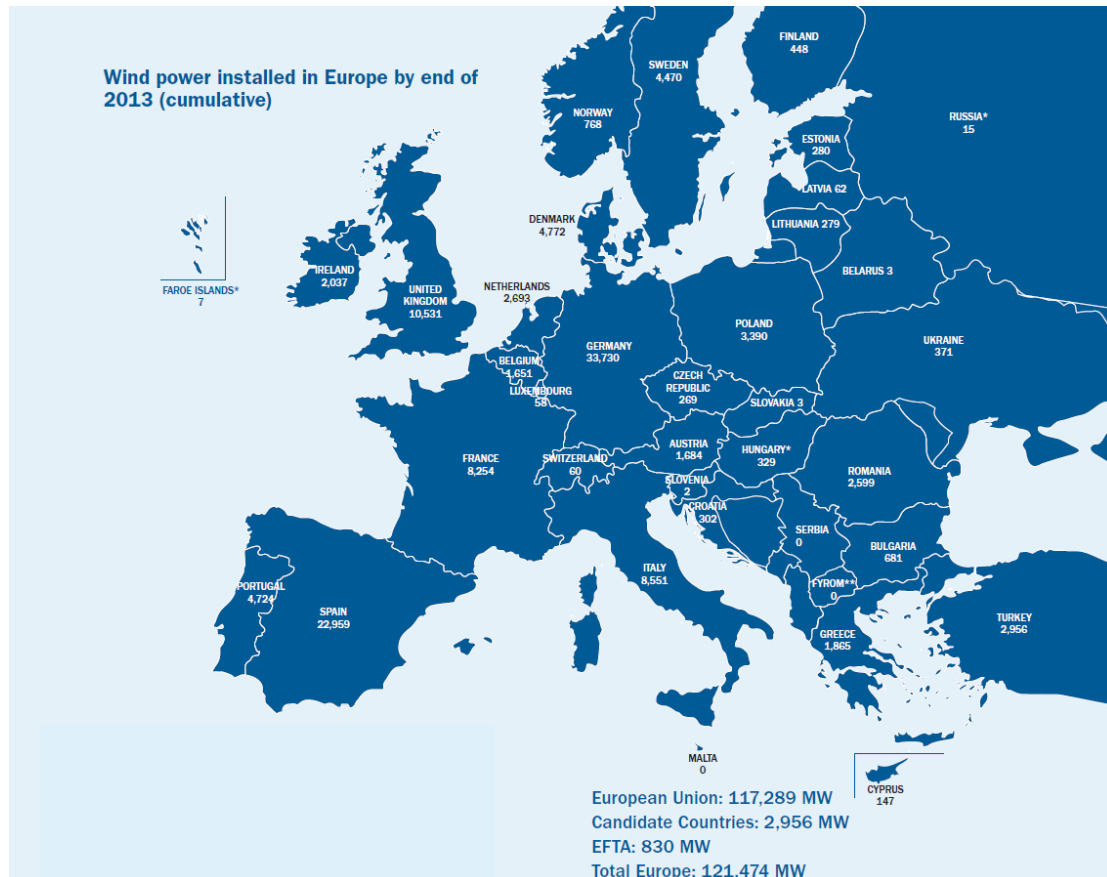
πάνω από 10.000MW στο τέλος του 2013: Κίνα (91.412MW), ΗΠΑ (61.091MW), Γερμανία (34.250MW), Ισπανία (22.959MW), Ινδία (20.150MW) και Ηνωμένο Βασίλειο (10.531MW). Το παρακάτω σχήμα επαληθεύει τα προαναφερθέντα στατιστικά ^[14].



Σχήμα 1.9: Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς των 10 κορυφαίων χωρών στο τέλος του 2013 ^[14]

Όσον αφορά το χώρο της Ευρώπης και συγκεκριμένα την Ευρωπαϊκή Ένωση, προκύπτουν κάποια ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία που προέρχονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (The European Wind Energy Association – EWEA). Ειδικότερα, αυτή τη στιγμή στην Ε.Ε. υπάρχουν συνολικά εγκατεστημένα 117,3GW αιολικής ισχύος, από τα οποία τα 110,7GW παράγονται σε ηπειρωτικές περιοχές και τα υπόλοιπα 6,6GW στη θάλασσα. Αυτό το σύνολο οδήγησε σε μια αύξηση της τάξης του 10% στην ολική αιολική ισχύ της Ε.Ε., σε σχέση με το 2012. Οι νέες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας που δημιουργούνται κάθε χρόνο έχουν αυξηθεί τα τελευταία 13 χρόνια, από 3,2GW το 2000 σε 11,2GW το 2013, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 10%. Σημειώνεται επίσης ότι η αιολική ενέργεια αποτέλεσε την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε σε μεγαλύτερο ποσοστό στις νέες ενεργειακές εγκαταστάσεις της Ευρώπης για το 2013 (32%) ^[15].

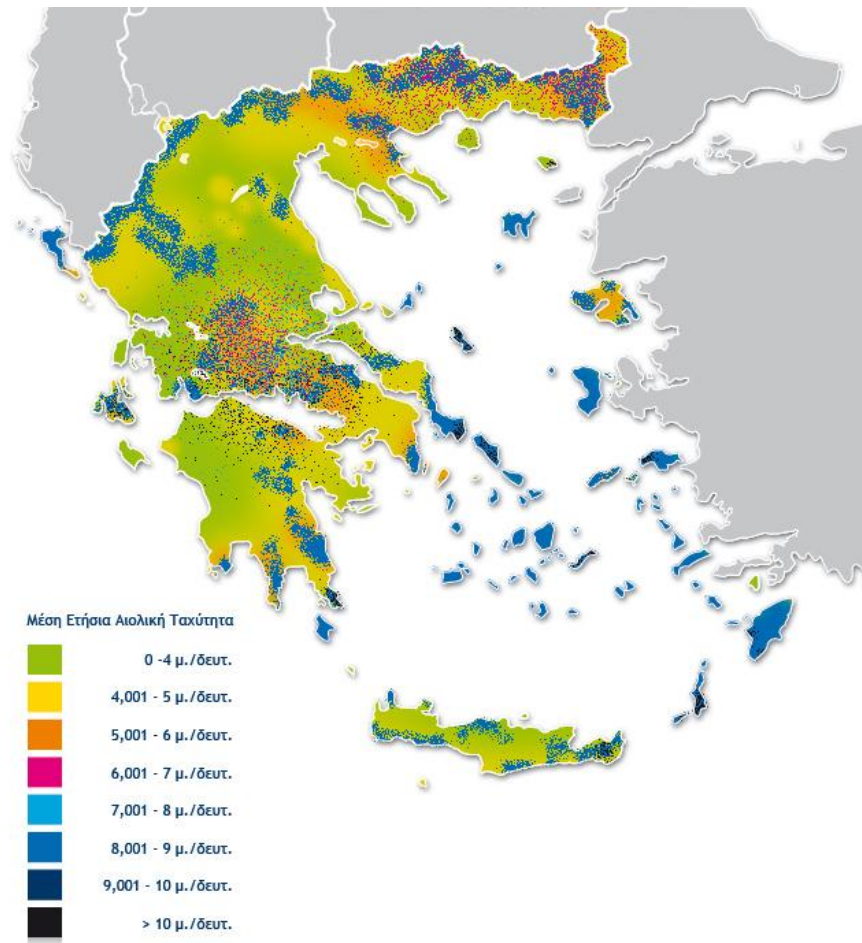
Ως προς τα επιμέρους κράτη, η Γερμανία παραμένει η χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ, ακολουθούμενη από την Ισπανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Ιταλία. Μεταξύ των χωρών – μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 15 έχουν εγκατεστημένη ισχύ άνω του 1GW μέχρι το 2013, ενώ 8 από αυτές ξεπερνούν συνολικά τα 4GW. Περισσότερες λεπτομέρειες και στοιχεία για κάθε χώρα εμφανίζονται στο εξής σχήμα.



Σχήμα 1.10: Η συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στις χώρες της Ε.Ε. κατά το τέλος του 2013 [15]

1.3.2 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

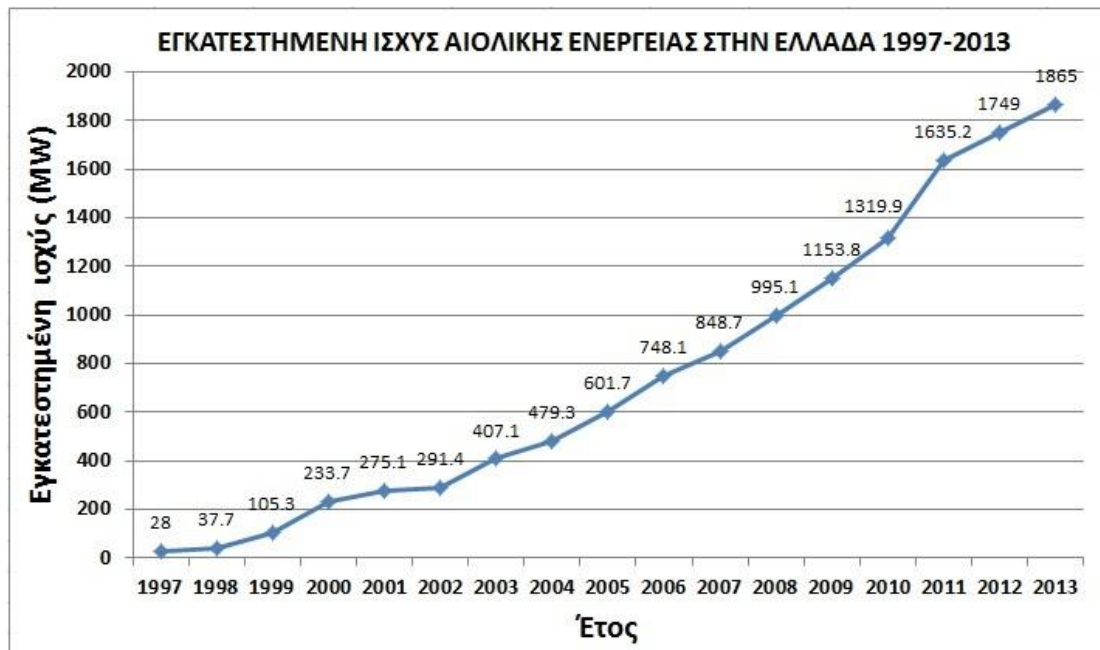
Η αιολική ενέργεια πρωταγωνιστεί στην ανάπτυξη των ΑΠΕ και παρουσιάζει σημαντικές επενδυτικές δυνατότητες στην Ελλάδα. Το εξαιρετικά υψηλό αιολικό δυναμικό της χώρας κατατάσσεται μεταξύ των πλέον ελκυστικών στην Ευρώπη, με απόδοση πάνω από 8 μέτρα/δευτερόλεπτο ή/και 2.500 ώρες παραγωγής αιολικής ενέργειας, σε πολλά σημεία της χώρας. Σε αυτό συμβάλλουν η μεγάλη ακτογραμμή και η ύπαρξη πολυπληθών νησιών, με αποτέλεσμα τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν κυρίως στις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές.



Σχήμα 1.11: Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας ^[11]

Το πρώτο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το 1982 στην Κύθνο. Μέχρι σήμερα έχουν κατασκευασθεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Σάμο και στην Κρήτη εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής πάνω από 30MW. Ως ιδιαίτερα σημαντικό θεωρείται το αυξημένο ενδιαφέρον του ιδιωτικού τομέα στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ειδικά σε περιοχές υψηλού αιολικού δυναμικού (Νησιά Αιγαίου, Νότια Εύβοια, Ανατολική Πελοπόννησος, Θράκη). Ωστόσο, σημαντικό εμπόδιο στην ακόμη μεγαλύτερη ανάπτυξη αποτελεί η ανεπάρκεια της υποδομής του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο κατασκευάστηκε πολύ πριν αναδυθεί η ανανεώσιμη ενέργεια ως βιώσιμη εναλλακτική λύση. Έτσι, στις ηπειρωτικές περιοχές υψηλού φυσικού δυναμικού, οι δυνατότητες επενδύσεων αιολικής ενέργειας έχουν περιοριστεί από τις δυνατότητες διείσδυσης στο ηλεκτρικό δίκτυο και παρόμοιοι περιορισμοί υφίστανται και στα νησιά, εμποδίζοντας την περαιτέρω διείσδυση της συγκεκριμένης ΑΠΕ ^[16].

Επιπλέον, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα αντιμετωπίζει προβλήματα, τα οποία έχουν ενταθεί λόγω της παγκόσμιας και εγχώριας οικονομικής κρίσης. Παρά τη σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τα προηγούμενα χρόνια, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, είναι κοινά αποδεκτό ότι αυτή η αύξηση είναι πολύ μικρή δεδομένου του πλούσιου αιολικού δυναμικού της χώρας ^[17].



Σχήμα 1.12: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997-2013

Κύριος λόγος για τη μικρή ανάπτυξη μέχρι το 2001 ήταν το νομοθετικό καθεστώς και το μονοπωλιακό μοντέλο της οικονομίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μετά τις νομοθετικές αλλαγές στο χώρο των ΑΠΕ και την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η κατάσταση βελτιώθηκε σημαντικά. Η Ελλάδα εφαρμόζει το σύστημα feed-in και η νομοθεσία προσφέρει επιπλέον αρκετά ικανοποιητικά κίνητρα για τους επενδυτές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αυξημένο ενδιαφέρον των επενδυτών για ανάπτυξη πολλών MW αιολικής ενέργειας.

Παρ' όλα αυτά, το επενδυτικό ενδιαφέρον είναι φανερό ότι δεν είναι αρκετό. Χαρακτηριστικά, ο στόχος της χώρας μας για το 2010 ως προς την ηλεκτροπαραγωγή από αιολική ενέργεια ήταν η εγκατεστημένη ισχύς να φτάσει περίπου τα 3500MW, ενώ στο τέλος του 2010 η πραγματικά εγκατεστημένη ισχύς ανήλθε μόλις στα 1320MW. Είναι φανερό ότι σε μια χώρα για την οποία υπάρχει στόχος και καλή θέληση ενώ και οι επενδυτικές προτάσεις δεν είναι λίγες, η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων καθυστερεί σημαντικά, με αποτέλεσμα, ο στόχος να έχει πλέον μεταταθεί για το 2020 με εγκατεστημένη ισχύ που θα πρέπει να φτάσει περίπου τα 7500MW, από τα οποία τα 300MW αφορούν υπεράκτια αιολικά πάρκα. Οι αιτίες για αυτές τις καθυστερήσεις είναι, τουλάχιστον μέχρι το 2009, η μακροσκελής και περίπλοκη αδειοδοτική διαδικασία, η αδυναμία του δικτύου σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. Εύβοια, Κρήτη) να υποστηρίξει επιπλέον εγκατεστημένη ισχύ, οι αντιδράσεις των κατοίκων κυρίως για θέματα οπτικής όχλησης και η έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού.

Παρά τις προηγούμενες δυσκολίες, το ευνοϊκό, μακροπρόθεσμο νομικό πλαίσιο της Ελλάδας για τις ΑΠΕ διασφαλίζει τις επενδύσεις στον κλάδο και έχει κερδίσει την εμπιστοσύνη μεγάλων επενδυτών. Μεταξύ των παγκόσμιων κολοσσών που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα είναι οι ισπανικές εταιρείες Endesa, σε συνεργασία με τον Όμιλο Μυτιληναίου, Iberdrola σε συνεργασία με τον Όμιλο Ρόκα, Acciona και

Gamesa. Επίσης, στην ελληνική αγορά δραστηριοποιούνται και οι γαλλικές EDF και Veolia, η ιταλική Enel και οι γερμανικές WPD και WRE, οι οποίες προσβλέπουν στη συνέχιση της ανάπτυξης τους στο χώρο.

Η αιολική ενέργεια συνιστά προτεραιότητα για την Ελλάδα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να αναπτυχθούν σε ανταγωνιστικές τιμές και στόχος είναι η συμμετοχή των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να φτάσει το 40% μέχρι το 2020. Δεδομένου ότι ο στόχος των ΑΠΕ αποτελεί συμβατική υποχρέωση της χώρας που απορρέει από τους σχετικούς κανονισμούς της Ε.Ε. και το Πρωτόκολλο του Κιότο, οι επενδυτές έχουν τη δυνατότητα να διασφαλίσουν σταθερούς και μακροχρόνιους στόχους στην ελληνική αγορά ΑΠΕ ^[18].

1.4 Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Η μεγάλης κλίμακας εξάπλωση της αιολικής ισχύος έχει συντελέσει στην αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί ωστόσο να εισάγει μια σειρά από δυσκολίες στους χειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αντίθετα με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και κατά συνέπεια η ενσωμάτωση της στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος καθίσταται πολύπλοκη. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας, απαιτούνται μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες, είτε για τη διαχείριση είτε για το εμπόριο της ενέργειας. Αυτά τα λειτουργικά εργαλεία πρόβλεψης θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τελικών χρηστών, όπως είναι οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ενέργειας, οι αγοραστές της ενέργειας και οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς ^[20].

1.4.1 Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς (TSO)

Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς είναι υπεύθυνος για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Κάθε στιγμή, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια που καταναλώνεται. Ο TSO παρέχει υπηρεσίες, όπως ο εν λειτουργία (online) σχεδιασμός και η ρύθμιση του συστήματος. Παρέχει πρόβλεψη της ζήτησης του φορτίου για μια περιοχή του δικτύου, σε σχέση με το σύνολο της ισχύος που αναμένεται να παραχθεί, ενώ επίσης υπολογίζει και τις αναμενόμενες απώλειες ενέργειας. Πρέπει να λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν την ποσότητα και τη σειρά, με την οποία θα εισέλθει η αιολική ισχύς στο δίκτυο την επόμενη μέρα. Για αυτό το λόγο, τα μέσα παραγωγής της ενέργειας ορίζονται εκ των προτέρων, ώστε να ανταποκρίνονται στο προφίλ της προβλεπόμενης καταναλισκόμενης ενέργειας.

Οι προβλέψεις της ζήτησης φορτίου είναι συνήθως αρκετά ακριβείς, με σφάλμα μόλις 1,5-2,5% του επιπέδου της ζητούμενης ισχύος για προβλέψεις που αφορούν την

επόμενη ημέρα, ενώ το σφάλμα δεν ξεπερνά το 5% για τις προβλέψεις που αφορούν την επόμενη εβδομάδα ^[21]. Παρ' όλα αυτά, η έρευνα γύρω από τις μεθόδους πρόβλεψης της ζήτησης συνεχίζεται, καθώς η περαιτέρω μείωση του σφάλματος θα παρέχει σημαντική εξοικονόμηση στις μονάδες που διευθύνουν μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ενέργειας.

Για να πραγματοποιηθεί ο προγραμματισμός της επόμενης μέρας, ο TSO μπορεί να λάβει υπόψη δικά του μέσα παραγωγής ενέργειας, εάν υπάρχουν, ή/και να αγοράσει ενέργεια από ανεξάρτητους παραγωγούς ενέργειας. Πρέπει, επομένως, ανάμεσα στους υποψήφιους παραγωγούς, να εντοπίσει εκείνους που θα του παρέχουν την ενέργεια που απαιτεί η ζήτηση και φυσικά σε χαμηλό κόστος. Είναι εμφανές ότι οι παραγωγοί αιολικής ισχύος δεν μπορούν να καταθέσουν τις προτάσεις τους, χωρίς να γνωρίζουν εκ των προτέρων την ισχύ που θα παράγουν τα αιολικά πάρκα. Για αυτό το λόγο, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για χρήση προηγμένων εργαλείων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ^[20].

1.4.2 Η σημασία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Η πρόβλεψη του ανέμου και της αιολικής ισχύος είναι ζωτικής σημασίας, τόσο για τους χειριστές των αιολικών πάρκων, όσο και για τους φορείς κοινής ωφέλειας. Η ακριβής πρόβλεψη επιτρέπει στους χειριστές, τους ερευνητές, τους αγοραστές και τους επενδυτές να αποκτούν καλύτερες πληροφορίες, ώστε να λαμβάνουν σημαντικές αποφάσεις και να πετυχαίνουν ευνοϊκότερες εμπορικές συμφωνίες στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο νωρίτερα μπορεί ένας διαχειριστής να κάνει μια ασφαλή και αξιόπιστη εκτίμηση της ηλεκτρικής ισχύος που πρόκειται να παραχθεί, τόσο μεγαλύτερο είναι το οικονομικό κέρδος που θα έχει. Οι διαχειριστές του δικτύου απαιτούν αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα, ώστε να απορροφήσουν το αυξανόμενο μερίδιο της αιολικής ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και να αντιμετωπίσουν πιθανές ελλείψεις, λόγω απότομων αλλαγών στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Ενδεικτικά στη Δανία, τη χώρα με το μεγαλύτερο μερίδιο αιολικής ισχύος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, μια αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου της τάξης του 1m/s μπορεί να οδηγήσει σε μια διαφορά 450MW στην εθνική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, η ενδεχόμενη βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης του ανέμου και της κερδοφορίας των αιολικών πάρκων, όπως επίσης και η ευκολότερη ενσωμάτωση της αιολικής ισχύος στο δίκτυο, θα διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη έργων αιολικής ενέργειας στο μέλλον ^[22].

Οι προβλέψεις της αιολικής ισχύος μπορούν να είναι βραχυπρόθεσμες (για τις επόμενες 48-72 ώρες) ή μακροπρόθεσμες (για τις επόμενες 5-7 ημέρες). Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις είναι κατά τεκμήριο πιο ακριβείς από τις μακροπρόθεσμες.

Οι ακριβείς βραχυπρόθεσμες προβλέψεις επιτρέπουν τον ωριαίο και ημερήσιο προγραμματισμό της αιολικής ισχύος. Είναι προφανές ότι οι προβλέψεις συνδέονται άμεσα με την αύξηση των εσόδων και τη μείωση του κόστους των επιχειρήσεων που

δρουν στον τομέα της ενέργειας. Επιπρόσθετα, οι προβλέψεις συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση του σχεδιασμού της μεταφοράς της ενέργειας.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως η αξία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι διαφορετική για κάθε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα δίκτυο που περιέχει πολλές μονάδες με εκκίνηση, είναι λιγότερο ευαίσθητο στις απρόβλεπτες μεταβολές της αιολικής ενέργειας που παράγεται, σε αντίθεση με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στις πιο αργές μονάδες παραγωγής. Ένα άλλο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η κατανομή των αιολικών πάρκων μέσα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο τα αιολικά πάρκα είναι διάσπαρτα σε μια ευρεία περιοχή, τα σφάλματα των προβλέψεων των επιμέρους αιολικών πάρκων αλληλοαναιρούνται. Αντίθετα, σ' ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή όλων των αιολικών πάρκων συσχετίζεται ιδιαίτερα ^[23].

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει την αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, είναι ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς που ρέει το φορτίο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα καλά διασυνδεδεμένο δίκτυο, όπως αυτό της δυτικής Δανίας, μπορεί να διαχειριστεί σχετικά εύκολα τις μεγάλες ποσότητες της αιολικής ενέργειας, που δεν έχουν προβλεφθεί σωστά. Τα απομονωμένα ή ελαφρώς διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως αυτά που υπάρχουν στην Ιρλανδία, είναι ευαίσθητα στα σφάλματα της πρόβλεψης. Κατά συνέπεια, περιορίζεται το ποσό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματωθεί στο δίκτυο ^[24].

1.5 Δομή της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος δύο μοντέλων πρόβλεψης ηλιακής και αιολικής ισχύος και η αξιολόγηση της επίδοσής τους. Τα μοντέλα βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, με τη χρήση των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης. Τα μοντέλα "μαθαίνουν" να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους σύμφωνα με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τις αντίστοιχες χρονοσειρές ηλιακής και αιολικής ισχύος που παρουσιάζονται στην είσοδό τους, χωρίς να ξεχνάνε την πρότερη γνώση από παλαιότερες παρατηρήσεις. Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στα κεφάλαια της εργασίας, τα οποία έχουν ως στόχο την εξοικείωση με την πρόβλεψη ισχύος των παραπάνω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καθώς και με τα χαρακτηριστικά της περιφερειακής πρόβλεψης.

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική περιγραφή της ανάπτυξης της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, με ιδιαίτερη αναφορά στην κατάσταση που επικρατεί τόσο στην Ευρώπη, όσο και στον Ελλαδικό χώρο. Παράλληλα έγινε ιδιαίτερη αναφορά στη σημασία και αναγκαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, καθώς και στην αξία της τελευταίας για τους τελικούς χρήστες, όπως ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ανεξάρτητοι παραγωγοί.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται εκτενής αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται μια λεπτομερής περιγραφή των μετεωρολογικών μοντέλων πρόβλεψης και των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που προέρχονται από αυτά, για τη μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας και την εκτίμηση της ηλιακής και αιολικής παραγωγής.

Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των κυριότερων μοντέλων πρόβλεψης της ηλιακής και αιολικής ισχύος τεχνολογίας αιχμής.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το σφάλμα της πρόβλεψης και τα χαρακτηριστικά του. Πραγματοποιείται εκτίμηση του σφάλματος πρόβλεψης, βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος και στην κατανομή του. Επίσης, περιγράφονται οι κατανομές των σφαλμάτων πρόβλεψης, τόσο της ταχύτητας του ανέμου, όσο και της αιολικής ισχύος.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας των νευρωνικών δικτύων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους αυτό-οργανούμενους χάρτες και στα νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης, που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των μοντέλων της παρούσας διπλωματικής, ενώ γίνεται σύντομη αναφορά και στους γενετικούς αλγορίθμους.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται περιγραφή των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν, με την αναλυτική παράθεση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε σε όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB, μέχρι και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται η σύνοψη των προτεινόμενων μοντέλων και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων, ενώ καταλήγουμε στα γενικότερα συμπεράσματα της μελέτης.

Κεφάλαιο 2

Κύρια χαρακτηριστικά ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου και αριθμητικές προβλέψεις καιρού

2.1 Στοιχεία θεωρίας ηλιακής ακτινοβολίας

Ο Ήλιος είναι ένας αστέρας σφαιρικού σχήματος με διάμετρο 1.392 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Η σημασία του Ήλιου στην εξέλιξη και τη διατήρηση της ζωής στη Γη είναι καίρια, καθώς με τη θεμελιώδη διαδικασία της φωτοσύνθεσης προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη των ζωντανών οργανισμών, διατηρεί την επιφανειακή θερμοκρασία της Γης σε ανεκτά για τη ζωή επίπεδα, καθώς επίσης προκαλεί τα μετεωρολογικά φαινόμενα ^[25].

Το ορατό τμήμα που βρίσκεται στην επιφάνεια του Ηλίου λέγεται φωτόσφαιρα και αποτελεί την πηγή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη. Στη φωτόσφαιρα παρατηρούνται οι ηλιακές κηλίδες, οι κόκκοι και οι ηλιακές εκλάμψεις. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η χρωμόσφαιρα στην οποία παρατηρούνται οι ηλιακές προεξοχές. Ακολουθούν η ζώνη αναστροφής της θερμοκρασίας (η θερμοκρασία αυξάνει απότομα στους 30.000 °K από 5.700 °K), το ηλιακό στέμμα και η ηλιόσφαιρα που συνιστά την εξωτερική ατμόσφαιρα του Ηλίου. Στην περιοχή πέρα του ηλιακού στέμματος παρατηρείται ο ηλιακός άνεμος, που συνιστά ασθενή ακτινοβολία σωματιδιακής φύσης (ηλεκτρόνια, πρωτόνια) που απομακρύνεται από τον Ήλιο με την ταχύτητα του φωτός. Σε περιόδους έντονων ηλιακών εκρήξεων, φθάνει στην επιφάνεια της Γης με τιμές ως 10^{12} πρωτόνια / $m^2 \text{ sec}$.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την γήινη ατμόσφαιρα είναι σχεδόν σταθερή στην τιμή $G_{\text{SOLAR CONSTANT}}=1367 \text{ W/m}^2$. Καθώς η ακτινοβολία μεταδίδεται προς τη Γη, εξασθενεί η πυκνότητα ισχύος της, ενώ συγχρόνως μειώνεται η ενέργεια (συχνότητα) των φωτονίων και αυξάνει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, το 7% της φασματικής απόκρισης βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$), το 47% βρίσκεται στο ορατό φάσμα και το 46% στην υπέρυθη περιοχή ($\lambda > 0.75 \mu\text{m}$).

2.1.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί κατά τη μεταφορά μιας δέσμης φωτός μέσα από την ατμόσφαιρα είναι η απορρόφηση, η σκέδαση και η ανάκλαση. Οι μηχανισμοί αυτοί τροποποιούν την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (υψηλής ενέργειας). Εξαιτίας αυτών των μηχανισμών, η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_{GLOBAL} που φθάνει στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από την **άμεση** και τη **διάχυτη** συνιστώσα.

Η **άμεση** φθάνει απευθείας από τον Ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα. Η τιμή της εξαρτάται από την απόσταση Ηλίου-Γης, την ηλιακή απόκλιση δ , τη γωνία ύψους του Ηλίου, το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, την κλίση της επιφάνειας που προσπίπτει και την απορρόφηση που υφίσταται στην ατμόσφαιρα. Η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση που διανύει εντός της ατμόσφαιρας και για το λόγο αυτό έχει μεγαλύτερη τιμή κατά το θέρος και μικρότερη το χειμώνα. Επίσης, όσο πιο κάθετα προσπίπτει στην επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της.

Η **διάχυτη** ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά από ανάκλαση, σκέδαση εντός της ατμόσφαιρας, αλλά και ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της Γης. Ο συντελεστής ανάκλασης albedo ορίζεται από το λόγο ανακλώμενης προς προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη θέση που δημιουργεί την ανάκλαση. Η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από τη γωνία ύψους του Ηλίου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσοστό νέφωσης και υδροσταγονιδίων και άλλων παραγόντων σκέδασης που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν 2 οικογένειες μοντέλων που προβλέπουν τις μέσες ωριαίες τιμές των διαφόρων συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτές είναι τα παραμετρικά μοντέλα και τα μοντέλα κατάτμησης. Τα πρώτα απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες ατμοσφαιρικών μετεωρολογικών παραμέτρων, ενώ τα δεύτερα απαιτούν πειραματικά δεδομένα καταγραφής της συνολικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης ^[26].

Αναλύεται το **μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-Klein-Duffie** γιατί βρέθηκε ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα στα γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 31 και 42 μοιρών και για μεσαίου εύρους γωνίες του ηλιακού ζενίθ (50-65 μοίρες).

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία επί οριζόντιου εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$G_{BEAM,h} = G_{GLOBAL,h} \frac{1 - k_d}{\sin\beta}$$

όπου:

- $G_{BEAM,h}$ η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους,
- $G_{GLOBAL,h}$ η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους, όπως μετρήθηκε από ένα πυρανόμετρο,
- k_d το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας, το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εμπειρική συνάρτηση, στην οποία k_t είναι ο δείκτης αιθριότητας, η τιμή του οποίου υποδεικνύει τη νέφωση. Η πρώτη περιοχή τιμών αντιστοιχεί σε πολύ συννεφιασμένο ουρανό, η δεύτερη σε συννεφιασμένο και η τελευταία με τις υψηλές τιμές σε ουρανό χωρίς σύννεφα.

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0.09k_t, & k_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4, & 0.22 < k_t < 0.8 \\ 0.165, & k_t \geq 0.8 \end{cases}$$

Ο δείκτης αιθριότητας k_t υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k_t = \frac{G_{GLOBAL,h}}{G_{GLOBAL,h,oa}}$$

όπου $G_{GLOBAL,h,oa}$ η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, η οποία αποτελείται μόνο από την άμεση συνιστώσα διότι δεν υπάρχει ατμόσφαιρα για να προκαλέσει διάχυση.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι σχεδόν σταθερή στην τιμή 1367W/m^2 (πυκνότητα ισχύος της ηλιακής σταθεράς $G_{SOLAR\ CONSTANT}$). Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια (AM0), έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, δίνεται από τον τύπο:

$$G_{EXTRA_TERRESTRIAL} = G_{SOLAR\ CONSTANT} * [1 + 0,33 * \cos\left(\frac{360 * DoY}{365}\right)]$$

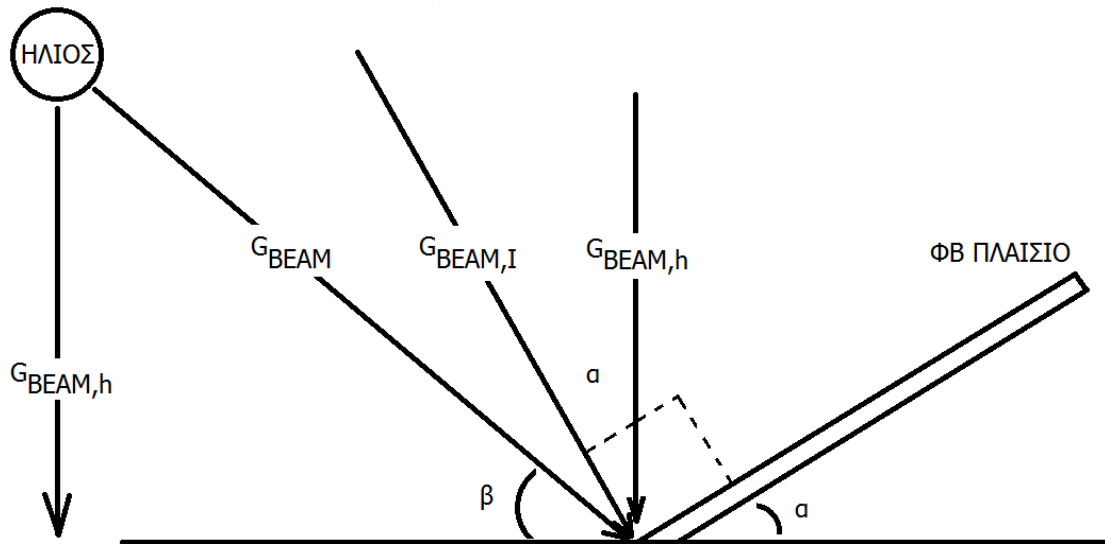
Ο όρος μέσα στην παρένθεση λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην απόσταση Ήλιου-Γης, στις διάφορες ημέρες του έτους. Λόγω της γωνίας β του ύψους του Ηλίου, αν μετατοπιστεί το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, η ακτινοβολία που δέχεται καθορίζεται από την κάθετη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και δίνεται από τον τύπο:

$$G_{GLOBAL,h,oa} = G_{EXTRA_TERRESTRIAL} * \sin\beta$$

Μετά τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας $G_{BEAM,h}$ επί οριζόντιου εδάφους, υπολογίζεται η διάχυτη συνιστώσα $G_{DIFF,h}$ από τον τύπο:

$$G_{DIFF,h} = G_{GLOBAL,h} - G_{BEAM,h}$$

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο των Liu & Jordan (1960). Θεωρείται ότι κάθε φ/β πλαίσιο έχει ελεύθερη θέα, που εκτείνεται από τον ορίζοντα ως το ζηνίθ και το νοητό επίπεδο του φ/β πλαισίου, το οποίο καθορίζεται από τη γωνία κλίσης α του φ/β πλαισίου ως προς το επίπεδο έδαφος. Για το λόγο αυτό, υπερεκτιμάται η διάχυτη ακτινοβολία που υπολογίζεται για την επόμενη φ/β συστοιχία, αφού βλέπει ένα τμήμα της παραπάνω ουράνιας σφαίρας. Οι συνιστώσες της άμεσης ακτινοβολίας φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 2.1: Συνιστώσες της άμεσης ακτινοβολίας G_{BEAM}

Από το σχήμα προκύπτει ότι:

$$G_{BEAM,h} = G_{BEAM} \cdot \sin\beta$$

$$G_{BEAM,I} = G_{BEAM} \cdot \cos(\varphi_z - \alpha) = G_{BEAM} \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

$$G_{BEAM,I} = G_{BEAM,h} \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin\beta}$$

όπου:

- φ_z η συμπληρωματική της γωνίας β ,
- G_{BEAM} η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους,
- $G_{BEAM,I}$ η συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη.

Η διάχυτη ακτινοβολία $G_{DIFF,I}$ που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη, θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες: το τμήμα που οφείλεται στον ουράνιο θόλο από τον ορίζοντα ως το ζενίθ και το τμήμα που οφείλεται στον ουράνιο θόλο από το ζενίθ ως το νοητό επίπεδο του φ/β πλαισίου. Με επαλληλία, η διάχυτη ακτινοβολία $G_{DIFF,I}$ που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G_{DIFF,I} = \frac{1}{2} G_{DIFF,h} (1 + \cos \alpha)$$

Η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο του φ/β πλαισίου δίνεται από τον τύπο:

$$G_{GLOBAL,I} = G_{BEAM,I} + G_{DIFF,I}$$

2.1.2 Φωτοβολταϊκή μετατροπή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έχει παρατηρηθεί από το 1839 από τον Γάλλο φυσικό Becquerel. Το φαινόμενο αυτό ουσιαστικά συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω κυρίως των διόδων p-n. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Οι δημιουργούμενοι ηλεκτρικοί φορείς οδηγούνται προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των ωμικών επαφών και στους ακροδέκτες του κυκλώματος εμφανίζεται τάση. Για τη δίοδο p-n, το ρεύμα καθορίζεται από τους φορείς μειονότητας που υπάρχουν στους ημιαγωγούς τύπου p και n.

Με το φωτισμό της δίοδου p-n, τα φωτόνια ενέργειας $E=hn$ προσπίπτουν στον ημιαγωγό τύπου n. Η ενεργός περιοχή για τη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι οι περιοχές $w+L_p+L_n$, όπου τα τελευταία αντιστοιχούν στα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας, στις περιοχές τύπου n και p αντίστοιχα, εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, πριν επανασυνδεθούν με φορέα πλειονότητας (ηλεκτρόνια για την περιοχή n και οπές για την περιοχή p) και χαθούν.

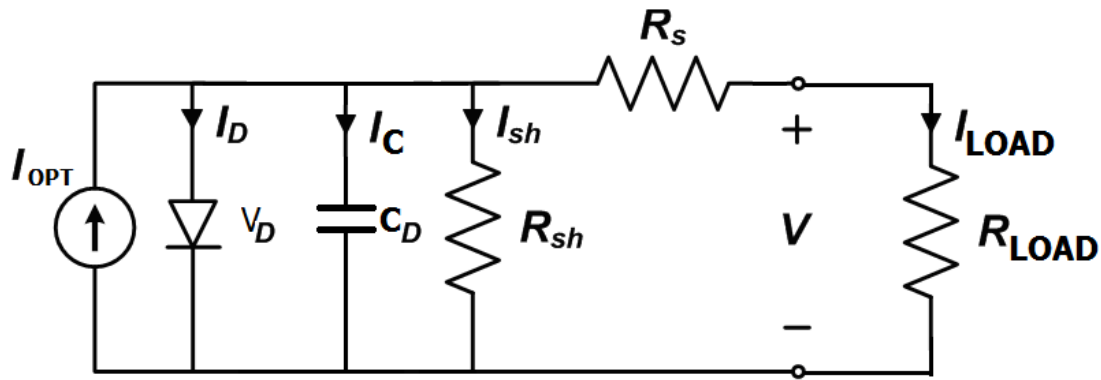
Εφόσον η ενέργεια κάθε προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του ενεργειακού διακένου, κάθε φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους που είναι σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η ενέργεια του φωτονίου διεγείρει το ηλεκτρόνιο προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στο πλέγμα μια οπή (στη ζώνη σθένους). Συνεπώς, μέσω της οπτικής διέγερσης εισάγονται ταυτόχρονα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οπές στη ζώνη σθένους, σε όλο το εύρος της επαφής p-n. Αυτά τα ζεύγη διαχωρίζονται αυτόματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο και δεν επανασυνδέονται. Στις περιοχές L_n και L_p , οι δημιουργούμενοι φορείς μειονότητας διαχέονται προς την περιοχή w και δεν επανασυνδέονται με τον φορέα πλειονότητας.

Λόγω της συνεχούς οπτικής διαταραχής που εισάγει ηλεκτρικούς φορείς στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος, το υλικό δεν φθάνει σε θερμοδυναμική ισορροπία. Σύμφωνα με την προσέγγιση Quasi Equilibrium, η στάθμη Fermi διαχωρίζεται σε δύο διακριτές στάθμες, μία για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια Φ_n και μια για τις οπές Φ_p , που χρησιμοποιούνται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Όσο διαρκεί η οπτική διέγερση, τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στην περιοχή w εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n και οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Ο πρώτος θα αποκτήσει περισσότερα αρνητικά φορτία και ο δεύτερος περισσότερα θετικά. Οι στάθμες Φ_n , Φ_p διαχωρίζονται κατά την ενεργειακή διαφορά:

$$\Phi_n - \Phi_p = q * V_{TOTAL}$$

όπου V_{TOTAL} είναι η τιμή της τάσης εξόδου στα άκρα της δίοδου p-n.

Για τον προσδιορισμό και την κατανόηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, θεωρούμε ότι ένα φ/β στοιχείο περιγράφεται με το παρακάτω ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η παρεχόμενη ισχύς από το φ/β στοιχείο καταναλώνεται από την εξωτερική αντίσταση R_{LOAD} . Το κύκλωμα αποτελείται από την πηγή που παράγει το φωτόρρευμα, παράλληλα με μια ιδανική δίοδο. Το ρεύμα I_d οφείλεται στη μεταφορά των φορέων μειονότητας με διάχυση, εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της διάταξης ισχύουν οι εξισώσεις:

$$I_{LOAD} = I_{OPT} - (I_D + I_{SHUNT})$$

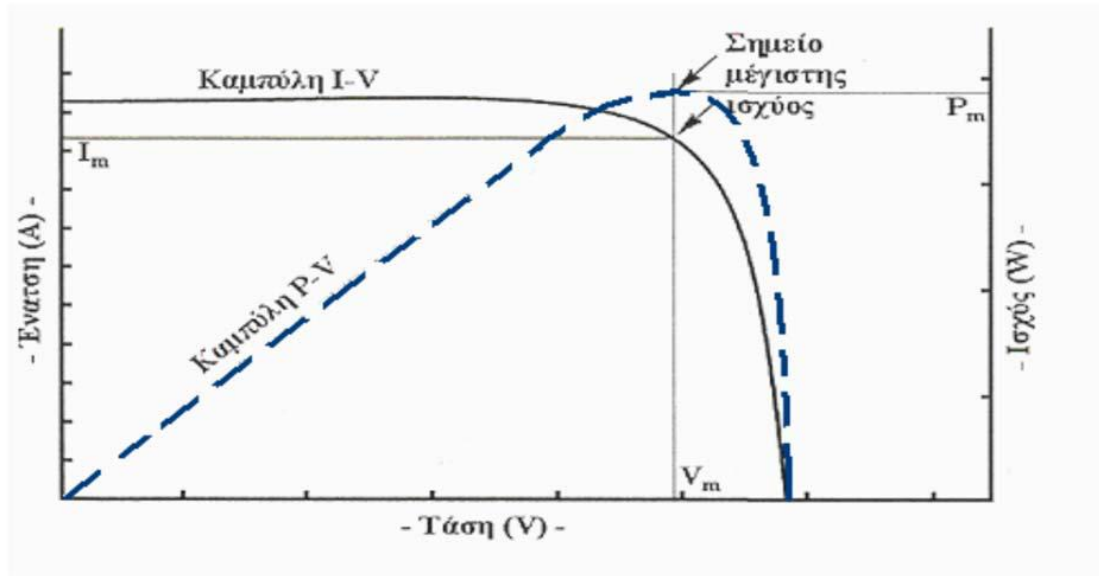
όπου :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right)$$

$$V_D = I_{LOAD}R_S + V_{LOAD}$$

$$I_{SHUNT} = \frac{I_{LOAD}R_S + V_{LOAD}}{R_{SHUNT}}$$

Η γραφική παράσταση μεταξύ του ρεύματος στην έξοδο (I_s) και της τάσης στην έξοδο (V_s) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται $I - V$ χαρακτηριστική. Γενικά, έχει επικρατήσει για λόγους κυκλωματικής ανάλυσης η αναπαράσταση της $I-V$ χαρακτηριστικής να γίνεται μαζί με τη γραφική της ηλεκτρικής ισχύος στο πρώτο τεταρτημόριο.



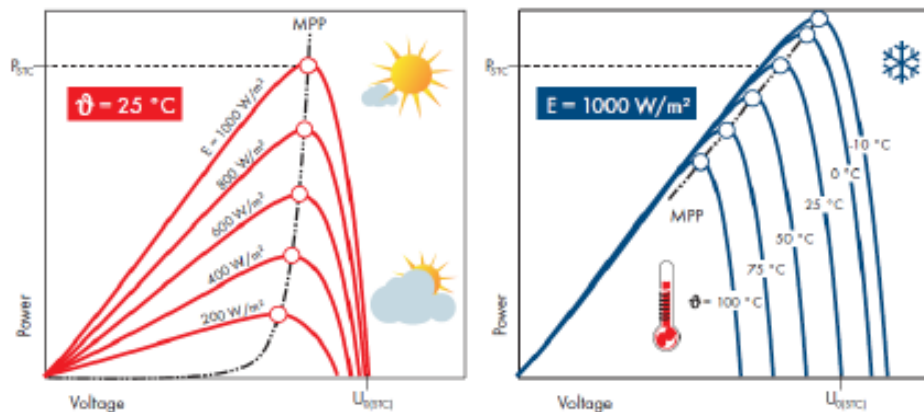
Σχήμα 2.3: $I - V$ χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης φορτίου (R_{LOAD}) του κυκλώματος, η τάση και η ένταση του ρεύματος κυμαίνονται ανάμεσα στις ακραίες τιμές. Οι ακραίες αυτές τιμές είναι i) η βραχυκυκλωμένη κατάσταση όταν η τιμή της αντίστασης φορτίου είναι μηδέν (έχουμε μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και ii) η ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση όταν η τιμή της αντίστασης φορτίου τείνει στο άπειρο (έχουμε μέγιστη τιμή τάσης V_{oc} και μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος).

Επομένως, είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση του κυκλώματος (αντίσταση φορτίου) που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή, ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς. Η παρεχόμενη ισχύς από ένα φ/β στοιχείο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και την αντίσταση φορτίου.

2.1.2.1 Θερμοκρασιακή επίπτωση

Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αισθητή μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης των φ/β στοιχείων. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι θα δημιουργείται πρόβλημα για τη διατήρηση της βελτιστοποίησης της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από ένα ηλιακό φ/β στοιχείο κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών του έτους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, τα φ/β συστήματα συνεργάζονται με μια διάταξη που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (M.P.P. tracker), η οποία διατηρεί το σημείο λειτουργίας του φ/β συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος υπό οποιοσδήποτε συνθήκες. Στην εικόνα απεικονίζεται η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στο M.P.P. Όπως παρατηρούμε, αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας και μείωση της θερμοκρασίας αυξάνουν την τάση M.P.P.



Σχήμα 2.4: Καμπύλες ισχύος Φ/B : Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και εξάρτηση από τη θερμοκρασία του ϕ/β κελιού

2.1.2.2 Επίδραση της σκίασης

Η επίδραση της σκίασης, της έλλειψης δηλαδή ηλιακού φωτός, ανάγεται στην μερική ή ολική απώλεια δημιουργίας φωτορεύματος. Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων (π.χ. δένδρα, κτίρια, στύλοι κτλ.) ή από παροδικά (και μάλλον στοχαστικού χαρακτήρα) φαινόμενα (π.χ. σύννεφα).

Για τα τυπικά ϕ/β πλαίσια, που αποτελούνται συνήθως από 36 (ή 72) ϕ/β στοιχεία σε σειρά, η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν οι υπόλοιπες. Παρατεταμένος σκιασμός της, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων κυψελίδων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου του.

Αναφορικά με τη σκίαση, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η εγκατάσταση να βρίσκεται σε χώρο στον οποίο απουσιάζουν εμπόδια. Επιπλέον, για την αποφυγή σκιάσεων μεταξύ των συστοιχιών, ένας πρακτικός κανόνας τοποθέτησης είναι ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια του ύψους της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στην εικόνα:



Σχήμα 2.5: Απόσταση μεταξύ συστοιχιών για αποφυγή σκιάσεων

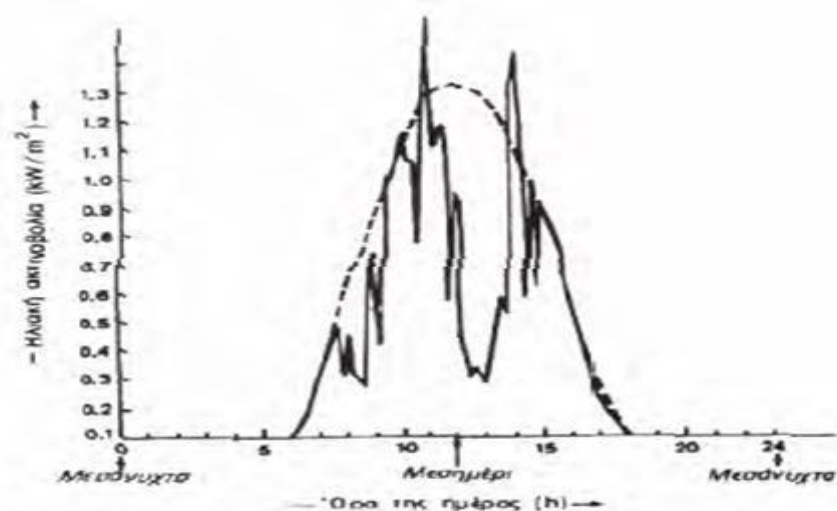
2.1.2.3 Επίδραση της νέφωσης

Η νέφωση είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους απόδοσης ενός φ/β στοιχείου. Ανάλογα με το ποσοστό κάλυψης του ουρανού από σύννεφα κυμαίνεται και η απόδοση του φ/β, δηλαδή όσο πιο αραιή είναι η νέφωση που υπάρχει στον ουρανό, τόσο πιο καλή είναι η απόδοση του φ/β, ενώ όταν ο ουρανός είναι καλυμμένος από σύννεφα τότε η απόδοση του φ/β είναι πάρα πολύ μικρή.

Το πιο συνηθισμένο σύστημα καταγραφής της νέφωσης είναι σε όγδοα. Έτσι μηδέν όγδοα σημαίνει ότι ο ουρανός είναι τελείως καθαρός και οκτώ όγδοα σημαίνει ότι ο ουρανός είναι πλήρως καλυμμένος από σύννεφα.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται και στην εικόνα. Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος.

Επίσης, μπορούν να παρατηρηθούν εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς, στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.



Σχήμα 2.6: Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση για καθαρό ουρανό

2.2 Στοιχεία θεωρίας του ανέμου

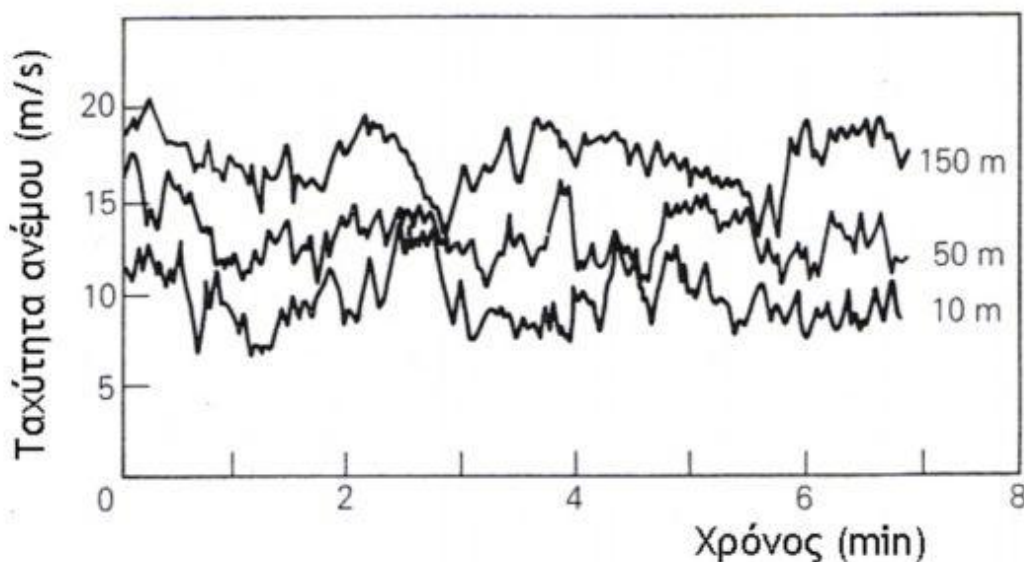
Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια

της γης, καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής, ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια τυπική καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου μετρημένη σε τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος. Από την καταγραφή αυτή μπορούν να διαπιστωθούν τα ακόλουθα:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος,
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός,
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων.

Οι διακυμάνσεις του στροβιλισμού έχουν τυχαίο χαρακτήρα και έτσι δεν μπορούν να αναλυθούν με τη χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων. Έτσι προτιμούνται στατιστικές τεχνικές.



Σχήμα 2.7: Καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου σε τρία διαφορετικά ύψη από το έδαφος^[27]

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στον στροβιλισμό από τις πιο αργές, που οφείλονται σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας V του ανέμου, που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

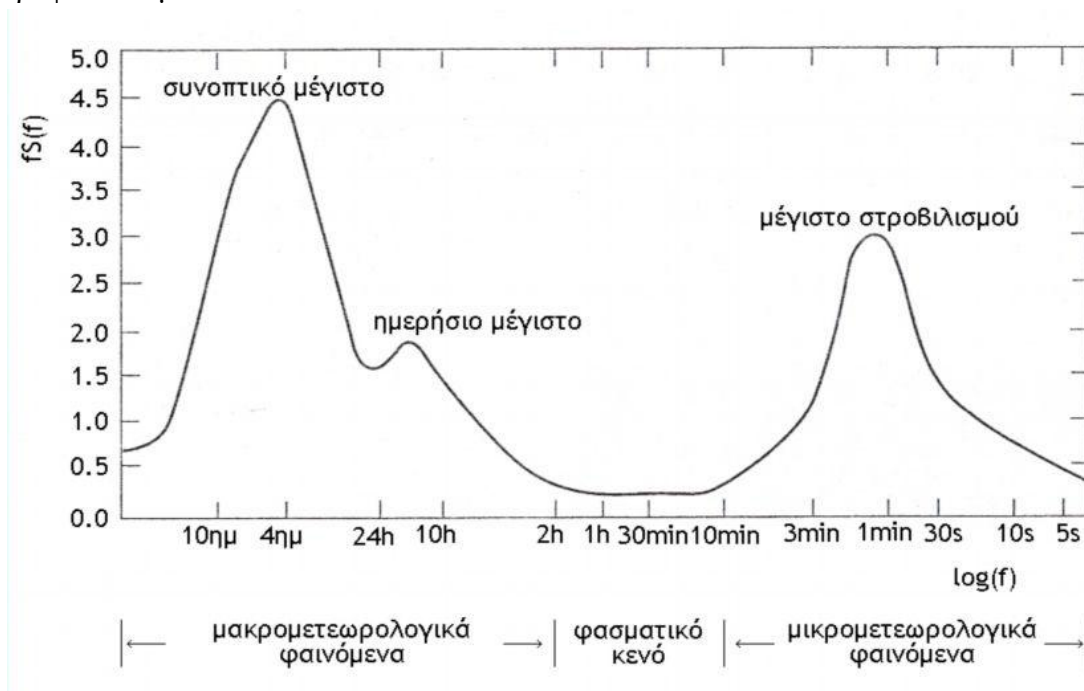
$$V = \frac{1}{T} \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} v(t) dt$$

όπου

- $v(t)$ η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου,

- ο Το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή.

Η ενεργειακή φασματική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ^[30]. Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος αντιστοιχεί στα μακρομετεωρολογικά φαινόμενα. Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι μεταβολές του ανέμου που οφείλονται σε αλλαγές του καιρού από μέρα σε μέρα έως εβδομάδα (συνοπτικές μεταβολές) και οι μεταβολές του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στη στεριά και τη θάλασσα (ημερήσιες μεταβολές). Η πλευρά των υψηλών συχνοτήτων αντιστοιχεί στα μικρομετεωρολογικά φαινόμενα και οι μεταβολές οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην απόδοση των ανεμογεννητριών, καθώς και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος στο τροφοδοτούμενο δίκτυο.



Σχήμα 2.8: Ενεργειακή φασματική κατανομή για την οριζόντια ταχύτητα του ανέμου

2.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου

Όπως αναφέρθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, άνεμος ονομάζεται κάθε οριζόντια μετακίνηση μάζας ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών πιέσεων που επικρατούν από τόπο σε τόπο. Ο άνεμος προσδιορίζεται από δύο στοιχεία, τη διεύθυνση (direction) και την ένταση (speed), δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα. Ως διεύθυνση ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Στα επόμενα αναφέρονται οι κυριότερες δυνάμεις που χαρακτηρίζουν τους ανέμους και τα διάφορα είδη ανέμου που αυτές προκαλούν, ενώ παρουσιάζονται επίσης τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ανέμων, καθώς και μια σειρά από σημαντικούς παράγοντες που τους επηρεάζουν.

2.2.1.1 Δυνάμεις και τύποι ανέμου

Οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέριας μάζας παρουσιάζονται παρακάτω και είναι οι εξής ^[31]:

- *Δύναμη βαροβαθμίδας*: ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε μια αέρια μάζα εξαιτίας των διαφορετικών πιέσεων που υπάρχουν σε αυτήν και η οποία ωθεί την αέρια μάζα από τις ψηλές πιέσεις προς τις χαμηλές.
- *Δύναμη Coriolis*: ασκείται σε κάθε σώμα που κινείται πάνω στη γη. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας της γης, της ταχύτητας του σώματος (δηλαδή της αέριας μάζας στην περίπτωση του ανέμου) και επίσης είναι ανάλογη του ημιτόνου του γεωγραφικού πλάτους του τόπου στον οποίο λαμβάνει χώρα η κίνηση, είναι δηλαδή πιο μεγάλη στους πόλους (γεωγραφικό πλάτος 90°) και μηδέν στον ισημερινό, όπου το γεωγραφικό πλάτος είναι μηδέν.
- *Δύναμη τριβής*: αναπτύσσεται εξαιτίας της τραχύτητας που παρουσιάζει η επιφάνεια του εδάφους και της θάλασσας, πάνω στην οποία υποχρεώνεται να κινηθεί η αέρια μάζα. Το μέτρο της δύναμης αυτής είναι ανάλογο της ταχύτητας με την οποία κινείται η αέρια μάζα κι έχει φορά αντίθετη με εκείνη της ταχύτητας του ανέμου.
- *Φυγόκεντρη δύναμη*: είναι η δύναμη με την οποία αντιδρά κάθε σώμα, το οποίο κινείται σε κυκλική τροχιά. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της κεντρομόλου επιτάχυνσης και ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας της τροχιάς.

Βάσει των προηγούμενων δυνάμεων, προκαλείται η δημιουργία των ακόλουθων τύπων ανέμου:

- *Γεωστροφικός άνεμος (geostrophic wind)*: Όταν οι ισοβαρείς είναι ευθείες παράλληλες, τότε ο ατμοσφαιρικός αέρας δέχεται την επίδραση της δύναμης βαροβαθμίδας (F_P), που τον μετακινεί αρχικά από τις ψηλές προς τις χαμηλές πιέσεις, και της δύναμης Coriolis (F_C), που τον εκτρέπει προς τα δεξιά. Αν δεν υπάρχουν τριβές στην κίνηση της αέριας μάζας, τότε ο άνεμος πνέει τελικά παράλληλα προς τις ισοβαρείς. Ο άνεμος που δημιουργείται από την ισορροπία των δύο αυτών δυνάμεων, ονομάζεται γεωστροφικός άνεμος. Όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε ένα χάρτη επιφανείας, τόσο πιο μεγάλη είναι η δύναμη βαροβαθμίδας κι άρα τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η ταχύτητα του ανέμου.
- *Άνεμος βαροβαθμίδας (gradient wind)*: Όταν οι ισοβαρείς είναι καμπύλες και η κίνηση του ανέμου εκτελείται σε περιοχές της ατμόσφαιρας που η δράση της τριβής είναι αμελητέα, τότε αυτή είναι αποτέλεσμα της δράσης τριών δυνάμεων, της δύναμης βαροβαθμίδας (F_P), της δύναμης Coriolis (F_C) και της φυγόκεντρης δύναμης (F_Φ). Στο κυκλωνικό σύστημα των ισοβαρών (χαμηλό βαρομετρικό), εξαιτίας της συγκεκριμένης ισορροπίας των δυνάμεων, παρατηρείται σύγκλιση (convergence) του ανέμου προς το κέντρο του συστήματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανοδικές κινήσεις στο

κέντρο. Αντίθετα στο αντικυκλωνικό σύστημα (υψηλό βαρομετρικό), η ισοροπία των δυνάμεων δημιουργεί απόκλιση (divergence) του ανέμου από το κέντρο του συστήματος, με συνέπεια τη δημιουργία καθοδικών κινήσεων στο κέντρο. Συνέπεια των ανοδικών κινήσεων στο κέντρο ενός κυκλωνικού συστήματος είναι η δημιουργία νεφών με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, όταν φυσικά υπάρχει αρκετή υγρασία στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, οι καθοδικές κινήσεις σε ένα βαρομετρικό υψηλό τείνουν να κάνουν την ατμόσφαιρα πιο ευσταθή.

- *Ημερήσιοι άνεμοι:* Στην κατηγορία αυτή των ανέμων, ανήκουν οι άνεμοι εκείνοι που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται τόσο κατά την ημέρα όσο και κατά τη νύχτα, ανάμεσα στην ξηρά και στη θάλασσα ή ανάμεσα σε πεδινές και ορεινές περιοχές. Στους ημερήσιους ανέμους ανήκει η θαλάσσια αύρα που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της ταχύτερης θέρμανσης του αέρα πάνω από τη στεριά σε σχέση με αυτόν πάνω από τη θάλασσα, ενώ έχει διεύθυνση από τη θάλασσα προς τη στεριά. Ημερήσιος άνεμος είναι αντίστοιχα και η απόγεια αύρα, η οποία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας ως αποτέλεσμα της ταχύτερης ψύξης του αέρα πάνω από τη στεριά σε σχέση με τη θάλασσα. Η διεύθυνση του ανέμου στην περίπτωση αυτή είναι από τη στεριά προς τη θάλασσα.
- *Τοπικοί άνεμοι:* Η τοπογραφική διαμόρφωση διαφόρων περιοχών της γης, σε συνάρτηση και με ορισμένες καιρικές συνθήκες, δημιουργεί τοπικούς ανέμους με χαρακτηριστικές πολλές φορές ονομασίες. Οι άνεμοι αυτοί, που χαρακτηρίζονται τοπικοί, είναι μικρής κλίμακας (π.χ. Βαρδάρης).
- *Μελτέμια:* Δημιουργούνται από ένα μεγάλο σύστημα υψηλών πιέσεων στα Βαλκάνια, βόρεια της Ελλάδας, και σε ένα μεγάλο σύστημα χαμηλών πιέσεων στη Μικρά Ασία και την ανατολική Μεσόγειο. Το χαμηλό σύστημα πιέσεων οφείλεται στα μεγάλα θερμικά ανοδικά ρεύματα πάνω από την Ινδία, τα οποία καθιστούν ένα μεγάλο θερμικό ελάχιστο πίεσης που στα μέσα του καλοκαιριού εκτείνεται μέχρι την ανατολική Μεσόγειο.

2.2.1.2 Παράγοντες επίδρασης της τοπολογίας εδάφους στον άνεμο

Η ροή του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης, δηλαδή στο οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο, επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Γι' αυτό, η μελέτη του εδάφους της περιοχής ενός αιολικού πάρκου είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της παραγωγής του. Η λεπτομερής περιγραφή της επιφάνειας του εδάφους ονομάζεται τοπολογία. Με σκοπό λοιπόν την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου και, κατ' επέκταση, της παραγόμενης αιολικής ισχύος, είναι απαραίτητη η γνώση της τοπολογίας της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το υπό μελέτη αιολικό πάρκο. Ανάλογα με την τοπολογία του εδάφους, τα αιολικά πάρκα κατηγοριοποιούνται σε πάρκα σε πολύπλοκο έδαφος (complex terrain), σε ημί-πολύπλοκο έδαφος (semi-complex terrain) και σε απλό έδαφος (simple terrain).

Επίσης, τα πάρκα διακρίνονται σε "μέσα από την ακτή" (onshore), "κοντά στην ακτή" (near shore) και "πέρα από την ακτή" (offshore), ανάλογα με το αν είναι τοποθετημένα ενδοχώρια, παραθαλάσσια ή πάνω σε θαλάσσιο χώρο αντίστοιχα.

Η τοπολογία του εδάφους μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες, την τραχύτητα, τα εμπόδια και την ορεογραφία^[32]:

- *Τραχύτητα:* Ως τραχύτητα αναφέρεται το συνολικό αποτέλεσμα της επιφάνειας του εδάφους, που οδηγεί σε μία γενική επιβράδυνση του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης. Η εκτίμηση της τραχύτητας μιας περιοχής γίνεται με μια παράμετρο, που μετριέται σε μονάδες μήκους και ονομάζεται μήκος τραχύτητας. Αν και η τραχύτητα καθορίζεται από το μέγεθος και την κατανομή των στοιχείων τραχύτητας της περιοχής, όπως η βλάστηση, οι οικισμοί κλπ., το μήκος της τραχύτητας δεν είναι σταθερό, αλλά αλλάζει για διάφορους λόγους, π.χ. ανάλογα με το μέγεθος της βλάστησης, την επικάλυψη του εδάφους από χιόνι, την κατάσταση της θάλασσας, αν μιλάμε για offshore πάρκο, κ.ο.κ.
- *Εμπόδια:* Το δεύτερο στοιχείο που πρέπει να περιγραφεί κατά τη μελέτη της τοπογραφίας μιας περιοχής και για το χαρακτηρισμό της ανάλογα με τη πολυπλοκότητα του εδάφους, είναι τα εμπόδια που συναντάει ο άνεμος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητά του. Πρέπει λοιπόν, να εξετασθεί τι εμπόδια υπάρχουν στην περιοχή, είτε με αεροφωτογραφίες είτε με επίσκεψη της περιοχής, ώστε να καθοριστούν η θέση, οι διαστάσεις και το πώς επηρεάζεται ο άνεμος κοντά σε κάθε εμπόδιο. Το τελευταίο γίνεται με τη βοήθεια ανεμομέτρου, που τοποθετείται κοντά στο εμπόδιο.
- *Ορεογραφία:* Απαραίτητη για την εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας του ανέμου είναι η ορεογραφία. Η ορεογραφία περιγράφεται με χάρτες, οι οποίοι παρουσιάζουν τις υψομετρικές καμπύλες του εδάφους μιας περιοχής. Οι υψομετρικές μεταβολές του εδάφους (με σημείο αναφοράς των μετρήσεων την επιφάνεια της θάλασσας) μπορούν να αποτυπωθούν ψηφιακά στους "διανυσματικούς χάρτες", που περιέχουν τις (x,y)-συντεταγμένες και το υψόμετρο των υψομετρικών καμπύλων.

Με σκοπό την περιγραφή των επιδράσεων της ορεογραφίας στην πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας, διακρίνουμε τις περιοχές, ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους, σε τρεις κατηγορίες: επίπεδες, με λόφους και περιοχές με βουνά. Ο τρόπος που επηρεάζει η μορφολογία του εδάφους τη ροή του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο είναι απαραίτητο να αναλυθεί, αφού ο βαθμός ακρίβειας της εκτίμησης της αιολικής ενέργειας είναι ανάλογη με την πολυπλοκότητα της περιοχής του αιολικού πάρκου.

2.2.1.3 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου

Η αδιάκοπη μεταβολή της μορφής και της φυσικής κατάστασης των στρωμάτων της ατμόσφαιρας, έχει σαν αποτέλεσμα η συμπεριφορά του ανέμου να είναι διακοπτόμενη και έντονα μεταβαλλόμενη. Η ανάλυση των χρονοσειρών της

ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου έχει αποδείξει ότι τυχαία διαστήματα νηνεμίας εμφανίζονται τόσο σε ωριαία όσο και σε ημερήσια βάση. Η εμφάνιση των διαστημάτων, στα οποία μεταβάλλεται απότομα τόσο η ταχύτητα του ανέμου όσο και η διεύθυνσή του, κάνει πολύ δύσκολο τον υπολογισμό των στατιστικών ιδιοτήτων των χρονοσειρών του ανέμου και την μοντελοποίησή του. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός κατάλληλου στατιστικού μοντέλου, για την περιγραφή της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου. Από τις μελέτες που έγιναν σε διάφορες τοποθεσίες, προκύπτει ότι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου προσεγγίζεται καλύτερα με την κατανομή Weibull ^[33].

Γενικά, η κατανομή Weibull είναι ασύμμετρη και περιγράφεται με δύο παραμέτρους, όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$f(u) = \left(\frac{k_w}{c_w}\right) \left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right)$$

Η παράμετρος k_w καθορίζει τη μορφή της κατανομής και η παράμετρος c_w καθορίζει το βαθμό της κατανομής, γι' αυτό και ονομάζονται συντελεστές σχήματος και κλίμακας της κατανομής αντίστοιχα. Ο συντελεστής κλίμακας c_w καθορίζει τη μέση ταχύτητα ανέμου και μετράται σε m/s, ενώ ο συντελεστής σχήματος k_w συνήθως παίρνει τιμές από 1,5 έως 2,5. Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1,5 και 2,0.

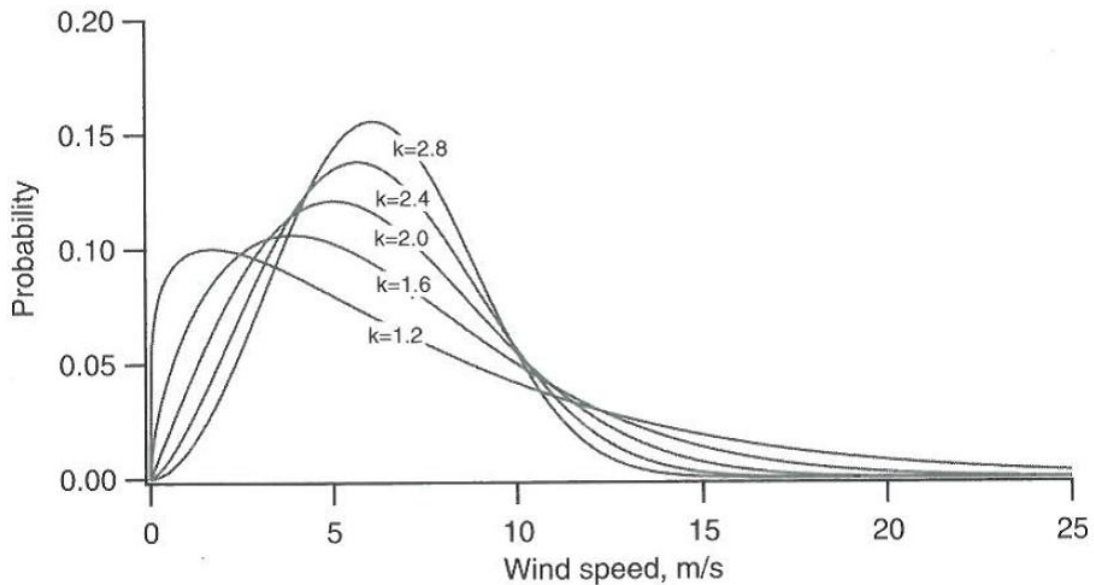
Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες υπολογίζονται οι δύο αυτοί παράμετροι, όπως είναι η μέθοδος των ορμών ή η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας. Μπορεί όμως εύκολα να υπολογιστεί, μετασχηματίζοντας την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας $F(u)$, λογαριθμίζοντας τα δύο μέλη της δύο φορές:

$$\ln[-\ln(1 - F(u))] = k_w \ln(u) - k_w \ln(c_w)$$

$F(u)$ είναι η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας, που ορίζεται από τον τύπο:

$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right]$$

Γενικά, για την εκτίμηση των παραμέτρων k_w και c_w , χρειάζονται δεδομένα ταχύτητας του ανέμου, τα οποία να καλύπτουν περίοδο αρκετών χρόνων ^[23].



Σχήμα 2.9: Η Weibull συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για διάφορους συντελεστές σχήματος k , με συντελεστή κλίμακας $c = 6 \text{ m/s}$

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull εν γένει είναι ασύμμετρη από τη δεξιά πλευρά, κάτι που δείχνει ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι πιο σπάνιοι από τους μέτριους και ασθενείς ανέμους. Επίσης, τα χαρακτηριστικά του ανέμου αλλάζουν χρόνο με τον χρόνο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους της κατανομής. Έτσι, όλη η πληροφορία της συμπεριφοράς του ανέμου συγκεντρώνεται σε αυτές, σε συνάρτηση βέβαια και με τη διεύθυνση του ανέμου.

Η στατιστική ανάλυση του ανέμου, και συγκεκριμένα ο καθορισμός των παραμέτρων της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου, είναι ο καταλληλότερος τρόπος για τη μελέτη του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής, στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο. Σε άλλες περιπτώσεις, βοηθάει τους μηχανικούς να βελτιώσουν τον σχεδιασμό των Α/Γ και να προβλέψουν τα οικονομικά οφέλη ενός αιολικού πάρκου.

2.2.2 Μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια

2.2.2.1 Η θεωρητική μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια

Η αιολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την κινητική ενέργεια του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) αποτελούν το μέσο της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία ονομάζεται και αιολική ενέργεια. Οι Α/Γ λαμβάνουν την ενέργεια του ανέμου μέσω της έλικας (συνήθως τριπτέρης). Η έλικα αποδίδει το απαραίτητο μηχανικό έργο στο δρομέα της ανεμογεννήτριας, περιστρέφοντάς τον, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική. Η σχέση που συνδέει την ενέργεια του ανέμου με την έξοδο μίας Α/Γ, δίνεται από τον τύπο:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho A_r C_p u^3$$

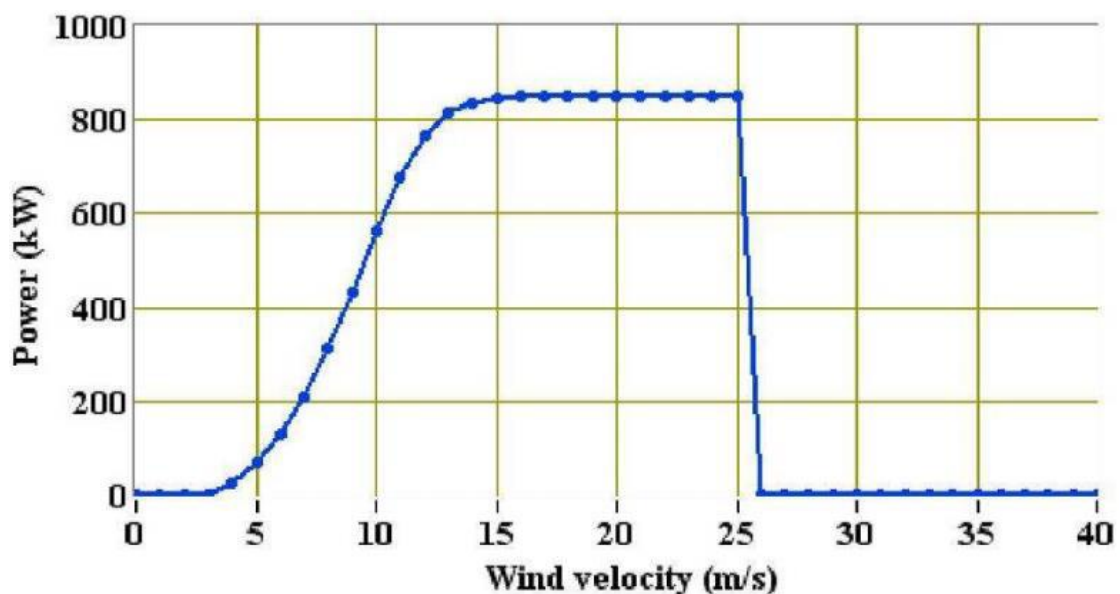
όπου:

- u είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης μια δεδομένη χρονική στιγμή,
- ρ είναι η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και
- A_r είναι η περιοχή (εμβαδόν) σάρωσης της έλικας της Α/Γ ($A = \pi R^2$, όπου R η ακτίνα της έλικας).

Η ποσότητα C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής της ισχύος και καθορίζει την απόδοση της Α/Γ. Ο συντελεστής C_p εξαρτάται από τη γωνία της έλικας και είναι ανάλογη με τον λόγο της ταχύτητας του άκρου της έλικας και της ταχύτητας του ανέμου. Η μέγιστη τιμή του C_p καθορίζεται από το όριο Betz, που ισούται με 16/27 και αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από τον άνεμο, όταν πέφτει κάθετα στο επίπεδο της έλικας. Στην πράξη, ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p παίρνει πολύ μικρότερες τιμές από το όριο του Betz, λόγω των αεροδυναμικών απωλειών της έλικας και των μηχανικών απωλειών της Α/Γ. Ο συντελεστής C_p μίας καλά σχεδιασμένης Α/Γ, είναι περίπου 0.35 [12].

2.2.2.2 Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας από τον κατασκευαστή

Δεδομένου του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p και με προσδιορισμένη την ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του δρομέα της Α/Γ, μπορεί να εκτιμηθεί η παραγόμενη από αυτήν ισχύ. Η γραφική παράσταση της εξόδου της Α/Γ για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται καμπύλη ισχύος και δίνεται από τον κατασκευαστή, καθώς είναι χαρακτηριστική για κάθε ανεμογεννήτρια. Στη συνέχεια παρατίθεται η καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.10: Η καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ έχει την παραπάνω μορφή ανεξάρτητα από τον τύπο της και παρέχεται από τον κατασκευαστή της με τη μορφή εξίσωσης ή με τη μορφή ενός πίνακα, όπου για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου δίνεται η αντίστοιχη παραγωγή της Α/Γ. Από την παραπάνω καμπύλη ισχύος, παρατηρείται ότι μία Α/Γ παράγει ισχύ μέσα από καθορισμένα όρια της ταχύτητας του ανέμου, ενώ έξω από τα όρια αυτά η παραγωγή της ισχύος είναι μηδενική. Το κάτω όριο ταχύτητας ανέμου, πάνω από το οποίο μία Α/Γ αρχίζει να παράγει ισχύ, ονομάζεται όριο διασύνδεσης (cut-in wind speed) της Α/Γ και αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανέμου που ξεπερνάει τις τριβές και τη μηχανική αντίδραση της Α/Γ (3-5m/sec περίπου). Από την άλλη, η λειτουργία μίας Α/Γ διακόπτεται, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι τόσο ισχυρή, που μπορεί να αποφέρει σοβαρές μηχανικές καταπονήσεις. Το άνω όριο αυτό της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται όριο αποκοπής (cut-off wind speed) και κυμαίνεται από 25 μέχρι 30m/s. Επιπλέον, μία Α/Γ παράγει την ονομαστική της τιμή ισχύος, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει μία ορισμένη τιμή, που και αυτή είναι χαρακτηριστική στην καμπύλη ισχύος. Η ταχύτητα αυτή είναι η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου και παίρνει τιμές από 12 μέχρι 16m/s. Έτσι, είναι προφανές πως η Α/Γ παράγει την ονομαστική της τιμή όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται μεταξύ της ονομαστικής της τιμής και του ορίου αποκοπής.

Παρατηρώντας την καμπύλη ισχύος μιας τυπικής Α/Γ, προκύπτει ότι στο διάστημα ταχυτήτων ανέμου μεταξύ του ορίου διασύνδεσης και της ονομαστικής ταχύτητας, η παραγωγή ισχύος αυξάνεται απότομα και μη γραμμικά (κυβικά ως προς την ταχύτητα ανέμου). Παράλληλα, από τη μορφή της κατανομής Weibull παρατηρούμε ότι η συχνότητα εμφάνισης των ασθενών και μέτριων ανέμων, που αντιστοιχούν στο παραπάνω διάστημα των τιμών της ταχύτητας και κατ' επέκταση στα χαμηλότερα και πιο απότομα τμήματα της καμπύλης ισχύος, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των ισχυρών. Με αυτόν τον τρόπο οι μικρές μεταβολές της ταχύτητας των ασθενών ή των μέτριων ανέμων οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές της αιολικής παραγωγής. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός της μεγάλης συχνότητας των ανέμων, που αντιστοιχούν στα μη γραμμικά και απότομα τμήματα της καμπύλης ισχύος, με την έντονη μεταβλητότητα του ανέμου, κάνει το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής ιδιαίτερα περίπλοκο ^[23].

Σημειώνεται πως η μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ, με τη βοήθεια της καμπύλης ισχύος που λαμβάνεται από τον κατασκευαστή της Α/Γ, πρέπει σε κάθε περίπτωση να ληφθεί ως θεωρητική, αφού προϋποθέτει την παραδοχή πως η τιμή της ταχύτητας που εφαρμόζεται, είναι αυτή στο ύψος του δρομέα και σταθερή σε όλο το επίπεδο της έλικας. Η παραγωγή ωστόσο μίας Α/Γ, που περιέχεται μαζί με άλλες σε ένα αιολικό πάρκο, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα η επίδραση σκίασης ή κύματος που οδηγεί στην απόκλιση της πραγματικής από τη θεωρητική τιμή.

2.3 Αριθμητικές προβλέψεις καιρού

Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού (Numerical Weather Prediction – NWP) χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, καθώς επίσης και διάφορες υπολογιστικές τεχνικές, προκειμένου να προβλέψουν τον καιρό λαμβάνοντας υπόψη και τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες. Είναι προφανές πως η παραγωγή της αιολικής ισχύος έχει άμεση σχέση με τις καιρικές συνθήκες, συνεπώς το πρώτο βήμα για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών στο επίπεδο του αιολικού πάρκου.

2.3.1 Γενικά

Οι ρίζες της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού εντοπίζονται στη δουλειά του Wilhelm Bjerknes, ενός Νορβηγού φυσικού που θεωρείται ο πατέρας της σύγχρονης μετεωρολογίας. Ο Bjerknes δημοσίευσε το 1904 μια εργασία, στην οποία ανέφερε ότι ήταν δυνατό να προβλέψει τον καιρό λύνοντας ένα σύστημα μη-γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Ένας Βρετανός μαθηματικός, ο Lewis Fry Richardson, αφιέρωσε τρία χρόνια στην ανάπτυξη των τεχνικών και των διαδικασιών του Bjerknes ώστε να λύσει αυτές τις εξισώσεις. Ο Richardson έκανε μια πρόγνωση για τις αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης σε ένα συγκεκριμένο σημείο για ένα διάστημα έξι ωρών. Ο υπολογισμός αυτός είχε διάρκεια έξι εβδομάδων, αλλά τα αποτελέσματα της πρόγνωσης ήταν σαφώς μη ρεαλιστικά. Εν τούτοις, οι προσπάθειες αυτές αποτέλεσαν το έναυσμα για την πρόβλεψη του καιρού στο μέλλον, καθώς η χρήση των μαθηματικών στον τομέα αυτόν αναπτύχθηκε στη διάρκεια των χρόνων.

Αρκετά χρόνια αργότερα, ο John von Neumann, δημιουργός του πρώτου υπολογιστή ENIAC, αναγνώρισε το πρόβλημα της πρόγνωσης του καιρού ως κατάλληλο για επίλυση στο υπολογιστικό του αυτό σύστημα. Έτσι, το 1948, συνάθροισε μια ομάδα θεωρητικών μετεωρολόγων στο Institute of Advanced Study στο Princeton του New Jersey. Επικεφαλής της ομάδας ήταν ο Jule Charney, που είχε ασχοληθεί εκτεταμένα με την ανάπτυξη ενός απλοποιημένου, φιλτραρισμένου συστήματος εξισώσεων για την πρόβλεψη του καιρού. Η ομάδα του δημιούργησε ένα επιτυχημένο μαθηματικό μοντέλο της ατμόσφαιρας, αποδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Μέχρι το 1954, τόσο η ικανότητα του μοντέλου όσο και η υπολογιστική ισχύς είχαν αναπτυχθεί σε τέτοιο σημείο που η δυνατότητα λειτουργικών αριθμητικών προβλέψεων καιρού σε πραγματικό χρόνο λαμβανόταν σοβαρά υπόψη στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Στις Η.Π.Α. τελικά δημιουργήθηκε και οργανώθηκε η κοινή Αριθμητική Μονάδα Πρόγνωσης Καιρού (JNWPU), ένα κοινό πρόγραμμα από την Πολεμική Αεροπορία, το Ναυτικό και τη Μετεωρολογική Υπηρεσία, με σκοπό την εφαρμογή της αναπτυσσόμενης τεχνολογίας των υπολογιστών στη λειτουργική παραγωγή προβλέψεων καιρού ^[34].

Καθώς οι υπολογιστές γίνονταν πιο ισχυροί, το μέγεθος των αρχικών συνόλων δεδομένων αυξήθηκε και νεότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα αναπτύχθηκαν για να επωφεληθούν από την συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ. Αυτά τα νεότερα μοντέλα περιλάμβαναν περισσότερες φυσικές διεργασίες στις απλουστεύσεις των εξισώσεων της κίνησης σε αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας. Το 1966, η Δυτική Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες άρχισαν να παράγουν επιχειρησιακές προβλέψεις βασιζόμενες σε μοντέλα εξισώσεων πρώτου βαθμού και ακολούθησαν το Ηνωμένο Βασίλειο το 1972 και η Αυστραλία το 1977 ^[35]. Η ανάπτυξη μοντέλων περιορισμένων περιοχών (περιφερειακών) διευκόλυνε την πρόβλεψη της πορείας των τροπικών κυκλώνων καθώς και την ποιότητα του αέρα στις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 τα μοντέλα άρχισαν να περιλαμβάνουν τις αλληλεπιδράσεις του εδάφους και της βλάστησης με την ατμόσφαιρα, η οποία οδήγησε σε πιο ρεαλιστικές προβλέψεις.

Η παραγωγή των μοντέλων πρόβλεψης με βάση δυναμικής της ατμόσφαιρας δεν είναι σε θέση να επιλύσει κάποιες λεπτομέρειες που αφορούν τις καιρικές συνθήκες κοντά στην επιφάνεια της Γης. Ως εκ τούτου, μια στατιστική σχέση μεταξύ των συμπερασμάτων ενός αριθμητικού μοντέλου και των επακόλουθων συνθηκών στο έδαφος αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 και του 1980, που είναι γνωστή ως στατιστικά αποτελέσματα του μοντέλου (MOS). Με αφετηρία το 1990, το σύνολο των μοντέλων πρόβλεψης έχει χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στον καθορισμό της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, καθώς και να επεκτείνει το χρονικό ορίζοντα στον οποίο η αριθμητική πρόγνωση του καιρού είναι βιώσιμη βαθύτερα στο μέλλον από ό,τι άλλο είναι δυνατό ^[36].

2.3.2 Μοντέλα NWP

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η παραγωγή αιολικής ισχύος έχει άμεση σχέση με τις καιρικές συνθήκες, συνεπώς ο ρόλος των μοντέλων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών. Για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής έχει ιδιαίτερη αξία η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών αυτών μεταβλητών στο επίπεδο του αιολικού πάρκου. Έτσι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι δεδομένα εισόδου για τα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Η ανάπτυξη των αριθμητικών προβλέψεων καιρού καθίσταται δυνατή και υποστηρίζεται από τη γνώση μας για την ατμόσφαιρα. Η ατμόσφαιρα είναι ένα ρευστό. Ως εκ τούτου, η ιδέα της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού είναι να δοκιμαστεί η κατάσταση του ρευστού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις της ρευστοδυναμικής και θερμοδυναμικής, για να εκτιμηθεί η κατάσταση του ρευστού σε κάποια χρονική στιγμή στο μέλλον. Η διαδικασία της εισαγωγής των δεδομένων της παρατήρησης μέσα στο μοντέλο για να δημιουργηθούν οι αρχικές συνθήκες ονομάζεται εκκίνηση. Στην ξηρά, διαθέσιμοι

χάρτες εδάφους με αναλύσεις κάτω από 1 χιλιόμετρο (0,6mi) σε παγκόσμιο επίπεδο χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν τη μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας μέσα σε περιοχές με τραχιά τοπογραφία, προκειμένου να απεικονίζουν καλύτερα χαρακτηριστικά, όπως τους καθοδικούς ανέμους, τα κύματα των βουνών και τη σχετική νέφωση που επηρεάζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Τα κύρια δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της υπαίθρου είναι παρατηρήσεις από συσκευές (που ονομάζεται ραδιοβολίδες) σε μετεωρολογικά μπαλόνια που μετρούν ποικίλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους και τις μεταδίδουν σε ένα σταθερό δέκτη, καθώς και από μετεωρολογικούς δορυφόρους. Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός ενεργεί για την τυποποίηση των οργάνων, παρατηρώντας τις πρακτικές και το χρονοδιάγραμμα αυτών των παρατηρήσεων σε όλο τον κόσμο. Οι σταθμοί είτε αναφέρουν ωριαίες METAR εκθέσεις είτε κάθε έξι ώρες SYNOP εκθέσεις. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι ασυνήθιστα ευρύχωρες, έτσι λοιπόν υποβάλλονται σε επεξεργασία με δεδομένα αφομοίωσης και μεθόδους αντικειμενικής ανάλυσης, οι οποίες εκτελούν έλεγχο ποιότητας και αποκτούν χρησιμότητα σε περιοχές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μοντέλα μαθηματικών αλγορίθμων. Μερικά παγκόσμια μοντέλα χρησιμοποιούν πεπερασμένες διαφορές, κατά τις οποίες ο κόσμος αναπαρίσταται ως διακριτά σημεία πάνω σε ένα πλέγμα γεωγραφικού πλάτους και μήκους ανά τακτά διαστήματα. Άλλα μοντέλα χρησιμοποιούν φασματικές μεθόδους που αναλύονται σε μια ευρεία κλίμακα μηκών κύματος. Τα δεδομένα στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ως το σημείο εκκίνησης για μια πρόβλεψη.

Μια ποικιλία μεθόδων χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων παρατήρησης για χρήση σε αριθμητικά μοντέλα. Περιοχές εκτοξεύουν ραδιοβολίδες σε μετεωρολογικά μπαλόνια τα οποία ανυψώνονται μέσω της τροπόσφαιρας και κυλούν στη στρατόσφαιρα. Οι πληροφορίες από μετεωρολογικούς δορυφόρους χρησιμοποιούνται εκεί όπου δεν είναι διαθέσιμες παραδοσιακές πηγές δεδομένων. Το εμπόριο παρέχει αναφορές των πιλότων σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής των αεροσκαφών και των πλοιάρχων για όλη τη διάρκεια των διαδρομών των πλοίων. Τα ερευνητικά προγράμματα χρησιμοποιούν αναγνωριστικά αεροσκάφη, τα οποία πετούν μέσα και γύρω από τα καιρικά συστήματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως οι τροπικοί κυκλώνες. Τα αναγνωριστικά αεροσκάφη επίσης πετούν πάνω από τους ανοικτούς ωκεανούς κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου, μέσα σε συστήματα που προκαλούν σημαντικές αβεβαιότητες στην καθοδήγηση της πρόβλεψης ή είναι απρόσμενο να έχουν υψηλά αποτελέσματα, από τρεις έως επτά ημέρες στο μέλλον, πάνω από κάποια ήπειρο. Ο θαλάσσιος πάγος άρχισε να εισάγεται στα μοντέλα πρόβλεψης το 1971. Οι προσπάθειες για τη συμμετοχή επιφανειακής θερμοκρασίας της θάλασσας στην εκκίνηση του μοντέλου άρχισε το 1972, λόγω του ρόλου της στη διαμόρφωση των καιρικών συνθηκών σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη του Ειρηνικού.

Ένα μοντέλο αριθμητικής πρόβλεψης είναι ένα πρόγραμμα υπολογιστή που παράγει μετεωρολογικές πληροφορίες για μελλοντικές εποχές σε δεδομένες τοποθεσίες και γεωγραφικά πλάτη. Εντός κάθε σύγχρονου μοντέλου υπάρχει ένα σύνολο εξισώσεων, γνωστό ως εξισώσεις πρώτου βαθμού, που χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τη μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας. Αυτές οι εξισώσεις μαζί

με τον ιδανικό νόμο των αερίων χρησιμοποιούνται για να εξαχθεί η πυκνότητα, η πίεση, τα δυναμικά πεδία της θερμοκρασίας και το διανυσματικό πεδίο της ταχύτητας του αέρα της ατμόσφαιρας, μέσα στο χρόνο. Επιπλέον, εξισώσεις μεταφοράς ρύπων και άλλα αερολύματα περιλαμβάνονται σε ορισμένες πρώτου βαθμού εξισώσεις μοντέλων υψηλής ανάλυσης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες είναι αδύνατο να λυθούν ακριβώς με αναλυτικές μεθόδους, με εξαίρεση λίγες εξιδανικευμένες περιπτώσεις. Επομένως, οι αριθμητικές μέθοδοι επιδέχονται κατά προσέγγιση λύσεις. Διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους λύσης: ορισμένα παγκόσμια μοντέλα και σχεδόν όλα τα τοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και για τις τρεις διαστάσεις του χώρου, ενώ άλλα παγκόσμια μοντέλα και μερικά τοπικά μοντέλα χρησιμοποιούν φασματικές μεθόδους για τις οριζόντιες διαστάσεις και μεθόδους πεπερασμένων διαφορών για τις κάθετες. Αυτές οι εξισώσεις εισάγονται από τα δεδομένα της ανάλυσης και προσδιορίζονται οι ρυθμοί μεταβολής. Αυτά τα ποσοστά μεταβολής προβλέπουν την κατάσταση της ατμόσφαιρας σε σύντομο χρονικό διάστημα στο μέλλον. Η αύξηση του χρόνου για την πρόβλεψη αυτή ονομάζεται χρονικό βήμα. Οι εξισώσεις τότε εφαρμόζονται σε αυτή τη νέα ατμοσφαιρική κατάσταση για να βρουν νέους ρυθμούς μεταβολής, και αυτά τα νέα ποσοστά μεταβολής προβλέπουν την ατμόσφαιρα σε ένα περαιτέρω χρονικό βήμα στο μέλλον. Αυτή η αναβάθμιση του χρόνου επαναλαμβάνεται, έως ότου η λύση φτάσει στην επιθυμητή ώρα πρόβλεψης. Το μέγεθος του χρονικού διαστήματος, που επιλέγεται εντός του μοντέλου, σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ των σημείων για το υπολογιστικό πλέγμα και επιλέγεται για να διατηρηθεί η αριθμητική σταθερότητα. Τα χρονικά διαστήματα για τα παγκόσμια μοντέλα είναι της τάξης των δεκάδων λεπτών, ενώ τα χρονικά διαστήματα για τα τοπικά μοντέλα είναι μεταξύ ενός και τεσσάρων λεπτών. Τα παγκόσμια μοντέλα τρέχουν σε διάφορες χρονικές στιγμές στο μέλλον. Το ενοποιημένο μοντέλο UKMET λειτουργεί για έξι ημέρες στο μέλλον, ενώ το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προγνώσεων και το μοντέλο Ολοκληρωμένου Συστήματος πρόγνωσης Περιβάλλοντος του Καναδά, Global Environmental Multiscale, τρέχουν για δέκα ημέρες στο μέλλον. Παράλληλα, το Παγκόσμιο Σύστημα Πρόγνωσης, που διευθύνεται από το Κέντρο Περιβαλλοντικής Μοντελοποίησης λειτουργεί με χρονικό ορίζοντα δεκαέξι ημερών. Το οπτικό αποτέλεσμα που παράγεται από μια λύση μοντέλου είναι γνωστό ως προγνωστικός χάρτης, ή prog.

Οι χειρισμοί τεράστιου αριθμού δεδομένων και η εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών που είναι απαραίτητοι στη σύγχρονη αριθμητική πρόγνωση του καιρού απαιτούν μερικούς από τους πιο ισχυρούς υπερυπολογιστές στον κόσμο. Ακόμη και με την αυξανόμενη δύναμη των υπερυπολογιστών, η ικανότητα πρόβλεψης των αριθμητικών μοντέλων καιρού εκτείνεται σε περίπου δέκα μόνο μέρες. Παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων περιλαμβάνουν την πυκνότητα και την ποιότητα των παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται ως βάση για τις προβλέψεις, σε συνδυασμό με τις αδυναμίες των ίδιων των αριθμητικών μοντέλων. Παρόλο που έχουν αναπτυχθεί τεχνικές για τα ακόλουθα της διαδικασίας, όπως οι στατιστικές μοντέλου παραγωγής (MOS) για να βελτιωθεί ο χειρισμός των

σφαλμάτων στις αριθμητικές προβλέψεις, ένα πιο θεμελιώδες πρόβλημα έγκειται στην χαοτική φύση των διαφορικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν την ατμόσφαιρα. Είναι αδύνατο να λυθούν αυτές οι εξισώσεις ακριβώς, ενώ τα μικρά λάθη μεγαλώνουν με το χρόνο (διπλασιαζόμενα περίπου κάθε πέντε ημέρες). Επιπλέον, οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο πρέπει να συμπληρωθούν με παραμέτρους για την ηλιακή ακτινοβολία, την πορεία της υγρασίας (σύννεφα και βροχοπτώσεις), της ανταλλαγή της θερμοκρασίας, το έδαφος, τη βλάστηση, τα επιφανειακά ύδατα, καθώς και τις επιπτώσεις τους στο έδαφος. Σε μια προσπάθεια να αξιολογήσουν το μεγάλο ποσό της εγγενούς αβεβαιότητας που παραμένει στις αριθμητικές προβλέψεις, ένα σύνολο προβλέψεων έχουν χρησιμοποιηθεί από τη δεκαετία του 1990, για να βοηθήσει να μετρηθεί ακριβώς η αξιοπιστία των προγνώσεων και να αποκτηθούν χρήσιμα αποτελέσματα για το απώτερο μέλλον. Η προσέγγιση αυτή αναλύει πολλαπλές προβλέψεις που δημιουργήθηκαν με ένα επιμέρους μοντέλο πρόβλεψης ή πολλαπλά μοντέλα.

2.3.3 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις

Τα παγκόσμια μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού συνιστούν τον πυρήνα των μετεωρολογικών προβλέψεων, καθώς διεξάγουν στο μεγαλύτερο βαθμό τις διαδικασίες αφομοίωσης δεδομένων, παράγοντας έτσι το σύνολο των αρχικών και συνοριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από πιο τοπικά μοντέλα. Πιο πρόσφατα, αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως κύρια πηγή κλιματολογικών δεδομένων, μέσω της διεξαγωγής παγκόσμιων τρισδιάστατων επαν-αναλύσεων, από φορείς όπως το Εθνικό Κέντρο για Περιβαλλοντικές Προβλέψεις (NCEP) (*Kalnay et al.*) και το Ευρωπαϊκό Κέντρο για Μεσοπρόθεσμες Προβλέψεις Καιρού ECMWF (*Uppala et al.*). Τα σύνολα δεδομένων που προκύπτουν από αυτές τις επαν-αναλύσεις αποτελούνται από τα αποτελέσματα του συστήματος αφομοίωσης δεδομένων μέσω ενός εξειδικευμένου μοντέλου, ενώ οι λειτουργικές αναλύσεις προκύπτουν από διαφορετικές κυκλοφορίες των μοντέλων, καθώς αυτά ενημερώνονται τακτικά. Εξ' αυτού είναι γενικά αποδεκτό ότι οι συγκεκριμένες επαν-αναλύσεις παρέχουν την πιο αξιόπιστη διαθέσιμη, τρισδιάστατου πλέγματος, άποψη της γήινης ατμόσφαιρας.

2.3.3.1 Αφομοίωση δεδομένων για την αρχικοποίηση των μοντέλων

Κάθε μετεωρολογικό μοντέλο απαιτεί κάποιας μορφής αφομοίωση δεδομένων, προκειμένου να προσδιορίσει την αρχική του κατάσταση. Στα σύγχρονα παγκόσμια μοντέλα η αφομοίωση δεδομένων αποτελεί μία από τις κυριότερες επιτυχίες του μοντέλου, ιδιαίτερα αν αναλογιστούμε ότι τα λάθη στην αρχικοποίηση του μοντέλου αναγνωρίζονται γενικά ως ο μεγαλύτερος κίνδυνος για αβεβαιότητα των προβλέψεων που παράγει. Λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη την τεράστια ποσότητα των διαθέσιμων για αφομοίωση δεδομένων, τα οποία προέρχονται από ραδιοβολίδες, δορυφόρους,

εμπορικά αεροπλάνα, σταθμούς στην επιφάνεια της γης κλπ., οι διαδικασίες αφομοίωσης δεδομένων είναι δυνατόν να διεξαχθούν μόνο σε μεγάλους μετεωρολογικούς σταθμούς, που έχουν πρόσβαση στα δίκτυα διανομής πληροφοριών του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (World Meteorological Organization – WMO), και τα τεχνολογικά εφόδια είναι δυνατό να διαχειρίζονται την τεράστια ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Παλαιότερα συστήματα NWP χρησιμοποιούσαν απλουστευμένους αλγόριθμους αφομοίωσης δεδομένων, οι οποίοι παρενέβαλλαν παρατηρήσεις στο πλέγμα του μοντέλου, εφαρμόζοντας ταυτόχρονα κάποια φίλτρα και περιορισμούς για την ισορροπία μεταξύ διαφορετικών πεδίων, όλα σχεδιασμένα έτσι ώστε να μειώνουν το θόρυβο στην αρχική κατάσταση. Σύγχρονοι κώδικες αφομοίωσης δεδομένων (όπως μέθοδοι 3D-VAR και 4D-VAR των *Lewis* και *Derber*) υιοθετούν μια εναλλακτική προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της αρχικής κατάστασης, συχνά αφομοιώνοντας παρατηρήσεις εντός ενός χρονικού διαστήματος. Η προσέγγιση αυτή είναι αρκετά κατάλληλη για τα σύγχρονα συστήματα αφομοίωσης, με δυνατότητες ανίχνευσης παρατηρήσεων από μακριά, οι οποίες ενημερώνονται τακτικά (π.χ. ανά 15 λεπτά). Οι περιορισμοί που επιβάλλονται από πιο σύγχρονα συστήματα δεδομένων ενσωματώνουν τις φυσικές ισορροπίες που συμπεριλαμβάνονται στις εξισώσεις των μοντέλων, καθώς οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν τις προβλέψεις άλλων μοντέλων ως αρχική εκτίμηση της αρχικής τους κατάστασης.

Το δίκτυο ραδιοβόλισης ήταν για πολλές δεκαετίες η "ραχοκοκαλιά" των παρακολουθήσεων της ατμόσφαιρας, παράγοντας τις μόνες άμεσες παρατηρήσεις για την τρισδιάστατη κατάσταση αυτής. Μαζί με ένα αρκετά πιο πυκνό δίκτυο σταθμών της επιφάνειας, συναποτελούν το πρωταρχικό δίκτυο που δίνει σε παγκόσμια κλίμακα συγχρονισμένες παρατηρήσεις σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Ωστόσο, το πρόβλημα με το δίκτυο αυτό είναι η μεγάλη χωρική ετερογένεια του, με μεγάλες εκτάσεις κυρίως πάνω από ωκεανούς πρακτικά να μην παρατηρούνται. Λόγω αυτών των δυσχερειών άρχισαν σταδιακά να χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό δεδομένα διαφορετικής φύσης, όπως δεδομένα από δορυφόρους, στη διαδικασία της αφομοίωσης. Οι παρατηρήσεις από δορυφόρους είναι σήμερα η κύρια πηγή δεδομένων, αν και τα παραγόμενα δεδομένα είναι μεγάλης κλίμακας υπό την έννοια ότι είναι πιο εύχρηστα για τα παγκόσμια μοντέλα κα λιγότερο για τα τοπικά. Υπάρχουν ωστόσο πιθανές πηγές δεδομένων για μικρότερης κλίμακας μοντέλα, όπως εικόνες από ραντάρ κ.ά., οι οποίες μπορεί σύντομα να φανούν χρήσιμες για τα τοπικής χρήσης μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

2.3.3.2 Τυποποίηση των μοντέλων (Model formulation)

Η πλειοψηφία των παγκόσμιων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με αξιοσημείωτη εξαίρεση το μοντέλο UK Met Office, χρησιμοποιούν μια μέθοδο φασματικής διακριτοποίησης της υδρόγειου σφαίρας, αναπαριστώντας τα ατμοσφαιρικά πεδία ως άθροισμα σφαιρικών συνιστωσών. Ο αριθμός των όρων που συμμετέχουν στο άθροισμα αυτό καθορίζει την τάξη της προσέγγισης που σχετίζεται άμεσα με τη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Ωστόσο, επειδή πολλές από τις

διαδικασίες του μοντέλου υπολογίζονται στο φυσικό και όχι στο φασματικό πεδίο, το μοντέλο υπολογίζει τους ευθείς και αντίστροφους μετασχηματισμούς σε κάθε χρονικό βήμα. Τα περισσότερα παγκόσμια μοντέλα χρησιμοποιούν μια κατακόρυφη συντεταγμένη, διαμορφωμένη ανάλογα με την πίεση, σε ένα σιγμοειδές κατά Phillips σύστημα που ακολουθεί την επιφάνεια της γης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα υπολογισμού των επιφανειακών συννοριακών συνθηκών για το διάνυσμα του ανέμου. Η χρήση της πίεσης για τον καθορισμό της κατακόρυφης συνιστώσας απλοποιεί τους θερμοδυναμικούς υπολογισμούς και συναντάται συχνά στη μετεωρολογική μοντελοποίηση. Η προσέγγιση ταιριάζει πολύ στα υδροστατικά μοντέλα (πρωτογενείς εξισώσεις), ενώ είναι εφικτή και για τα μη υδροστατικά ^{[37],[38]}.

Τα παγκόσμια μοντέλα πρωτογενών εξισώσεων ενσωματώνουν προγνωστικές εξισώσεις για τις οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου, για την επιφανειακή πίεση, για μια θερμοδυναμική μεταβλητή (θερμοκρασία ή πιθανή θερμοκρασία) και τουλάχιστον για τους υδρατμούς, αν δεν ενσωματώσουν τις υπόλοιπες "αποθήκες" νερού, όπως σύννεφα νερού, πάγο κτλ. Λοιπές μεταβλητές υπολογίζονται από τη σχέση τους με τις παραπάνω, όπως για παράδειγμα η κατακόρυφη ταχύτητα του ανέμου, η οποία δεν είναι δυνατόν να υπολογιστεί άμεσα σε μια υδροστατική προσέγγιση και υπολογίζεται εν τέλει μέσω της ολοκλήρωσης της εξίσωσης συνέχειας.

Τα μοντέλα διαφέρουν επί της ουσίας στις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούν. Οι μη γραμμικοί όροι για την κίνηση των αέριων μαζών στις διάφορες προγνωστικές εξισώσεις δεν είναι επαρκείς για υπολογισμό στο φασματικό πεδίο και επιλύονται στο φυσικό πεδίο, στο οποίο τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά σχήματα διαφορικών ή ημι-λαγκρανζιανές προσεγγίσεις. Επιπλέον, η οριζόντια κίνηση αέριων μαζών είναι συχνά η δυναμική διαδικασία που καθορίζει το χρονικό βήμα του μοντέλου και είναι μια κυρίαρχη ατμοσφαιρική διαδικασία. Επομένως, ως συνιστώσα του μοντέλου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορά και την απόδοσή του .

2.3.3.3 Πακέτα φυσικών διεργασιών των μοντέλων

Τα πακέτα φυσικών διεργασιών αποτελούν μια από τις τρεις βασικές συνιστώσες ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Τα πακέτα φυσικών διεργασιών ενός παγκόσμιας κλίμακας μοντέλου περιλαμβάνουν την αναπαράσταση ενός αριθμού διεργασιών, που δεν αναπαρίσταται ρητά μέσω των προγνωστικών εξισώσεων, λόγω της ανάλυσης (resolution) του μοντέλου. Την ίδια στιγμή περιλαμβάνουν υπολογισμούς κάποιων απαραίτητων όρων για τις προγνωστικές εξισώσεις. Τα περιεχόμενα των πακέτων φυσικών διεργασιών μπορεί να ποικίλουν αρκετά επί της ουσίας και κάποια πιο ερευνητικά μοντέλα μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες παραλλαγές για κάθε διαδικασία.

Οι διαδικασίες που θεωρούνται με σκοπό την παραμετροποίηση στα παγκόσμια μοντέλα περιλαμβάνουν: τον στροβιλισμό, τη μετάδοση θερμότητας, αποτελούμενη συχνά από επιφανειακές και βαθιές διατάξεις μετάδοσης, τα σύννεφα και την κατακρήμνιση, την ακτινοβολία και τα κύματα βαρύτητας. Οι στροβιλισμοί και η

επιφανειακή μετάδοση θερμότητας αναπαριστούν διαδικασίες του συνοριακού στρώματος, με σημαντικές συνέπειες στη ροή στα χαμηλά στρώματα. Βέβαια, όταν είναι παρούσες, και οι υπόλοιπες διαδικασίες μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στη ροή αυτή. Το επιφανειακό μοντέλο, το οποίο τεχνικά είναι ένα ανεξάρτητο μοντέλο, μπορεί επίσης να έχει σημαντική επιρροή στις μεταβλητές των χαμηλών στρωμάτων. Γενικά, τα παγκόσμιας κλίμακας μοντέλα αντικρίζουν τις διαφορετικές παραμετροποιήσεις του φυσικού μοντέλου σαν μονοδιάστατα προβλήματα παράλληλα με την κατακόρυφη ανάλυση, χωρίς σαφείς αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γειτονικών κάθετων τομέων ανάλυσης. Η προσέγγιση αυτή είναι δικαιολογημένη, εξαιτίας της τεράστιας ασυμμετρίας μεταξύ των οριζόντιων και των κατακόρυφων αναλύσεων στα παγκόσμια μοντέλα και έχει ως αποτέλεσμα την αξιoσημείωτη ελάττωση του υπολογιστικού κόστους ^[39].

2.3.3.4 Πρότυπα λειτουργίας

Τα παγκόσμιας κλίμακας μοντέλα NWP λειτουργούν 2 ή 4 φορές καθημερινά, χειριζόμενα από ένα μικρό αριθμό πολύ σημαντικών Μετεωρολογικών Υπηρεσιών, όπως οι NCEP και ECMWF, το ναυτικό των Η.Π.Α. και μερικές εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες όπως της Γερμανίας, του Ηνωμένου Βασιλείου, της Γαλλίας, της Ιαπωνίας, της Βραζιλίας και της Ρωσίας. Οι κύριες προβλέψεις αρχίζουν στις 00:00 και 12:00 UTC (Universal Time Coordinated, ή αλλιώς GMT) σε αντιστοιχία με την εκτόξευση της παγκόσμιας ραδιοβολίδας (της μόνης τρισδιάστατης άμεσης παρατήρησης της ατμοσφαιρικής κατάστασης). Επιπρόσθετες προβλέψεις αρχίζουν στις 06:00 και 18:00 UTC. Μάλιστα η πρόβλεψη χρονικού ορίζοντα 10 ημερών του NCEP είναι ελεύθερα διαθέσιμη μέσω του διαδικτύου και χρησιμοποιείται ευρύτατα από μικρότερες μετεωρολογικές υπηρεσίες, πανεπιστήμια και μετεωρολογικές ομάδες σε όλο τον κόσμο.

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι υπηρεσίες ECMWF και NCEP έχουν θεμελιώσει τα πρότυπα για μεσοπρόθεσμες προβλέψεις, οι οποίες ορίζονται ως προβλέψεις για διάστημα από 3 έως 10 ημέρες μπροστά. Και τα δύο κέντρα χρησιμοποιούν ένα παγκόσμιο φασματικό μοντέλο. Σήμερα, το μοντέλο Παγκόσμιου Συστήματος Προβλέψεων (Global Forecast System – GFS) του NCEP διαθέτει οριζόντια ανάλυση της τάξης των 35 χιλιομέτρων, αποτελούμενο από 64 ανομοιόμορφα κατανεμημένα κατακόρυφα επίπεδα. Στην περίπτωση του ECMWF, το μοντέλο IFS (Integrated Forecast System) είναι ένα υψηλής ανάλυσης μοντέλο σε ακτίνα περίπου 25 χιλιομέτρων, με 91 ανομοιόμορφα κατανεμημένα κατακόρυφα επίπεδα. Και τα δύο προαναφερθέντα κέντρα (ECMWF και NCEP) στρέφονται παράλληλα προς ένα υψηλότερης ανάλυσης καθολικό μοντέλο οριζόντιας ανάλυσης, περίπου στα 100 χιλιόμετρα, με ένα σύνολο από 50 χαμηλότερης ανάλυσης προσομοιώσεις, με διαταραγμένη αρχική κατάσταση και στην περίπτωση του ECMWF με διαταραγμένες φυσικές διεργασίες, έχοντας ως σκοπό την αποτίμηση της προβλεψιμότητας της ατμόσφαιρας, αλλά και ενός αντικειμενικού βαθμού αβεβαιότητας για κάθε ξεχωριστή πρόβλεψη.

2.3.4 Τοπικά και μεσαίας κλίμακας μοντέλα

Τα μοντέλα μικρής κλίμακας αναπτύχθηκαν, αρχικά, για την μελέτη των ατμοσφαιρικών διαδικασιών μεσαίας κλίμακας (οριζόντιας κλίμακας 1 έως μερικά εκατοντάδες χιλιόμετρα). Αυτή η κλίμακα περιλαμβάνει πολλά τοπικά καιρικά φαινόμενα, όπως θαλάσσιες αύρες, ρεύματα αέρα στα βουνά και καταιγίδες.

Διάφορα άλλα μοντέλα, που αρχικά αναπτύχθηκαν για έρευνα από διάφορες πανεπιστημιακές ομάδες, κατέληξαν να γίνουν βιώσιμα μοντέλα καιρικών προβλέψεων, από τότε που οι παγκόσμιες προβλέψεις έγιναν ευρέως διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιο μοντέλο είναι το MM5 μοντέλο, που σχεδιάστηκε από το πανεπιστήμιο της Πενσυλβανίας και αργότερα υιοθετήθηκε από το Παγκόσμιο κέντρο Ατμοσφαιρικής Έρευνας (National Center of Atmospheric Research, NCAR), και κατ' επέκταση έγινε ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόβλεψης περιορισμένης εκτάσεως που λειτουργείται από μικρές υπηρεσίες καιρού και πανεπιστημιακές μονάδες. Ακόμα ένα μοντέλο είναι το WRF, ένα μοντέλο νέας γενιάς, μεσαίας κλίμακας, που σχεδιάστηκε συγκεκριμένα για τον υπολογισμό πλατφόρμων, παίρνοντας πρόσφατες και τρέχουσες μετεωρολογικές μελέτες υπόψη. Το WRF έχει δύο βασικές παραλλαγές (τύπου NCAR και NCEP) και περιλαμβάνει πολλούς διακόπτες επιλογής, που παρέχουν πρόσβαση σε προαιρετικές παραμετροποιήσεις και αριθμητικές διατάξεις. Άλλα μοντέλα μεσαίας κλίμακας ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι το Σύστημα Τοπικού Ατμοσφαιρικού Μοντέλου (Regional Atmospheric Modeling System, RAMS), το μοντέλο του Αμερικάνικου Ναυτικού COAMPS, το ερευνητικό μοντέλο MesoNH της Meteo-France και το νέο Ευρωπαϊκό μοντέλο AROME. Το κοινό που έχουν όλα αυτά τα μοντέλα με τα MM5 και WRF είναι η μη υδροστατική ομάδα εξισώσεων.

Αντίθετα με τα παγκόσμια μοντέλα, τα μοντέλα μικρής κλίμακας δεν μπορούν να λειτουργήσουν από μόνα τους. Χρειάζονται οριακές συνθήκες, οι οποίες δίνονται μόνο από παρατηρήσεις ή από παγκόσμια μοντέλα, καθώς και διευκρινισμένες αρχικές συνθήκες, είτε από πρόσθετες παρατηρήσεις είτε από προσθήκες στο στιγμιαίο πλαίσιο ενός παγκοσμίου μοντέλου. Τα περισσότερα μοντέλα μικρής κλίμακας περιλαμβάνουν έναν απλοποιημένο κώδικα αφομοίωσης των δεδομένων, που κάνει την προσθήκη στο πεδίο της αρχικής κατάστασης. Τα μοντέλα αυτά μπορούν ακόμα να αφομοιώσουν χρονοσειρές σημειακών παρατηρήσεων, χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές "ωθήσεως", ενώ μερικά, όπως το MM5 και WRF, μπορούν ακόμα και να περιλάβουν προαιρετικές και εξεζητημένες μεθόδους αφομοίωσης δεδομένων. Παρόλα αυτά, αυτές οι συνιστώσες χρησιμοποιούνται κυρίως για έρευνα.

Όλα τα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού μικρής κλίμακας χρησιμοποιούν συντεταγμένες βασιζόμενες στην υδροστατική προσέγγιση, με απαλοιφή της κάθετης συνιστώσας του ανέμου, κυρίως σε συστήματα βασιζόμενα στην πίεση, ενώ υπάρχουν και μερικά που χρησιμοποιούν κλιμακούμενο γεωμετρικό ύψος. Τα περισσότερα μοντέλα είναι μοντέλα "σημειακού πλέγματος", που χρησιμοποιούν διάφορα πεπερασμένα πλαίσια εξισώσεων, ενώ μερικά παλαιότερα

υδροστατικά μοντέλα χρησιμοποιούν φασματικούς κώδικες, τους οποίους δανείζονται από τα παγκόσμια μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Τα περισσότερα πλέγματα στα τοπικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι δικτυωτά, με χαμηλής ανάλυσης πλέγματα που καλύπτουν όλη την περιοχή, και διαδοχικά πλέγματα υψηλής ανάλυσης για να καλύπτουν όλο και μικρότερα τμήματα της περιοχής. Τα δικτυωτά αυτά πλέγματα προσφέρουν πολύ υψηλή ανάλυση για πολύ μικρές περιοχές με σταδιακή μετάβαση σε μέσου επιπέδου αναλύσεις, μέχρι να συναντήσουν τα όρια των χαμηλών αναλύσεων των παγκοσμίων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Αυτός ο σχεδιασμός είναι πολύ αποτελεσματικός στην μελέτη των ρευμάτων μεσαίας κλίμακας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δικτυωτών πλεγμάτων μπορεί να είναι μονόδρομη (με τις μεγάλες κλίμακες να ωθούν τις μικρές) ή αμφίδρομη. Επειδή το χρονικό βήμα είναι γραμμικό ως προς την ανάλυση, οι περισσότεροι υπολογισμοί γίνονται στο εσωτερικό (υψηλής ανάλυσης) πλέγμα.

Η περιοχή και η ανάλυση ενός τοπικού μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού ρυθμίζεται σύμφωνα με τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους και μερικοί κώδικες μπορεί ακόμη και να λειτουργούν σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα υδροστατικά μοντέλα έχουν σχεδιαστεί για οριζόντια ανάλυση στα 10km, παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για λίγο υψηλότερες αναλύσεις, ενώ από την άλλη μεριά, τα μη υδροστατικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού χρησιμοποιούνται για ακόμα υψηλότερες αναλύσεις. Τεχνικά, η υδροστατική προσέγγιση απαιτεί την αναλογία της υπό μελέτη ατμοσφαιρικής διαδικασίας να είναι μικρή (π.χ. η οριζόντια κλίμακά της να είναι πολύ μεγαλύτερη της κάθετης), μια συνθήκη που, σε γενικές γραμμές, δεν ικανοποιείται στα ρεύματα αέρα μεσαίας κλίμακας, στα εσωτερικά κύματα και στα συστήματα μεταγωγής θερμότητας.

Ενώ τα μη υδροστατικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού βρίσκουν εφαρμογή στα ρεύματα μεσαίας κλίμακας και μερικές φορές και σε μεγαλύτερης κλίμακας χαμηλόβαθμες διαδικασίες, οι περισσότερες φυσικές παραμετροποιήσεις τους έχουν σχεδιαστεί για οριζόντιες κλίμακες των μερικών χιλιομέτρων και άρα μπορεί να μην έχουν ισχύ σε μεγαλύτερες αναλύσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι προσομοιώσεις του 1km ασταθούς οριακού στρώματος ρεύματος αέρα να αποτελέσουν πρόκληση, εξαιτίας της ανεπαρκούς ανταπόκρισης της διάταξης της υπο-πλεγματικής κλίμακας των αναταράξεων του αέρα σε αυτή την ανάλυση.

Οι προσδοκίες για τις καιρικές προβλέψεις μεσαίας κλίμακας και γενικά για όλες τις προβλέψεις υψηλής ανάλυσης ήταν χαμηλές, εξαιτίας της ιδέας που επικρατούσε ότι οι μικρότερες κλίμακες είχαν και μειωμένη προβλεψιμότητα και ότι η αρχικοποίηση μοντέλων υψηλής ανάλυσης απαιτούσε απίστευτα πυκνά δίκτυα παρατηρήσεων. Στην πράξη, όμως, τα αποτελέσματα ξεπέρασαν τις προσδοκίες και αυτό πρέπει να οφείλεται στο γεγονός ότι μερικές κυκλοφορίες αέριων μαζών μεσαίας κλίμακας οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες και δεν επηρεάζονται από παράγοντες προβλεψιμότητας. Ένα παράδειγμα είναι η ορειογραφική ροή ανέμου, η οποία επηρεάζεται από την γεωμετρία της περιοχής, μια μόνιμη και πολύ καλά διατυπωμένη στο μοντέλο σταθερά.

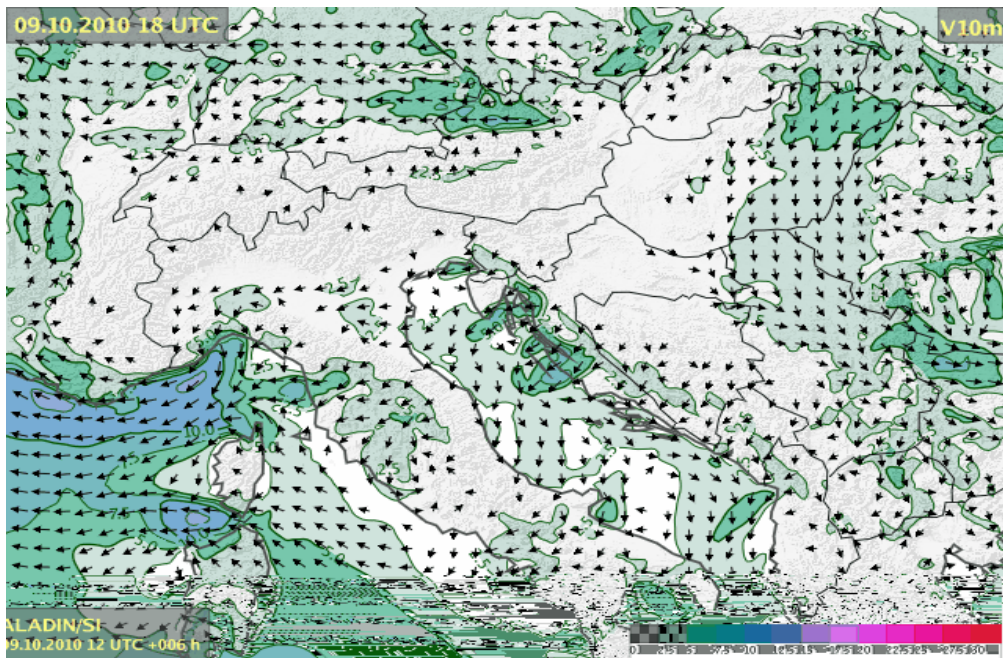
2.3.5 Χρησιμοποιούμενα μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι αδύνατη, χωρίς τη χρήση της εξόδου κάποιου μετεωρολογικού μοντέλου. Αν και είναι δυνατόν να προβλεφθεί η αιολική παραγωγή για λίγες ώρες μπροστά με κάποια μέθοδο χρονοσειρών, η χρήση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι απαραίτητη για τον υπόλοιπο ορίζοντα πρόβλεψης. Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, συνήθως, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού, που παρέχονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες της κάθε χώρας. Παρακάτω αναλύονται τα πιο διαδεδομένα από αυτά τα μοντέλα, ενώ ιδιαίτερο βάθος δίνεται στην ανάλυση του μοντέλου SKIRON, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2.3.5.1 Το μοντέλο ALADIN

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) είναι ένα λειτουργικό υδροστατικό μοντέλο με ημι-λαγκρανζιανό πλαίσιο εξισώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από επιμέρους τμήματα, που περιγράφουν τις διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες, όπως τον στροβιλισμό, τις επιρροές της ορογραφίας και της βαρύτητας, τη λεπτομερή ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας, την κίνηση των σύννεφων και την ακτινοβολία. Η οριζόντια ανάλυση του πλέγματος είναι 10km, ενώ γίνεται ανάλυση σε 41 κάθετα επίπεδα.

Το σύστημα αφομοίωσης που χρησιμοποιεί είναι της μορφής 4D-VAR χαρτών. Το μοντέλο ALADIN αναβαθμίζει τις προβλέψεις του 4 φορές την ημέρα, οι οποίες καλύπτουν την περίοδο των επόμενων δύο ημερών. Παρακάτω παρουσιάζεται μια άποψη των προβλέψεων που παράγει το μοντέλο ALADIN για μια περιοχή ενδιαφέροντός του.



Σχήμα 2.11: Προβλέψεις του μοντέλου ALADIN για τα μέτωπα του ανέμου στο βόρειο τμήμα της Αδριατικής θάλασσας (κάτω αριστερά) και την ευρύτερη περιοχή των Άλπεων (άσπρο χρώμα)

2.3.5.2 Το μοντέλο HIRLAM

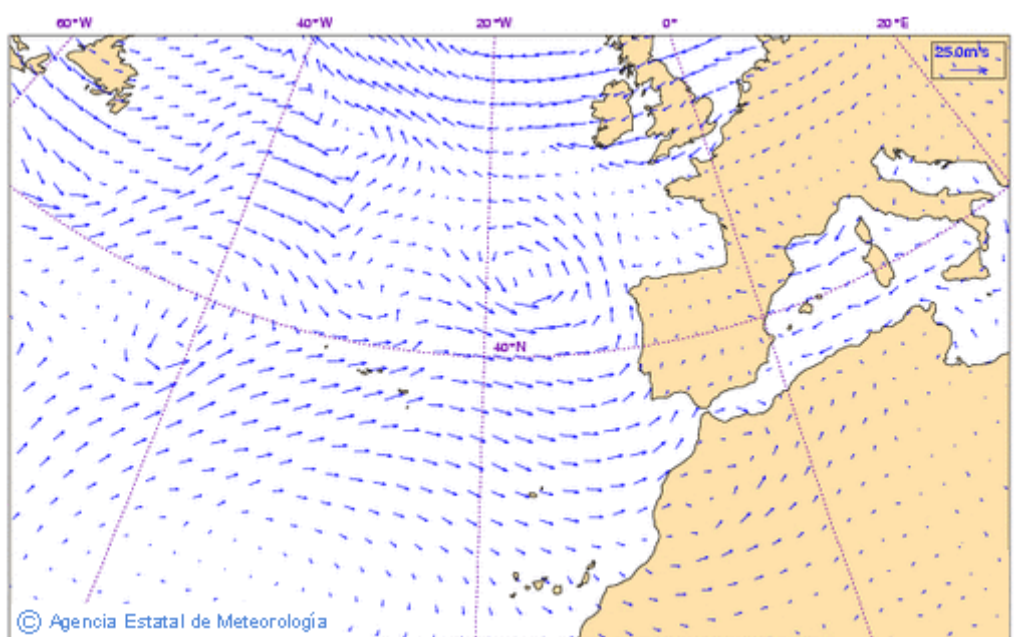
Το μοντέλο HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος HIRLAM-5, με σκοπό την πρόγνωση του καιρού σε μικρής κλίμακας περιοχή και για μικρό ορίζοντα πρόβλεψης. Το ερευνητικό πρόγραμμα HIRLAM-5 είναι η συνέχεια του προγράμματος HIRLAM-4 και των προκάτοχών του και είχε σκοπό να αναπτύξει ένα σύστημα μετεωρολογικής πρόγνωσης, που να παρέχει μεγάλης ακρίβειας αριθμητικές προβλέψεις καιρού και να είναι λειτουργικό για τα μέλη του. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν οι μετεωρολογικές υπηρεσίες της Δανίας, της Φινλανδίας, της Ισλανδίας, της Ιρλανδίας, της Ολλανδίας, της Νορβηγίας, της Ισπανίας και της Σουηδίας, καθώς και η Météo-France.

Στη περίπτωση του μοντέλου HIRLAM, μεγάλο ενδιαφέρον δίνεται στη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Κάθε διαδικασία, που σχετίζεται με την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες σε εκτέλεση με υψηλή ανάλυση. Για παράδειγμα, στην παραμετροποίηση της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας μπορούν να προκύψουν διάφορες καταστάσεις, αφού η μετάδοση ακτινοβολίας σε γειτονικά κουτιά του πλαισίου μπορούν να συμβάλλουν σε τοπικές θερμικές κινήσεις του αέρα. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται για αναλύσεις μικρότερες από 10km και δεν έχουν αντιμετωπιστεί πλήρως από το HIRLAM. Το HIRLAM παρέχει αναλύσεις με τη μέθοδο σημείων πλέγματος και με την φασματική μέθοδο.

Το σύστημα HIRLAM περιλαμβάνει ένα μεταβατικό μοντέλο αφομοίωσης δεδομένων (Data Assimilation), με τρεις ή τέσσερις διαστάσεις (3D-Var ή 4D-Var)

και με ανάλυση συμβατικών και μη συμβατικών παρατηρήσεων, όπως δεδομένα από ραντάρ ή δορυφόρο. Επίσης, για την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιείται το μοντέλο Βέλτιστης Παρεμβολής (Optimum Interpolation – OI) για τα ανώτερα στρώματα αέρα. Για το κατώτερο οριακό στρώμα, το κάθε τετράγωνο τμήμα του πλαισίου χαρακτηρίζεται από πέντε διαφορετικά είδη εδάφους, που αντιστοιχούν σε νερό, πάγο, γυμνό έδαφος, χαμηλή βλάστηση και δάσος. Επιπλέον, για κάθε είδος εδάφους, ορίζονται ο τύπος της βλάστησης και οι μεταβλητές της υψής του εδάφους. Ο τύπος της βλάστησης καθορίζει το albedo, το τοπικό μήκος της τραχύτητας, το ποσοστό βλάστησης και τον δείκτη της επιφάνειας φυλλώματος, ενώ η υψή του εδάφους καθορίζει τις υδρολογικές ιδιότητες, όπως η χωρητικότητα του εδάφους, το σημείο εκφύλισης και οι τιμές κορεσμού του εδάφους. Περαιτέρω ανάλυση γίνεται στην επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (SST), στον λόγο πάγου και νερού, στο βάθος του χιονιού, στην επιφανειακή και μέση θερμοκρασία του εδάφους και στην επιφανειακή και μέση κατ' όγκο σύσταση του νερού ^[40].

Το μοντέλο HIRLAM είναι ένα υδροστατικό μοντέλο με οριζόντια ανάλυση πλέγματος από 55km μέχρι 5km και τα κάθετα επίπεδα που χρησιμοποιεί κυμαίνονται από 16 μέχρι 40, ανάλογα σε ποια μετεωρολογική υπηρεσία εφαρμόζονται. Το πλαίσιο των εξισώσεων που εφαρμόζεται γενικά είναι Οϊλεριανού τύπου.



Σχήμα 2.12: Προβλέψεις του μοντέλου HIRLAM για τα μέτωπα του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντός του

2.3.5.3 Το μοντέλο MM5

Το MM5 είναι ένα ακόμη μοντέλο αριθμητικής πρόβλεψης καιρού. Είναι ένα μοντέλο μέσης κλίμακας και δημιουργήθηκε από το Pennsylvania State University και το National Center for Atmospheric Research με δυνατότητα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών συνθηκών με ανάλυση από 100 μέχρι 1km. Είναι ένα μοντέλο

περιορισμένης εμβέλειας, μη υδροστατικό, με λεπτομερή περιγραφή της πίεσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Ο αριθμητικός υπολογισμός γίνεται πάνω σε ένα εναλλασσόμενο ορθογώνιο σύστημα με τη χρήση διάφορων πεπερασμένων διαφορικών. Η κάθετη συνιστώσα είναι η εξαρτημένη συντεταγμένη από το έδαφος σίγμα (σ). Σκοπός είναι να γίνεται μια πιο ρεαλιστική και αποτελεσματική προσέγγιση της τοποθεσίας όπου βρίσκεται το αιολικό πάρκο, γεγονός που θα εξασφαλίσει καλύτερη ποιότητα προβλέψεων. Για αυτό το λόγο, το φυσικό πακέτο του MM5 περιέχει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την παραμετροποίηση διαφόρων χαρακτηριστικών όπως το νέφος, η ακτινοβολία, το οριακό στρώμα του πλανήτη, η μικροφυσική και επιπλέον επιφανειακά εμπόδια. Ένα σχέδιο για τη συγκέντρωση δεδομένων τεσσάρων διαστάσεων περιέχεται μέσα στο μοντέλο με τη δυνατότητα να προσαρμόζει το αποτέλεσμα ανάλογα με την ανάλυση ή τις μετρήσεις που έγιναν ^[41].

2.3.5.4 Το μοντέλο WAsP

Το WAsP είναι τα αρχικά του Wind Atlas Analysis and Application Program και είναι το πιο διαδεδομένο εργαλείο για την πρόβλεψη του ανέμου τόσο στην γη όσο και στη θάλασσα. Το WAsP προέκυψε από την έρευνα του European Wind Atlas το 1989 από τους Troen και Petersen, με σκοπό την εξομοίωση των στατιστικών των ανέμων κοντά στη επιφάνεια σε μια περιοχή, με βάση τις παρατηρήσεις του καιρού, αλλά και τις ορεογραφικές και τοπογραφικές πληροφορίες. Είναι ένα γρήγορο και φιλικό προς το χρήστη εργαλείο και από την πρώτη στιγμή που δημιουργήθηκε, επικράτησε για την εκτίμηση των τοπικών ανέμων και την εξακρίβωση των επιφανειακών ανέμων, σε περιοχές όπου επικρατούν ίδιες συνθήκες ανέμου.

Το WAsP είναι ένα πρόγραμμα για υπολογιστές που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των ανέμων αλλά και της παραγωγής αιολικής ισχύος από μια ανεμογεννήτρια ή ένα αιολικό πάρκο. Οι προβλέψεις βασίζονται σε δεδομένα για τον άνεμο που μετρήθηκαν σε σταθμούς στην ίδια περιοχή που βρίσκεται το αιολικό πάρκο. Το πρόγραμμα περιέχει ένα μοντέλο ανάλυσης της ροής του ανέμου, ένα μοντέλο για την αλλαγή της τραχύτητας και ένα μοντέλο για την τοποθέτηση διαφόρων φυσικών εμποδίων. Σε θαλάσσιες περιοχές δίνει καλές προβλέψεις, σε σχέση με τον παρατηρούμενο μέσο όρο της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου, αλλά και σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του ανέμου που έχουν περιγραφεί σε αυτή την περιοχή. Στον τομέα της ανάλυσης, τα στατιστικά αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων για την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου στην περιοχή που βρίσκεται το πάρκο που μας ενδιαφέρει, χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό του οριακού στρώματος του πάρκου με τη χρήση μια κατανομής Weibull και μοντελοποιούνται ανάλογα με τις επιπτώσεις των εμποδίων, της τραχύτητας του εδάφους και της ορεογραφίας στο συγκεκριμένο πάρκο. Τα στατιστικά αποτελέσματα από την επεξεργασία αυτή για τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου είναι γνωστά σαν κλίμα ανέμου (Wind Climate) και αντιπροσωπεύουν τον γεωστροφικό άνεμο στην περιοχή αυτή. Στο τομέα της εφαρμογής, η πρόβλεψη σε μια τοποθεσία, όπου εξετάζεται η εγκατάσταση αιολικού πάρκου, δημιουργείται με τη χρήση δεδομένων για το κλίμα ανέμου και μετασχηματίζοντάς τα από το οριακό στρώμα,

χαμηλά στο επίπεδο που θα βρίσκεται το υποθετικό πάρκο (ακριβώς αντίθετη διαδικασία από τον τομέα της ανάλυσης που αναφέρθηκε προηγουμένως).

Το μοντέλο WAsP αναπτύχθηκε κυρίως για εφαρμογές στη γη και η λειτουργικότητά του σε περιοχές πέρα από την ακτή είναι αμφισβητήσιμη και αυτό γιατί:

- Η τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας εξαρτάται από το επίπεδο των κυμάτων και δεν είναι σταθερή, όπως θεωρείται στο WAsP.
- Η διαστρωμάτωση της ατμόσφαιρας επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του ανέμου που έχουν διαπιστωθεί στη θαλάσσια περιοχή (προφίλ ανέμου) ακόμη και για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Το WAsP χρησιμοποιεί ένα μέσο προφίλ που είναι ανεξάρτητο από την πραγματική θερμική κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή.
- Η ασυνέχεια της ξηράς-θάλασσας δημιουργεί ένα εσωτερικό οριακό στρώμα (IBL – internal boundary layer) που εξαρτάται άμεσα από τη σταθερότητα της ατμόσφαιρας. Το WAsP χρησιμοποιεί και εδώ ένα μέσο οριακό στρώμα ^[41].

2.3.5.5 Το μοντέλο WRF

Το WRF (Weather Research and Forecasting model) είναι ένα σύστημα αριθμητικών προβλέψεων καιρού, σχεδιασμένο να εξυπηρετεί τόσο την ατμοσφαιρική έρευνα, όσο και τις επιχειρησιακές ανάγκες της πρόγνωσης του καιρού. Το WRF χαρακτηρίζεται από δύο δυναμικούς υπολογιστικούς πυρήνες, ένα σύστημα αφομοίωσης δεδομένων, καθώς και μια αρχιτεκτονική λογισμικού τέτοια που επιτρέπει τους παράλληλους υπολογισμούς και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος μετεωρολογικών εφαρμογών με κλίμακες που κυμαίνονται από μέτρα μέχρι χιλιάδες χιλιόμετρα.

Η προσπάθεια ανάπτυξης του WRF ξεκίνησε στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1990 και αποτελούσε προϊόν συνεργασίας κυρίως μεταξύ του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικής Έρευνας (National Center for Atmospheric Research – NCAR), της Εθνικής Διοίκησης Ωκεανού και Ατμόσφαιρας, εκπροσωπούμενης από το Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (National Center for Environmental Prediction – NCEP), του Οργανισμού Καιρού Πολεμικής Αεροπορίας (Air Force Weather Agency – AFWA), του Ναυτικού Ερευνητικού Εργαστηρίου (Naval Research Laboratory – NRL) και του Πανεπιστημίου της Οκλαχόμα. Το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών για το μοντέλο ωστόσο έχει εκτελεστεί κι έχει υποστηριχθεί από τα NCAR και NCEP.

Το μοντέλο WRF δίνει στους ερευνητές τη δυνατότητα να παράγουν προσομοιώσεις που αναπαριστούν είτε πραγματικά δεδομένα (παρατηρήσεις, αναλύσεις), είτε εξιδανικευμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το WRF παρέχει στην επιχειρησιακή πρόβλεψη του καιρού μια ευέλικτη και ισχυρή πλατφόρμα, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει προόδους στη φυσική, την αριθμητική και την αφομοίωση δεδομένων μέσω της συνεισφοράς της ερευνητικής κοινότητας προγραμματιστών. Το WRF βρίσκεται αυτή τη στιγμή σε λειτουργική χρήση στο κέντρο NCEP και σε άλλα

κέντρα πρόβλεψης διεθνώς, ενώ έχει αναπτυχθεί αρκετά ώστε να αποκτήσει μια μεγάλη παγκόσμια κοινότητα από χρήστες. Πλέον, το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται εκτενώς για έρευνα και πρόβλεψη καιρού σε πραγματικό χρόνο σε όλο τον κόσμο ^[42].

2.3.5.6 Το μοντέλο ECMWF

Το ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) είναι ένας ανεξάρτητος διακυβερνητικός οργανισμός που υποστηρίζεται από 20 Ευρωπαϊκά Μέλη-Κράτη (μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα) και 14 συνεργαζόμενα Κράτη. Το μοντέλο του ECMWF είναι γνωστό παγκοσμίως, καθώς παρέχει τις πιο ακριβείς παγκόσμιες προβλέψεις καιρού μεσαίας κλίμακας για 15 μέρες και εποχικές προβλέψεις για 12 μήνες. Τα αποτελέσματά του παρέχονται στις Ευρωπαϊκές Εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες σαν συμπλήρωμα των εθνικών κλιματολογικών δραστηριοτήτων μικρής κλίμακας ^[43].

Στο E.C.M.W.F. τρέχουν δύο "φόρμες". Η μία παράγει παγκόσμιες αναλύσεις για τέσσερις κύριες συνοπτικές ώρες στις 00:00, 06:00, 12:00 και 18:00 UTC και δεκαήμερες προγνώσεις βασισμένες στην ανάλυση των 12:00 UTC. Η δεύτερη παράγει αναλύσεις για την ίδια ώρα αλλά με μια μικρή διακοπή (cut-off) (μόνο μια ώρα αντί για τέσσερις, από την πιο κοντινή ώρα στην συλλογή δεδομένων). Σε ό,τι αφορά τις οριακές συνθήκες, τριήμερες παγκόσμιες προγνώσεις τρέχουν τέσσερις φορές την ημέρα και από αυτές τις αναλύσεις παρέχονται στα Κράτη-Μέλη οι οριακές συνθήκες για τα δικά τους μοντέλα περιορισμένης περιοχής.

Οι μεταβλητές του μοντέλου για τον υπολογισμό των προγνώσεων είναι η θερμοκρασία, ο άνεμος και η ειδική υγρασία. Αυτές οι βασικές παράμετροι μετατρέπονται σε άλλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους, ενώ υπολογίζονται για ένα χρονικό διάστημα 3 ωρών από 3 έως 72 ώρες, καθώς επίσης και κάθε 6 ώρες από 72 έως 240 ώρες βασισμένες στα στοιχεία των 12:00 UTC.

2.3.6 Το μοντέλο SKIRON

Το μετεωρολογικό σύστημα SKIRON αναπτύχθηκε από το Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας και σχεδιάστηκε με σκοπό την εφαρμογή του στην Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, για τοπική πρόγνωση καιρού στην περιοχή της Μεσογείου, αλλά και επιχειρησιακά στις μετεωρολογικές επιστήμες, στα ερευνητικά κέντρα ή σε ιδιωτικές εταιρίες. Είναι ένα αξιόπιστο υπολογιστικό σύστημα το οποίο παράγει προβλέψεις καιρού και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για προβλέψεις καιρού τοπικά, αλλά και για μέση κλίμακας μελέτες. Είναι εύκολο να μεταφερθεί και να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε πλατφόρμα υπολογιστή ^[44].

Η βασική του συνιστώσα είναι το προγνωστικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής ETA. Το ETA αρχικά αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου και στην Μετεωρολογική Υπηρεσία της Γιουγκοσλαβίας. Βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι εφαρμόζεται σε περιοχές με έντονο μορφολογικό χαρακτήρα. Η περαιτέρω

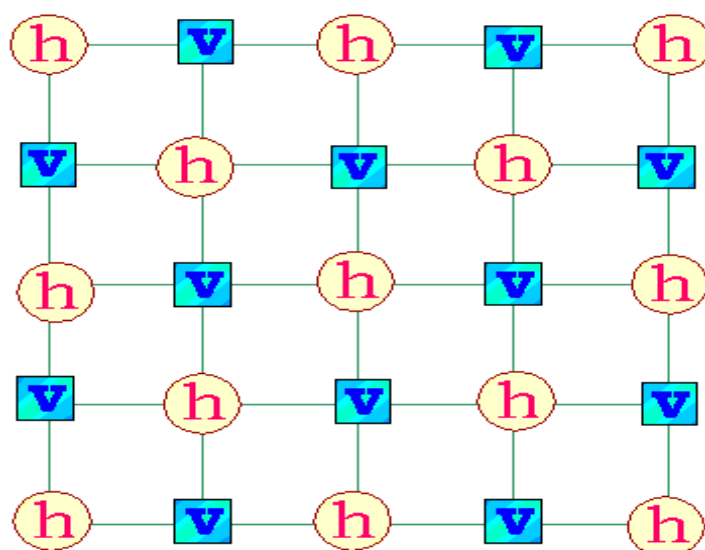
ανάπτυξη του έγινε στο Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP) στην Ουάσινγκτον.

Το λογισμικό του συστήματος SKIRON έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί αυτόματα για οποιαδήποτε περιορισμένη γεωγραφική περιοχή. Ολόκληρο το σύστημα αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Συλλογή δεδομένων και σύστημα προ-επεξεργασίας
- Πυρήνας μοντέλο ETA
- Σύστημα γραφικής απεικόνισης και σύστημα διαδικασίας καταχώρησης.

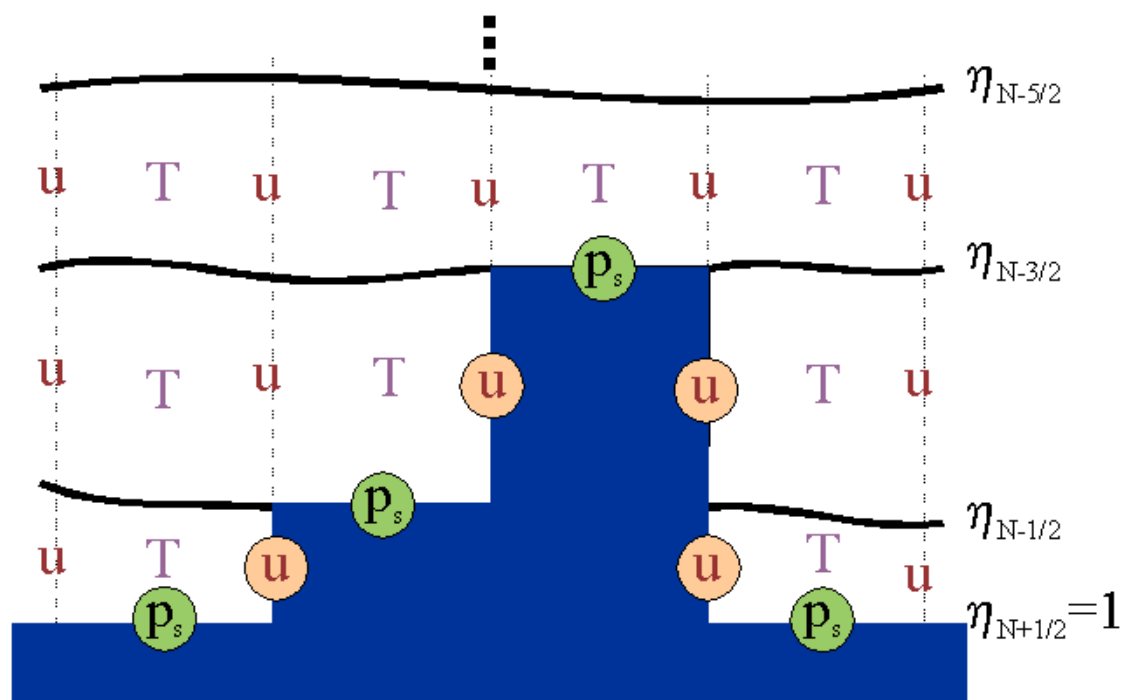
Το μοντέλο πάνω στο οποίο βασίστηκε το SKIRON είναι ένα περιφερειακό μέσης κλίμακας ατμοσφαιρικό μοντέλο με ένα αριθμό ιδανικών λύσεων που εφαρμόζονται στα τμήματα παραμετροποίησης των δυναμικών και φυσικών διαδικασιών του. Οι περισσότερες από τις συνιστώσες του έχουν σχεδιαστεί, με σκοπό να περιγραφούν όσο το δυνατό καλύτερα οι ατμοσφαιρικές διαδικασίες μικρότερης κλίμακας και συνεπώς, τα έντονα καιρικά φαινόμενα όπως οι έντονες βροχοπτώσεις, οι καταιγίδες, οι κυκλοφορίες αέρα ανάμεσα στα βουνά και τα μέτωπα.

Το SKIRON, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια έκδοση του μοντέλου ETA. Έχει "χτιστεί" στις βασικές εξισώσεις της κίνησης, της ενέργειας, της μάζας και της διατήρησης του νερού. Χρησιμοποιεί την υδροστατική προσέγγιση, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί με την πιο μικρή οριζόντια ανάλυση, περίπου 5 – 10km. Το ETA είναι ένα μοντέλο που περιγράφει την κατάσταση της ατμόσφαιρας με ένα χωρικό πλέγμα. Για κάθε σημείο του πλέγματος, λύνονται μερικές διαφορικές εξισώσεις, που αναπαριστάνονται με προσαρμοσμένα αντικείμενα. Τα αντικείμενα είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να εκπληρώνουν τις απαιτήσεις για υπολογιστική οικονομία, καθώς και τους φυσικούς περιορισμούς της πραγματικής ατμόσφαιρας. Οριζόντια, το ETA μοντέλο προσομοιώνει την κατάσταση της ατμόσφαιρας σ' ένα ημι-εναλλασσόμενο πλαίσιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.13: Το χωρικό πλέγμα του μοντέλου SKIRON, όπου h είναι η οριζόντια κατεύθυνση και v η κάθετη

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον καθορισμό των παραμέτρων πάνω στο πλαίσιο σε έντονες φυσικές συνθήκες, όπως η επιρροή της ορογραφίας. Άλλωστε, το πρόβλημα της ικανοποιητικής προσομοίωσης της ορογραφίας ήταν το πρωταρχικό μέλημα, από την αρχή της ανάπτυξης του μοντέλου. Για το πρόβλημα αυτό, έχει εφαρμοστεί ένα σύστημα κάθετων συντεταγμένων, όπου οι όγκοι των βουνών αναπαριστούνται από ένα σύνολο πακέτων, όπως φαίνεται παρακάτω. Με τον τρόπο αυτό, περιγράφεται η επιρροή που έχει ένα βουνό στην κίνηση του ανέμου. Επίσης, η μη γραμμική οριζόντια προσομοίωση του ανέμου βοηθάει στην περιγραφή όρων στις εξισώσεις του μοντέλου και εμποδίζει τον αριθμητικό θόρυβο, που είναι δεδομένος σε άλλα μοντέλα πρόβλεψης.



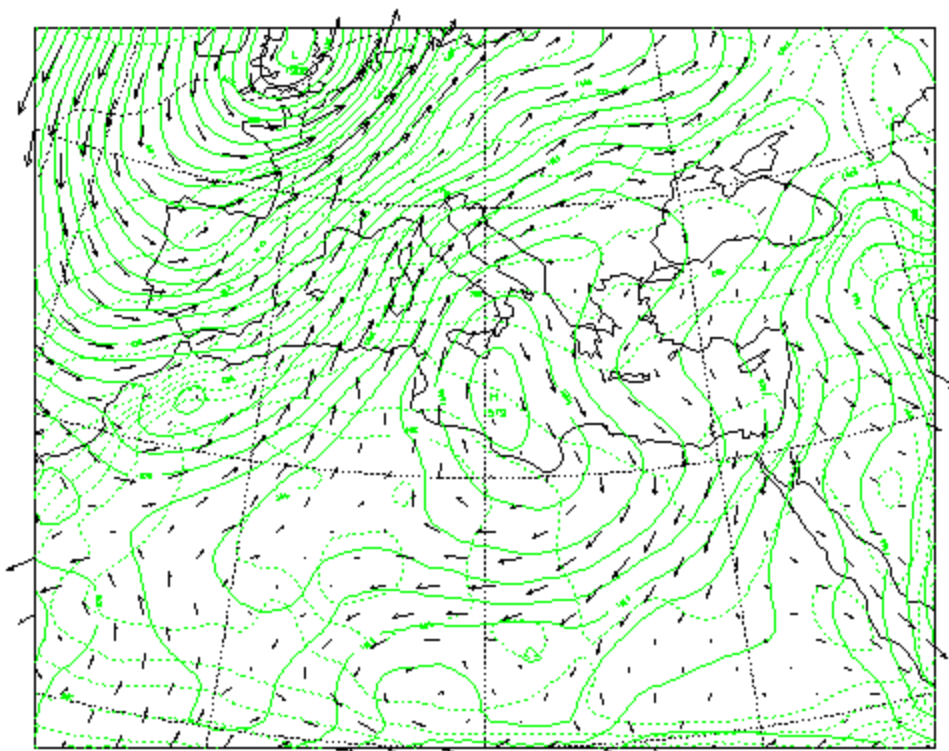
Σχήμα 2.14: Το σύστημα κάθετων συντεταγμένων του μοντέλου SKIRON

Το σύστημα SKIRON δέχεται στην είσοδο μετεωρολογικές παραμέτρους (γεωδυναμικό ύψος, συνιστώσες του αέρα και υγρασία), που προέρχονται από πολύ μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικά μοντέλα, όπως είναι το μοντέλο της ECMWF ή το μοντέλο του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (NCEP). Τα δεδομένα που λαμβάνονται αποκωδικοποιούνται και μετασχηματίζονται σε δομή πλαισίου (GRIB). Στο στάδιο προετοιμασίας, οι επιφανειακές παράμετροι, παρατηρούμενες ή προ-καθοριζόμενες (όπως τοπογραφία, επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας, είδος του εδάφους και της βλάστησης, θερμοκρασία και υγρασία του εδάφους) τοποθετούνται πάνω στο πλαίσιο του SKIRON. Τα δεδομένα διαμορφώνονται σε σύνολα για την ευκολότερη επεξεργασία τους. Μόλις καθοριστούν στο πλέγμα του μοντέλου, οι μετεωρολογικές παράμετροι χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν οι αρχικές και οι πλευρικές οριακές συνθήκες για την ολοκλήρωση του μοντέλου.

Τα σύνολα δεδομένων επεξεργάζονται από προ-επεξεργαστές, πριν χρησιμοποιηθούν από το ETA. Στη συνέχεια, το ETA λαμβάνει τα επεξεργασμένα

δεδομένα και τα περνάει ή σε έναν μονό επεξεργαστή ή σε συνδυασμό επεξεργαστών, που λειτουργούν με τη μέθοδο του πολύ-προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας καλύπτουν τις επόμενες 5 μέρες και διανέμονται κάθε μέρα στις 12:00 UTC.

Το σύστημα SKIRON περιέχει και ένα μοντέλο γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων. Αυτό χρησιμοποιεί εξόδους από διάφορα εργαλεία, με τρισδιάστατες και τετραδιάστατες απεικονίσεις.



Σχήμα 2.15: Πρόβλεψη του SKIRON για άνεμο και γεωδυναμικό 850 hPa στις 12:00 UTC της 4^{ης} Ιουλίου 2005

2.3.7 Επιδόσεις των μοντέλων NWP

Η απόδοση των παγκοσμίων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού έχει αξιολογηθεί σε γεωδυναμικά πεδία των 500hPa, που αντιπροσωπεύουν τον άνεμο στη μέσο-τροπόςφαιρα. Η ανωμαλία της συσχέτισης των πεδίων έχει αυξηθεί από τα τέλη του 1970, όταν οι πρωτογενείς εξισώσεις των 10ήμερων παγκοσμίων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού λειτουργούσαν με λιγότερο από 60% συσχέτιση, και η συσχέτιση ανέβηκε στο 88% στην 5ήμερη πρόβλεψη που έκανε το IFS μοντέλο. Αν συγκρίνουμε τις σημερινές προβλέψεις με τις προβλέψεις της δεκαετίας του 1980, παρατηρούμε ότι στις παρούσες 5ήμερες προβλέψεις υπάρχει μια αύξηση κέρδους του μεγέθους των 2 ημερών στην προβλεψιμότητα σε σύγκριση με τις 3ήμερες προβλέψεις του 1980 και επίσης, η ανωμαλία της συσχέτισης (70%) στις σημερινές

7ήμερες προβλέψεις είναι πολύ καλύτερη από την συσχέτιση (κάτω από 60%) των 5ήμερων προβλέψεων τότε.

Τα παραδοσιακά μέσα αξιολόγησης των μοντέλων (μέσο απόλυτο σφάλμα – MAE, ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος – RMS, σταθερά – BIAS, συσχέτιση – CORRELATION) χρησιμοποιούν σημειακά σφάλματα, έτσι ώστε να συγκρίνουν τις παρατηρούμενες από τους μετεωρολογικούς σταθμούς χρονοσειρές με τις τρέχουσες χρονοσειρές των δεδομένων που προστίθενται στα μοντέλα στην ίδια τοποθεσία. Όταν ένα μοντέλο προσομοιώνει ένα συγκεκριμένο καιρικό φαινόμενο, θα υπάρχουν πάντα σφάλματα στην ένταση, στο συγχρονισμό και στην τροχιά του, εκ των οποίων τα δύο τελευταία ονομάζονται και σφάλματα φάσης. Καθώς, τώρα, τα μοντέλα υψηλής ανάλυσης προσομοιώνουν πιο ακριβή φαινόμενα ως προς το χώρο και το χρόνο, τα σφάλματα φάσης επιφέρουν μεγαλύτερες κυρώσεις σε θέμα στατιστικής, οδηγώντας σε αυτό που αποκαλείται "διπλή ποινή" (double penalty).

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή σημαντικότερων μοντέλων πρόβλεψης ηλιακής και αιολικής ισχύος

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, συνεπώς υπάρχουν σημαντικές δυσκολίες κατά την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο ηλεκτρικής ισχύος. Για το λόγο αυτό, έχει αποκτήσει ιδιαίτερη αξία το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, απασχολώντας τους τομείς της μετεωρολογίας, των μαθηματικών και της εφαρμοσμένης πληροφορικής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επένδυση πολλών ερευνητικών κέντρων και εταιριών στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων και λειτουργικών εργαλείων, οδηγώντας στη δημιουργία μιας πληθώρας μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Με βάση το είδος των δεδομένων που επεξεργάζονται και τις μεθόδους που χρησιμοποιούν, τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες προσέγγισης του προβλήματος: τη φυσική προσέγγιση και τη στατιστική προσέγγιση. Τα φυσικά μοντέλα εστιάζουν την προσπάθειά τους στην ακριβή εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στο σημείο κάθε Α/Γ, χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Μειώνουν το σφάλμα της πρόβλεψης με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων, που ονομάζονται στατιστικές τεχνικές της εξόδου του μοντέλου ή εν συντομία MOS (Model Output Statistics). Αντίθετα, τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν κατευθείαν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, για να μοντελοποιήσουν τις σχέσεις τους με τη χρονοσειρά της αιολικής παραγωγής, χωρίς καμία ανάλυση των φυσικών φαινομένων. Βέβαια, υπάρχουν μοντέλα που προσεγγίζουν το πρόβλημα συνδυαστικά και με τις δύο μεθόδους.

Γενικά, η χρήση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, ανεξαρτήτως της προσέγγισης που ακολουθούν, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν για χρονικούς ορίζοντες μεγαλύτερους των έξι ωρών. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση των στατιστικών μοντέλων είναι πάντα καλύτερη από αυτή των φυσικών μοντέλων, τις πρώτες ώρες του ορίζοντα πρόβλεψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φυσικά μοντέλα στηρίζονται κυρίως, στην πληροφορία που παρέχεται από τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και δεν λαμβάνουν υπόψη τη χρονοσειρά της αιολικής ισχύος. Το γεγονός αυτό τους παρέχει τη δυνατότητα να δώσουν προβλέψεις από την πρώτη μέρα της εγκατάστασης ενός καινούριου αιολικού πάρκου, όταν η χρονοσειρά της ισχύος δεν είναι διαθέσιμη.

Αντίστοιχα εμφανίζονται και τα χαρακτηριστικά των μοντέλων για την ηλιακή ισχύ. Τα μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών πάρκων διαχωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: α) τα φυσικά μοντέλα πρόβλεψης, τα οποία χρησιμοποιούν αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων (NWP models) καθώς και μοντέλα χαρτογράφησης των νεφώσεων (cloud imagery) και β) τα στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης, στα οποία η πρόβλεψη βασίζεται στη στατιστική επεξεργασία των ιστορικών τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας ή της ηλεκτρικής ισχύος των Φ/Β. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση για όλα τα προαναφερθέντα.

3.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης

Ένα σύστημα πρόβλεψης αιολικής ισχύος χαρακτηρίζεται από τον χρονικό του ορίζοντα, ο οποίος ορίζεται ως το μελλοντικό χρονικό διάστημα για το οποίο θα προβλεφθεί η αιολική παραγωγή (π.χ. το επόμενο 24ωρο). Σε άλλα προβλήματα πρόβλεψης σχετικά με τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως είναι η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου, το σύστημα πρόβλεψης χαρακτηρίζεται ανάλογα με το χρονικό του ορίζοντα ως πολύ βραχυπρόθεσμο, βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο ή μακροπρόθεσμο.

Ωστόσο, στο πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, τα χρονικά σύνορα που διακρίνουν τους διάφορους χρονικούς ορίζοντες μεταξύ τους δεν είναι σαφώς καθορισμένα στη διεθνή βιβλιογραφία. Έτσι, ένας γενικός διαχωρισμός είναι ο εξής^[39]:

- *Πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις:* Το εύρος του χρονικού ορίζοντα είναι μερικές ώρες, χωρίς όμως να υπάρχει συμφωνία ως προς τον ακριβή τους αριθμό. Οριακές τιμές των 4 ή των 9 ωρών απαντώνται στη βιβλιογραφία. Η εφαρμογή των προβλέψεων αυτού του χρονικού ορίζοντα για έναν ιδιοκτήτη αιολικού πάρκου εξαρτάται από τους κανόνες της αγοράς· για παράδειγμα, αυτές οι προβλέψεις μπορούν να φανούν χρήσιμες για συναλλαγές σε αγορές που μεταβάλλονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.
- *Βραχυπρόθεσμες προβλέψεις:* Ο χρονικός ορίζοντας εδώ κυμαίνεται από το άνω όριο των πολύ βραχυπρόθεσμων προβλέψεων μέχρι τις 48 ή 72 ώρες. Αυτές οι προβλέψεις χρησιμεύουν κυρίως για τον σχεδιασμό της συντήρησης των συστημάτων, ειδικά όταν ο χρονικός ορίζοντας είναι 72 ώρες, ενώ ενδιαφέρουν ιδιαίτερα και το εμπόριο σε αγορές της "επόμενης ημέρας". Για παράδειγμα, στην Ιβηρική Αγορά Ηλεκτρισμού (MIBEL4, ημερήσια αγορά) οι προσφορές για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρουσιάζονται μέχρι τις 10:00 π.μ. και έτσι ένας χρονικός ορίζοντας των 38 ωρών καλύπτει τις ανάγκες ολόκληρης της επόμενης ημέρας. Σε άλλες χώρες, η περίοδος παρουσίασης των προσφορών είναι διαφορετική (π.χ. στις Η.Π.Α. κυμαίνεται

από τις 5:00 π.μ. μέχρι τις 12 το μεσημέρι), οπότε ο χρονικός ορίζοντας των προβλέψεων μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα.

- *Μεσοπρόθεσμες προβλέψεις:* Ο χρονικός τους ορίζοντας κυμαίνεται από το όριο των βραχυπρόθεσμων προβλέψεων μέχρι συνήθως τις 7 ημέρες. Όσο αυξάνεται ο ορίζοντας τόσο αυξάνουν και τα σφάλματα. Αυτές οι προβλέψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν από συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (π.χ. μονάδες άνθρακα) ως είσοδος στη διαχείριση μονάδων τους (unit commitment), αλλά και κατά τον προγραμματισμό της συντήρησής τους. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις αυτές ως εισόδους, είναι δυνατόν να προγραμματιστεί η συντήρηση και των γραμμών μεταφοράς αλλά και των αιολικών πάρκων. Οι μεσοπρόθεσμες προβλέψεις (3 έως 7 ημερών) για λειτουργικές χρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με μεμονωμένη χρήση μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού από μεγάλα κέντρα όπως το European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF) ή το National Centre for Environmental Prediction (NCEP).

Σήμερα, λόγω της οικονομικής αξίας της πρόβλεψης, οι περισσότερες προβλέψεις αιολικής ισχύος είτε για ερευνητικούς είτε για εμπορικούς σκοπούς χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από 36 έως 72 ώρες μπροστά και με ανάλυση μιας ώρας. Η προβλεπόμενη ποσότητα είναι η μέση ωριαία τιμή της αιολικής παραγωγής.

Σημειώνεται πως εκτός από τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα που καλύπτουν τα συστήματα πρόβλεψης, απαιτείται και διαφορετική χωρική ανάλυση. Στη Δανία και τη Γερμανία για παράδειγμα, τα αιολικά πάρκα είναι διασπαρμένα σε όλη τη χώρα. Για το λόγο αυτό, η αιολική ισχύς προβλέπεται για ευρείες περιοχές. Στην Αμερική και την Ισπανία η αιολική ισχύς περιορίζεται σε ένα μικρό αριθμό αιολικών πάρκων με μεγάλη εγκατεστημένη ισχύ. Αυτό απαιτεί πρόβλεψη για μεμονωμένα αιολικά πάρκα.

3.3 Φυσικά μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής ισχύος

Τα φυσικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνουν αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων (NWP models), καθώς και μοντέλα χαρτογράφησης των νεφώσεων (cloud imagery), είτε από επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς είτε από δορυφόρους. Ενώ τα αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων βρίσκουν εφαρμογή και στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, τα μοντέλα χαρτογράφησης νεφώσεων βρίσκουν αποκλειστική εφαρμογή στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας.

3.3.1 Αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων (Numerical Weather Prediction Models, NWP)

Τα μοντέλα αυτά βρίσκουν ευρέως εφαρμογή στη βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη, εκεί όπου η αποδοτικότητα των αμιγώς στατιστικών μοντέλων φθίνει. Η έξοδος των μοντέλων είναι η εκτιμώμενη ηλιακή ακτινοβολία (κάθετη προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία).

Αν και τα αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων είναι τα μόνα που μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις ακτινοβολίας για αρκετές μέρες στο μέλλον, εμφανίζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Η γεωγραφική τους διακριτοποίηση καλύπτει σημαντική γεωγραφική περιοχή και δεν μπορούν να χαρτογραφήσουν με ακρίβεια την εξέλιξη της τοπικής νέφωσης σε ακρίβεια φωτοβολταϊκού πάρκου. Ακόμη και μία γεωγραφική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ δεν είναι ικανή να χαρτογραφήσει την ακριβή νέφωση. Επίσης, τα μεσοατμοσφαιρικά μοντέλα στα οποία στηρίζονται τα NWP ανανεώνονται με αργό ρυθμό, γι' αυτό και η έξοδος των μοντέλων περιορίζεται στην καλύτερη περίπτωση σε ωριαία πρόβλεψη (μοντέλο NAM) ενώ σε άλλα μοντέλα είναι τρίωρη (μοντέλα GFS και ECMWF). Επομένως, μεταβολές χρονικής κλίμακας μικρότερης της μίας ώρας δεν μπορούν να καλυφθούν. Τέλος, από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι τα μοντέλα εμφανίζουν αποκλίσεις και σφάλματα τα οποία μάλιστα εμφανίζουν σημαντική εξάρτηση από το επίπεδο της νέφωσης (δηλ. σε συνθήκες νέφωσης το σφάλμα πρόβλεψης αυξάνει σημαντικά).

Σε πολλές δημοσιεύσεις που αξιολογούν τα μοντέλα NWP οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η χρήση στατιστικών μοντέλων εξόδου (Model Output Statistics, MOS) μπορεί να βελτιώσει τις προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο πεδίο αυτό, οι *Lorenz et al.* ^[45] αναπτύσσουν μία μεθοδολογία πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας βασισμένη στη μετεωρολογική πρόβλεψη 72 ωρών στο μέλλον από το αριθμητικό μοντέλο του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμης Μετεωρολογικής Πρόβλεψης (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF). Η τετραγωνική ρίζα του ανηγμένου στη μέση τιμή των μετρήσεων ακτινοβολίας μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) της πρόβλεψης των επόμενων 24 ωρών σε επίπεδο σταθμού στη Γερμανία υπολογίζεται ίση με 36% και για το σύνολο της χώρας 13%, ενώ παράλληλα εντοπίζεται σημαντική διαφορά στο σφάλμα μεταξύ περιόδων έντονων νεφώσεων και περιόδων με καθαρό ουρανό. Έτσι, ενώ τον Απρίλιο (έντονη νέφωση) το NRMSE υπολογίζεται σε επίπεδο σταθμού 49%, τον Ιούλιο (έντονη ηλιοφάνεια) υποχωρεί στο 30%. Ακόμη, υπολογίζουν ότι το NRMSE από 37% για την πρώτη μέρα πρόβλεψης αυξάνεται στο 46% για την τρίτη μέρα (ώρες 48-72). Τέλος, με χρήση στατιστικών μοντέλων εξόδου (fourth order polynomial regression) επιτυγχάνουν να μειώσουν το NRMSE κατά 5% για 24ωρη πρόβλεψη.

Οι *Perez et al.* ^[46] εξετάζουν την αποτελεσματικότητα της πρόβλεψης στηριζόμενοι στο NWP μοντέλο του US National Digital Forecast Database. Υπολογίζουν το μέσο όρο NRMSE ίσο με 34% για 4-8 ώρες στο μέλλον, 38% για 8-26 ώρες στο μέλλον και 40% για 26-76 ώρες στο μέλλον.

Οι *Zamora et al.* ^[47] συγκρίνουν τις προβλέψεις που παρέχονται από το μεσαίας κλίμακας μετεωρολογικό μοντέλο πέμπτης γενιάς (fifth-generation mesoscale model) MM5 με καταγεγραμμένες παρατηρήσεις ακτινοβολίας και παρουσιάζουν την εξάρτηση που έχει η ακρίβεια της πρόβλεψης με το μοντέλο aerosol optical depth-AOD. Για μικρά βάθη νέφωσης η πρόβλεψη είναι καλή αλλά για μεγάλα βάθη νέφωσης καταγράφονται μεγαλύτερα σφάλματα και γι' αυτό καταλήγουν στην ιδιαίτερη αξία της ενσωμάτωσης μοντέλων εκτίμησης AOD στα NWP μοντέλα.

Η εφαρμογή στατιστικών μοντέλων εξόδου σε διάφορα μοντέλα NWP (North American Model – NAM, Global Forecast System – GFS και ECMWF) εξετάζεται στην εργασία των *Mathiesen et al.* ^[48], όπου υπολογίζονται οι αποκλίσεις στην πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (εμφανίζουν μάλιστα σημαντικές διαφορές από συνθήκες νέφωσης σε συνθήκες καθαρού ουρανού) και με χρήση διορθωτικών συναρτήσεων προσπαθούν να μειώσουν αυτή την απόκλιση. Επίσης, στην εργασία αυτή αξιολογείται και συγκρίνεται η ακρίβεια των παραπάνω μοντέλων NWP.

3.3.2 Χαρτογράφηση νεφώσεων (cloud imagery)

Αυτά τα φυσικά μοντέλα προσπαθούν να χαρτογραφήσουν τη νέφωση και το οπτικό βάθος νέφωσης (cloud optical depth) με παρατηρήσεις είτε από δορυφόρους είτε από επίγειους σταθμούς. Τα μοντέλα αυτά είναι χρήσιμα για ορίζοντες πρόβλεψης έως 6 ώρες στο μέλλον σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.

Οι *Lorenz et al.* ^[49] χρησιμοποίησαν δεδομένα από δορυφόρο για να εκτιμήσουν την κίνηση των νεφών για χρονικό ορίζοντα από 30 λεπτά έως και 6 ώρες στο μέλλον στηριζόμενοι στην ημι-εμπειρική μέθοδο Heliosat. Οι συγγραφείς συγκρίνουν την πρόβλεψη της ακτινοβολίας σε κλίμακα ενός σταθμού και αυτής σε μια αρκετά μεγαλύτερη περιοχή, με τη δεύτερη να παρουσιάζει μικρότερο σφάλμα. Παρατηρούν επίσης ότι η ακρίβεια της μεθόδου είναι αυξημένη σε συνθήκες ηλιοφάνειας με μικρή χωρική διακύμανση της νέφωσης και γωνίες ανύψωσης του ηλίου μεγαλύτερες από 20°. Αντίθετα, όταν η γωνία ανύψωσης είναι μικρή και η χωρική διακύμανση της νέφωσης σημαντική, το σφάλμα της πρόβλεψης ξεπερνά το 40% για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης (50 λεπτά έως 6 ώρες). Τέλος, επισημαίνουν ότι η επικείμενη βελτίωση των αλγορίθμων επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων αναμένεται να βελτιώσει τη πρόβλεψη.

Οι *Hammer et al.* ^[50] χρησιμοποίησαν δορυφορικές εικόνες για να εκτιμήσουν την κατεύθυνση κίνησης της νέφωσης, του καθοριστικότερου κατ' αυτούς παράγοντα επιρροής της ηλιακής ακτινοβολίας. Με την τεχνική τους κατάφεραν να πάρουν προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας από 30 λεπτά έως 2 ώρες στο μέλλον με σαφώς μικρότερα σφάλματα έναντι της μεθόδου παραμένουσας τιμής, ενώ για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας σε ένα σύνολο διασπαρμένων φωτοβολταϊκών πάρκων περιόρισαν το σφάλμα της πρόβλεψης στο 5%.

Οι *Chow et al.* ^[51] από την άλλη προσπαθούν να χαρτογραφήσουν δισδιάστατα τη νέφωση πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος με χρήση φωτογραφιών από επίγεια κάμερα, συχνότητας λήψης 30sec. Ο ορίζοντας πρόβλεψης είναι πολύ

βραχυπρόθεσμος, εκτεινόμενος από 30sec έως 5min. Η τεχνική τους αποδίδει καλύτερα από το μοντέλο παραμένουσας τιμής και θεωρούν ότι η βελτίωση της ποιότητας των εικόνων καθώς και η καταγραφή περισσότερων χαρακτηριστικών νέφωσης (π.χ. ύψος νέφωσης) θα οδηγούσε σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση του σφάλματος πρόβλεψης.

Οι *Perez et al.* ^[52] τέλος, αξιολόγησαν και τα 2 φυσικά μοντέλα που αναλύθηκαν παραπάνω, παρουσιάζοντας μια επαλήθευση των βραχυπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων προβλέψεων της παγκόσμιας ακτινοβολίας που παράγονται ως μέρος της αμερικανικής βάσης δεδομένων Solar-Anywhere (2010). Οι βραχυπρόθεσμες προβλέψεις που εκτείνονται μέχρι και 6-ώρες στο μέλλον βασίζονται στην κίνηση των νεφών, η οποία προέρχεται από διαδοχικές εικόνες ενός δορυφόρου γεωστατικής τροχιάς. Οι μεσοπρόθεσμες προβλέψεις εκτείνονται μέχρι και 6-ημέρες στο μέλλον και διαμορφώνονται με βάση τις πλεγματοποιημένες προβλέψεις της νέφωσης (gridded cloud cover forecasts) οι οποίες προέρχονται από την Εθνική Βάση Δεδομένων Ψηφιακής Πρόγνωσης των Η.Π.Α. (US National Digital Forecast Database).

Η λειτουργία των αλγορίθμων πρόβλεψης αξιολογήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά τους με επίγειες μετρήσεις από επτά κλιματολογικά διαφορετικές περιοχές των Η.Π.Α. για ένα έτος. Τα αποτελέσματα από τη σύγκριση οδήγησαν σε αποτελέσματα που ήταν συνεπή με τις προηγούμενες περιορισμένες εκτιμήσεις τους. Επίσης, η μελέτη περιλαμβάνει ένα πιο εκτεταμένο σύνολο κλιματολογικών περιβαλλόντων καθώς επίσης και αποτελέσματα για χειμερινούς μήνες, όπου η αποτελεσματικότητα των μοντέλων τείνει να είναι μικρότερη από ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Τέλος, τόσο οι βραχυπρόθεσμες όσο και οι μακροπρόθεσμες προβλέψεις είχαν σημαντικά καλύτερες επιδόσεις από την παραμένουσα τιμή όπως αυτή προέκυπτε από τις πραγματικές μετρήσεις υψηλής ακρίβειας.

3.4 Στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής ισχύος

Τα στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης της φωτοβολταϊκής παραγωγής διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον εάν λαμβάνουν υπόψη τους τις εξόδους των αντίστοιχων μοντέλων NWP ή βασίζονται αποκλειστικά στη στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων παραγωγής με πιθανή αξιολόγηση της εξάρτησης/συσχέτισης ορισμένων εξωγενών παραγόντων. Οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις αναλύονται ξεχωριστά στις ακόλουθες παραγράφους.

3.4.1 Στατιστικά μοντέλα χωρίς χρήση αριθμητικών μοντέλων μετεωρολογικών προβλέψεων και χαρτογράφησης νεφώσεων

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης ηλιακής ακτινοβολίας και ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών πάρκων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι έξοδοι των μοντέλων NWP. Η πρόβλεψη της ηλεκτρικής ισχύος γίνεται είτε απευθείας, είτε προβλέπεται αρχικά η ηλιακή ακτινοβολία και κατόπιν υπολογίζεται με χρήση στατιστικών μεθόδων η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Οι *Moreno et al.* ^[53] αξιολογούν τη χρήση μοντέλων ARMA στην πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας για ορίζοντα 5 λεπτών στο μέλλον. Καταλήγουν ότι η χρήση ενός μοντέλου AR κατάλληλης τάξεως είναι αποτελεσματικό για την πρόβλεψη της ακτινοβολίας σε τόσο σύντομο χρονικό ορίζοντα.

Οι *Huang et al.* ^[54] εξετάζουν την αποτελεσματικότητα των μοντέλων ARMA και του μοντέλου παραμένουσας τιμής στην πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (έως 5 ώρες στο μέλλον). Καταλήγουν ότι το μοντέλο ARMA υπερέρχει του μοντέλου παραμένουσας τιμής, αν και το τελευταίο λειτουργεί ικανοποιητικά για την πρόβλεψη της επόμενης ώρας.

Οι *Dazhi et al.* ^[55] εφάρμοσαν ένα μοντέλο ανάλυσης χρονοσειρών για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας για την επόμενη ώρα, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνέπειες της κάλυψης των νεφών (cloud effect) στην πρόβλεψη. Προτείνουν τρεις μεθόδους πρόβλεψης που χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους μετεωρολογικών ιστορικών δεδομένων ως παραμέτρους εισόδου, συγκεκριμένα, την παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (global horizontal irradiance (GHI)), την οριζόντια διάχυτη ακτινοβολία (diffuse horizontal irradiance (DHI)), την άμεση κανονική ακτινοβολία (direct normal irradiance (DNI) και τη νέφωση (cloud cover). Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί άμεσα τα ιστορικά δεδομένα της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας (GHI) για την πρόβλεψή της για την επόμενη ώρα, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ARIMA, αφού πρώτα απομακρυνθεί η πιθανή εποχιακή συνιστώσα που μπορεί να περιέχει η χρονοσειρά της ηλιακής ακτινοβολίας. Η δεύτερη μέθοδος προβλέπει την οριζόντια διάχυτη ακτινοβολία (DHI) και την άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI), ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας και πάλι ένα μοντέλο ARIMA, αφού πρώτα απομακρυνθούν πιθανές εποχιακές συνιστώσες που μπορεί να περιέχονται στις χρονοσειρές των δύο ηλιακών ακτινοβολιών, και στη συνέχεια συνδυάζει τις δύο αυτές προβλέψεις προκειμένου να προβλέψει την παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (GHI) χρησιμοποιώντας ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο. Αυτά τα δύο μοντέλα δείχνουν βελτιωμένη ακρίβεια σε σύγκριση με ένα συμβατικό μοντέλο ARIMA. Η τρίτη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις συνέπειες της νέφωσης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ARIMA για την πρόβλεψη των κινήσεων των σύννεφων και ακολούθως υπολογίζεται η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία (GHI) σε διαφορετικές γωνίες ζενίθ και κάτω από διαφορετικές συνθήκες νέφωσης με χρήση μη γραμμικών μοντέλων παλινδρόμησης. Δηλαδή αυτή η μέθοδος δημιουργεί έναν πίνακα αναζήτησης δεδομένων για τα μοντέλα παλινδρόμησης της παγκόσμιας οριζόντιας ακτινοβολίας για τις διάφορες συνθήκες νέφωσης. Το πλεονέκτημα της

τρίτης μεθόδου είναι ότι απαιτεί μόνο δεδομένα νέφωσης χαμηλής ανάλυσης για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την επόμενη ώρα. Η τρίτη μέθοδος φαίνεται να είναι πολύ χρήσιμη χάρη στην ακρίβειά της, ιδιαίτερα για καταστάσεις όπου υπάρχει έλλειψη σε μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Και οι τρεις μέθοδοι αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από δύο μετεωρολογικούς σταθμούς στις ΗΠΑ, συγκεκριμένα του Μαϊάμι και του Ορλάντο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι τρεις μέθοδοι έχουν πολύ καλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το μοντέλο της παραμένουσας τιμής, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο σύγκρισης την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE). Τέλος, μεταξύ των τριών μεθόδων, η τρίτη είχε το μικρότερο RMSE και ακολούθησε η δεύτερη. Ωστόσο η διαφορά μεταξύ των δύο πρώτων μεθόδων δεν ήταν ιδιαίτερα σημαντική.

Οι *Wu et al.* ^[56] προσεγγίζουν τη κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης σε 2 φάσεις. Στην πρώτη φάση αξιολογούν με τη μέθοδο Dickey-Fuller διάφορα μοντέλα για την εξαγωγή της τάσης (detrending) από τη μη στάσιμη χρονοσειρά της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακολούθως προχωρούν στην κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης, υλοποιώντας αρχικά ένα μοντέλο ARMA, στη συνέχεια ένα νευρωνικό δίκτυο με χρονική καθυστέρηση και, τέλος, υλοποιώντας ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει τα δύο προηγούμενα. Η σύγκριση με βάση το κριτήριο NRMSE αποδεικνύει ότι το υβριδικό μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των 2 πρώτων και καταλήγει σε μικρότερο σφάλμα.

Οι *Mihalakakou et al.* ^[57] περιγράφουν ένα μοντέλο TNΔ που χρησιμοποιήθηκε για βραχυπρόθεσμες ωριαίες προβλέψεις της χρονοσειράς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Προκειμένου να γίνουν προβλέψεις για περισσότερες από μία ώρες στο μέλλον, γίνεται χρήση ιστορικών δεδομένων (πραγματικές μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας) και αναδρομική εφαρμογή του μοντέλου στην οποία οι εισόδους για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις αντικαθίστανται με τις ήδη ληφθείσες προβλέψεις. Επιπλέον, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο AR για την ανάλυση και την αναπαράσταση της χρονοσειράς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Η χρήση του TNΔ για την πρόβλεψη μόνο της επόμενης ώρας στο μέλλον οδήγησε σε πολύ καλές προβλέψεις, ενώ εφαρμόζοντας την παραπάνω περιγραφείσα τεχνική για την πρόβλεψη περισσότερων ωρών στο μέλλον, οι προβλέψεις ήταν ικανοποιητικές μέχρι 10 έως 20 ημέρες στο μέλλον για την περίοδο του καλοκαιριού, ενώ για την χειμερινή περίοδο το χρονικό διάστημα ακριβούς πρόβλεψης περιοριζόταν σημαντικά λόγω των ασταθών καιρικών συνθηκών. Από τη σύγκριση των δύο προτεινόμενων μοντέλων (TNΔ και AR) βρέθηκε ότι το προτεινόμενο μοντέλο TNΔ οδηγεί σε καλύτερες προβλέψεις σε σύγκριση με το μοντέλο AR.

Οι *Wang et al.* ^[58] αναπτύσσουν ένα μοντέλο πρόβλεψης στηριζόμενοι στην εκπαίδευση ενός TNΔ με εισόδους που προκύπτουν έπειτα από εξακρίβωση κάποιων στατιστικών ιδιοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας (όπως διερεύνηση της σχέσης ανάμεσα στην εξωατμοσφαιρική (extraterrestrial) ηλιακή ακτινοβολία και αυτή στο επίπεδο του εδάφους) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το μοντέλο τους εμφανίζει μειωμένα σφάλματα σε σχέση με άλλα γνωστά μοντέλα ιδιαίτερα σε συνθήκες συννεφιάς.

Οι *Cococcioni et al.* ^[59] προτείνουν ένα υβριδικό μοντέλο για την πρόβλεψη της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (πάρκο), το οποίο βασίζεται στη χρήση της ανάλυσης χρονοσειρών σε συνδυασμό με τα ΤΝΔ. Ο στόχος τους είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης με χρονικό ορίζοντα την επόμενη ημέρα, το οποίο βασίζεται σε ένα Τεχνητό ΝΔ με γραμμές καθυστέρησης με εξόδους (neural network with tapped delay lines). Πιο συγκεκριμένα υλοποιούν το μοντέλο μη γραμμικής αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενή παράγοντα (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input model, NARX) μέσω ενός εμπρόσθιο-τροφοδοτούμενου νευρωνικού δικτύου (feed-forward neural network). Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και η ώρα ως εξωγενείς εισοδοί στο μοντέλο, και τα δεδομένα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πάρκου ως ενδογενής εισόδος. Το μοντέλο της μη γραμμικής αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενή παράγοντα (NARX) είναι το πιο γενικό από τα μοντέλα ανάλυσης χρονοσειρών. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών της χρονοσειράς $y(t)$, γνωρίζοντας τις προηγούμενες τιμές της ίδιας χρονοσειράς $y(t)$ και τις προηγούμενες τιμές της εξωγενούς χρονοσειράς $x(t)$.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο ΤΝΔ μπορεί να αναπαράγει πιστά την καμπύλη της ημερήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να προβλεφθεί η συνολική ημερήσια ενέργεια με σφάλμα μικρότερο του 5%. Επίσης, το μέσο εποχιακό σφάλμα που επιτυγχάνεται για την άνοιξη και το καλοκαίρι συγκρίνεται ευνοϊκά με αυτά που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία.

Οι *Pedro et al.* ^[60] εξέτασαν πέντε διαφορετικές τεχνικές για την πρόβλεψη της μέσης παραγόμενης ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πάρκου 1MWp για την επόμενη και τις δύο επόμενες ώρες στο μέλλον. Και στα πέντε μοντέλα που ανέπτυξαν δεν χρησιμοποιήθηκαν εξωγενή δεδομένα, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, κάτι που ουσιαστικά σημαίνει ότι οι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι μόνοι "αισθητήρες" που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των δεδομένων εισόδου σε αυτά τα μοντέλα. Οι μέθοδοι που μελετήθηκαν είναι: η μέθοδος της παραμένουσας τιμής, τα μοντέλα ARIMA, τα μοντέλα k-Πλησιέστερων Γειτόνων (k-Nearest-Neighbors, kNNs), τα Τεχνητά ΝΔ (ANNs), και τα Τεχνητά ΝΔ με Γενετικούς Αλγόριθμους (GAs/ANN). Η ακρίβεια των μοντέλων μελετήθηκε με τον υπολογισμό στατιστικών σφάλματος, όπως του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE), του μέσου σφάλματος πόλωσης (MBE), και του συντελεστή συσχέτισης (R^2) για τις διαφορές μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των πραγματικών τιμών. Επίσης εξετάστηκε και η ακρίβεια των διαφορετικών μεθόδων ως συνάρτηση της μεταβλητότητας της ισχύος εξόδου, η οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εποχιακές συνθήκες.

Από την ανάλυση του σφάλματος μεταξύ των μετρούμενων και των προβλεπόμενων τιμών διαπιστώθηκε ότι τα μοντέλα ΤΝΔ υπερέχουν των μοντέλων παραμένουσας τιμής, ARIMA και k-NN. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι η επιλογή εισόδου και η αρχιτεκτονική του ΤΝΔ μπορούν να βελτιστοποιηθούν μέσω των γενετικών αλγορίθμων προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια όλων των μοντέλων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα εποχιακά χαρακτηριστικά της ηλιακής μεταβλητότητας.

Ο *Reikard* ^[61] μελέτησε έξι διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης: α) Ένα απλό μοντέλο λογαριθμικής παλινδρόμησης με χρονομεταβαλλόμενους συντελεστές πρόβλεψης (Regression in Logs with Time Varying Coefficients), το οποίο χρησιμεύει ως μοντέλο αναφοράς, β) ένα μοντέλο που έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει τον ημερήσιο κύκλο τριγωνομετρικά, όπως είναι το μοντέλο μη παρατηρούμενων συνιστωσών (Unobserved Components model, UCM), γ) ένα μοντέλο ARIMA, δ) ένα μοντέλο ARIMA με χρήση συναρτήσεων μεταφοράς με αιτιατές εισόδους (Transfer Function with Causal Inputs), ε) ένα μοντέλο ΤΝΔ, και, τέλος, ζ) ένα Υβριδικό μοντέλο. Οι πειραματικές προβλέψεις έγιναν για διάφορους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης, ήτοι 5, 15, 30 και 60 λεπτών στο μέλλον, ενώ ως χρονοσειρά μελέτης χρησιμοποιήθηκε η παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία. Η εκτίμηση των μοντέλων έγινε με βάση τις ιστορικές τιμές της ακτινοβολίας μέχρι πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης. Το κριτήριο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των μοντέλων ήταν το ποσοστιαίο μέσο απόλυτο σφάλμα. Σε όλα σχεδόν τα πειράματα, τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονταν χρησιμοποιώντας τα μοντέλα ARIMA εκτός από ορισμένες περιπτώσεις (κυρίως σε υψηλές χρονικές αναλύσεις π.χ. της τάξεως των 5 λεπτών) όπου τα Νευρωνικά Δίκτυα ή τα Υβριδικά μοντέλα μπορούν να επιτύχουν εξίσου καλές ή καλύτερες προβλέψεις. Γενικά, η επιτυχία του μοντέλου ARIMA στις χαμηλότερες αναλύσεις (π.χ. 24ωρος ορίζοντας) οφείλεται κυρίως στην ικανότητά του να συλλαμβάνει τον ημερήσιο κύκλο πιο αποτελεσματικά από ό, τι οι υπόλοιπες μέθοδοι.

Οι *Mellit et al.* ^[62] χρησιμοποίησαν την αρχιτεκτονική του προσαρμοστικού δικτύου κυματιδίων (adaptive wavelet-network architecture) για την ανάπτυξη ενός κατάλληλου μοντέλου πρόβλεψης της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται ως η πιο σημαντική παράμετρος για την αποδοτική πρόβλεψη της παραγωγής των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο συνδυασμός της θεωρίας των κυματιδίων και των νευρωνικών δικτύων οδήγησε στην ανάπτυξη των δικτύων κυματιδίων (Wavelet networks). Τα δίκτυα κυματιδίων είναι εμπρόσθιο-τροφοδοτούμενα δίκτυα που χρησιμοποιούν κυματίδια ως συναρτήσεις ενεργοποίησης. Για την εξέταση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία που έχει καταγραφεί κατά το χρονικό διάστημα 1981 με 2001 από ένα μετεωρολογικό σταθμό στην Αλγερία. Το μοντέλο εκπαιδεύτηκε είτε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των 19 πρώτων χρόνων, είτε τα δεδομένα ενός μόνο έτους. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή του μοντέλου τα δεδομένα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας του έτους 2001. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέπει την ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία με πολύ καλή ακρίβεια περίπου 97% και με μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα που δεν ξεπερνά το 6%. Επιπλέον, εξετάστηκε η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου σε σύγκριση με διαφορετικές δομές ΤΝΔ και κάποια κλασικά μοντέλα πρόβλεψης και αποδείχθηκε ότι οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης για τα μοντέλα δικτύων κυματιδίων απαιτούν μικρότερο αριθμό επαναλήψεων σε σύγκριση με άλλα ΤΝΔ.

Οι *Mellit et al.* ^[63] ανέπτυξαν ένα υβριδικό μοντέλο για την πρόβλεψη της ημερήσιας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο συνδυάζει ένα Τεχνητό ΝΔ και μια βιβλιοθήκη των πινάκων μετάβασης Markov (Markov transition matrices, MTM). Το προτεινόμενο μοντέλο είναι σε θέση να δημιουργήσει μια ακολουθία από δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας έναν ελάχιστο αριθμό δεδομένων εισόδου (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος και υψόμετρο), ειδικά σε απομονωμένες περιοχές. Για τη μελέτη του μοντέλου αναπτύχθηκε μια βάση δεδομένων της ημερήσιας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας με δεδομένα που συλλέχτηκαν από 60 μετεωρολογικούς σταθμούς στην Αλγερία κατά το χρονικό διάστημα 1991-2000. Η αξιολόγηση του μοντέλου έδωσε μέγιστο σφάλμα RMSE 8% και συντελεστή συσχέτισης που κυμαινόταν από 90% μέχρι 92%. Επίσης έγινε σύγκριση του μοντέλου με άλλα μοντέλα πρόβλεψης όπως τα AR, ARMA, Markov chain και τα MTM, χρησιμοποιώντας ως κριτήρια σύγκρισης το σφάλμα πρόβλεψης και το χρόνο εκπαίδευσης του μοντέλου, η οποία ανέδειξε το προτεινόμενο μοντέλο ως το βέλτιστο εργαλείο πρόβλεψης.

Οι *Mellit et al.* ^[64] προτείνουν μια πρακτική μέθοδο για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας που βασίζεται στη χρήση τεχνητών ΤΝΔ. Το προτεινόμενο μοντέλο Πολυστρωματικών Αναγνωριστών (Multilayer Perceptron, MLP) καθιστά δυνατή την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια βάση 24 ωρών χρησιμοποιώντας τις παρούσες τιμές της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα. Τα αποτελέσματα των πειραματικών προβλέψεων έδειξαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι ικανοποιητικό, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης ήταν της τάξης 98-99% για τις ηλιόλουστες μέρες και 94-96% για συννεφιασμένες μέρες. Το μοντέλο μπορεί εύκολα να βελτιωθεί με την προσθήκη περισσότερων παραμέτρων εισόδου, όπως είναι π.χ. η νέφωση, η πίεση, η ταχύτητα του ανέμου, η διάρκεια ηλιοφάνειας, οι γεωγραφικές συντεταγμένες κλπ.

3.4.2 Στατιστικά μοντέλα με χρήση αριθμητικών μοντέλων μετεωρολογικών προβλέψεων και χαρτογράφησης νεφώσεων

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών πάρκων που λαμβάνουν υπόψη τα αποτελέσματα πρόβλεψης των μετεωρολογικών μοντέλων NWP αναφορικά με μεταβλητές που επηρεάζουν την ακριβή πρόβλεψη της ισχύος των Φ/Β (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, κίνηση νεφών κ.ά.). Τα μοντέλα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται για προβλέψεις που εκτείνονται μακρύτερα στο μέλλον (πέραν των 12 ωρών), όπου η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων των μετεωρολογικών προβλέψεων αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποδοτική.

Οι *Bacher et al.* ^[65] περιγράφουν μια νέα προσέγγιση για την on-line πρόβλεψη της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για on-line προβλέψεις σε πολλές εφαρμογές και σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των ωριαίων τιμών της ηλιακής ενέργειας για χρονικούς ορίζοντες έως 36 ώρες στο μέλλον. Η προτεινόμενη μέθοδος

είναι μια διαδικασία δύο σταδίων, όπου αρχικά λαμβάνει χώρα μια στατιστική αναγωγή της ηλιακής ενέργειας με χρήση ενός μοντέλου καθαρού ουρανού (clear sky model). Αυτό το μοντέλο του καθαρού ουρανού βρίσκεται χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές εξομάλυνσης. Στη συνέχεια, οι προβλέψεις της ανηγμένης ηλιακής ενέργειας υπολογίζονται με τη χρήση προσαρμοστικών γραμμικών μοντέλων χρονοσειρών (adaptive linear time series models). Αξιολογούνται τόσο τα μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης (AR) όσο και τα μοντέλα AR με τη συμβολή εξωγενών παραγόντων (ARX), οι οποίοι λαμβάνονται από αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων (NWP). Και τα δύο μοντέλα αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας ως δεδομένα 15-λεπτές παρατηρήσεις της ηλιακής ενέργειας από 21 φ/β συστήματα σε στέγες σπιτιών σε ένα μικρό χωριό στη Δανία. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για τις προβλέψεις μέχρι και 2 ώρες στο μέλλον, η πιο σημαντική μεταβλητή εισόδου για τα μοντέλα είναι οι διαθέσιμες παρατηρήσεις της ηλιακής ενέργειας, ενώ για μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης, οι προβλέψεις που λαμβάνονται από τα μοντέλα NWP γίνονται οι πιο σημαντικές εισοδοί. Τέλος, ως κριτήριο σύγκρισης θεωρήθηκε η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), μέσω του οποίου αποδείχθηκε ότι με το μοντέλο ARX επιτυγχάνεται μείωση του σφάλματος κατά 35% σε σύγκριση με ένα προτεινόμενο μοντέλο αναφοράς.

Οι *Huang et al.* ^[66] υπολογίζουν την ακρίβεια του μοντέλου NWP αφού πρώτα μετατρέψουν την πρόβλεψη ακτινοβολίας σε πρόβλεψη φωτοβολταϊκής παραγωγής μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Καταλήγουν ότι η κύρια πηγή σφαλμάτων πρόβλεψης προέρχεται από τα σφάλματα των μοντέλων NWP και ως πρώτο βήμα για τη βελτίωση της πρόβλεψης υποδεικνύουν τη βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων NWP.

Οι *Bofinger et al.* ^[67] χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα εξόδου προσπαθούν να βελτιώσουν την έξοδο του μοντέλου ECMWF (μοντέλο NWP). Ακολουθώντας μετατρέπουν την πρόβλεψη ηλιακής ακτινοβολίας σε πρόβλεψη φωτοβολταϊκής παραγωγής με χρήση μοντέλων για τον υπολογισμό της θέσης του ηλίου, της κατανομής της ολικής ακτινοβολίας στην άμεση και διαχεόμενη συνιστώσα και το μετασχηματισμό της ακτινοβολίας στην κατεύθυνση των φ/β πάνελ και τελικά προσδιορίζουν το RMSE της μεθόδου τους για πρόβλεψη 24 ωρών σε 24,5%.

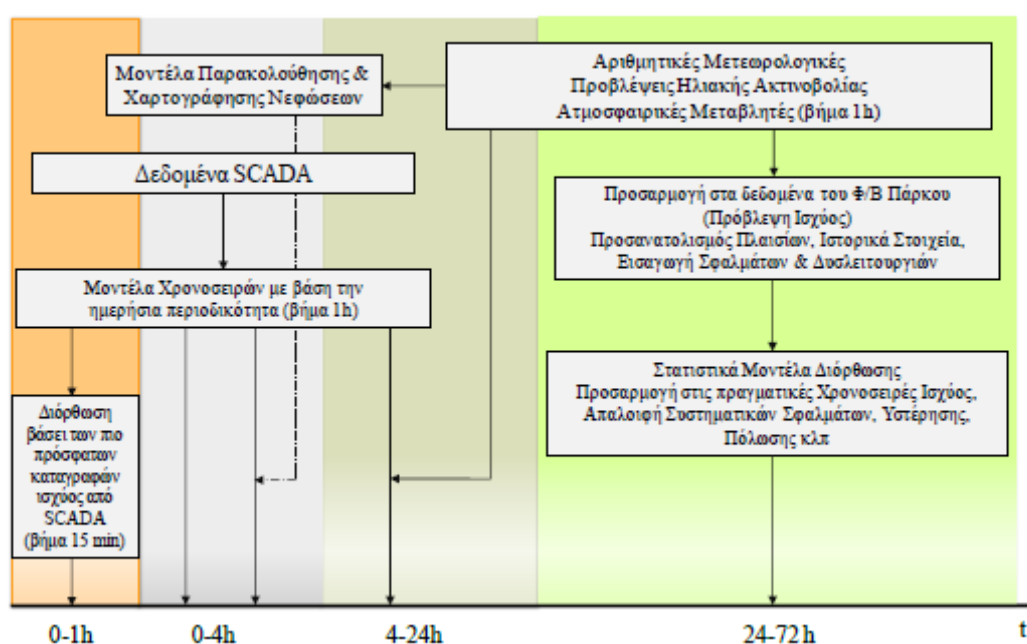
Οι *Jimenez et al.* ^[68] αναπτύσσουν ένα στατιστικό μοντέλο για διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το μοντέλο βασίζεται στην ανάπτυξη ενός νευρωνικού δικτύου που παίρνει ως είσοδο τα αποτελέσματα δύο μοντέλων NWP (GFS, MM5) και προβλέπει την ωριαία παραγωγή για χρονικό ορίζοντα από 1 έως 39 ώρες στο μέλλον. Για χρονικούς ορίζοντες από 16 έως 39 ώρες, το NRMSE υπολογίστηκε ίσο με το 11,79% της ονομαστικής ισχύος του πάρκου.

Οι *Chen et al.* ^[69] προτείνουν μια απλουστευμένη προσέγγιση για την πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος ενός φ/β στέγης για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών, χρησιμοποιώντας ένα ΤΝΔ ακτινωτών συναρτήσεων βάσης (radial basis function neural network, RBFNN). Η προτεινόμενη τεχνική μπορεί να πραγματοποιήσει μια άμεση πρόβλεψη της ισχύος ενός φ/β χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα σε συνδυασμό με μετεωρολογικές προβλέψεις της ηλιακής ακτινοβολίας, της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας στο χώρο του φ/β. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και

έναν χάρτη αυτοοργάνωσης (self-organizing map) για την ταξινόμηση των μεταβλητών εισόδου που προέρχονται από τα αριθμητικά μοντέλα μετεωρολογικών προβλέψεων NWP, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο σημαντικά την ακρίβεια της πρόβλεψης.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε ένα πραγματικό φ/β σύστημα μελετήθηκαν με κριτήριο αξιολόγησης το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης (MAPE) και έδειξαν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της ημερήσιας ισχύος εξόδου του φ/β με πολύ καλή ακρίβεια.

Βάσει της παραπάνω εκτεταμένης ανάλυσης, στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται συνοπτικά οι βασικές κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται τα μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της παραγωγής των φ/β σταθμών και οι χρονικοί ορίζοντες εφαρμογής τους.



Σχήμα 3.1: Μοντέλα Πρόβλεψης Φωτοβολταϊκής παραγωγής

3.5 Φυσικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Τα μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων για την πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ενέργειας επικεντρώνονται στην περιγραφή της ροής του ανέμου γύρω και μέσα στο αιολικό πάρκο, ενώ επιπλέον χρησιμοποιούν την καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή, για να διαμορφώσουν μια εκτίμηση της εξόδου της αιολικής ισχύος. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού χρησιμοποιούνται ως αρχικοποίηση για τη διαδικασία ανάλυσης και προσομοίωσης της ροής του ανέμου. Επιπλέον, τα μοντέλα μέσης κλίμακας και τα CFD μοντέλα λειτουργούν εμφωλιασμένα σε κάποιο κομμάτι του οριζόντιου πλέγματος ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού, αποτελώντας συνήθως μέρος των φυσικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας. Στόχος τους είναι η

λεπτομερής περιγραφή του οριακού ατμοσφαιρικού επιπέδου πολύ κοντά στην επιφάνεια της γης, πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος (τοποθεσία αιολικού πάρκου).

3.5.1 Μεθοδολογία φυσικής προσέγγισης

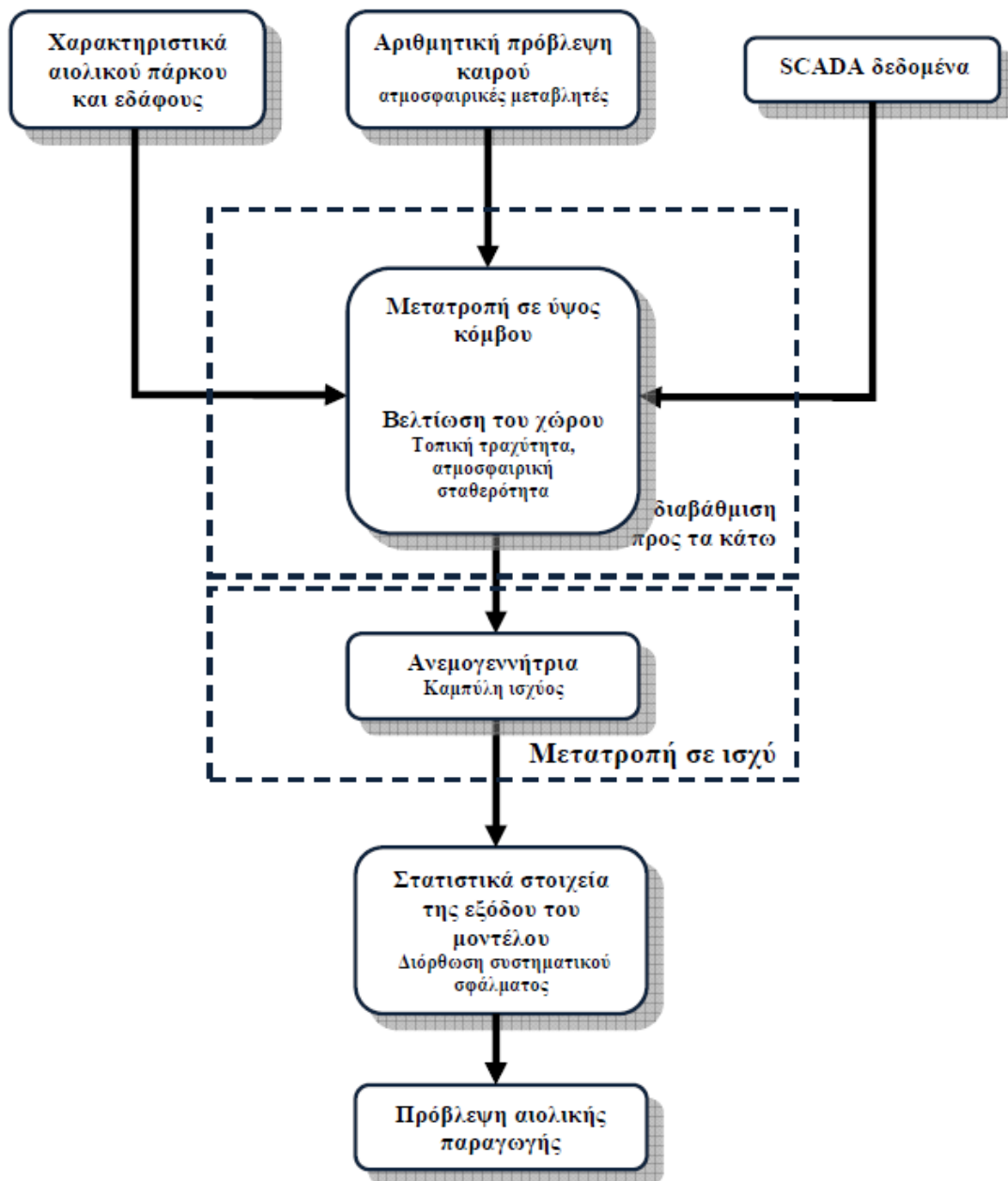
Η φυσική προσέγγιση του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι σαφώς καθορισμένη και αποτελείται από τρία στάδια επεξεργασίας: τη βαθμονόμηση προς τα κάτω, τον μοντελισμό καμπύλης ισχύος και τη στατιστική διόρθωση απόκρισης ^[39].

Στο στάδιο της βαθμονόμησης προς τα κάτω, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου προσαρμόζονται στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ, μια διαδικασία που μπορεί να χαρακτηριστεί ως προσαρμογή των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στα δεδομένα του αιολικού πάρκου και των Α/Γ. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι φυσικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν μετεωρολογικά μοντέλα μεσαίας ή μικρής κλίμακας. Τα μοντέλα NWP χρησιμοποιούν συνήθως χωρικές αναλύσεις της τάξης των 10 έως 15 χιλιομέτρων. Αρχικό μέλημα είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου, στο οποίο θα γίνει πιο ακριβής εκτίμηση των ατμοσφαιρικών μεταβλητών από τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, για την αρχικοποίηση των μοντέλων μικρότερης κλίμακας (η καλύτερη απόδοση συνήθως εντοπίζεται στα χαμηλότερα επίπεδα πίεσης της τάξης των 10 μέτρων). Τα τελευταία εκτελούνται σε κάθε αναβάθμιση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, ενώ σε πολλές άλλες περιπτώσεις προσομοιώνουν τη ροή του ανέμου, με βάση έναν πρότυπο πίνακα, που περιέχει τις τυπικές περιπτώσεις της εξέλιξης της ροής. Ο συμβουλευτικός πρότυπος πίνακας δημιουργείται με κάποια μέθοδο ταξινόμησης, όπως η ανάλυση συστάδων (clustering analysis).

Για την αναβάθμιση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού απαιτούνται κάποιες από τις φυσικές παραμέτρους του εδάφους, όπως η τραχύτητα, η ορογραφία, η παρουσία εμποδίων και η θερμική διαστρωμάτωση, με σκοπό τη διαμόρφωση του προφίλ του τοπικού ανέμου (λαμβάνοντας ίσως υπόψη και την ατμοσφαιρική σταθερότητα). Οι δύο κύριες εναλλακτικές για να γίνει αυτό είναι οι ακόλουθες:

- Ο συνδυασμός του προφίλ του τοπικού ανέμου (με μια λογαριθμική υπόθεση) και του γεωστροφικού νόμου αντίστασης, ώστε να καταγραφούν οι άνεμοι κοντά στην επιφάνεια.
- Η χρησιμοποίηση του κώδικα της Υπολογιστικής Δυναμικής των ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD) που πραγματοποιεί έναν ακριβή υπολογισμό του πεδίου του ανέμου στο αιολικό πάρκο, λαμβάνοντας υπόψη μια πλήρη περιγραφή της αντίστοιχης περιοχής. Μετά από αυτό το βήμα, υπάρχει διαθέσιμη μια πρόβλεψη του τοπικού ανέμου που επικρατεί.

Η είσοδος που απαιτείται στο τμήμα της διαβάθμισης προς τα κάτω είναι μια λεπτομερής περιγραφή της περιοχής του αιολικού πάρκου, όπως το χωροταξικό του σχεδιάγραμμα, η τραχύτητα, η ορογραφία και άλλα περιγραφικά στοιχεία.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα βημάτων της φυσικής προσέγγισης

Το βήμα της μετατροπής της (υπολογισμένης στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ) ταχύτητας ανέμου σε ισχύ περιλαμβάνει κυρίως τη μετατροπή με βάση την καμπύλη ισχύος. Η χρήση της καμπύλης ισχύος του κατασκευαστή είναι η απλούστερη προσέγγιση, ωστόσο πρόσφατες έρευνες από διάφορες ομάδες έδειξαν ότι είναι πολύ προτιμότερο η καμπύλη ισχύος να εκτιμάται μέσω των διαθέσιμων προβλέψεων της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αλλά και της αιολικής ισχύος, δηλαδή μιας προσέγγισης της καμπύλης ισχύος με βάση τα στοιχεία του αιολικού πάρκου^[39].

Για τον υπολογισμό των συστηματικών σφαλμάτων πρόβλεψης που μπορεί να οφείλονται στο μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού ή στην προσέγγιση που χρησιμοποιείται, οι επιστήμονες, που διαλέγουν την φυσική προσέγγιση, χρησιμοποιούν συχνά και το μοντέλο στατιστικής διόρθωσης απόκρισης (Model

Output Statistics, MOS) για την επεξεργασία μετά την πρόβλεψη της ισχύος. Για ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού, οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών των μοντέλων πρόβλεψης και των καιρικών παρατηρήσεων χρησιμοποιούνται είτε για την συσχέτιση των μεταβλητών του μοντέλου πρόβλεψης είτε για την πρόβλεψη μεταβλητών που δεν προβλέπονται σαφώς από το μοντέλο. Αυτές οι στατιστικές σχέσεις συνήθως παίρνουν την μορφή εξισώσεων πολύ-γραμμικής παλινδρόμησης, οι οποίες προέρχονται από την διαδικασία επιλογής πιθανών μεταβλητών πρόβλεψης του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή παράγει προβλέψεις για τις μεταβλητές του καιρού που, σε κάποιο βαθμό, είναι υπεύθυνες για τυχαία και συστηματικά σφάλματα στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι χρειάζεται τις μετρήσεις (εντός λειτουργίας ή εκτός λειτουργίας), όπως επίσης και δεδομένα καλής ποιότητας.

3.5.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικής προσέγγισης

3.5.2.1 Το μοντέλο Persistence

Το πιο απλό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι το μοντέλο Persistence ("Επίμονο" μοντέλο). Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι οι καιρικές συνθήκες, που επικρατούν τη στιγμή της πρόβλεψης, θα επικρατούν και το προβλεπόμενο διάστημα. Αυτό περιγράφεται από την επόμενη εξίσωση:

$$P(t + l) = P(t)$$

όπου το $P(t)$ είναι η παραγωγή σε χρόνο t και l ο χρόνος για τον οποίο θα γίνει η πρόβλεψη.

Παρ' όλη την εμφανή απλότητα του, το μοντέλο αυτό περιγράφει την ατμοσφαιρική ροή σχετικά καλά εξαιτίας της χαρακτηριστικής χρονικής κλίμακας των καιρικών συστημάτων· ο καιρός το απόγευμα είναι συχνά όμοιος με αυτόν το πρωί. Για σύντομο ορίζοντα πρόβλεψης, μόνο μερικών ωρών, το μοντέλο αυτό είναι δύσκολο να διαψευσθεί. Ωστόσο, επειδή ο ορίζοντας πρόβλεψης που μας ενδιαφέρει φτάνει συνήθως μέχρι και τις 72 ώρες και το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα για το διάστημα αυτό, χρησιμοποιείται κυρίως ως μέτρο σύγκρισης για τα σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης.

3.5.2.2 Το μοντέλο Prediktor

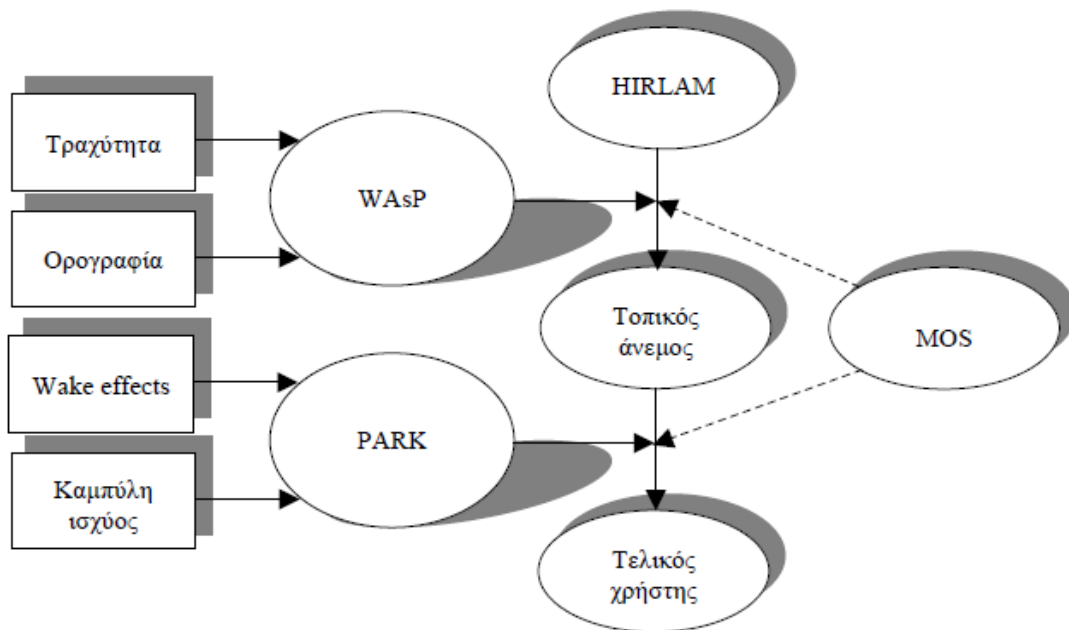
Ένα από τα πρώτα μοντέλα πρόβλεψης παραγωγής αιολικών πάρκων που αναπτύχθηκαν είναι το Prediktor, που παρουσιάστηκε στην αρχική του μορφή από τον Landberg ^[70]. Το μοντέλο αυτό βασιζόταν σε φυσικές παραμετροποιήσεις, παρόμοιες με τη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Αιολικού Χάρτη και χρησιμοποιούσε προβλέψεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού προέρχονταν από το μοντέλο DMI HIRLAM.

Η βασική ιδέα του μοντέλου ήταν να μετατρέψει το προβλεπόμενο διάνυσμα του ανέμου στις τοπικές συνθήκες του πάρκου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούνταν δύο τιμές της ταχύτητας. Αρχικά, με την τιμή της ταχύτητας από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, που αντιστοιχεί στα 10 μέτρα πάνω από το έδαφος, υπολογίζεται η μέση τιμή της τραχύτητας της περιοχής. Στη συνέχεια, η τιμή της ταχύτητας του ανέμου, που αντιστοιχεί σε ένα από τα υψηλότερα επίπεδα της ατμόσφαιρας, λαμβάνεται ως ίση με την τιμή του γεωστροφικού ανέμου. Έτσι, από τον νόμο της γεωστροφικής επιβράδυνσης, υπολογίζεται η ταχύτητα τριβής του ανέμου και παράλληλα, με την εξίσωση του λογαριθμικού προφίλ του ανέμου, προσεγγίζεται η τιμή της ταχύτητας στο ύψος της πλήμνης. Επειδή όμως οι τιμές της ταχύτητας προέρχονται από το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τοπικές επιδράσεις.

Η προσομοίωση της ροής του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος γίνεται πρώτα με το μέσο-κλιμακούμενο μοντέλο KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) και στη συνέχεια με το μικρό-κλιμακούμενο μοντέλο WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Το WAsP μοντελοποιεί τα εμπόδια της περιοχής, την τραχύτητα και τις αλλαγές της, καθώς και τις επιδράσεις της ορογραφίας. Αντίθετα, δεν περιλαμβάνει μονάδες που να περιγράφουν τα θερμικά φαινόμενα, όπως το φαινόμενο όρους/κοιλάδας ή τη γέφυρα θάλασσας/εδάφους. Η εκτίμηση του ανέμου στην περιοχή του πάρκου, όπως διαμορφώνεται από το μοντέλο WAsP, βελτιώνεται με τη χρήση στατιστικής διόρθωσης απόκρισης. Ένας συντελεστής διόρθωσης πολλαπλασιάζεται με την τιμή της ταχύτητας, με αποτέλεσμα να μειωθεί το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Έτσι, προκύπτει η προκαταρκτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, μετατρέποντας την ταχύτητα του ανέμου, μέσω των καμπύλων ισχύος των Α/Γ του πάρκου.

Παράλληλα, το φαινόμενο σκίασης των Α/Γ περιγράφεται με το μοντέλο PARK. Αυτό το μοντέλο δημιουργεί ένα ροδοδιάγραμμα της αποτελεσματικότητας του πάρκου, δηλαδή χαρτογραφείται η μείωση της παραγωγής του πάρκου, που προέρχεται από τη σκίαση των Α/Γ, σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου. Το μοντέλο PARK θεωρεί ότι το φάσμα του κυματισμού πίσω από την Α/Γ αυξάνεται γραμμικά και ότι η μείωση της επίδρασης του κυματισμού στις άλλες Α/Γ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασης από την Α/Γ.

Τέλος εφαρμόζεται και δεύτερη στατιστική διόρθωση απόκρισης στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Προϋπόθεση για την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων στατιστικής απόκρισης, είναι να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τουλάχιστον τεσσάρων μηνών. Το παραπάνω μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Risø της Δανίας.



Σχήμα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου Prediktor

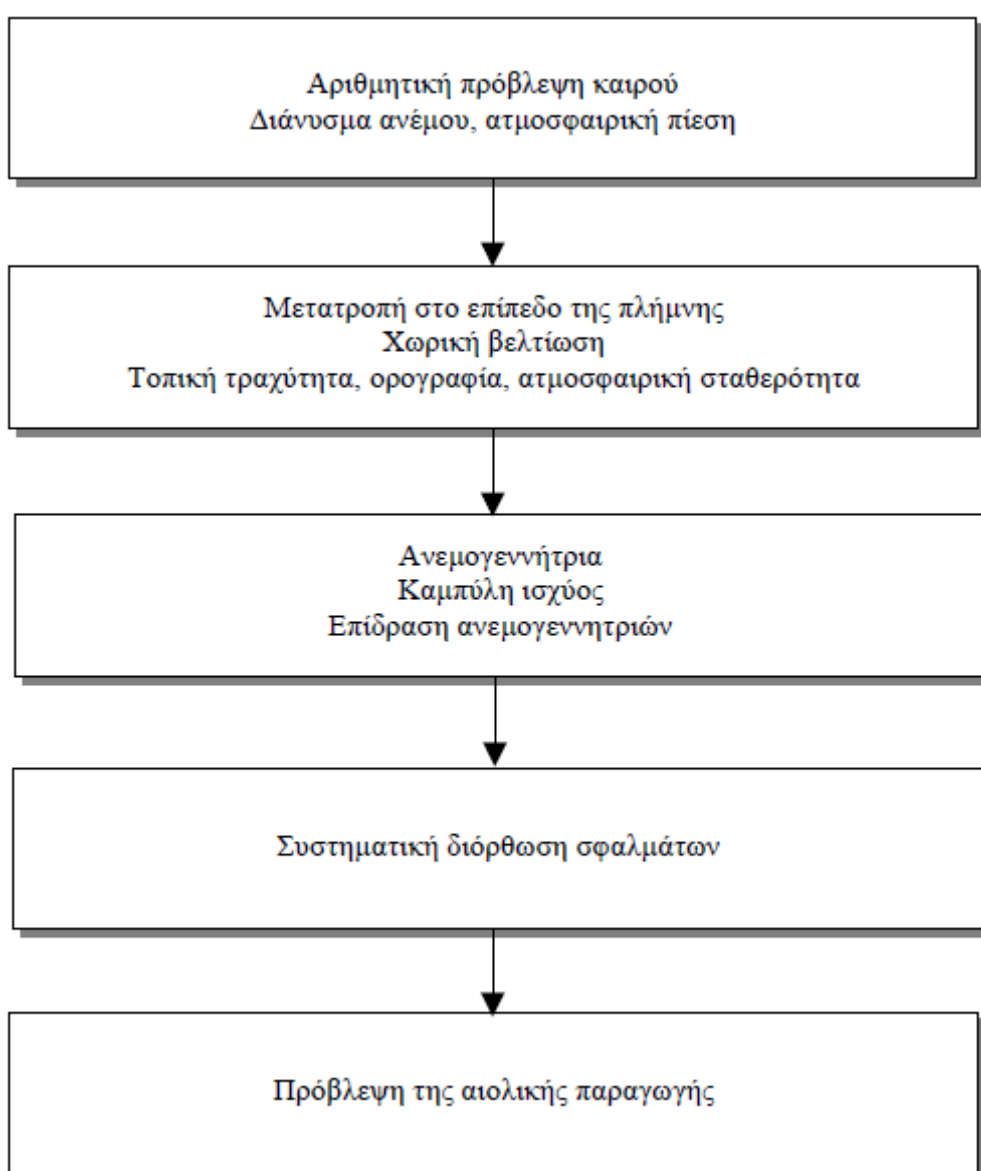
3.5.2.3 Το μοντέλο Previento

Ένα μοντέλο παρόμοιο με το παραπάνω είναι το Previento, που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Oldenburg της Γερμανίας πρώτα από τον Bayer και εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Focken και Lange. Το Previento έχει εφαρμοστεί στη Γερμανία, δίνοντας προβλέψεις τόσο σε απομονωμένα πάρκα όσο και στην συνολική αιολική παραγωγή της χώρας, ενώ χρησιμοποιεί δεδομένα NWP από το μοντέλο Localmodell (LM) της Γερμανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (DWD) και το μοντέλο της ECMWF. Το Previento, με διάφορα υπο – μοντέλα, βελτιώνει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, μοντελοποιώντας τις τοπικές συνθήκες της περιοχής και δίνοντας έμφαση στην ορογραφία και την εξαρτώμενη από τη διεύθυνση του ανέμου επιφανειακή τραχύτητα.

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της πλήμνης, γίνεται εκτίμηση του κάθετου προφίλ του ανέμου, με μοντελοποίηση της θερμικής διαστρωμάτωσης της ατμόσφαιρας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση Α/Γ πάνω από 50 μέτρα, η επίδραση της θερμικής ευστάθειας είναι πολύ σημαντική. Η μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ, γίνεται με τις θεωρητικές καμπύλες ισχύος των Α/Γ του πάρκου. Στην περίπτωση όμως, που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων ισχύος και ταχύτητας του ανέμου, οι καμπύλες ισχύος καθορίζονται στατιστικά για την συγκεκριμένη περιοχή. Στην εκτίμηση της αιολικής ισχύος, λαμβάνονται υπόψη και οι επιδράσεις σκίασης των Α/Γ στην έξοδο του πάρκου. Τέλος, αν η μέτρηση της παραγωγής του πάρκου είναι γνωστή, τότε εφαρμόζεται στατιστική διόρθωση απόκρισης, με τη βοήθεια τεχνικών γραμμικής παλινδρόμησης.

Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας, υπολογίζεται η αναμενόμενη σε μια μεμονωμένη περιοχή παραγωγή αιολικής ισχύος. Ωστόσο επειδή στην πράξη μας ενδιαφέρει η συνολική ισχύς των αιολικών πάρκων

που είναι διεσπαρμένα σε μια ευρύτερη περιοχή, το Previento περιλαμβάνει έναν εξελιγμένο αλγόριθμο αναβάθμισης (up-scaling algorithm), ο οποίος βασίζεται σε αντιπροσωπευτικά αιολικά πάρκα στην επιθυμητή περιοχή για να εξάγει αποτελέσματα για ευρύτερες περιοχές και ακόμα και για ολόκληρη τη χώρα. Η στατιστική διόρθωση του λάθους πρόβλεψης συναρτήσει των καιρικών συνθηκών, με τη χρήση MOS, θεωρείται απαραίτητη. Όσον αφορά την καμπύλη ισχύος, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της θεωρητικής και αυτής που προκύπτει από την εκτίμηση των δεδομένων, αλλά επίσης αποκλίσεις παρατηρούνται και στις εκτιμήσεις των καμπυλών ισχύος ανάμεσα στα διάφορα έτη. Το μεγαλύτερο μέρος του σφάλματος της πρόβλεψης του Previento θεωρείται ότι οφείλεται στο μοντέλο NWP^[71].



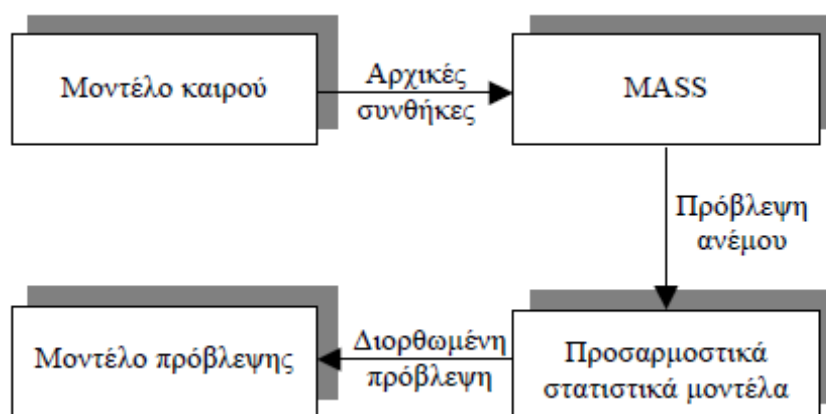
Σχήμα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου Previento

3.5.2.4 Το μοντέλο eWind

Το μοντέλο eWind, που αναπτύχθηκε από την True Wind Inc, συνδυάζει τις φυσικές θεωρήσεις με στατιστικές μεθόδους [72]. Το eWind χρησιμοποιεί αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι, ώστε να παρέχουν ακριβή πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου. Το σύστημα προβλέπει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και στη συνέχεια μετατρέπει τις προβλέψεις αυτές σε παραγόμενη ισχύ. Τα στοιχεία που συλλέγονται από τον χώρο πρόβλεψης, έχουν τη δυνατότητα συνεχούς ανατροφοδότησης, έτσι ώστε να παρέχουν τις καλύτερες δυνατές προβλέψεις σε όλο το διάστημα.

Το eWind, αντίθετα με τα περισσότερα μοντέλα, έχει δυνατότητα παγκόσμιας πρόβλεψης. Η αρχική διαμόρφωση του eWind χρησιμοποιεί ένα μέσης κλίμακας μοντέλο MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System Model), για να κάνει προβλέψεις καιρού (η τρέχουσα έκδοση του είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο, παρόμοιο με το MM5). Ωστόσο, τώρα χρησιμοποιούνται και άλλα μέσης κλίμακας μοντέλα, όπως τα ForeWind, MM5, WRF, COAMPS, workstation-ETA και OMEGA (το μοντέλο αυτό εκτελείται πάνω σε ένα μοναδικό, αδόμητο δίκτυο με μεταβλητή ανάλυση, η οποία επιτρέπει υψηλότερη ανάλυση σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως βουνά και ακτογραμμές καθώς και γύρω από κινούμενα καιρικά συστήματα).

Οι προβλέψεις των ατμοσφαιρικών μοντέλων τροφοδοτούν τα προσαρμοστικά στατιστικά μοντέλα. Τα στατιστικά μοντέλα είναι ένα σύνολο σχέσεων μεταξύ της εξόδου των βασικών μοντέλων στη φυσική ατμοσφαιρικών μοντέλων και των μεταβλητών, που πρόκειται να προβλεφθούν για μια τοποθεσία, όπως π.χ. η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και η πυκνότητα του αέρα στη θέση των Α/Γ. Τα στατιστικά μοντέλα, στην ουσία, βασίζονται στη γραμμική παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών και στα νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο είδος στατιστικών μοντέλων επιλέγει αυτόματα τις καλύτερες προγνωστικές μεταβλητές από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Πέρα από την πρόβλεψη του ανέμου, οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να περιλαμβάνουν θερμοκρασία, μεταβλητότητα, συννεφιά, και άλλες παραμέτρους. Τα νευρωνικά δίκτυα του eWind συνδυάζονται με αλυσίδες Markov.



Σχήμα 3.5: Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου eWind

3.5.2.5 Τα μοντέλα LocalPred και RegioPred

Το LocalPred και το RegioPred είναι μια οικογένεια εργαλείων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε περίπλοκα εδάφη, που αναπτύχθηκαν από τον Martí Perez.

Το LocalPred, περιλαμβάνει βελτιστοποίηση της εισόδου NWP, μοντελοποίηση της χρονοσειράς, μοντελοποίηση μέσης κλίμακας με το MM5 και μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος. Η εξελιγμένη μονάδα στατιστικού υποβιβασμού (*statistical downscaling module*) είναι ικανή να αναγνωρίζει και να απομακρύνει συστηματικά λάθη των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (NWP). Επιπλέον, ενσωματώνει υψηλής ανάλυσης φυσικά μοντέλα του εδάφους με το μέσης κλίμακας μοντέλο MM5, τα οποία επιτρέπουν τη βελτίωση της επίδοσης των μετεωρολογικών προβλέψεων μέσω μιας λεπτομερούς εξέτασης των χαρακτηριστικών του εδάφους στην περιοχή του αιολικού πάρκου. Τέλος, με τη μονάδα καμπύλης ισχύος (*wind farm power curve module*) του αιολικού πάρκου, γίνονται οι προβλέψεις της παραγόμενης αιολικής ισχύος. Έτσι, όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω, το LocalPred περιλαμβάνει όχι μόνο φυσική, αλλά και στατιστική διαμόρφωση, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Το RegioPred είναι ένα εργαλείο για την πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος σε εθνικό επίπεδο. Λειτουργεί συνδυαστικά με το LocalPred μέσω μιας μονάδας αναβάθμισης (*up-scaling module*). Το RegioPred παρέχει ακριβή πρόβλεψη σε χαμηλό κόστος μέσω μιας αποδοτικής επιλογής αιολικών πάρκων αναφοράς^[73].

3.5.2.6 Το μοντέλο HIRPOM

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού HIRLAM εφαρμόστηκε και ως μοντέλο πρόβλεψης αιολικής ισχύος^[74]. Το μοντέλο έτρεχε με τον ενφωλιασμένο τρόπο σε διαφορετικές οριζόντιες χωρικές αναλύσεις (0,45°, 0,225°, 0,15°, 0,05°, 0,014°) στην περίπτωση της Δανίας και με θεωρητικές καμπύλες ισχύος υπολογιζόταν η παραγωγή αιολικής ενέργειας. Το μοντέλο ονομάστηκε HIRPOM (HIRlam Power prediction Model). Μπορεί αυτή η μέθοδος να μην έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά έγινε μία αξιολογή μελέτη από τον Jorgensen και την Moehrle για το πώς επηρεάζει η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού την απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

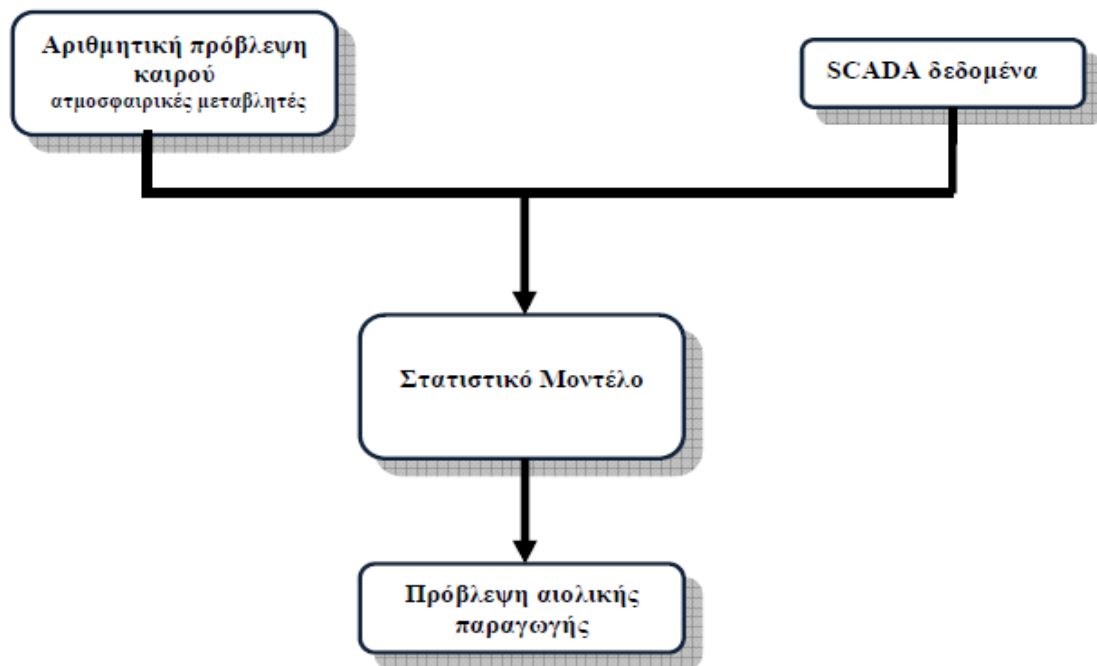
3.6 Στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Οι στατιστικές προσεγγίσεις είναι προϊόν της προσπάθειας των ερευνητών του τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος να επιτύχουν αποδοτικό μετασχηματισμό της ατμοσφαιρικής κατάστασης, όπως αυτή περιγράφεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε αιολική ενέργεια χωρίς περαιτέρω φυσικές θεωρήσεις και παραμετροποιήσεις της ροής του ανέμου στην επιλεγμένη περιοχή. Αντίθετα, συνδυάζουν στατιστικές συσχετίσεις παλαιότερων τιμών ισχύος και παλαιότερων

τιμών προβλέψεων διαφόρων μεταβλητών με τις μετρήσεις της αιολικής ισχύος. Σε αντίθεση με τη φυσική προσέγγιση, οι στατιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν ένα μόνο βήμα, αυτό της στατιστικής επεξεργασίας για την απευθείας μετατροπή των μεταβλητών εισόδου σε αιολική παραγωγή. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη στατιστική αυτή επεξεργασία περιλαμβάνουν ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου, θερμοκρασίες κτλ., τα οποία είναι διαθέσιμα μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, όπως επίσης online μετρήσεις της αιολικής ισχύος, της ταχύτητας και της διεύθυνσης ανέμου κ.ά., οι οποίες δίνονται από ένα σύστημα SCADA. Έχοντας τα δεδομένα αυτά, τα μοντέλα που προσεγγίζουν την πρόβλεψη αιολικής ισχύος με στατιστικές μεθόδους μπορούν να δώσουν εκτίμηση της εξόδου του αιολικού πάρκου σε ένα μόνο βήμα χωρίς περαιτέρω φυσικές θεωρήσεις.

3.6.1 Μεθοδολογία στατιστικής προσέγγισης

Το στατιστικό κομμάτι μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή και περισσότερα στατιστικά γραμμικά ή μη-γραμμικά μοντέλα ή άλλους τύπους. Μερικά παραδείγματα είναι τα μοντέλα "μαύρου κουτιού", τα οποία περιλαμβάνουν τα περισσότερα από τα μοντέλα που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη, όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks, NNs) και οι μηχανές διανυσματικής στήριξης (Support Vector Machines, SVMs). Άλλοι τύποι μοντέλων είναι τα μοντέλα "γκρι κουτιού", τα οποία εκπαιδεύονται εμπειρικά (από ένα σετ δεδομένων) και από όποια γνώση μπορεί να τους παρασχεθεί (π.χ. ημερήσιες μεταβολές). Τέλος, υπάρχουν επίσης και μοντέλα που μπορούν να εκφραστούν αναλυτικά, όπως η παλινδρόμηση Kernel.



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα βημάτων της στατιστικής προσέγγισης

Το στατιστικό μοντέλο μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση ^[39]:

$$\hat{p}_{t+k|t} = f(p_t, p_{t-1}, \dots, p_{t-n}, x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-n}, \hat{x}_{t+1|t}, \dots, \hat{x}_{t+k|t}) + e_t$$

που είναι μια συνάρτηση των παρελθοντικών τιμών του p και μια σειρά από παρελθοντικές τιμές και προβλέψεις της διευκρινιστικής μεταβλητής x .

Τα στατιστικά μοντέλα συνήθως κατασκευάζονται από ένα κομμάτι αυτοπαλινδρόμησης, το οποίο χρησιμοποιείται για να συλλαμβάνει την επίμονη συμπεριφορά του ανέμου, και από ένα κομμάτι μετεωρολογικό, το οποίο αποτελείται από μια μη γραμμική μετατροπή των αριθμητικών καιρικών προβλέψεων. Το κομμάτι της αυτοπαλινδρόμησης συμβάλλει στην ενίσχυση της ακρίβειας των προβλέψεων για ορίζοντες μέχρι και 6 με 10 ώρες μπροστά (π.χ. γενικά, σε αυτή την περίοδο, η χρησιμοποίηση μόνο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού μπορεί να μην είναι αποτελεσματική στο να ξεπεράσουν το μοντέλο persistence).

Στις μέρες μας, οι κύριες εξελίξεις στις στατιστικές προσεγγίσεις της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος επικεντρώνονται στην χρήση πολλαπλών μετεωρολογικών προβλέψεων σαν συνδυασμό μετρήσεων και προβλέψεων και στην βέλτιστη χρησιμοποίηση των χωρικά διάσπαρτων μετρήσεων, ώστε να διορθωθούν τα σφάλματα φάσης ή για την προειδοποίηση σε περίπτωση μεγάλης αβεβαιότητας.

3.6.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικής προσέγγισης

3.6.2.1 Το μοντέλο Wind Power Prediction Tool – WPPT

Το πιο ευρέως διαδεδομένο αυτό-παλινδρομικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος φαίνεται να είναι το WPPT (Wind Power Prediction Tool – εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος), που αναπτύχθηκε στον τομέα IMM (Informatics and Mathematical Modeling) του πολυτεχνείου DTU (Denmark Technical University) της Δανίας ^[75].

Το WPPT βασίζεται σε στατιστικές μεθόδους και προβλέπει την παραγωγή σε μεγάλες εκτάσεις, συνδυάζοντας μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο (online) από επιλεγμένα αιολικά πάρκα στην περιοχή, καθώς και αριθμητικές προβλέψεις καιρού για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Η περιοχή διαιρείται σε υποπεριοχές, εάν αυτό είναι απαραίτητο, και για κάθε υποπεριοχή επιλέγεται ένα αιολικό πάρκο αναφοράς. Οι προβλέψεις γίνονται με δύο τρόπους:

- είτε χρησιμοποιώντας τις online μετρήσεις της αιολικής παραγωγής και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σαν είσοδο για κάθε αιολικό πάρκο αναφοράς και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο αναβάθμισης για την πρόγνωση της παραγωγής σε όλη την περιοχή,
- είτε χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που συνδυάζει offline μετρήσεις της αιολικής παραγωγής της περιοχής με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οι

προβλέψεις των επιμέρους υποπεριοχών αθροίζονται, για να δώσουν μια πρόβλεψη για ολόκληρη την περιοχή.

Η τελική πρόβλεψη για την περιοχή ενδιαφέροντος υπολογίζεται σαν ο σταθμισμένος μέσος των δύο παραπάνω τρόπων πρόβλεψης.

Γενικά το WPPT χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους για να καθορίζει την ιδανική ισοστάθμιση μεταξύ online μετρήσεων και μεταβλητών, που είναι αποτέλεσμα μετεωρολογικών προβλέψεων. Έτσι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται, καθώς μεταβάλλονται τα διαθέσιμα δεδομένα με την πάροδο του χρόνου. Οι μεταβολές μπορεί να οφείλονται σε γήρανση των ανεμογεννητριών, μεταβολές στο περιβάλλον και πάνω από όλα σε αλλαγές των NWP, όπως επίσης και σε αλλαγές στον αριθμό των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο ή μια ευρύτερη περιοχή.

3.6.2.2 Το μοντέλο Sipleólico

Ένα άλλο μοντέλο είναι το Sipleólico το οποίο αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Carlos III της Μαδρίτης. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα από το HIRLAM για την Ισπανία και επίσης συμπεριλαμβάνει ωριαία δεδομένα από το SCADA από το 80% του συνόλου των ανεμογεννητριών. Αυτές οι εισοδοί χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σε μη παραμετρικά στατιστικά μοντέλα, μαζί με διαφορετικές καμπύλες ισχύος. Υπάρχουν εννιά διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων: περιλαμβάνεται ένα μοντέλο ανάλυσης των χρονοσειρών, χωρίς είσοδο από NWP. Άλλα τρία μοντέλα περιλαμβάνουν υψηλές προϋποθέσεις για την ταχύτητα του ανέμου, ενώ τρία επιπλέον λαμβάνουν υπόψη και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα δύο τελευταία αποτελούν συνδυασμούς των προαναφερθέντων και επίσης μιας μη-παραμετρικής πρόβλεψης του ημερήσιου κύκλου. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένας αναδρομικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων και το φίλτρο Kalman (εκτιμητής του γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων).

Έτσι, με τον τρόπο αυτό, μετά την διαδικασία εκτέλεσης των μοντέλων, υπάρχουν 18 διαφορετικές προβλέψεις, οι οποίες συγκρίνονται και συναγωνίζονται μεταξύ τους. Ανάλογα με την απόδοσή τους, γίνεται ένας συνδυασμός των αποτελεσμάτων των καλύτερων μοντέλων και στη συνέχεια υπολογίζεται η έξοδος ισχύος σαν σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων αυτών. Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει είναι ο συνδυασμός του ισπανικού HIRLAM με το πολύπλοκο έδαφος^[73].

3.6.2.3 Το μοντέλο Advanced Wind Power Prediction Tool - AWPPT

Το ινστιτούτο ISET (Institut für Energieversorgungstechnik) δημιούργησε ένα σύστημα διαχείρισης αιολικής ισχύος (Wind Power Management System – WPMS)^[76]. Αυτό αποτελείται από τρία στάδια και παρέχει την τρέχουσα αιολική παραγωγή, καθώς και την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη αυτής από μία μέχρι 72 ώρες. Έτσι, στα πλαίσια αυτού του συστήματος, αναπτύχθηκε ένα σύστημα online παρακολούθησης της αιολικής παραγωγής, το οποίο παρέχει την αιολική παραγωγή

μέσω ενός αλγορίθμου αναβάθμισης, από αποτελέσματα που προκύπτουν από αιολικά πάρκα αναφοράς (1^ο στάδιο) και ένα μοντέλο πρόβλεψης, το Advanced Wind Power Prediction Tool (AWPPT, 2^ο και 3^ο στάδιο). Το AWPPT βασίζεται σε τέσσερις επιτυχείς προσεγγίσεις:

- Ακριβής αριθμητική πρόβλεψη του καιρού από τη Γερμανική Μετεωρολογική υπηρεσία (DWD),
- Μετατροπή των προβλεπόμενων δεδομένων ανέμου στην τοποθεσία του Α/Π, χρησιμοποιώντας το μέσης κλίμακας αριθμητικό μοντέλο KLIMM,
- Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος του Α/Π βασισμένη σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα,
- Αναβάθμιση της προβλεπόμενης ισχύος στη συνολική ισχύ με την οποία τροφοδοτείται το δίκτυο, με τη βοήθεια του online μοντέλου.

3.6.2.4 Το μοντέλο Advanced Wind Power Prediction System – AWPPS

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος CARE πιο προχωρημένα μοντέλα αναπτύχθηκαν και εγκαταστάθηκαν στα αιολικά πάρκα της Κρήτης. Στο ερευνητικό πρόγραμμα που ακολούθησε, το MORE-CARE, η ARMINES ανέπτυξε μοντέλα για πρόβλεψη ισχύος για 48-72 ώρες μπροστά. Μία τελική έκδοση της μεθόδου πρόβλεψης που αναπτύχθηκε από τον Kariniotakis οδήγησε στο AWPPS (Advanced Wind Power Prediction System), που χρησιμοποιείται σε αρκετές χώρες σε όλη την Ευρώπη. Το ARMINES Advanced Wind Power Prediction System αποτελείται από:

- Μοντέλα σχεδιασμένα με στατιστική προσέγγιση χρησιμοποιώντας χρονοσειρές που έχουν την δυνατότητα να προβλέψουν την αιολική ισχύ για χρονικούς ορίζοντες μέχρι 10 ώρες και με χρονικό βήμα της τάξης 10 με 15 λεπτών.
- Μοντέλα ανεπτυγμένα με χρήση προσαρμοσμένων νεύρο-ασαφών δικτύων για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη μέχρι 72 ώρες μπροστά.
- Μοντέλα που συνδυάζουν βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προβλέψεις των παραπάνω μοντέλων για καλύτερη απόδοση σε όλο το χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης.

Το AWPPS έχει τεθεί σε λειτουργία στα νησιά Κρήτη και Μαδέιρα στα πλαίσια του προγράμματος MORE-CARE και δίνει προβλέψεις για 48 ώρες μπροστά χρησιμοποιώντας NWP από το μοντέλο SKIRON. Η ελαστικότητα της προσέγγισης του παραπάνω μοντέλου έκανε δυνατή την ανάπτυξη διαφόρων στρατηγικών για τοπική πρόβλεψη που μπορούν να ενσωματωθούν με τα διαθέσιμα δεδομένα ή την απαιτούμενη ακρίβεια για τους διάφορους ορίζοντες πρόβλεψης.

3.6.2.5 Μοντέλα πρόβλεψης τεχνητής νοημοσύνης

Σε πολλές δημοσιεύσεις έχει προσεγγιστεί το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης αποδείχθηκαν κατάλληλες να περιγράψουν τόσο την αυτό-παλινδρομική

συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, όσο και τις σχέσεις μεταξύ των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, που εξελίσσονται στην περιοχή του υπό μελέτη αιολικού πάρκου, μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με την παραγόμενη αιολική ισχύ.

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από κόμβους χωρισμένους σε επίπεδα, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω των νευρώνων. Ένας κόμβος είναι, στην ουσία, μία συνάρτηση μεταφοράς, που λαμβάνει στην είσοδό της το πολωμένο γινόμενο ενός αριθμού, που ονομάζεται βάρος, με την έξοδο των κόμβων του προηγούμενου επιπέδου ή με μία εξωτερική είσοδο. Οι νευρώνες, καθένας από τους οποίους αποτελείται από ένα βάρος και μία πόλωση (ή κλίση), μοιράζονται όλη την πληροφορία που διέπει ένα σύστημα. Η ικανότητα ενός νευρωνικού δικτύου να προβλέπει, αποκτάται από ένα σύνολο εκπαίδευσης αρκετά μεγάλο, ώστε να περιέχονται όλες οι περιπτώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα και μέσω ενός αλγόριθμου εκμάθησης. Αν και φαίνεται απλή η εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων για την επίλυση ενός προβλήματος, απαιτούν μεγάλη εμπειρία και πολύπλοκους χειρισμούς του αλγόριθμου εκμάθησης, ώστε το νευρωνικό δίκτυο να αποθηκεύσει μόνο την κατάλληλη πληροφορία, ώστε αυτή να είναι γενικευμένη και στον υπόλοιπο χώρο από το σύνολο εκπαίδευσης ^[23].

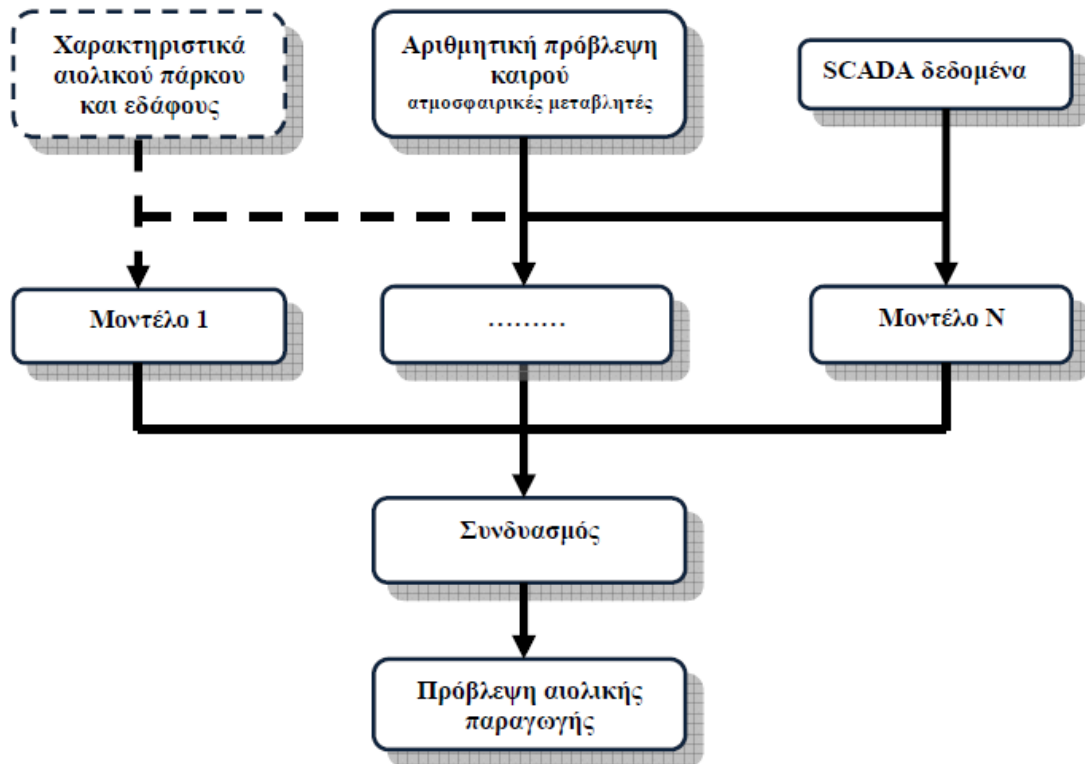
3.7 Συνδυασμένη προσέγγιση φυσικών και στατιστικών μοντέλων

Οι πρόσφατες εξελίξεις στα συστήματα πρόβλεψης αιολικής ισχύος αφορούν μια συνδυαστική εκδοχή των δύο προσεγγίσεων, τα φυσικά και μαθηματικά μοντέλα. Το υβριδικό αυτό μοντέλο ωφελείται, αφενός, από την υψηλή ακρίβεια των μοντέλων των χρονοσειρών σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες, και αφετέρου, από την ακρίβεια των φυσικών μοντέλων σε χρονικούς ορίζοντες από 6 μέχρι 72 ώρες. Το φυσικό μοντέλο επιτρέπει, επίσης, την αύξηση της χωρικής ανάλυσης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά της περιοχής και παράγοντας προβλέψεις χωρίς τη χρήση των μετρήσεων SCADA ^[39].

Δύο τύποι συνδυασμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υβριδικό μοντέλο:

- Ένας συνδυασμός φυσικών και στατιστικών προσεγγίσεων (π.χ. Zephyr μοντέλο) ή
- Ένας συνδυασμός μοντέλων για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (0-6 ώρες) και ένας συνδυασμός για την μακροπρόθεσμη (0-48 ώρες) .

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι ο συνδυασμός εναλλακτικών στατιστικών μοντέλων, όπως το Ισπανικό Sipleólico. Ο συνδυασμός επιτυγχάνεται είτε χρησιμοποιώντας τον ορίζοντα σαν κριτήριο, αφού πρώτα έχει επιλεγεί το μοντέλο που ταιριάζει καλύτερα εκτός λειτουργίας σε κάθε ορίζοντα, είτε με μια διαδικασία επιλογής βασιζόμενη στην πρόσφατη απόδοση κάθε μοντέλου ξεχωριστά.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα βημάτων της συνδυασμένης προσέγγισης

Κεφάλαιο 4

Χαρακτηριστικά σφαλμάτων πρόβλεψης

4.1 Εισαγωγή

Οι προβλέψεις της ισχύος ενός σταθμού ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από εγγενή αβεβαιότητα, που σημαίνει ότι καμία πρόβλεψη δεν μπορεί να είναι ακριβής, και για αυτό είναι απαραίτητο να αξιολογούνται κατάλληλα οι προβλέψεις για την επαρκή σύγκριση της ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων. Στο πλαίσιο της πρόβλεψης της ισχύος, τα σφάλματα της πρόβλεψης συνεπάγονται οικονομικές απώλειες για τους τελικούς χρήστες και το μάνατζμεντ των ενεργειακών ανισομερειών. Η εκτίμηση των προβλέψεων είναι ένα ύψιστης σημασίας μέρος της διαδικασίας της πρόβλεψης, όχι μόνο για την ανάπτυξη μιας καίριας άποψης της λειτουργίας της επιλεγμένης προσέγγισης, αλλά επίσης και για την απόκτηση μιας βαθύτερης διορατικότητας του τι χαρακτηρίζει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να δοθεί η ερμηνεία της "καλής" και της "κακής" πρόβλεψης και επίσης να οριστεί τι είναι αυτό που καθιστά μια πρόβλεψη καλύτερη από μια άλλη. Το τι καθορίζει την επιδεξιότητα των προβλέψεων εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο διαφωνίας ανάμεσα στους δημιουργούς των μοντέλων πρόβλεψης και στους χειριστές αυτών. Βασικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε τρία διαφορετικά είδη καλών εφαρμογών πρόβλεψης καιρού. Πρώτον, οι προβλέψεις θα πρέπει να συμπίπτουν με τα αληθινά "πιστεύω" των δημιουργών των μοντέλων και να μη συγχέονται με το κριτήριο μεγίστης χρησιμότητας των χρηστών των μοντέλων – αυτό είναι το είδος της *συνέπειας* (*consistency*). Δεύτερον, το είδος της *ποιότητας* (*quality*) δηλώνει τη συμφωνία των προβλεπόμενων και των μετρούμενων τιμών. Τέλος, το τρίτο είδος, αυτό της *αξίας* (*value*), συνδέεται άμεσα με την εφαρμογή της πρόβλεψης και απεικονίζει τις οικονομικές ή μη ωφέλειες που προκύπτουν από τη χρήση της πρόβλεψης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η αποτίμηση των προβλέψεων σημείου μπορεί να φαίνεται ως κάτι τετριμμένο, καθώς μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις μετρήσεις. Όμως, μια πληθώρα κριτηρίων αποτίμησης είναι διαθέσιμα, τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν και να σχεδιαστούν με το σωστό τρόπο, προκειμένου να καταλήξει κανείς σε σχετικά συμπεράσματα.

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει η εκτίμηση των προβλέψεων της αιολικής ισχύος με προσεγγίσεις που προσανατολίζονται είτε στα μέτρα του σφάλματος είτε στις κατανομές τους.

4.2 Το σφάλμα πρόβλεψης

Γενικά, το σφάλμα της πρόβλεψης ενός μεγέθους ορίζεται ως η διαφορά της προβλεπόμενης τιμής, που προέρχεται από το μοντέλο πρόβλεψης, από την παρατηρούμενη τιμή, όπως μετριέται από τα όργανα μέτρησης. Έτσι το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ενός μοντέλου που αντιστοιχεί στις επόμενες k ώρες μπορεί να γραφεί:

$$e_{t+k/t} = \hat{p}_{t+k/t} - p_{t+k/t}$$

δεδομένου ότι η πρόβλεψη $\hat{p}_{t+k/t}$ προκύπτει από την γνώση των παραγόντων της πρόβλεψης που είναι διαθέσιμη μέχρι τη χρονική στιγμή t .

Για να γίνουν τα αποτελέσματα περισσότερο εμφανή, το σφάλμα της πρόβλεψης διαιρείται με την εγκατεστημένη ισχύ του υπό μελέτη πάρκου. Η τιμή που προκύπτει ονομάζεται κανονικοποιημένο σφάλμα της πρόβλεψης και έχει τη παρακάτω μορφή:

$$e_{t+k/t} = \frac{1}{P_n} (\hat{p}_{t+k/t} - p_{t+k/t})$$

όπου P_n είναι η εγκατεστημένη ισχύς.

Σε αντίθεση με άλλα προβλήματα πρόβλεψης, όπως η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παρουσίαση του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ως ποσοστό επί τοις εκατό της μετρούμενης τιμής καθίσταται αδύνατη, αφού η παραγωγή ενός πάρκου μπορεί να ισούται με μηδέν. Παράλληλα, εφαρμόζοντας το κανονικοποιημένο σφάλμα, είναι δυνατόν να συγκριθεί η απόδοση ενός μοντέλου σε διαφορετικά πάρκα ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Από την πλευρά της αγοράς ενέργειας, όπου σημασία έχει το ποσό της υπερεκτιμημένης ή υποεκτιμημένης ενέργειας, θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική παρουσίαση του σφάλματος. Μία άλλη μέθοδος που εφαρμόζεται, αλλά δεν προτιμάται τόσο από τους τελικούς χρήστες, είναι η κανονικοποίηση του σφάλματος με την μέση τιμή της χρονοσειράς της παραγόμενης ισχύος την χρονική τιμή t . Η τελευταία μέθοδος κανονικοποίησης του σφάλματος επιτρέπει την καλύτερη εκτίμηση του κόστους του σφάλματος σε συνάρτηση με τον συντελεστή απόδοσης του αιολικού πάρκου.

Κάθε σφάλμα πρόβλεψης μπορεί να διαχωριστεί στο συστηματικό και στο τυχαίο σφάλμα

$$e_{t+k/t} = b_{t+k/t}^e + \xi_{t+k/t}^e$$

όπου το $b_{t+k/t}^e$ είναι σταθερό και ονομάζεται κλίση του σφάλματος και το $\xi_{t+k/t}^e$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή. Όταν το σύστημα πρόβλεψης είναι ιδανικό, το συστηματικό σφάλμα ισούται με το μηδέν και το τυχαίο τμήμα του

ονομάζεται λευκός θόρυβος. Ο λευκός θόρυβος είναι μια σειρά από ανεξάρτητα σφάλματα, που μπορούν να μοντελοποιηθούν με μια κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής (Κεντρικό Οριακό Θεώρημα). Ωστόσο, στην πράξη αυτό δεν ισχύει, αφού τα σφάλματα πρόβλεψης ακολουθούν άλλου είδους κατανομές.

4.3 Πλαίσιο εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης

Η ποσοτική εκτίμηση της ποιότητας ενός μοντέλου πρόβλεψης μπορεί να προκύψει από στατιστικά κριτήρια γνωστά ως *μέτρα του σφάλματος*. Τα μέτρα του σφάλματος υπολογίζονται πάνω στην χρονοσειρά του σφάλματος $\{e_{i,k}\}$, που προκύπτει από την διαφορά των χρονοσειρών της προβλεπόμενης αιολικής ισχύος $\{\hat{p}_{i,k}\}$ και της αντίστοιχης μετρούμενης $\{p_i\}$. Για να πιστοποιηθεί λοιπόν ένα μοντέλο πρόβλεψης με βάση τα μέτρα του σφάλματός του, είναι απαραίτητο η χρονική περίοδος αποτίμησης του να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αξιολογηθεί σε όλες τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και να εξαλειφθούν οι τυχαίες λανθασμένες μετρήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομα τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μεθόδων πρόβλεψης. Υπάρχουν δύο ειδών προσεγγίσεις: η βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος και η βασισμένη στην κατανομή του.

4.3.1 Εκτίμηση βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος

Το πρώτο μέτρο του σφάλματος ορίζεται ως η **μέση τιμή (bias) των σφαλμάτων**, που προκύπτουν από όλη την χρονική περίοδο αποτίμησης και υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα k της πρόβλεψης ως εξής:

$$bias(k) = \hat{\mu}_k^e = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} e_{t+k/t}$$

όπου N_T είναι ο αριθμός των προβλέψεων που χρησιμοποιούνται. Η μέση τιμή του σφάλματος είναι ο πρώτος παράγοντας για την εκτίμηση της επίδοσης μιας μεθόδου πρόβλεψης. Παρέχει πληροφορίες για το αν το μοντέλο έχει την τάση να υπερεκτιμάει ή υποεκτιμάει την παραγωγή της αιολικής ισχύος. Στη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η μέση τιμή του σφάλματος διατηρείται κοντά στο μηδέν χάρη στις στατιστικές μεθόδους που εφαρμόζονται (ακόμα και οι φυσικές μέθοδοι έχουν τεχνικές MOS για να απομακρύνουν το bias) και γι' αυτό είναι αδύνατον να πιστοποιηθεί μία προσέγγιση με αυτό το κριτήριο. Υπολογίζοντας τη μέση τιμή για διάφορα υποσύνολα, στα οποία επικρατούν διαφορετικές καιρικές συνθήκες, μπορεί να βγάλει κανείς συμπέρασμα για ποιες συνθήκες η μέθοδος π.χ. υπερεκτιμά την πρόβλεψη. Εκτός, όμως, από αυτή τη διαισθητική προσέγγιση, η μέση τιμή του

σφάλματος δεν δίνει πληροφορίες για την ικανότητα εκτίμησης του μοντέλου: είναι απίθανο μια μέθοδος με μηδενική μέση τιμή να δίνει τέλειες προβλέψεις. Σε αυτή την περίπτωση το bias προκύπτει μηδενικό, γιατί θετικές και αρνητικές τιμές του αλληλοαναιρούνται.

Ένα άλλο συνηθισμένο μέτρο του σφάλματος που φανερώνει τη συνεισφορά θετικών και αρνητικών σφαλμάτων στην έλλειψη ακρίβειας, είναι το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE – Mean Square Error)**, το οποίο ισούται με το μέσο όρο των αθροισμάτων όλων των τετραγωνικών σφαλμάτων:

$$MSE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2$$

ή επίσης η τετραγωνική ρίζα αυτού, δηλαδή (**RMSE – Root Mean Square Error**):

$$RMSE(k) = [MSE(k)]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Επίσης το RMSE μπορεί να γραφτεί και ως:

$$RMSE = bias^2 + SDE^2 = bias^2 + sbias^2 + disp^2$$

όπου το **sbias** εκφράζει τη διαφορά των τυπικών αποκλίσεων μεταξύ μετρούμενης και προβλεπόμενης χρονοσειράς και δίνεται από τον τύπο:

$$sbias = \sigma(\rho) - \sigma(\hat{\rho})$$

και το **disp** αναφέρεται στη διασπορά και συμπεριλαμβάνει την αλληλοσυσχέτιση των χρονοσειρών και δίνεται από τον τύπο:

$$disp = \sqrt{2\sigma(\rho)\sigma(\hat{\rho})(1 - r_{\rho,\hat{\rho}})}$$

Το RMSE είναι πιο εύκολο να ερμηνευτεί αφού έχει τις ίδιες μονάδες με τις προβλέψεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μέτρα των σφαλμάτων δεν εξαρτώνται από το μέγεθος του συνόλου αποτίμησης.

Ένα άλλο μέτρο εκτίμησης σφάλματος είναι το **μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE – Mean Absolute Error)** το οποίο είναι η μέση τιμή της απόλυτης τιμής των σφαλμάτων.

$$MAE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} |e_{t+k/t}|$$

Στην πραγματικότητα η επιλογή των RMSE και MAE σαν κύριο κριτήριο εκτίμησης του μοντέλου εξαρτάται από την ευαισθησία των τελικών χρηστών στο σφάλμα. Η ευαισθησία δίνεται από την συνάρτηση απωλειών. Η χρήση του RMSE συνεπάγεται τη θεώρηση τετραγωνικής συνάρτησης απωλειών, ενώ η χρήση του MAE συνεπάγεται τη θεώρηση γραμμικής.

Αντί για τη χρησιμοποίηση του RMSE μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς την *τυπική απόκλιση (SDE – Standard Deviation of the Errors)*.

$$SDE(k) = \hat{\sigma}_k^e = \frac{1}{N_T - 1} \sum_{t=1}^{N_T} \left[(e_{t+k/t} - b_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Το κριτήριο του SDE είναι ένα μέγεθος που σχετίζεται με το τυχαίο τμήμα του σφάλματος. Σε αντίθεση με το SDE, τόσο τα συστηματικά όσο και τα τυχαία σφάλματα συνεισφέρουν στην τιμή του MAE και RMSE.

Στατιστικά, οι τιμές του bias και του MAE σχετίζονται με τη ροπή πρώτης τάξης της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης και για το λόγο αυτό, είναι μεγέθη που σχετίζονται άμεσα με την παραγόμενη ισχύ. Οι τιμές του RMSE και SDE σχετίζονται με τη ροπή δεύτερης τάξης και με τη μεταβλητότητα του σφάλματος πρόβλεψης. Δεν έχουν άμεση ερμηνεία. Στα δύο τελευταία μέτρα, μεγάλα σφάλματα πρόβλεψης έχουν μεγαλύτερη επίδραση. Για αυτό το λόγο, το RMSE είναι πιο ευαίσθητο στην παρουσία λανθασμένων δεδομένων από το MAE στο σύνολο εκτίμησης (validation set). Επειδή το τελευταίο είναι πιο ανθεκτικό, θα πρέπει να προτιμάται σαν βασικό κριτήριο, εάν κανείς δεν είναι σίγουρος για την ορθότητα των δεδομένων του συνόλου εκτίμησης. Μεγάλη τιμή του RMSE σημαίνει χαμηλή ακρίβεια της εκτιμώμενης μεθόδου.

Τα παραπάνω μεγέθη σφάλματος μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας το σφάλμα $e_{t+k/t}$ ή το κανονικοποιημένο σφάλμα. Έτσι προκύπτουν τα κανονικοποιημένα μέτρα σφάλματος, όπως η κανονικοποιημένη μέση τιμή (Nbias), η κανονικοποιημένη τυπική απόκλιση (NSDE) κλπ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα πρόβλεψης είναι μη στατικά. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της μη γραμμικής διαδικασίας, υπάρχουν περίοδοι ή συγκεκριμένες συνθήκες για τις οποίες μπορεί να γίνει ευκολότερα η πρόβλεψη από άλλες. Επίσης, κάποια μοντέλα μπορεί να είναι καλύτερα από άλλα, στην απεικόνιση της θεωρούμενης διαδικασίας για δεδομένες μη γραμμικότητες. Είναι σκόπιμο να υπολογίζονται (εκτιμώνται) τα μεγέθη του σφάλματος σε περιόδους που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες συνθήκες: μεγάλη ταχύτητα ανέμου, καλοκαίρι, δυτικός άνεμος κλπ.

4.3.2 Εκτίμηση βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος

Τα μέτρα που προτάθηκαν παραπάνω αποδίδουν τη συμπεριφορά του μοντέλου με μια μόνο τιμή. Για παράδειγμα, μία δοσμένη μέθοδος έχει NMAE ίσο με 3,5% της

εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου, για προβλέψεις μίας ώρας μπροστά. Ωστόσο, η εκτίμηση του μοντέλου δεν μπορεί να γίνει από μια μοναδική τιμή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιεί κανείς την κατανομή του σφάλματος. Ένας άλλος τρόπος, για το χαρακτηρισμό των σφαλμάτων της πρόβλεψης, είναι η μελέτη των κατανομών τους, που αποσκοπεί στη συλλογή περισσότερων πληροφοριών.

Η βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος προσέγγιση εκτίμησης αναπτύχθηκε για να επισημαίνει τα χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα της κοινής κατανομής των προβλέψεων \hat{p} και των παρατηρήσεων $p, q(\hat{p}, p)$, η οποία περιέχει όλες τις μη εξαρτώμενες από το χρόνο πληροφορίες για την ποιότητα της μεθόδου πρόβλεψης. Μια τέτοια προσέγγιση, βασισμένη στην κατανομή, είναι επίσης γνωστή και ως Murphy-Winkler. Καθώς είναι δύσκολο να εξετάσει κανείς άμεσα την κοινή κατανομή, μπορεί να εστιάσει στις διάφορες δεσμευμένες και οριακές κατανομές για να εξάγει συμπεράσματα για χαρακτηριστικά της κοινής κατανομής. Τέτοιες είναι, η δεσμευμένη κατανομή των παρατηρήσεων δεδομένων των προβλέψεων $q(p|\hat{p})$, η δεσμευμένη κατανομή των προβλέψεων δεδομένων των παρατηρήσεων $q(\hat{p}|p)$, η οριακή κατανομή των παρατηρήσεων $q(p)$ και η οριακή κατανομή των προβλέψεων $q(\hat{p})$.

Ακολουθώντας αυτή την προσέγγιση εκτίμησης σφάλματος, εξετάζεται πώς συγκεκριμένες παράμετροι (π.χ. προβλεπόμενη ισχύς) επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά (τις ροπές από πρώτης μέχρι τέταρτης τάξης) των κατανομών των σφαλμάτων πρόβλεψης. Η ροπή κάθε τάξης αντιστοιχεί σε διαφορετικό χαρακτηριστικό του σφάλματος πρόβλεψης. Επομένως:

- 1) Το μέσο $\hat{\mu}_k^e$ αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους της κατανομής και δίνει πληροφορίες για το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Δίνεται από την προαναφερθείσα σχέση για τη μέση τιμή.
- 2) Η τυπική απόκλιση $\hat{\sigma}_k^e$ αντανακλά τη διασπορά της κατανομής και έτσι μας πληροφορεί για το βαθμό αβεβαιότητας της πρόβλεψης.
- 3) Η ασυμμετρία ή λοξότητα $\hat{\nu}_k^e$ περιγράφει την έλλειψη συμμετρίας της κατανομής. Δίνει την πιο πιθανή κατεύθυνση των σφαλμάτων και μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

$$\nu_k^e = \frac{N_T}{(N_T - 1)(N_T - 2)} \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{e_{t+k/t} - \hat{\mu}_k^e}{\hat{\sigma}_k^e} \right)^3$$

- 4) Η κύρτωση κ_k^e μας ενημερώνει για το σχήμα της δοσμένης κατανομής, συγκρινόμενη με την κανονική κατανομή. Όπως είναι προφανές, η κανονική κατανομή έχει μηδενική κύρτωση και θετική κύρτωση αντιστοιχεί σε πιο έντονη αιχμή και βαρύτερα άκρα.

$$\hat{\kappa}_k^e = \frac{N_T(N_T - 1)}{(N_T - 1)(N_T - 2)(N_T - 3)} \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{e_{t+k/t} - \hat{\mu}_k^e}{\hat{\sigma}_k^e} \right)^4 - \frac{3(N_T - 1)^2}{(N_T - 2)(N_T - 3)}$$

4.3.3 Σύγκριση της ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης

Κατά την εκτίμηση των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης μπορεί να μην είναι σαφές το ποια είναι η καλύτερη, καθώς μια μέθοδος μπορεί να είναι καλύτερη με κάποιο κριτήριο αλλά όχι με κάποιο άλλο. Επίσης, η επίδοση των μοντέλων μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τον ορίζοντα εκτίμησης. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητο η εκτίμηση για την ποιότητα της πρόβλεψης να βασίζεται σε διεξοδική ανάλυση, αποτελούμενη από ένα σύνολο μέτρων σφάλματος.

Ένας τρόπος για να συγκρίνει κανείς τις διάφορες μεθόδους και να ποσοτικοποιήσει το κέρδος σε σύγκριση με τα μοντέλα αναφοράς, είναι να χρησιμοποιήσει το κριτήριο που ορίζεται σαν *βελτίωση με σεβασμό (improvement with respect)* ως προς το μοντέλο αναφοράς. Αυτό αντιστοιχεί στη μείωση του σφάλματος που επιτυγχάνεται με την προηγμένη μέθοδο, για ένα δεδομένο μέτρο σφάλματος. Η μέθοδος ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Im p^{ref}(k) = \frac{Y^{ref}(k) - Y(k)}{Y^{ref}(k)}$$

όπου Y το θεωρούμενο κριτήριο (μέτρο) σφάλματος, $Y^{ref}(k)$ είναι η τιμή για την προσεγγιστική μέθοδο αναφοράς και $Y(k)$ για το χρονικό ορίζοντα k . Το κριτήριο μπορεί να είναι το MAE, το RMSE ή το SDE. Το κριτήριο μπορεί να πάρει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές ανάλογα με το αν έχουμε βελτίωση ή χειροτέρευση της επίδοσης, σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς.

Μια άλλη δυνατότητα για να συγκρίνει κανείς την επίδοση των μοντέλων, είναι να υπολογίσει τη σταθερά αποφασιστικότητας (R^2) για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης:

$$R^2(k) = \frac{MSE^0(k) - MSE(k)}{MSE^0(k)}$$

όπου το MSE^0 είναι το MSE του γενικού μοντέλου.

Στη στατιστική, η σταθερά αυτή (R^2) αντιπροσωπεύει την ικανότητα του μοντέλου να εξηγεί τη μεταβλητότητα των δεδομένων.

4.4 Κατανομή σφάλματων πρόβλεψης

4.4.1 Κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου

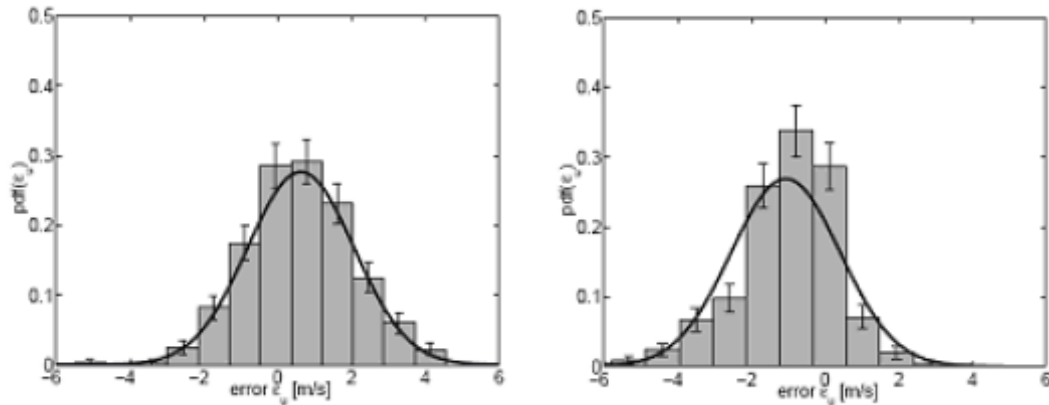
4.4.1.1 Μορφή της κατανομής

Η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου έχει διαπιστωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί **κανονική κατανομή (normal distribution)**. Ο Matthias Lange, στη διδακτορική διατριβή του, μελέτησε την κατανομή του σφάλματος της ταχύτητας του ανέμου. Χρησιμοποίησε το μοντέλο πρόβλεψης Previento για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος σε διάφορα διασκορπισμένα πάρκα στη Γερμανία, αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP) από τη Γερμανική Υπηρεσία καιρού (DWD) και δεδομένα από τα έτη 1996, 1997 και 1999. Επίσης χρησιμοποίησε τα δύο τυπικά στατιστικά τεστ, το παραμετρικό χ^2 και το μη-παραμετρικό τεστ Lilliefors, με την υπόθεση ότι οι κατανομές είναι κανονικές. Σκοπός του ήταν μια πιο λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών των αιολικών πάρκων και των προβλεπόμενων ωρών.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του έδειξαν ότι η πλειοψηφία των προβλέψεων έχουν σφάλματα που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Συγκεκριμένα, μετά από όλα τα τεστ που έτρεξε για τα αιολικά πάρκα και για τα τρία έτη, το αποτέλεσμα ήταν το εξής: το 82% και το 92% πέρασαν (δηλαδή δεν απέρριψαν την υπόθεση ότι οι κατανομές είναι κανονικές) το χ^2 -τεστ για τα έτη 1996 και 1997 αντίστοιχα, ενώ για το Lilliefors τεστ τα ποσοστά ήταν 81% και 93%. Για το 1999, τα ποσοστά ήταν πολύ χαμηλότερα, 69% για το χ^2 -τεστ και 63% για το Lilliefors τεστ. Αυτό οφείλεται στα προβλεπόμενα δεδομένα, τα οποία ήταν προβλέψεις σημείου, στα οποία είχε συμπεριληφθεί η τοπολογία του αιολικού πάρκου.

Επίσης, οι γραφικές παραστάσεις του Landberg^[70] και του Giebel^[77], για το δανέζικο αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης καιρού HIRLAM, επιβεβαιώνουν την σχεδόν κανονική κατανομή του σφάλματος της ταχύτητας του ανέμου.

Παρακάτω φαίνονται δύο κατανομές των συναρτήσεων πυκνότητας-πιθανότητας δύο αιολικών πάρκων στη Γερμανία, σε επίπεδο (Fehrman) και σε πολύπλοκο έδαφος (Altenbecken). Στο δεύτερο, παρατηρούμε μια μικρή απόκλιση από την κανονική κατανομή.



Σχήμα 4.1: Κατανομές σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου για δύο αιολικά πάρκα στη Γερμανία (Fehrman-αριστερά, Altenbecken-δεξιά). Πρόκειται για το έτος 1996, ορίζοντα πρόβλεψης ίσο με 12 ώρες και ύψος μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου 10 μέτρα.

4.4.1.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, μεταβάλλονται ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης και την πολυπλοκότητα του εδάφους. Ορισμένα από αυτά είναι κοινά για όλα τα αιολικά πάρκα και άλλα παρουσιάζουν τοπικό χαρακτήρα. Για τον τρόπο που ο ορίζοντας πρόβλεψης και η πολυπλοκότητα του εδάφους τα επηρεάζουν, ο Lange στη διδακτορική διατριβή του εξέτασε συνολικά 30 αιολικά πάρκα (Α/Π) και από αυτά επέλεξε έξι, εκ των οποίων τα τρία βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος στη Β. Γερμανία: Α/Π Fehrman σε ένα νησί στη Βαλτική, Α/Π Schuelp σε ακτή της Β. Θάλασσας και Hilkenbrook περίπου 70km μακριά από την ακτή και τα άλλα τρία βρίσκονται σε πολύπλοκο έδαφος: Altenbecken και Söllnitz σε σχετικά ορεινό έδαφος, Rapshagen σε λιγότερο ορεινό έδαφος.

Ο Lange πραγματοποίησε αυτή τη μελέτη και επικεντρώθηκε στα γενικά χαρακτηριστικά του σφάλματος της ταχύτητας του ανέμου στα συγκεκριμένα αιολικά πάρκα. Σκοπός του ήταν να προσδιορίσει τα στατιστικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι όμοια σε όλα τα αιολικά πάρκα (*global characteristics*) και αυτά που έχουν τοπικό χαρακτήρα (*regional characteristics*). Για αυτό το λόγο, τα μέτρα των σφαλμάτων κανονικοποιήθηκαν προς τη μέση μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου.

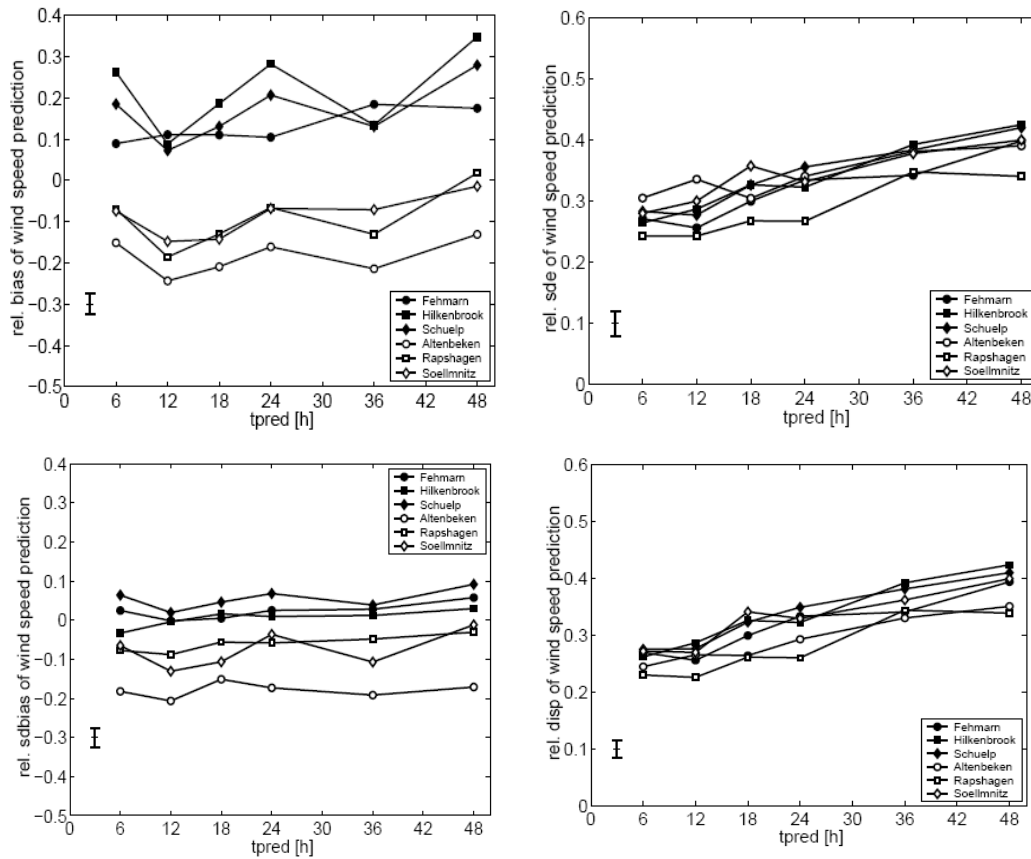
Αρχικά, εξέτασε τη συμπεριφορά του σχετικού RMSE (κανονικοποιημένο ως προς τη μέση ετήσια μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου) συνολικά και μετά τη συμπεριφορά του καθενός από τους όρους που συμβάλλουν σε αυτό. Για το σχετικό RMSE, διαπίστωσε ότι αυξάνεται με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης t_{pred} και η τιμή του είναι παρόμοια για όλα τα αιολικά πάρκα, κυμαίνεται δε για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών μεταξύ 0,25 και 0,37 και για ορίζοντα πρόβλεψης 48 ωρών από 0,35 μέχρι και 0,55. Το RMSE παρουσιάζει ημερήσιες διακυμάνσεις, οι οποίες όμως δεν έχουν την ίδια μορφή για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Από τους όρους που αποτελούν το σχετικό RMSE, η σχετική μέση τιμή (*relative bias*) και η σχετική

διαφορά των τυπικών αποκλίσεων (*relative sbias*) επηρεάζονται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου Α/Π και συγκεκριμένα από την πολυπλοκότητα του εδάφους. Η σχετική διασπορά, *disp*, επηρεάζει όλα τα Α/Π με τον ίδιο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το σχετικό bias έχει συγκεκριμένη συμπεριφορά για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων Α/Π. Παρουσιάζει ημερήσιες διακυμάνσεις όμοιες για όλα τα Α/Π, με την τιμή του να είναι μικρότερη τις μεσημεριανές ώρες και να αυξάνεται το απόγευμα. Έχει δηλαδή ένα χαρακτηριστικό σχήμα W για τα ηπειρωτικά Α/Π, ενώ στα *offshore* Α/Π οι διακυμάνσεις δεν είναι τόσο έντονες. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο συστηματικό σφάλμα που εισάγεται από το NWP μοντέλο και σχετίζεται με τη μη ιδανική ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση σε αυτό. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μέσης τιμής είναι ότι τα Α/Π που βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος έχουν θετική μέση τιμή. Αυτό υποδηλώνει μια υπερεκτίμηση των προβλεπόμενων τιμών. Αντίθετα, τα Α/Π που βρίσκονται σε πολύπλοκο έδαφος έχουν αρνητική μέση τιμή, κάτι που υποδηλώνει υποτίμηση των προβλεπόμενων τιμών. Η εκάστοτε υποτίμηση ή υπερίμηση των προβλεπόμενων τιμών οφείλεται στα NWP. Συγκεκριμένα, η υποτίμηση των προβλεπόμενων τιμών σε πολύπλοκο έδαφος οφείλεται στο γεγονός ότι τα Α/Π είναι ιδανικά τοποθετημένα, έτσι ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή απόδοση.

Η σχετική διαφορά των τυπικών αποκλίσεων (*relative sbias*) παρουσιάζει διαφορετικές τιμές για το κάθε Α/Π. Αιολικά πάρκα που είναι τοποθετημένα σε επίπεδο έδαφος παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές *sbias*, ενώ μεταξύ των Α/Π που είναι τοποθετημένα σε πολύπλοκο έδαφος η διαφορά των τιμών *sbias* είναι μεγαλύτερη. Παράλληλα, για όλα τα Α/Π, το *sbias* παραμένει σχεδόν σταθερό με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης.

Η σχετική διασπορά, *disp*, εκφράζει τη συνεισφορά του φασικού σφάλματος στο RMSE και αυξάνεται με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης. Είναι καθολική, με την έννοια ότι η επίδραση του φασικού σφάλματος αυξάνεται με τον ορίζοντα πρόβλεψης, όμοια για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του εδάφους. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης δίνονται στο σχήμα 4.2.

Η αποσύνθεση του RMSE οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτό κυριαρχείται κυρίως από φασικά σφάλματα. Ακόμα και όταν το bias είναι σημαντικό, μπορεί να απομακρυνθεί με τεχνικές MOS ή με τη χρήση στατιστικών προσεγγίσεων. Έτσι καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα, ότι τα φασικά σφάλματα έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στο τελικό σφάλμα της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου από ότι τα σφάλματα πλάτους.



Σχήμα 4.2: Χαρακτηριστικά σφάλματος προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου (*rel. bias, rel. sde, rel. sdbias, rel. disp*) συναρτήσει του οριζοντα πρόβλεψης t_{pred}

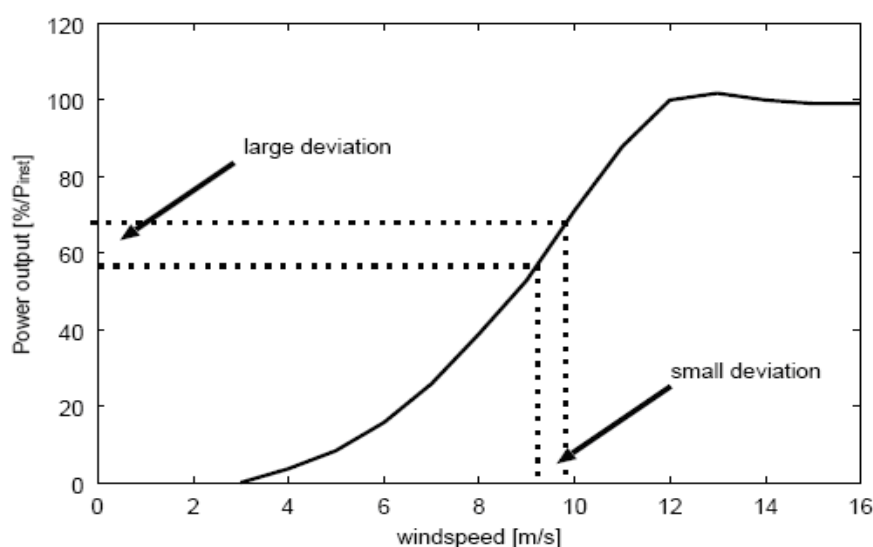
4.4.2 Κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

4.4.2.1 Μορφή της κατανομής

Σε αντίθεση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, οι στατιστικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι εντελώς διαφορετικές. Στη διατριβή του ο Lange αποδεικνύει ότι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των σφαλμάτων αυτών είναι μη συμμετρικές και όχι κανονικές και γενικά έχουν υψηλότερη συγκέντρωση σε μικρές τιμές και συγκεκριμένα κοντά στο μηδέν (σχήμα 4.4). Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι ταχύτητες κάτω από την ταχύτητα αποκοπής της Α/Γ αντιστοιχούν σε μηδενική παραγόμενη ισχύ από την καμπύλη ισχύος. Επίσης είναι τελείως ασύμμετρες. Για αυτό, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι από τα τεστ που πραγματοποίησε σε 496 κατανομές σε διαφορετικά αιολικά πάρκα και για διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης t_{pred} , όλες απέρριψαν την αρχική υπόθεση, δηλαδή ότι είναι κανονικές.

Ας θεωρήσουμε την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ, $P(u)$. Ένα χαρακτηριστικό της είναι η μη γραμμικότητα. Η καμπύλη είναι ανάλογη του u^3 για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ταχύτητα ένταξης και σταθερή για ταχύτητες, για τις οποίες η ισχύς ξεπερνά την ονομαστική ισχύ της Α/Γ, ενώ μηδενίζεται, όταν η ταχύτητα του

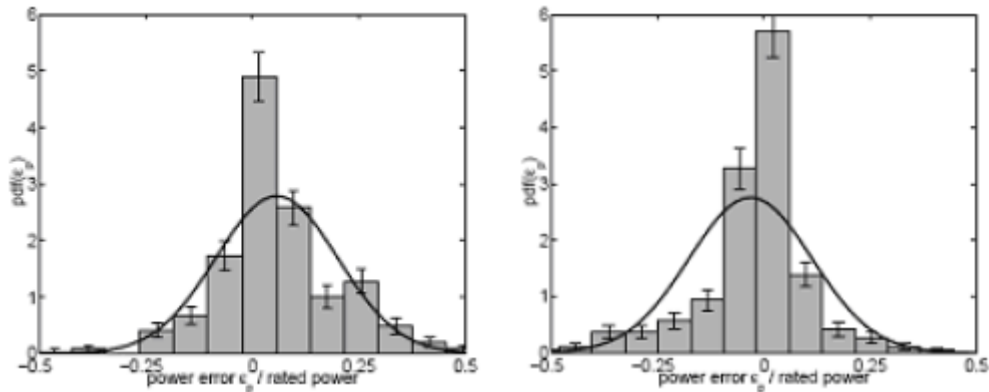
ανέμου γίνει μεγαλύτερη από την ταχύτητα αποκοπής ή είναι μικρότερη από την ταχύτητα ένταξης. Υποθέτουμε ότι η προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου έχει μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή. Στο απότομο κομμάτι της καμπύλης ισχύος, μικρή διαφορά μεταξύ προβλεπόμενης και μετρούμενης ταχύτητας του ανέμου μεταφράζεται σε σχετικά μεγάλη διαφορά στην αντιστοιχούσα ισχύ. Σε αντίθεση με αυτό, εάν μικρή απόκλιση στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου συμβαίνει στο επίπεδο κομμάτι της καμπύλης, όπου η κλίση είναι μηδενική, το σφάλμα στην πρόβλεψη της ισχύος είναι σχεδόν μηδενικό. Με αυτόν τον τρόπο, η καμπύλη ισχύος αυξάνει ή μειώνει τις αρχικές αποκλίσεις στην προβλεπόμενη ταχύτητα, ανάλογα με την τοπική της παράγωγο (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Τυπική καμπύλη ισχύος και σχετικές αποκλίσεις

Τα πειράματα που έκανε ο Lange έδειξαν, ότι από τις κατανομές σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος που εξετάστηκαν, καμία δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Για τις περισσότερες εξεταζόμενες περιπτώσεις, η πιθανότητα να βρεθεί το σφάλμα πρόβλεψης μέσα στο διάστημα $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ είναι 77%, μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από το 68% που αντιστοιχεί στην κανονική κατανομή.

Συνεπώς, μπορεί να καταλάβει κάποιος ότι μετατρέποντας την ταχύτητα του ανέμου σε αιολική ισχύ, τα στατιστικά χαρακτηριστικά που αφορούν την απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών αλλάζουν τελείως. Αυτό σχετίζεται προφανώς με τη μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος, σαν βασικό στοιχείο της μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε ισχύ.



Σχήμα 4.4: Κατανομές σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για δύο αιολικά πάρκα στη Γερμανία (Fehrman-αριστερά, Altenbecken-δεξιά). Πρόκειται για το έτος 1996 και τα σφάλματα είναι κανονικοποιημένα ως προς την ετήσια παραγόμενη ισχύ από μια ανεμογεννήτρια.

4.4.2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά

Μετά την εκτίμηση της προβλεπόμενης ακρίβειας των προβλέψεων της ταχύτητας του ανέμου που πραγματοποιήθηκε παραπάνω, θα ακολουθήσει εκτίμηση της παραγόμενης αιολικής ισχύος. Για να είναι εφικτή η σύγκριση των σφαλμάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ανάμεσα σε διαφορετικά αιολικά πάρκα, απαιτείται κάποιο είδος κανονικοποίησης. Ο Lange στη διατριβή του, χρησιμοποίησε ως αναφορά τη μέση ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή αλλά και το είδος της ανεμογεννήτριας. Στο σχήμα 4.4.5 φαίνονται τα διαγράμματα με τα χαρακτηριστικά του σφάλματος της αιολικής ισχύος για τα διάφορα γερμανικά αιολικά πάρκα. Ακολουθεί ανάλυση αυτών των στατιστικών χαρακτηριστικών.

Η σχετική τυπική απόκλιση $\sigma(P_{meas})/\overline{P_{meas}}$ της μετρούμενης ισχύος εξόδου είναι 1,8 έως 2,3 φορές μεγαλύτερη από αυτή της μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό οφείλεται στη μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος.

Η σχετική RMSE για την προβλεπόμενη ισχύ κυμαίνεται για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών μεταξύ 0,5 και 1,1 και για ορίζοντα πρόβλεψης 48 ωρών από 0,8 μέχρι και 1,45. Παρατηρούμε ότι πρόκειται για διπλάσιες τιμές από τη σχετική RMSE της ταχύτητας του ανέμου.

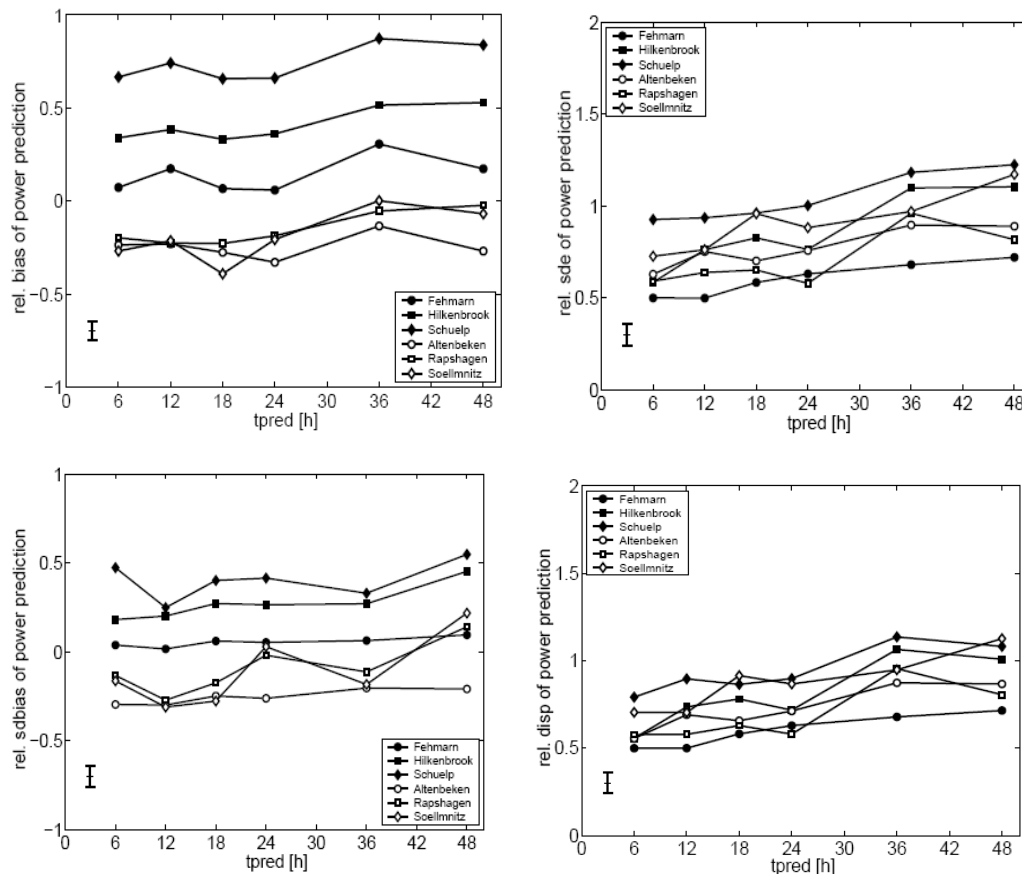
Η σχετική μέση τιμή (*bias*) παρουσιάζει ασυμφωνία ανάμεσα στα αιολικά πάρκα και κυμαίνεται από 0,8 έως -0,5. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις εξακολουθούν να είναι της τάξεως 10-20% της μέσης ισχύος, αλλά υπάρχει αντιστροφή με το μεγαλύτερο bias να εμφανίζεται τις μεσημεριανές αντί τις βραδινές ώρες. Δεν έχει δηλαδή το χαρακτηριστικό σχήμα *W*. Αυτή η αντιστροφή των ημερήσιων διακυμάνσεων δηλώνει ότι η διαφορά των μέσων τιμών των μεσημεριανών και βραδινών ωρών υπερεκτιμούνται από το σύστημα πρόβλεψης της ισχύος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι επιπτώσεις σταθερότητας δεν περιλαμβάνονται στο μετασχηματισμό του ύψους μέτρησης. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το *bias* είναι η μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος, καθώς η διαφορά ανάμεσα στις

μετρούμενες και τις προβλεπόμενες τιμές τις μεσημεριανές ώρες είναι μεγαλύτερη, αφού αυτές οι μέσες τιμές έχουν μεγαλύτερες απόλυτες τιμές από ότι έχουν τις βραδινές ώρες. Όσον αφορά την πολυπλοκότητα του εδάφους, όπως και στην περίπτωση της ταχύτητας του ανέμου, το *bias* είναι θετικό για επίπεδο έδαφος και αρνητικό για πολύπλοκο έδαφος.

Η σχετική τυπική απόκλιση *sde* δε διαφέρει ιδιαίτερα με αυτή στην περίπτωση της ταχύτητας του ανέμου. Σε αντίθεση, όμως, με την *sde* της ταχύτητας του ανέμου, τώρα η *sde* επηρεάζει περισσότερο την RMSE από ότι η μέση τιμή *bias*.

Η σχετική διαφορά των τυπικών αποκλίσεων *sdbias* για την αιολική ισχύ είναι παρόμοια με αυτή της ταχύτητας του ανέμου για κάθε πάρκο. Σε πολύπλοκο έδαφος υπάρχει υποεκτίμηση των διακυμάνσεων της μετρούμενης ισχύος. Σε επίπεδο έδαφος οι τιμές της *sdbias* είναι μεγαλύτερες και θετικές.

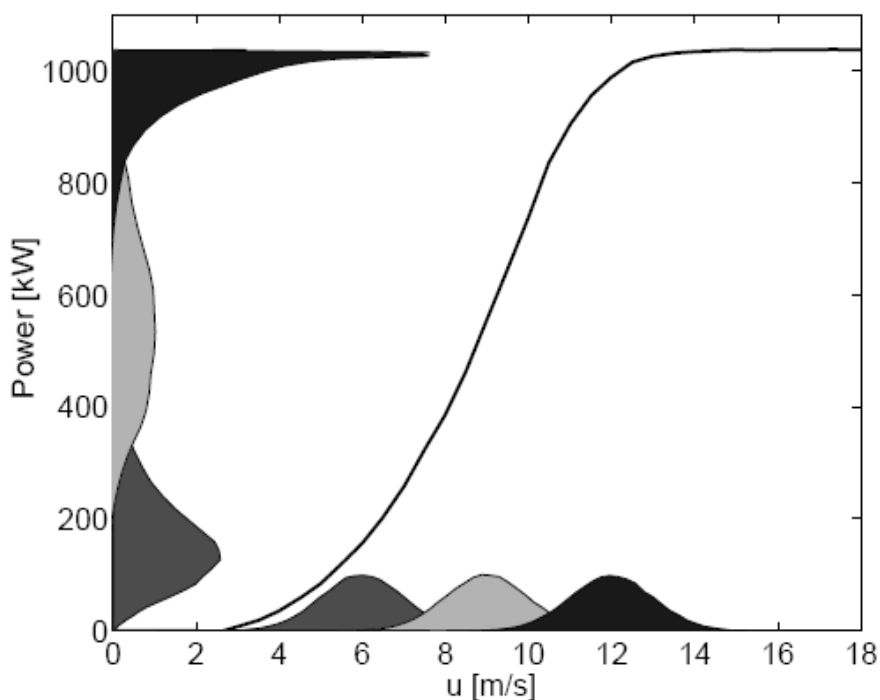
Τέλος, η σχετική διασπορά, *disp*, είναι όμοια για τα αιολικά πάρκα. Συνολικά, είναι περίπου διπλάσια από ότι στην περίπτωση της ταχύτητας του ανέμου. Οι διαφορές ανάμεσα στα αιολικά πάρκα είναι μικρότερες από ότι οι διαφορές της RMSE, κάτι που δείχνει ότι η σχετική διασπορά *disp* έχει κάποιες κοινές στατιστικές ιδιότητες.



Σχήμα 4.5: Χαρακτηριστικά σφάλματος προβλεπόμενης αιολικής ισχύος (*rel. bias*, *rel. sde*, *rel. sdbias*, *rel. disp*) συναρτήσει του οριζοντα πρόβλεψης t_{pred}

4.4.3 Συμπεράσματα για τη μορφή των κατανομών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ συνεπάγεται ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά που αφορούν την απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών αλλάζουν τελείως. Αυτό σχετίζεται προφανώς με τη μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος, σαν βασικό στοιχείο της μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε ισχύ. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο σχήμα 4.6. Για τρεις διαφορετικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου στον άξονα x , έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχες κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος στον άξονα y . Όπως παρατηρείται, οι κανονικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου για μικρές και μεγάλες ταχύτητες του ανέμου παραμορφώνονται ιδιαίτερα, όταν μετατρέπονται σε αντίστοιχες κατανομές ισχύος. Για μεσαίες ταχύτητες ανέμου, η κατανομή του σφάλματος της προβλεπόμενης αιολικής ισχύος είναι πιο επίπεδη και πιο εξαπλωμένη από αυτή της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 4.6: Κατανομές σφάλματος ταχύτητας ανέμου (οριζόντιος άξονας) και αντίστοιχες κατανομές σφάλματος προβλεπόμενης ισχύος (κάθετος άξονας). Η συνεχής γραμμή είναι η καμπύλη ισχύος τυπικής ανεμογεννήτριας.

Κεφάλαιο 5

Νευρωνικά δίκτυα

5.1 Εισαγωγή

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) είναι απλοποιημένα μοντέλα του κεντρικού νευρικού συστήματος του ανθρώπου. Μιμούνται τη λειτουργία των βιολογικών νευρώνων του εγκεφάλου και τη δομή των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Αποτελούνται από διασυνδεδεμένα υπολογιστικά στοιχεία, που έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα που δέχονται στην είσοδό τους και να μαθαίνουν να προσαρμόζονται στο περιβάλλον τους.

Η έρευνα σχετικά με τα ΤΝΔ είναι εμπνευσμένη από τη δομή και τη λειτουργία του εγκεφάλου. Βασικό δομικό στοιχείο του εγκεφάλου είναι οι νευρώνες, δηλαδή τα νευρικά κύτταρα τα οποία δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ τους. Τα συνήθη ΤΝΔ χρησιμοποιούν πολύ απλούστερα μοντέλα νευρώνων, τέτοια ώστε να διατηρούν μόνο τα πολύ αδρά χαρακτηριστικά των λεπτομερών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στη νευρολογία.

Το αντικείμενο των ΤΝΔ είναι η ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων εκπαίδευσης και ανάκλησης της πληροφορίας που αυτά περιέχουν, έτσι ώστε να προσομοιάζονται ευφυείς διαδικασίες. Η θεμελιώδης μονάδα επεξεργασίας της πληροφορίας στα ΤΝΔ είναι ο νευρώνας (neuron). Κάθε μονάδα χαρακτηρίζεται από εισόδους και εξόδους και υλοποιεί τοπικά έναν απλό υπολογισμό. Κάθε σύνδεση μεταξύ δυο μονάδων χαρακτηρίζεται από μια τιμή βάρους. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν τη γνώση που είναι αποθηκευμένη στο δίκτυο και καθορίζουν τη λειτουργικότητά του. Η έξοδος κάθε μονάδας καθορίζεται από τον τύπο της μονάδας, τη διασύνδεση με τις υπόλοιπες μονάδες και πιθανώς κάποιες εξωτερικές εισόδους. Πέρα από μια πιθανή δεδομένη (εκ κατασκευής) λειτουργική ικανότητα ενός δικτύου, συνήθως ένα δίκτυο αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω μιας μορφής εκπαίδευσης ^[78].

5.2 Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

5.2.1 Από τα βιολογικά στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

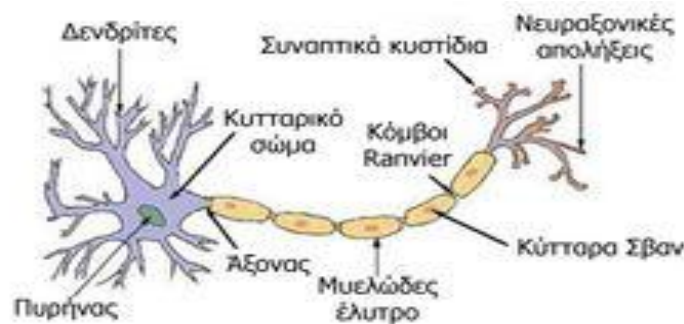
Με τον όρο νευρώνας ορίζουμε το κύτταρο που αποτελεί δομικό μέρος και λειτουργική μονάδα του νευρικού συστήματος. Κάθε νευρώνας αποτελείται από ένα κυτταρικό σώμα (περιλαμβάνει τον πυρήνα και μεγάλο αριθμό οργανιδίων) και από μία ή περισσότερες αποφυάδες. Αυτές ονομάζονται "δενδρίτες" όταν συλλέγουν τα

σήματα που στέλνονται στο κύτταρο και "νευρίτες" όταν μεταδίδουν ώσεις από το κυτταρικό σώμα.

Ο νευρίτης είναι μια λεπτή ίνα, που μπορεί να είναι μέχρι και δεκάδες χιλιάδες φορές μεγαλύτερη σε μήκος από τη διάμετρο του σώματος. Αυτή η δομή μεταφέρει τα νευρικά σήματα από τον νευρώνα. Κάθε νευρώνας διαθέτει μόνο έναν άξονα, αλλά αυτός ο άξονας μπορεί να διακλαδίζεται έντονα, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η επικοινωνία με πολλά κύτταρα-στόχους. Εκεί που τελειώνει ο άξονας υπάρχουν σημαντικά στοιχεία, τα τελικά κομβία, που χρειάζονται για την μεταφορά των πληροφοριών προς άλλους δενδρίτες άλλων νευρώνων. Οι περισσότεροι νευρίτες είναι μονωμένοι με έλυτρα μυελίνης.

Οι δενδρίτες είναι σχετικά κοντές διακλαδιζόμενες κυτταρικές προεξοχές ή αποφυάδες. Ο κάθε νευρώνας έχει πολλούς δενδρίτες με πολλές διακλαδώσεις. Αυτές οι δομές αποτελούν το δίκτυο με το οποίο ο νευρώνας προσλαμβάνει σήματα από άλλα κύτταρα. Τα κύματα αυτά φτάνουν στους δενδρίτες του κάθε νευρικού κυττάρου από νευρίτες (έναν ή περισσότερους) άλλων νευρικών κυττάρων. Με τον τρόπο αυτό συνδέονται, διακλαδίζονται και συνεργάζονται μεταξύ τους τα νευρικά κύτταρα, κατά ομάδες, για να επιτελέσουν το σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκαν, τη διάδοση των ερεθισμάτων από την περιφέρεια προς το κέντρο (εγκέφαλο) και το αντίστροφο. Στην άκρη των δενδριτών βρίσκονται τα προσυναπτικά κομβία και οι συνάψεις, και από εκεί το κύτταρο λαμβάνει ή μεταδίδει τα σήματα.

Τόσο ο νευρίτης όσο και οι δενδρίτες έχουν τυπικό μέγεθος γύρω στο 1μm, ενώ το Σώμα είναι γύρω στα 25μm, όχι πολύ μεγαλύτερο από τον πυρήνα που περιέχει. Ο νευρίτης ενός κινητικού νευρώνα μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 1 μέτρο σε μήκος, συνδέοντας, για παράδειγμα, τη βάση της σπονδυλικής στήλης με τα δάχτυλα των ποδιών.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού βιολογικού νευρώνα

Οι νευρώνες επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των συναπτικών συνδέσεων (η άκρη ενός νευρίτη καταλήγει στους δενδρίτες, στο σώμα ή, σπανιότερα στο νευρίτη άλλων νευρώνων). Οι συνάψεις είναι κύστες με ηλεκτροχημικό υλικό, κυρίως ιόντα καλίου και νατρίου (Na^+ , K^+). Η επικοινωνία τους επιτυγχάνεται με χημικό τρόπο με την ταχύτατη έκκριση μορίων νευροδιαβιβαστών. Το προ-συναπτικό νευρωνικό κύτταρο (αυτό που απελευθερώνει το νευροδιαβιβαστή) μπορεί να επάγει στο μετά-συναπτικό κύτταρο (το οποίο προσλαμβάνει το νευροδιαβιβαστή) μια ηλεκτρική διέγερση, που θα διαβιβαστεί στο αξονικό λοφίδιο, ώστε να δημιουργηθεί ένα

δυναμικό ενέργειας, το οποίο μετά θα διαβιβαστεί ως ηλεκτρική διέγερση κατά μήκος του νευρίτη.

Κατά την άφιξη στην απόληξη του νευρίτη, θα προκληθεί απελευθέρωση του νευροδιαβιβαστή στο συναπτικό κενό. Οι νευροδιαβιβαστές γενικά μπορεί είτε να προκαλέσουν διέγερση είτε να εμποδίσουν τη διέγερση του κυττάρου-στόχου. Το δυναμικό ενέργειας θα παραχθεί στο κύτταρο-στόχο αν τα μόρια του νευροδιαβιβαστή που δρουν στους μετά-συναπτικούς υποδοχείς οδηγήσουν το κύτταρο-στόχο στο να φτάσει τον ουδό πυροδότησής του.

5.2.2 Ιστορική αναδρομή τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η μελέτη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων υποκινήθηκε από την αναγνώριση ότι οι "εγκεφαλικοί υπολογιστές" είναι διαφορετικοί από τους ψηφιακούς υπολογιστές. Τυπικά, οι νευρώνες του εγκεφάλου είναι 5-6 τάξεις μεγέθους αργότεροι από τις λογικές πύλες σιλικόνης. Παρόλα αυτά, ο εγκέφαλος οργανώνει τους νευρώνες ώστε να εκτελεί συγκεκριμένους υπολογισμούς πιο γρήγορα από τους πιο γρήγορους ψηφιακούς υπολογιστές. Ο εγκέφαλος είναι ένας πολύπλοκος, μη γραμμικός και παράλληλος υπολογιστής. Κατά τη γέννησή του, ο εγκέφαλος κατασκευάζει τους δικούς του κανόνες, μια "εμπειρία", η οποία μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου. Τα ΤΝΔ αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, δηλαδή εκπαιδεύονται με τη βοήθεια παραδειγμάτων, έτσι ώστε να μαθαίνουν το περιβάλλον τους.

Η μελέτη των ΤΝΔ ξεκίνησε τις τελευταίες δεκαετίες αλλά η μεγάλη ώθηση δόθηκε μετά το 1980. Η μοντέρνα περίοδος των ΤΝΔ λέγεται ότι άρχισε με την πρωτοποριακή δουλειά των McCulloch και Pitts, το 1943, όταν αυτοί ανέπτυξαν το πρώτο μοντέλο νευρωνικού δικτύου ^[79].

Η επόμενη μεγάλη ανάπτυξη πάνω στα ΤΝΔ ήρθε το 1949 με την έκδοση του βιβλίου του Hebb με τίτλο "The Organization of Behavior" ^[80], στο οποίο μια ιδιαίτερη δήλωση ενός φυσιολογικού κανόνα μάθησης για συναπτικές τροποποιήσεις έγινε για πρώτη φορά. Πιο συγκεκριμένα, ο Hebb πρότεινε ότι η συνδετικότητα του εγκεφάλου συνεχώς αλλάζει, καθώς ο οργανισμός μαθαίνει διάφορες εργασίες, και ότι οι νευρωνικοί συγκεντρωτές δημιουργούνται από τέτοιες αλλαγές. Επίσης πρότεινε το διάσημο αίτημα μάθησης, σύμφωνα με το οποίο η αποτελεσματικότητα μιας σύναψης μεταβλητής ανάμεσα σε δύο νευρώνες αυξάνεται από την επαναλαμβανόμενη ενεργοποίηση του ενός νευρώνα από τον άλλο κατά μήκος της σύναψης.

Το 1956, χρησιμοποιώντας την ιδέα του πλεονασμού, ο Von Neumann λύνει το σημαντικό πρόβλημα, ενδιαφέροντος για τα ΤΝΔ, της σχεδίασης ενός αξιόπιστου δικτύου με νευρώνες που μπορούν να θεωρηθούν σαν μη αξιόπιστα στοιχεία.

Το 1958 μια νέα προσέγγιση πάνω στο πρόβλημα της αναγνώρισης προτύπων έγινε από τον Rosenblatt στην εργασία του πάνω στο αισθητήριο (perceptron). Το ιδιαίτερο επίτευγμα του ήταν το αποκαλούμενο θεώρημα σύγκλισης αισθητηρίου (perceptron convergence theorem).

Το 1960 οι Widrow και Hoff πρότειναν τον αλγόριθμο ελάχιστων μέσων τετραγώνων (Least Mean Square, LMS) και τον χρησιμοποίησαν για να σχηματίσουν το Adaline (adaptive linear element). Η διαφορά ανάμεσα στο αισθητήριο και στο Adaline βρίσκεται στον τρόπο μάθησης. Ένα από τα πρόσφατα εκπαιδευσιμα TND με πολλαπλά στοιχεία είναι η δομή Madaline.

Κατά την διάρκεια της κλασσικής περιόδου του perceptron (1960) πιστευόταν ότι τα TND μπορούσαν να κάνουν τα πάντα. Αλλά τότε εκδόθηκε το βιβλίο των Minsky και Papert που με μαθηματικά απέδειξε ότι υπάρχουν όρια πάνω στο τι μπορεί να υπολογιστεί από τα αισθητήρια ^[81].

Το 1980 έγιναν πολλές εργασίες πάνω στην θεωρία αλλά και στον σχεδιασμό των νευρωνικών δικτύων. Ο Grossberg (1980) ανέπτυξε μια καινούργια αρχή αυτό-οργάνωσης που συνδυάζει φιλτράρισμα από "κάτω προς τα πάνω" και αντίθετη αύξηση σε μικρή μνήμη με από "πάνω προς τα κάτω" ταίριασμα προτύπων και σταθεροποίηση του κώδικα μάθησης. Αυτό το φαινόμενο δίνει την βάση για μια νέα κατηγορία TND γνωστά σαν adaptive resonance theory (ART).

Το 1982 ο Hopfield έδειξε με μαθηματική απόδειξη πως ένα TND μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος (storage device) και πως μπορεί να επανακτήσει όλη την πληροφορία ενός συστήματος, αν του δοθούν μερικά τμήματα μόνο και όχι ολόκληρο το σύστημα. Αυτή η δουλειά του άνοιξε τον δρόμο για ένα κατακλυσμό θεωριών για τα TND. Αυτή η συγκεκριμένη τάξη νευρωνικών δικτύων με ανατροφοδότηση χρήστηκε ιδιαίτερης προσοχής το 1980 και με το χρόνο έγιναν γνωστά σαν δίκτυα Hopfield.

Το 1983 οι Cohonen και Grossberg έδωσαν μια νέα αρχή για σχεδίαση μιας διευθυνσιοδοτούμενης μνήμης (content-addressable memory), που περιλαμβάνει την έκδοση συνεχούς χρόνου του δικτύου Hopfield σαν μια ιδιαίτερη περίπτωση. Το 1983, επίσης, οι Kirkpatrick, Gallat και Vecchi περιέγραψαν μια νέα διαδικασία που λέγεται εξομοιωμένη ανόπτηση για λύση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Η εξομοιωμένη ανόπτηση χρησιμοποιείται στην στατιστική θερμοδυναμική και βασίζεται σε μια απλή τεχνική. Την ίδια χρονιά εκδόθηκε μια εργασία από τους Burto, Sutton και Anderson πάνω στην ενισχυμένη μάθηση, η οποία δημιούργησε μεγάλο ενδιαφέρον πάνω στην ενισχυμένη μάθηση και την εφαρμογή της.

Το 1986 οι McClelland και Rumelhart προτείνουν στο "Parallel Distributed Processing" μία νέα διαδικασία εκπαίδευσης, την μέθοδο της οπισθοδιάδοσης (backpropagation). Το 1985 έχουμε τα πρώτα συνέδρια και περιοδικά σε TND, από ειδικές επαγγελματικές εταιρίες νευρωνικών δικτύων.

Το 1988 ο Linsker περιέγραψε μια νέα αρχή για την αυτό-οργάνωση σε ένα δίκτυο αισθητηρίων. Η αρχή αυτή σχεδιάστηκε, ώστε να διατηρεί μέγιστη πληροφορία σχετικά με τα πρότυπα ενεργειών που υπόκεινται σε περιορισμούς, όπως συναπτικές συνδέσεις και δυναμικές περιοχές σύναψης. Ο Linsker χρησιμοποίησε αφηρημένες έννοιες πάνω στη θεωρία πληροφοριών ώστε να σχηματίσει τη αρχή της διατήρησης μέγιστης πληροφορίας. Επίσης το 1988 οι Broomhead και Lowe περιέγραψαν μία διαδικασία για το σχεδιασμό "προς τα εμπρός τροφοδότησης"

(feedforward) ΤΝΔ, χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ακτινικής βάσης (RBF), που είναι μια εναλλαγή των πολυεπίπεδων αισθητηρίων.

Το 1989 εκδόθηκε το βιβλίο του Mead με τίτλο "VLSI and Neural Systems" [82]. Αυτό το βιβλίο δίνει μια ασυνήθιστη μίξη περιεχομένων από την νευροβιολογία και την τεχνολογία VLSI.

Τα ΤΝΔ έχουν σίγουρα διανύσει πολύ δρόμο από την εποχή των McCulloch και Pitts. Δεν είναι αναγκαίο να πούμε ότι θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται σε θεωρία, σχεδιασμό και εφαρμογές [83].

5.2.3 Τα πλεονεκτήματα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Ένα ΤΝΔ οφείλει την υπολογιστική του ισχύ κατά πρώτον στην παράλληλη, κατανεμημένη δομή του και κατά δεύτερον στην ικανότητά του να μαθαίνει και, ως εκ τούτου, να γενικεύει. Ο όρος γενίκευση αναφέρεται στην παραγωγή, από το ΤΝΔ, λογικών εξόδων για εισόδους τις οποίες δεν έχει συναντήσει κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσής του. Αυτές οι δύο δυνατότητες δίνουν στα ΤΝΔ την ικανότητα να βρίσκουν καλές προσεγγιστικές λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα, τα οποία είναι μη επιδεκτικά σε λύσεις. Τα ΤΝΔ προσφέρουν τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες [84]:

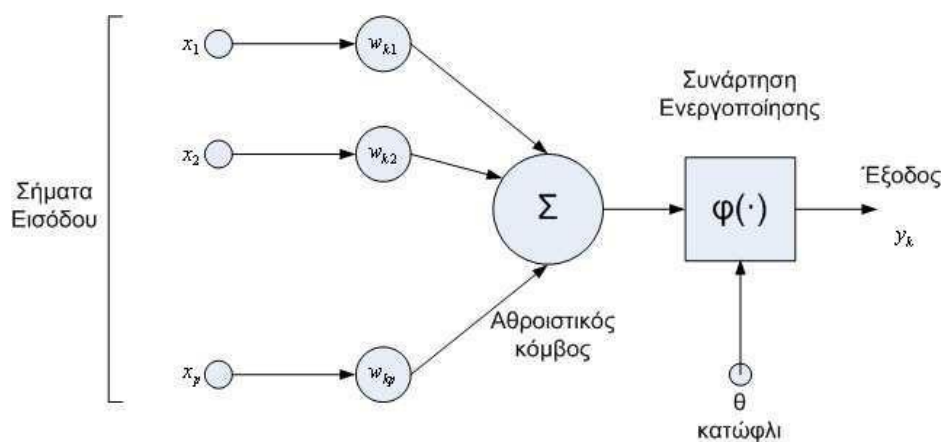
- **Μη γραμμικότητα:** Ένας τεχνητός νευρώνας μπορεί να είναι είτε γραμμικός, είτε μη γραμμικός. Ένα ΤΝΔ που αποτελείται από διασυνδεδεμένους μη γραμμικούς νευρώνες είναι μη γραμμικό. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική, κυρίως αν ο υποκείμενος φυσικός μηχανισμός που παράγει το σήμα εισόδου (π.χ. ομιλία) είναι εκ φύσεως μη γραμμικός.
- **Αντιστοίχιση Εισόδου-Εξόδου:** Ένα δημοφιλές παράδειγμα μάθησης, η μάθηση με εκπαιδευτή ή επιβλεπόμενη μάθηση, συνίσταται στην τροποποίηση των συναπτικών βαρών ενός ΤΝΔ εφαρμόζοντας ένα σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης. Κάθε παράδειγμα αποτελείται από ένα μοναδικό σήμα εισόδου και μια αντίστοιχη επιθυμητή απόκριση (στόχος). Τα συναπτικά βάρη τροποποιούνται έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής απόκρισης και της πραγματικής απόκρισης του δικτύου. Τότε το δίκτυο φτάνει σε μια ευσταθή κατάσταση όπου δεν υπάρχουν άλλες αλλαγές βαρών. Αν και τα ΤΝΔ δεν είναι τα μόνα συστήματα με ικανότητα μάθησης μέσω παραδειγμάτων, εντούτοις διακρίνονται για την ικανότητά τους να οργανώνουν την πληροφορία των δεδομένων εισόδου σε χρήσιμες μορφές. Αυτές οι μορφές αποτελούν στην ουσία ένα μοντέλο που αναπαριστά τη σχέση που ισχύει μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου.
- **Παράλληλος τρόπος λειτουργίας:** Τα ΤΝΔ λειτουργούν με παράλληλο τρόπο γιατί μια εργασία μοιράζεται στα διάφορα τμήματα του δικτύου, δηλαδή σε όλους τους επιμέρους νευρώνες. Έτσι, τα ΤΝΔ είναι συστήματα "παράλληλων κατανεμημένων διεργασιών". Αυτό παρέχει μεγάλες ταχύτητες καθώς θυμίζει την ταυτόχρονη χρήση πολλών επεξεργαστών.

- **Προσαρμοστικότητα:** Τα ΤΝΔ έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τα συναπτικά τους βάρη ανάλογα με τις μεταβολές που γίνονται στο περιβάλλον τους. Ένα ΤΝΔ εκπαιδευμένο να λειτουργεί σε συγκεκριμένο περιβάλλον, μπορεί εύκολα να επανεκπαιδευτεί ώστε να μπορεί να χειρίζεται τις μεταβολές στο νέο περιβάλλον λειτουργίας του.
- **Ανοχή σε βλάβες (fault-tolerant):** Ένα ΤΝΔ υλοποιημένο σε hardware έχει τη δυνατότητα να είναι ανεκτικό σε βλάβες ή εύρωστο, υπό την έννοια ότι η απόδοσή του μειώνεται βαθμιαία και ομαλά υπό αντίξοες συνθήκες λειτουργίας. Αν ένας νευρώνας ή οι συνδέσεις του καταστραφούν, η ποιότητα της εξόδου μειώνεται. Ωστόσο, επειδή η πληροφορία που αποθηκεύεται στο δίκτυο είναι κατανεμημένη σε όλη τη δομή του, η βλάβη θα πρέπει να λάβει μεγάλη έκταση για να αρχίσει να μειώνεται σοβαρά η συνολική απόκριση του δικτύου.
- **Ομοιομορφία ανάλυσης και σχεδίασης:** Τα ΤΝΔ απολαμβάνουν καθολικής αποδοχής ως επεξεργαστές πληροφοριών, υπό την έννοια ότι χρησιμοποιείται η ίδια σημειογραφία σε όλα τα πεδία εφαρμογής τους. Οι νευρώνες αντιπροσωπεύουν ένα συστατικό κοινό σε όλα τα ΤΝΔ και αυτό καθιστά εφικτή τη χρήση των ίδιων θεωριών και αλγορίθμων μάθησης σε διαφορετικές εφαρμογές των ΤΝΔ.
- **Αναλογία με τη νευροφυσιολογία του εγκεφάλου:** Η σχεδίαση ενός ΤΝΔ δανείζεται στοιχεία από τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου, ο οποίος είναι η ζωντανή απόδειξη ότι η εύρωστη, παράλληλη επεξεργασία δεν είναι μόνο φυσικά εφικτή, αλλά επίσης γρήγορη και ισχυρή. Τα ΤΝΔ, όπως και τα βιολογικά, έχουν μεγάλη ανοχή σε δομικά σφάλματα. Αυτό σημαίνει ότι η κακή λειτουργία ή η καταστροφή ενός νευρώνα ή κάποιων συνδέσεων δεν είναι ικανή να διαταράξει σημαντικά τη λειτουργία τους, καθώς η πληροφορία που εσωκλείουν δεν είναι εντοπισμένη σε συγκεκριμένο σημείο αλλά διάχυτη σε όλο το δίκτυο. Γενικά, το μέγεθος του σφάλματος λόγω “δομικών αστοχιών” είναι ανάλογο του ποσοστού των κατεστραμμένων συνδέσεων.
- **Η δυνατότητα θεώρησής τους ως κατανεμημένη μνήμη (distributed memory) και ως μνήμη συσχέτισης (associative memory):** Ο χαρακτηρισμός των ΤΝΔ ως κατανεμημένη μνήμη πηγάζει από το ότι η κωδικοποίηση που δημιουργούν είναι κατανεμημένη σε όλα τα βάρη της συνδεσμολογίας τους. Για τον ίδιο λόγο τα ΤΝΔ χαρακτηρίζονται και ως μνήμες συσχέτισης. Μια μνήμη συσχέτισης δεν αποθηκεύει πληροφορία με τον παραδοσιακό τρόπο, αλλά μέσω κατάλληλων συσχετίσεων που δημιουργεί από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Η ανάκληση της πληροφορίας γίνεται με βάση το περιεχόμενο και όχι τη διεύθυνση, όπως δηλαδή συμβαίνει και με τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Η παραπάνω οργάνωση κάνει ορισμένα είδη ΤΝΔ να είναι πολύ ανεκτικά σε μικρές αλλαγές στα σήματα εισόδου, δηλαδή είναι σε θέση να παράγουν τη σωστή έξοδο ακόμη και αν τα δεδομένα εισόδου είναι λίγο διαφορετικά (για παράδειγμα, λόγω θορύβου) ή και ελλιπή.

- **Η ικανότητά τους για αναγνώριση προτύπων (pattern recognition):** Τέλος, τα ΤΝΔ έχουν εξαιρετική ικανότητα αναγνώρισης προτύπων καθώς δεν επηρεάζονται από ελλιπή ή/και με θόρυβο δεδομένα. Από τη στιγμή που ένα ΤΝΔ εκπαιδευτεί στην αναγνώριση συνθηκών και καταστάσεων, απαιτείται ένας μόνο κύκλος λειτουργίας τους για να προσδιορίσουν μια συγκεκριμένη κατάσταση. Η τελευταία ιδιότητα κάνει ένα ΤΝΔ ιδανικό για χρήση σε αυτοματισμούς που θα λειτουργήσουν σε αντίξοες συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε διαστημικές αποστολές, σε χώρους με ραδιενέργεια και σε πεδία μάχης.

5.2.4 Το μοντέλο του τεχνητού νευρώνα

Ένας νευρώνας είναι μια μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας, που είναι θεμελιώδης για την λειτουργία ενός νευρωνικού δικτύου. Το επόμενο σχήμα δείχνει το μοντέλο ενός νευρώνα.



Σχήμα 5.2: Η μορφή του τεχνητού νευρώνα

Τα τρία βασικά στοιχεία αυτού του μοντέλου είναι:

- Ένα σύνολο από συνάψεις ή συνδετικούς κρίκους, κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα βάρος ή δύναμη. Συγκεκριμένα, ένα σήμα x_j στην είσοδο της σύναψης j που συνδέεται στον νευρώνα k , πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος w_{kj} . Ο πρώτος δείκτης αναφέρεται στον εν λόγω νευρώνα και ο δεύτερος στην είσοδο της σύναψης όπου αναφέρεται το βάρος. Το βάρος w_{kj} είναι θετικό αν η σύναψη είναι διεγερτική, δηλαδή ωθεί τον νευρώνα να αποκριθεί στη διέγερση, ενώ αρνητικό αν η σύναψη είναι απαγορευτική, δηλαδή αποτρέπει τον νευρώνα να παράγει μια απόκριση.
- Ένας αθροιστικός κόμβος για την πρόσθεση των σημάτων εισόδου, που παίρνουν βάρος από την αντίστοιχη σύναψη. Αυτές οι λειτουργίες αποτελούν το γραμμικό συνδυαστή u_k .

- Μια συνάρτηση ενεργοποίησης που περιορίζει (συνθλίβει) το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή (συνήθως στο κανονικοποιημένο διάστημα $[0,1]$ ή εναλλακτικά στο $[-1,1]$) ^[85].

Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη πόλωση (κατώφλι) θ_k , που έχει επίδραση στην ελάττωση της εισόδου στην εφαρμοζόμενη συνάρτηση ενεργοποίησης που ακολουθεί. Αντίθετα, η είσοδος του δικτύου μπορεί να αυξηθεί με την χρήση ενός όρου μεροληψίας, ο οποίος είναι ο αντίθετος από τη πόλωση (bias) ^[86].

Με μαθηματικούς όρους, ένας νευρώνας k περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

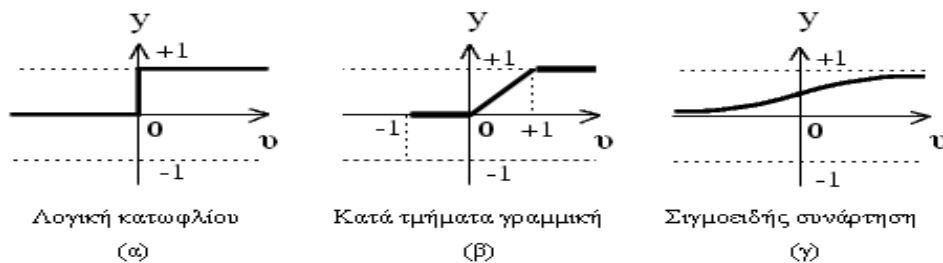
$$u_k = \sum_{j=1}^p w_{kj} x_j$$

και

$$y_k = \varphi(u_k - \theta_k)$$

Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης αξίζει να μελετηθούν λίγο αναλυτικότερα και μάλιστα μια συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω μορφές:

- Συνάρτηση λογικής κατωφλίου (threshold/hard limiter function)
- Κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση (piecewise linear function)
- Συνεχής σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid/S-shape function)



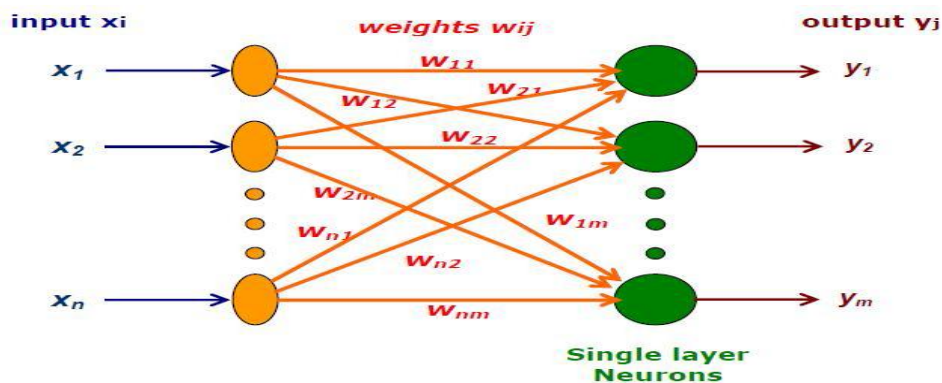
Σχήμα 5.3: Συναρτήσεις ενεργοποίησης

5.2.5 Αρχιτεκτονικές τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η αρχιτεκτονική του ΤΝΔ αφορά στις διασυνδέσεις των νευρώνων. Οι δύο βασικές ιδιότητες που καθορίζουν την αρχιτεκτονική ενός δικτύου είναι το πλήθος των επιπέδων (layers) και ο τρόπος μετάδοσης του παλμού. Το τρίτο χαρακτηριστικό, το οποίο σχετίζεται φυσιολογικά με τον τρόπο κατά τον οποίο είναι δομημένοι οι νευρώνες, είναι ο αλγόριθμος μάθησης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου.

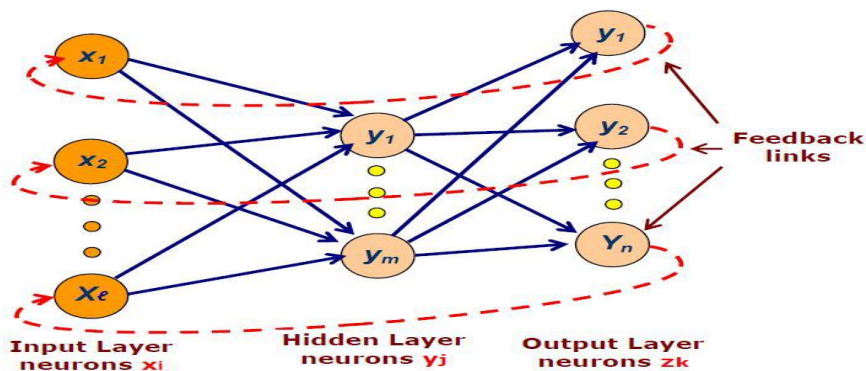
5.2.5.1 Τρόπος μετάδοσης παλμού

- *Εμπρός Τροφοδοτούμενα ΤΝΔ (feed forward neural networks):* Σαν εμπρός τροφοδότησης, αναφέρονται τα ΤΝΔ, στα οποία τα σήματα κατευθύνονται από την είσοδο στην έξοδο. Δηλαδή κάθε επίπεδο νευρώνων δέχεται εισόδους μονό από τα προηγούμενα επίπεδα νευρώνων. Έτσι η ροή πληροφορίας είναι μονόδρομη.



Σχήμα 5.4: Εμπρός τροφοδοτούμενο ΤΝΔ

- *Ανατροφοδοτούμενα ΤΝΔ (Recurrent Neural Networks):* Όταν οι έξοδοι κάποιων νευρώνων, γίνονται εισόδοι σε νευρώνες προηγούμενων επιπέδων, τότε έχουμε ανάδραση. Τα ανατροφοδοτούμενα ΤΝΔ έχουν ένα τουλάχιστον βρόχο με ανάδραση, δηλαδή νευρώνες μεγαλύτερων επιπέδων τροφοδοτούν είτε νευρώνες του ίδιου επιπέδου είτε νευρώνες προηγούμενων επιπέδων (ακόμα και νευρώνας μπορεί να ανατροφοδοτεί τον ίδιο). Τα ΤΝΔ αυτά παρατηρείται ότι έχουν κάποιου είδους "μνήμη". Αυτό ενδιαφέρει τη μελέτη μας, διότι η πρόβλεψη με ΤΝΔ έχει να κάνει με μνήμη παρόμοιας συμπεριφοράς παλαιότερων περιπτώσεων.



Σχήμα 5.5: Ανατροφοδοτούμενο ΤΝΔ

5.2.5.2 Επίπεδα νευρώνων

- *TNΔ ενός επιπέδου (Single layer FeedForward Networks)*: Είναι τα πιο απλά TNΔ. Έχουν μόνο ένα επίπεδο νευρώνων, στους οποίους εφαρμόζουμε τα σήματα εισόδου.
- *TNΔ πολλών επιπέδων (Multilayer FeedForward Networks)*: Είναι τα TNΔ, στα οποία υπάρχουν κρυμμένα επίπεδα μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου. Τα κρυμμένα επίπεδα προσδίδουν ευελιξία στο δίκτυο και μπορούν να παράγουν υψηλότερου επιπέδου στατιστικές, καθιστώντας τα χρήσιμα ιδιαίτερα όταν το μέγεθος του επιπέδου είναι μεγάλο.

5.2.6 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων

5.2.6.1 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης με επίβλεψη (supervised learning)

Τα TNΔ αυτά τροφοδοτούνται με παραδείγματα εισόδων και τις αντίστοιχες εξόδους. Η διαδικασία της μάθησης περιλαμβάνει την προσαρμογή των βαρών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ της εξόδου του δικτύου και της πραγματικής εξόδου. Τέτοια TNΔ είναι τα perceptron, ADALINE και τα δίκτυα ακτινικής βάσης^[87].

Οι παράμετροι του δικτύου ανανεώνονται με βάση τόσο το διάνυσμα εκπαίδευσης όσο και το σήμα σφάλματος (δηλαδή της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής απόκρισης $y(t)$ και της επιθυμητής απόκρισης $y_d(t)$ του δικτύου). Ορίζοντας μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους:

$$J(w) = \frac{1}{2} E \left[(y(t) - y_d(t))^2 \right]$$

όπου w είναι το διάνυσμα των προς επιλογή (ελεύθερων) παραμέτρων του συστήματος μάθησης (δηλαδή του TNΔ), η ανανέωση/προσαρμογή των παραμέτρων παίρνει την μορφή του αλγόριθμου διόρθωσης σφάλματος. Δυο περιπτώσεις αλγόριθμων επιβλεπόμενης μάθησης είναι ο αλγόριθμος Ελαχίστου Μέσου Τετραγώνου (Least Mean Square, LMS) και η γενίκευση του που είναι γνωστή ως Αλγόριθμος Ανάστροφης Διάδοσης (Back Propagation, BP).

5.2.6.2 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning)

Τα TNΔ αυτά τροφοδοτούνται μόνο με τις εισόδους και η έξοδος προκύπτει μέσω ομαδοποίησης ομοειδών δεδομένων. Πρακτικά, το μόνο που χρειάζεται ένα TNΔ μη επιβλεπόμενης μάθησης είναι να συντονισθεί στις στατιστικές ομαλότητες των δεδομένων εισόδου και μετά να μπορέσει να δημιουργήσει εσωτερικές παραστάσεις για την κωδικοποίηση των ιδιοτήτων εισόδου και να παράγει αυτόματα

νέες κατηγορίες. Η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη έχει περισσότερες ομοιότητες με το μοντέλο μάθησης βιολογικών συστημάτων.

5.2.6.3 Αλγόριθμοι εκπαίδευσης με ενισχυτική μάθηση (reinforced learning)

Στον τύπο αυτό μάθησης, το ΤΝΔ τροφοδοτείται και πάλι με δειγματικά πρότυπα εισόδου αλλά δεν τροφοδοτείται με τις επιθυμητές αποκρίσεις σε αυτές τις εισόδους. Εδώ χρησιμοποιείται ένα συνολικό μέτρο της επάρκειας της προκύπτουσας απόκρισης (δείκτης συμπεριφοράς), το οποίο μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο στην επιθυμητή συμπεριφορά. Το μέτρο αυτό είναι γνωστό ως ενισχυτικό σήμα (reinforcement signal) και ανατροφοδοτείται στο ΤΝΔ έτσι ώστε να "επιβραβεύσει" (reward) τις ορθές συμπεριφορές και να "τιμωρήσει" (penalize) τις λανθασμένες.

Η ενισχυτική μάθηση στηρίζεται στο νόμο του Thornlike, που λέει ότι "Αν μια ενέργεια ενός συστήματος μάθησης ακολουθείται από μια ικανοποιητική κατάσταση ή συμπεριφορά, τότε η τάση του συστήματος αυτού να παράγει τη συγκεκριμένη ενέργεια ενισχύεται (ενδυναμώνεται). Διαφορετικά, η τάση του συστήματος να παράγει την ενέργεια αυτή εξασθενείται".

Συνοπτικά, η ενισχυτική μάθηση λειτουργεί ως εξής: Το ΤΝΔ υπολογίζει τις εξόδους που παράγονται από την παρούσα είσοδο με τις παρούσες τιμές των βαρών. Το σύστημα αξιολογεί την έξοδο και το ενισχυτικό σήμα τροφοδοτείται στο δίκτυο. Τα βάρη ανανεώνονται με βάση το ενισχυτικό σήμα αυξάνοντας τις τιμές των βαρών που συνέβαλαν σε καλή συμπεριφορά ή μειώνοντας τις τιμές αυτών που προκάλεσαν κακή συμπεριφορά. Το δίκτυο ψάχνει να βρει ένα σύνολο βαρών τα οποία τείνουν να αποτύχουν αρνητικά ενισχυτικά σήματα.

Η διαφορά ανάμεσα στην ενισχυτική και την επιβλεπόμενη μάθηση είναι ότι στην ενισχυτική μάθηση το σύστημα μάθησης βελτιώνεται χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο συμπεριφοράς, οι τιμές του οποίου δίνονται από το περιβάλλον, ενώ στην επιβλεπόμενη μάθηση το κριτήριο συμπεριφοράς (συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος) καθορίζεται εσωτερικά με βάση τις επιθυμητές αποκρίσεις (στόχους).

5.3 Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινικής βάσης

5.3.1 Νευρώνες ακτινικών συναρτήσεων βάσης

Τα δίκτυα τα οποία χρησιμοποιήσαμε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελούνται από νευρώνες ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function neurons), τους οποίους ονομάζουμε για συντομία RBF νευρώνες. Έστω ότι ένας RBF νευρώνας έχει d συνδέσεις εισόδου $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_d\}$ με αντίστοιχες τιμές κέντρου $\vec{\mu} = \{\mu_1, \dots, \mu_d\}$ και μία τιμή εύρους σ . Η διεργασία που επιτελεί ένας τέτοιος νευρώνας ξεκινά με τον υπολογισμό της ευκλείδειας απόστασης ή κάποιας άλλης

νόρμας μεταξύ των διανυσμάτων εισόδου \vec{x} και κέντρου $\vec{\mu}$, τα οποία έχουν από d στοιχεία (elements) και έτσι προκύπτει το σήμα ενεργοποίησης u :

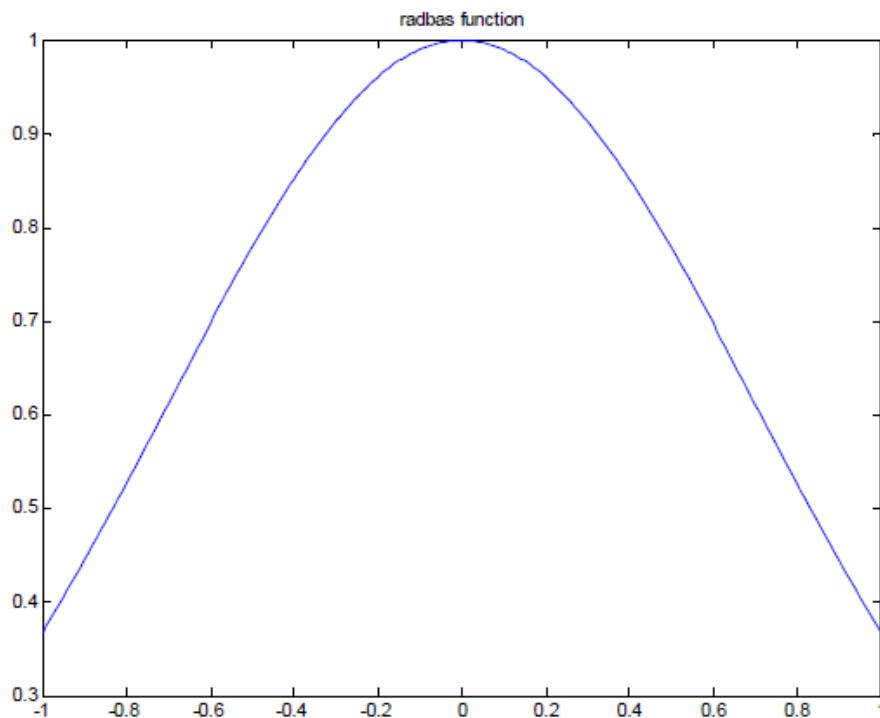
$$u = \|\vec{x} - \vec{\mu}\|$$

όπου $\|\cdot\|$ συνήθως η ευκλείδεια νόρμα.

Στη συνέχεια διαιρείται η ενεργοποίηση αυτή με το εύρος σ , ώστε να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας περιοχών με μεταβλητή ακτίνα στο πεδίο εισόδου:

$$n = \frac{u}{\sigma}$$

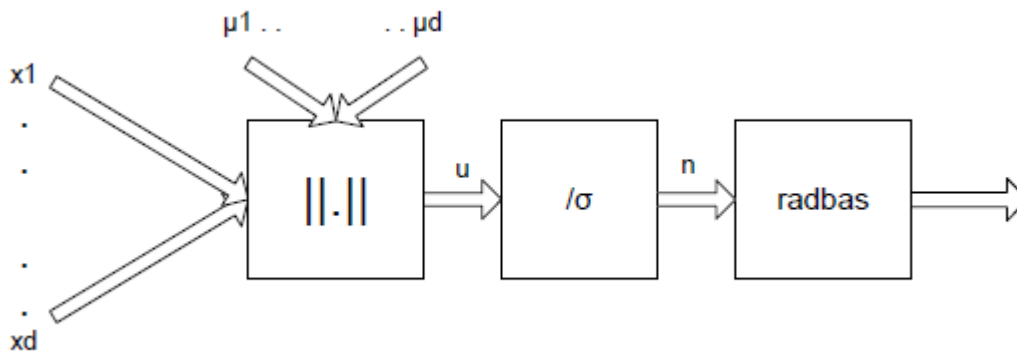
Τέλος, για να υπολογίσει την έξοδο y , περνάει την ενεργοποίηση n από μία συνάρτηση εξόδου f , η οποία ονομάζεται ακτινική συνάρτηση βάσης (radbas), $f(u) = \exp(-n^2)$ και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.6: Ακτινική συνάρτηση βάσης

Το διάνυσμα $\vec{\mu}$ καθορίζει το κέντρο της συνάρτησης βάσης ενώ το σ καθορίζει την ακτίνα της συνάρτησης βάσης. Η έξοδος του RBF νευρώνα παίρνει τη μέγιστη τιμή (μονάδα) για εισόδους που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της συνάρτησης βάσης, ενώ η τιμή της ελαττώνεται εκθετικά καθώς η είσοδος απομακρύνεται ακτινικά (όσο μεγαλύτερο το εύρος, τόσο μικρότερη η μείωση της εξόδου για δεδομένη απομάκρυνση της εισόδου από το κέντρο της συνάρτησης βάσης), ώσπου να αγγίξει την τιμή μηδέν. Δηλαδή η έξοδος του RBF νευρώνα είναι κοντά στην μονάδα αν η είσοδος ανήκει στην περιοχή που ορίζεται από το κέντρο $\vec{\mu}$ και το εύρος σ της

συνάρτησης βάσης, ενώ είναι κοντά στο μηδέν εάν η είσοδος βρίσκεται έξω από αυτήν την περιοχή. Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν σε έναν τέτοιο νευρώνα είναι το κέντρο $\vec{\mu}$ και η ακτίνα σ της συνάρτησης βάσης. Το μοντέλο του RBF τεχνητού νευρώνα, όπως περιγράφηκε σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται σχηματικά στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.7: Μοντέλο τεχνητού RBF νευρώνα

5.3.2 Νευρωνικά δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (Radial Basis Function networks)

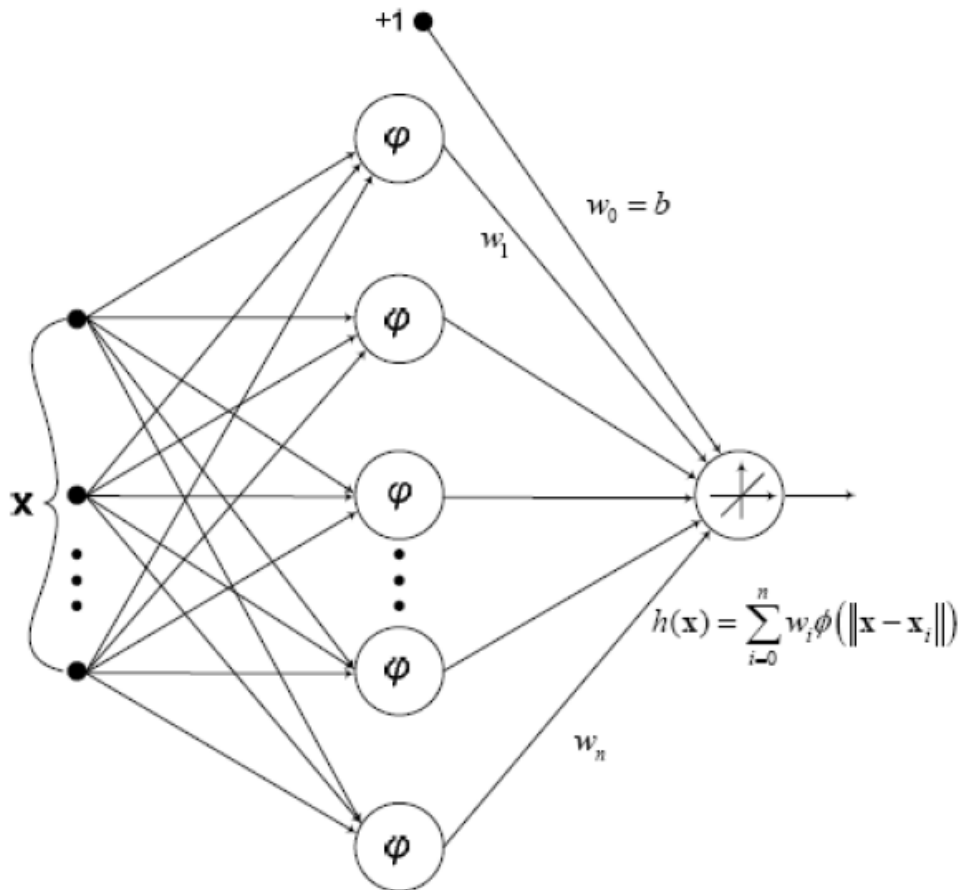
Τα δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (radial basis function networks), τα οποία ονομάζουμε για συντομία RBF δίκτυα, έχουν την ρίζα τους στην μαθηματική θεωρία της προσέγγισης συναρτήσεων. Στην ουσία υλοποιούν μία συνάρτηση παρεμβολής (interpolation function), η οποία προσεγγίζει την τιμή μίας συνάρτησης σε κάποιο σημείο ως το μέσο όρο των τιμών της συνάρτησης σε κοντινά σημεία.

Τα RBF δίκτυα είναι νευρωνικά δίκτυα εμπρός τροφοδότησης, αποτελούμενα συνολικά από δύο επίπεδα (two layer network). Το πρώτο επίπεδο (εσωτερικό επίπεδο – hidden layer), αποτελείται από RBF νευρώνες. Κάθε RBF νευρώνας ορίζει μία περιοχή στον χώρο εισόδου. Οι έξοδοι του πρώτου επιπέδου οδηγούνται ως εισοδοί στο δεύτερο επίπεδο (επίπεδο εξόδου – output layer), που αποτελείται από απλούς νευρώνες. Κάθε απλός νευρώνας ορίζει και μία διαφορετική κατάσταση στον χώρο εξόδου. Συνήθως θεωρούμε ότι η έξοδος που ενεργοποιείται από την είσοδο του δικτύου είναι αυτή με την μέγιστη τιμή στον αντίστοιχο νευρώνα εξόδου. Κάθε RBF νευρώνας έχει ισάριθμες εισόδους με τα στοιχεία των διανυσμάτων εισόδου, ενώ κάθε νευρώνας του επιπέδου εξόδου έχει ισάριθμες εισόδους με τους RBF νευρώνες.

Κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης ενός RBF δικτύου, οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι οι παράμετροι των νευρώνων από τους οποίους αποτελείται το δίκτυο. Κάτι που δεν είναι φανερό με την πρώτη ματιά, είναι το γεγονός ότι κατά την εκπαίδευση μπορεί να αλλάξει και η δομή του RBF νευρωνικού δικτύου. Αυτό θα γίνει εάν αυξηθεί ο αριθμός των ορισμένων περιοχών, με την προσθήκη RBF νευρώνων στο εσωτερικό επίπεδο του δικτύου και την δημιουργία ανάλογων συνδέσεων με το επίπεδο εξόδου.

Πιο συγκεκριμένα η εκπαίδευση αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα παρεμβολής καμπύλης (curve – fitting) σε ένα πολυδιάστατο χώρο ^[88]:

- Η εκπαίδευση αντιστοιχεί στην εύρεση μιας επιφάνειας σε ένα πολυδιάστατο χώρο η οποία προσαρμόζεται βέλτιστα ανάλογα με το σύνολο παραδειγμάτων εκπαίδευσης.
- Η γενίκευση (δηλαδή η απόκριση του δικτύου σε δεδομένα εισόδου που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την εκπαίδευση) αντιστοιχεί στη χρήση αυτή της πολυδιάστατης επιφάνειας για την παρεμβολή των δεδομένων ελέγχου (test data).



Σχήμα 5.8: Ένα δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται ένα δίκτυο ακτινικών συναρτήσεων βάσης και η έξοδος του (στη γενική περίπτωση έχουμε περισσότερες από μία εξόδους αλλά η αντιμετώπιση είναι η ίδια) είναι το σταθμισμένο άθροισμα μιας σειράς συναρτήσεων $\phi(d)$, όπου d η απόσταση μεταξύ εισόδου και ενός πρωτοτύπου (τα πρωτότυπα αυτά αποτελούν παραμέτρους του δικτύου). Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση είναι η γκαουσιανή συνάρτηση:

$$\phi_i = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x - x_i\|^2\right)$$

Η χρήση ενός γραμμικού επιπέδου εξόδου στην περίπτωση του δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης μπορεί να δικαιολογηθεί υπό το πρίσμα του θεωρήματος του Cover για τη διαχωρισιμότητα των προτύπων ^[84]. Σύμφωνα με αυτό το θεώρημα, με την προϋπόθεση ότι ο μετασχηματισμός από το επίπεδο εισόδου στο (κρυφό) επίπεδο των χαρακτηριστικών είναι μη γραμμικός και η διάσταση του χώρου των χαρακτηριστικών είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη διάσταση του διανύσματος εισόδου (χώρου εισόδου), τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι ένα πρόβλημα που ήταν μη (γραμμικά) διαχωρίσιμο στο χώρο εισόδου να είναι γραμμικά διαχωρίσιμο στο χώρο των χαρακτηριστικών.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη σχεδίαση ακτινικών συναρτήσεων βάσης (επιλογής αριθμού και κέντρων των συναρτήσεων βάσης):

- Επιλογή των κέντρων με τυχαίο τρόπο ^[89].
- Επιλογή των κέντρων ύστερα από μια διαδικασία αυτοοργάνωσης ^[90].
- Επιλογή των κέντρων με εποπτεία ^[88].

Συνήθως τα κέντρα των συναρτήσεων βάσης έχει επικρατήσει να επιλέγονται με κάποιο αλγόριθμο χωρίς επίβλεψη, ενώ τα βάρη ανάμεσα στο κρυφό επίπεδο και το επίπεδο εξόδου καθορίζονται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Συνεπώς, οι παράμετροι των δύο επιπέδων ενός δικτύου ακτινικών συναρτήσεων βάσης εκπαιδεύονται (ως επί το πλείστον) ανεξάρτητα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον μικρό χρόνο εκπαίδευσης.

Η ονομασία τους οφείλεται κυρίως στο γεγονός της αντικατάστασης του γραμμικού τελεστή που υπάρχει στους νευρώνες του κρυφού επιπέδου. Ο μη γραμμικός τελεστής είναι μία συνάρτηση που περιέχει έκφραση της γενικευμένης Ευκλείδειας απόστασης του διανύσματος εισόδου από το αντίστοιχο διάνυσμα των συντελεστών βαρύτητας των συνάψεων του νευρώνα. Οι νευρώνες εξόδου δεν διαθέτουν μη γραμμικό τελεστή και γι' αυτό τον λόγο εκτελούν μονάχα ένα γραμμικό μετασχηματισμό των εξόδων των νευρώνων του κρυφού επιπέδου ^[91].

Η συνάρτηση που δίνει την σχέση μιας εξόδου του δικτύου με την είσοδο και τους συντελεστές βαρύτητας των συνάψεων είναι η ακόλουθη:

$$f = \sum_{i=1}^N w_i G(x, q_i)$$

όπου x είναι η είσοδος του δικτύου, q_i είναι ένα από N σταθερά σημεία στο χώρο των προτύπων, και $w_i, i=1, \dots, N$ είναι οι συντελεστές βαρύτητας ενός νευρώνα εξόδου.

Το πρόβλημα της κατευθυνόμενης εκπαίδευσης των δικτύων ακτινικών συναρτήσεων μπορεί να εκφραστεί ως εξής: Δεδομένου ενός αριθμού παραδειγμάτων εκπαίδευσης, βρείτε τους συντελεστές βαρύτητας των συνάψεων που ελαχιστοποιούν το μέσο σφάλμα της επιθυμούμενης από την πραγματική έξοδο του δικτύου.

Η εύρεση των συντελεστών βαρύτητας κάθε νευρώνα αποτελεί μια ανεξάρτητη λύση. Αν ορίσουμε σαν b την επιθυμούμενη έξοδο κάθε νευρώνα, το μέσο σφάλμα της προσομοίωσης για M παραδείγματα είναι:

$$\Sigma\varphi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = (b - G_w)^T (b - G_w) = |b - G_w|^2 = \sum_{j=1}^M \left(b_j - \sum_{i=1}^N w_i G(x, q_i) \right)^2$$

όπου $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_M)^T$ το διάνυσμα των επιθυμούμενων εξόδων και $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ οι συντελεστές βαρύτητας του νευρώνα. Το G περιγράφει ένα σύνολο σταθερών αριθμών:

$$G = \begin{pmatrix} G(x_1, q_1) & \dots & G(x_1, q_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G(x_M, q_1) & \dots & G(x_M, q_N) \end{pmatrix}$$

Η LMS λύση δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{w}} \Sigma\varphi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = 0 \Rightarrow G^T G \mathbf{w} = G^T \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{w} = (G^T G)^{-1} G^T \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{w} = G^+ \mathbf{b}$$

Ο πίνακας G^+ ονομάζεται ψευδοαντίστροφος πίνακας της G διότι η διαδικασία υπολογισμού της έχει ομοιάζοντα χαρακτηριστικά με τον τρόπο υπολογισμού του αντιστρόφου ενός τετραγωνικού πίνακα.

Από την λύση που περιγράψαμε, βλέπουμε ότι στην περίπτωση των δικτύων ακτινικών συναρτήσεων μπορούμε να βρούμε με αναλυτικό τρόπο τους συντελεστές βαρύτητας των συνάψεων. Το γεγονός αυτό αποτελεί σαφές πλεονέκτημα απέναντι στις μεθόδους εκπαίδευσης του πολυεπίπεδου perceptron. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι τα δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων μπορούν να προσομοιώσουν με την επιθυμητή ακρίβεια οποιαδήποτε συνεχή διανυσματική συνάρτηση.

Σε προβλήματα κατασκευής συστημάτων ταξινόμησης προτύπων, τα δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων χρησιμοποιούνται πλέον συχνότερα από το πολυεπίπεδο perceptron, διότι ο αλγόριθμος εκπαίδευσης έχει πολύ μικρή υπολογιστική πολυπλοκότητα ^[91].

5.4 Αυτό-οργανούμενοι χάρτες (Self – Organizing Maps)

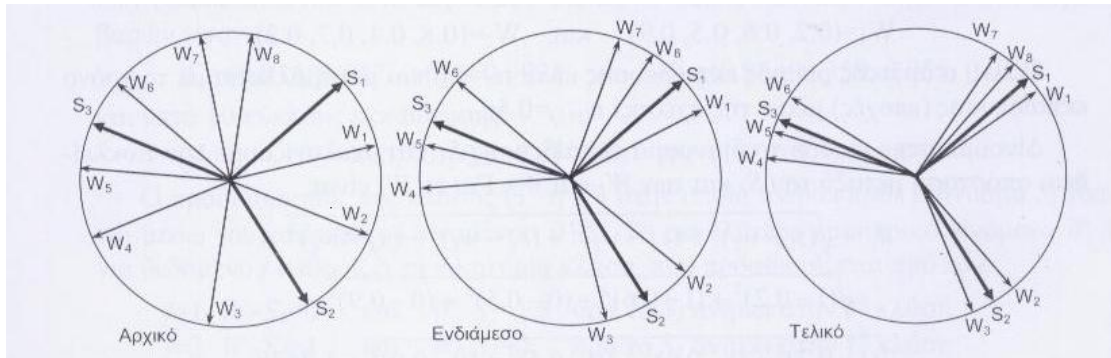
Οι αυτό-οργανούμενοι χάρτες (SOM) είναι γνωστοί και ως αυτό-οργανούμενα δίκτυα Kohonen. Ανήκουν στην κατηγορία των νευρωνικών δικτύων μη επιβλεπόμενης μάθησης, ενώ ο αλγόριθμος μάθησής τους είναι όμοιος με τον αλγόριθμο ανταγωνιστικής μάθησης ^[92]. Οι αυτό-οργανούμενοι χάρτες απεικονίζουν τα πολυδιάστατα δεδομένα εισόδου σε νευρώνες, οι οποίοι βρίσκονται σε κάποια γεωμετρική τοπολογία, όπως ευθεία, επίπεδο ή σφαίρα ^[93]. Κάθε νευρώνας είναι συνδεδεμένος μέσω βαρών με την είσοδο και λαμβάνει ένα διάνυσμα εισόδου

πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο βάρος. Μέσω εκπαίδευσης οι αυτό-οργανούμενοι χάρτες μαθαίνουν να αντιστοιχούν ένα διάνυσμα εισόδου με κάποιο νευρώνα πραγματοποιώντας έτσι κατηγοριοποίηση.

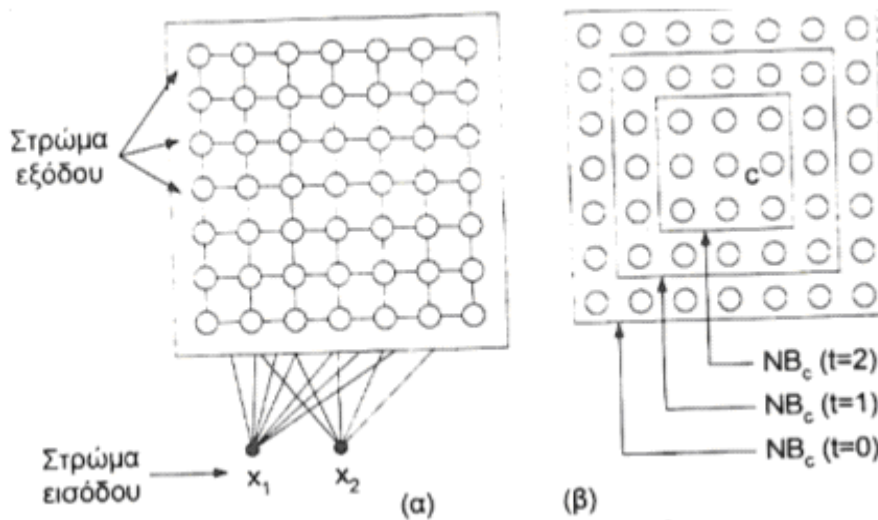
Κάθε νευρώνας επηρεάζει θετικά τους κοντινούς σε αυτόν νευρώνες και ουδέτερα ή αρνητικά τους απομακρυσμένους. Αν η όλη διαδικασία εξεταστεί συνολικά, δημιουργείται ένα είδος ανταγωνισμού για το ποιος νευρώνας θα επικρατήσει για την κάθε είσοδο. Κάθε νευρώνας προσπαθεί να ενισχύσει την δική του έξοδο, καθώς και την έξοδο των κοντινών σε αυτόν νευρώνων, και να εξασθενήσει την έξοδο των υπολοίπων νευρώνων. Οι κοντινοί στον κάθε νευρώνα νευρώνες θεωρούνται ότι αποτελούν μια γειτονιά, η οποία καθορίζεται από πριν βάσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Για να υλοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνάρτηση μεγίστου και στη συνέχεια ο νευρώνας νικητής να έχει έξοδο +1 και οι υπόλοιποι 0. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος εισόδου με το βάρος του κάθε νευρώνα, έτσι ώστε νευρώνας-νικητής να ανακηρύσσεται εκείνος με το μεγαλύτερο εσωτερικό γινόμενο. Μία τρίτη μέθοδος είναι να ανακηρύσσεται νευρώνας-νικητής εκείνος, ο οποίος έχει την μικρότερη Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ του διανύσματος εισόδου και του αντίστοιχου βάρους ^[93]. Στα δίκτυα Kohonen ανανεώνονται όχι μόνο οι κόμβοι που κερδίζουν αλλά και όλα τα βάρη σε μια περιοχή γύρω από αυτούς. Η εκπαίδευση ενός τέτοιου δικτύου Kohonen αποτελείται από τα παρακάτω βήματα ^[92]:

- *Βήμα 1:* Χρησιμοποιώντας ένα μέτρο ομοιότητας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μεταξύ των διανυσμάτων εισόδου και των βάρους w_i του κάθε νευρώνα, επιλέγουμε το νευρώνα που "κερδίζει".
- *Βήμα 2:* Τα βάρη του νικητή και των γειτονικών του κόμβων ανανεώνονται σύμφωνα με τον κανόνα $\Delta w_i = \gamma \cdot (x - w_i)$, όπου γ μικρός θετικός ρυθμός εκπαίδευσης.

Τα παραπάνω βήματα εκτελούνται κάθε φορά που υπάρχει ένα νέο διάνυσμα εισόδου, δηλαδή υπάρχει ένας νέος κύκλος εκπαίδευσης. Πριν την έναρξη κάθε νέου κύκλου εκπαίδευσης, ο ρυθμός εκπαίδευσης και το μέγεθος της γειτονιάς μειώνονται. Η μείωση είναι συνήθως γραμμική. Με την παραπάνω διαδικασία δημιουργείται ένας χάρτης που αναπαριστά σε ποιους νευρώνες αντιστοιχεί η κάθε είσοδος. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνονται 3 βήματα για 3 διανύσματα εισόδου των 2 στοιχείων το καθένα και έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη με 8 νευρώνες. Καθώς η εκπαίδευση προχωρά, τα διανύσματα βαρών μετακινούνται προς το πλησιέστερο διάνυσμα εκπαίδευσης.

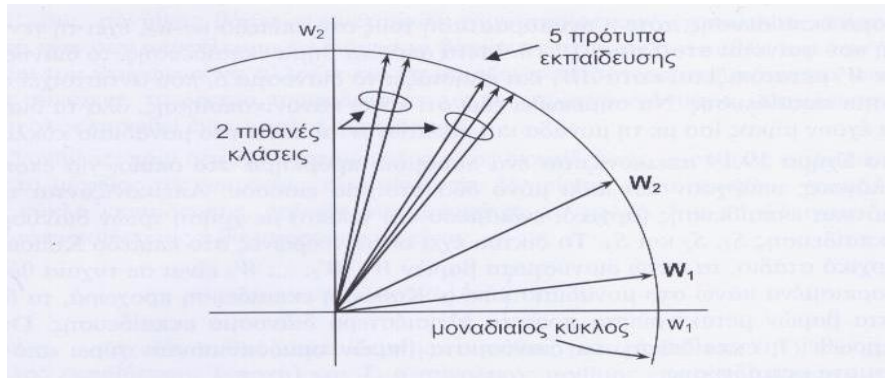


Σχήμα 5.9: Διαδικασία εκπαίδευσης αυτό-οργανούμενου χάρτη



Σχήμα 5.10: Δομή άλλου αυτό-οργανούμενου χάρτη

Ο αριθμός των νευρώνων επηρεάζει την κατηγοριοποίηση. Μικρός αριθμός νευρώνων μπορεί να οδηγήσει σε συγχώνευση κλάσεων, ενώ μεγάλος αριθμός σε υπερπροσαρμογή (overfitting), δηλαδή να προκύψουν περισσότερες κατηγορίες από όσες πραγματικά υπάρχουν. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα είναι οι αρχικές τιμές των βαρών. Η εκ των προτέρων γνώση της κλάσης κάποιου από τα διανύσματα εκπαίδευσης επιτρέπει στο να οριστούν καλές αρχικές τιμές για κάποια βάρη. Αν όμως δοθούν αρχικά τυχαίες τιμές στα βάρη, τότε μπορεί να προκληθεί το πρόβλημα που φαίνεται στο επόμενο σχήμα, δηλαδή η κλάση του διανύσματος βαρών W_2 είναι νικήτρια για τα δεδομένα πέντε διανύσματα εκπαίδευσης, τα οποία φαίνεται ότι στην πραγματικότητα ανήκουν σε δύο κλάσεις^[93].



Σχήμα 5.11: Περίπτωση λανθασμένης κατηγοριοποίησης κλάσεων

Τα δίκτυα των αυτό-οργανούμενων χαρτών είναι από τα πιο γρήγορα δίκτυα, καθώς απαιτούν λίγους κύκλους για εκπαίδευση. Επιπλέον, η εκπαίδευση του δικτύου μπορεί να γίνεται συνεχώς, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στο δίκτυο να αναπροσαρμόζεται σε συνεχή χρόνο και να αντιμετωπίζει νέες καταστάσεις.

5.5 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι συστήματα επίλυσης προβλημάτων που βασίζονται στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Τα συστήματα αυτού του είδους λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προς επίλυση προβλήματος, στον οποίο εφαρμόζονται διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντας τους προηγούμενους πληθυσμούς. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) είναι ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος που μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming), τις Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενετικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής και αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γενότυπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γενότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes) και η αναφορά γίνεται συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία και κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωμοσώματος που καλούνται loci. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με

διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται αλληλόμορφα (alleles) (τιμές χαρακτηριστικού γνωρίσματος). Κάθε γενότυπος αναπαριστά μια πιθανή λύση σε ένα πρόβλημα ^[94].

Ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη – χρησιμοποιούνται διάφοροι γενετικοί τελεστές όπως η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά καλές λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά κακές απομακρύνονται. Ο διαχωρισμός και η αποτίμηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective ή fitness function), η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί η λύση. Ο γενετικός αλγόριθμος διατηρεί ένα πληθυσμό από πιθανές λύσεις (άτομα), όπου κάθε μέλος του πληθυσμού αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και της ορθότητάς του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός που προκύπτει από την επιλογή των καλύτερων μελών του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς ^[95].

Μερικά μέλη που επιλέγονται τυχαία από τον καινούριο αυτό πληθυσμό, υφίστανται αλλαγές με τη βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δυο γονέων για να δημιουργήσει δυο νέους απογόνους, ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η μετάλλαξη αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος και εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό. Συνοψίζοντας, ένας γενετικός αλγόριθμος αποτελείται από τα παρακάτω πέντε συστατικά ^[94]:

1. Μια δυαδική αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Ένα τρόπο δημιουργίας ενός αρχικού πληθυσμού από πιθανές λύσεις (αρχικοποίηση).
3. Μια αντικειμενική συνάρτηση αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, που παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος.
4. Γενετικούς τελεστές για τη δημιουργία νέων μελών (λύσεων).
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο Γ.Α. (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών κτλ.)

Τα βασικά βήματα του απλού Γενετικού Αλγορίθμου, που επιλύει ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης f , είναι τα εξής:

1. Δημιουργία με τυχαίο τρόπο, ενός αρχικού πληθυσμού δυνατών λύσεων. Το βήμα αυτό καλείται Αρχικοποίηση (Initialization). Στη φάση αυτή δημιουργείται ένας αρχικός πληθυσμός από δυνατές λύσεις του προς επίλυση προβλήματος, όπου το μέγεθος του πληθυσμού παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου.

2. Αξιολόγηση (Evaluation) κάθε λύσης με χρήση μια συνάρτησης αξιολόγησης (fitness function). Για το συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιείται η f σαν συνάρτηση αξιολόγησης.
3. Επιλογή (Selection) ενός νέου πληθυσμού με βάση την απόδοση κάθε μέλους (δυνατής λύσης) του προηγούμενου πληθυσμού. Κατά τη φάση αυτή, δημιουργείται ένας νέος προσωρινός πληθυσμός με βάση την απόδοση των μελών του τρέχοντος πληθυσμού. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί η επιλογή και η πιο κλασική είναι η μέθοδος της "εξαναγκασμένης ρουλέτας" (roulette wheel selection).
4. Εφαρμογή στον πληθυσμό που θα προκύψει μετά τη διαδικασία της επιλογής, των γενετικών τελεστών της διασταύρωσης (Crossover) και της μετάλλαξης (Mutation). Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να υλοποιηθεί η διασταύρωση, η οποία είναι η ανταλλαγή γενετικού υλικού μεταξύ δυο γονέων. Το πώς ακριβώς θα υλοποιηθεί η διασταύρωση, εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και από την αναπαράσταση που έχει επιλεγεί. Η πιθανότητα κάθε μέλους του πληθυσμού να επιλεγεί για διασταύρωση είναι p_c . Για κάθε μέλος του πληθυσμού επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός r μεταξύ 0 και 1 και αν $r < p_c$ τότε επιλέγεται το τρέχον μέλος του πληθυσμού για διασταύρωση. Μετά την επιλογή μελών του πληθυσμού για διασταύρωση, σχηματίζονται ζευγάρια από μέλη και για κάθε ζευγάρι επιλέγεται τυχαία ένας ακεραίος αριθμός στο διάστημα $[1, m-1]$, όπου m είναι το μήκος σε δυαδικά ψηφία του χρωμοσώματος κάθε μέλους. Ο επόμενος γενετικός τελεστής είναι η μετάλλαξη, η οποία ουσιαστικά τροφοδοτεί τον πληθυσμό των δυνατών λύσεων που εξελίσσεται με νέες λύσεις, προστατεύοντάς τον από τον κίνδυνο να διαθέτει λίγες καλές λύσεις και βοηθώντας στη διασφάλιση της πολυπόθητης ισορροπίας ανάμεσα στην εξερεύνηση του χώρου των λύσεων και στην εκμετάλλευση των καλύτερων από αυτές. Για κάθε χρωμόσωμα και κάθε γονίδιο μέσα στο χρωμόσωμα, επιλέγεται τυχαία ένας πραγματικός αριθμός r μεταξύ 0 και 1 και αν $r < p_m$ τότε μεταλλάσσεται το γονίδιο.
5. Με την ολοκλήρωση του προηγούμενου βήματος, έχει δημιουργηθεί η επόμενη γενιά και γίνεται επιστροφή στο βήμα 2.
6. Η διαδικασία (βήματα 2 έως 5) επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού του γενετικού αλγορίθμου. Μια τέτοια συνθήκη θα μπορούσε να είναι ο τερματισμός όταν συμπληρωθεί ένας μέγιστος αριθμός γενεών, ή όταν για μεγάλο αριθμό γενεών δεν παρατηρείται καμία βελτίωση στην απόδοση των μελών του πληθυσμού. Το καλύτερο χρωμόσωμα – μέλος του τελευταίου πληθυσμού – αντιστοιχεί σε μια βέλτιστη λύση.

Κεφάλαιο 6

Περιφερειακή (Regional) πρόβλεψη αιολικής και ηλιακής ισχύος στην Κρήτη

6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα νευρωνικά δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBF) και τους αυτό-οργανούμενους χάρτες (SOM). Στις παρακάτω ενότητες, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή ενός μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος, που περιλαμβάνει τη χρήση του συνδυασμού των δύο παραπάνω ειδών ΤΝΔ, σε αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε όλη την περιφέρεια της Κρήτης. Αντίστοιχα, για το μοντέλο πρόβλεψης της ηλιακής παραγωγής των φωτοβολταϊκών πάρκων της Κρήτης, χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα ακτινωτής βάσης. Με τη βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος MATLAB, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες προσομοιώσεις για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων.

6.2 Ανάλυση επιμέρους στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων

Πριν την περιγραφή των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν, θα γίνει αναφορά σε μια σειρά από ειδικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν από κοινού και στα δύο μοντέλα πρόβλεψης.

6.2.1 Χρησιμοποιούμενα είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων ακτινικής βάσης (RBFNN)

Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν, χρησιμοποιήθηκαν 3 συγκεκριμένα είδη RBF, τα επιμέρους χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται παρακάτω.

1) Το πρώτο είδος που θα αναφέρουμε είναι τα RBF που αναπτύχθηκαν από τον Mark Orr. Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται στο MATLAB για την υλοποίησή τους είναι η *rbf_fs_2*, της οποίας η μορφή είναι η ακόλουθη ^[100]:

$$[C, R, w, info, conf] = rbf_fs_2(X, y, conf)$$

Η συνάρτηση αυτή επιλύει ένα πρόβλημα αναδρομής με εισόδους X και εξόδους y , χρησιμοποιώντας εμπρόσθια επιλογή (forward selection) συναρτήσεων ακτινικής βάσης και κανονικοποίηση, μέσω της κανονικοποιημένης ορθογώνιας μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (αλγόριθμος regularized orthogonal least squares). Επιστρέφει τα κέντρα C του κρυφού επιπέδου, τις πολώσεις (biases) R , τα βάρη w μεταξύ κρυφού επιπέδου και επιπέδου εξόδου, καθώς και κάποιες επιπρόσθετες πληροφορίες.

Ειδικά για τη δημιουργία του πίνακα σχεδίασης (design matrix) H , χρησιμοποιείται η εντολή *rbf_dm* υπό τη μορφή:

$$[H] = rbf_dm(X, C, R, conf)$$

δεδομένων των εισόδων X , των κέντρων C και των πολώσεων R .

2) Το δεύτερο είδος χρησιμοποιεί για τη δημιουργία του RBF τη συνάρτηση του MATLAB, *newrb*, που εκτελεί τον αλγόριθμο orthogonal least squares (ορθογώνια μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Η συνάρτηση *newrb*, λειτουργώντας επαναληπτικά, δημιουργεί ένα ακτινωτό δίκτυο προσθέτοντας ένα μόνο νέο νευρώνα σε κάθε επανάληψη. Οι νευρώνες προστίθενται στο δίκτυο έως ότου επιτευχθεί ένας επιθυμητός στόχος για το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ή όταν ο συνολικός αριθμός νευρώνων φτάσει σε ένα μέγιστο όριο. Η κλήση για αυτήν την λειτουργία είναι η εξής:

$$net = newrb(P, T, GOAL, SPREAD)$$

Η λειτουργία *newrb* παίρνει τις μήτρες των διανυσμάτων των δεδομένων εισόδου P και επιθυμητών εξόδων T , τις σχεδιαστικές παραμέτρους $GOAL$ και $SPREAD$, και επιστρέφει το επιθυμητό δίκτυο. Σε κάθε επανάληψη το διάνυσμα εισόδου που οδηγεί στη μείωση του σφάλματος πιο πολύ σε σχέση με τα άλλα χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει έναν νευρώνα *radbas*. Το σφάλμα του νέου δικτύου ελέγχεται και εάν είναι αρκετά χαμηλό, η *newrb* τερματίζεται.

Είναι σημαντικό η παράμετρος $SPREAD$ να είναι αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε οι νευρώνες *radbas* να αποκρίνονται στις επικαλυπτόμενες (overlapping) περιοχές του διαστήματος εισόδου, αλλά όχι τόσο μεγάλη ώστε όλοι οι νευρώνες να αποκρίνονται ουσιαστικά με τον ίδιο τρόπο.

Αλγόριθμος: Η *newrb* δημιουργεί ένα δίκτυο δύο στρωμάτων. Το πρώτο στρώμα έχει *radbas* νευρώνες. Αρχικά υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ ενός διανύσματος εισόδου και του πίνακα των βαρών εισόδου μέσω της συνάρτησης *DIST*, ενώ στη συνέχεια αυτή πολλαπλασιάζεται στοιχείο προς στοιχείο με το διάνυσμα των bias μέσω της συνάρτησης *NETPROD*. Η έξοδος του πρώτου επιπέδου σε ένα τέτοιο δίκτυο υπολογίζεται από μία εντολή της μορφής:

$$a\{1\} = radbas(NETPROD(DIST(net.IW\{1,1\}, p), net.b\{1\}))$$

Αν τώρα η σταθμισμένη είσοδος ενός νευρώνα είναι ίση με το διάνυσμα εισόδου, τότε η σταθμισμένη έξοδός του, σύμφωνα με τη λογική της radbas, θα είναι 1 και άρα αυτός θα είναι ο νευρώνας που θα ενεργοποιήσει το δεύτερο επίπεδο. Το δεύτερο στρώμα έχει τους PURELIN νευρώνες, υπολογίζει τη σταθμισμένη είσοδό τους με τη DOTPROD και τις τελικές εισόδους του στρώματος με τη NETSUM.

3) Το τρίτο νευρωνικό δίκτυο που εξετάζουμε δημιουργείται από τη συνάρτηση

$$net = RBF(nin, nhidden, nout, rbfund, outfunc)$$

Η εντολή αυτή δημιουργεί ένα δίκτυο ακτινωτής βάσης. Τα βάρη αρχικοποιούνται σε ένα μηδενικό μέσο και χρησιμοποιείται η συνάρτηση του MATLAB, RANDN. Οι συναρτήσεις ενεργοποίησης καθορίζονται σύμφωνα με την απόσταση μεταξύ του δεδομένου σημείου και του αντίστοιχου κέντρου.

Η εκπαίδευση του δικτύου γίνεται από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$net = RBFTRAIN(net, options, X, T)$$

Αυτή χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εκπαίδευσης δυο επιπέδων για να δημιουργήσει τα βάρη στο RBF δίκτυο της δομής net. Κάθε σειρά του X αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα εισόδου και κάθε σειρά του T περιέχει το αντίστοιχο διάνυσμα στόχου. Τα κέντρα καθορίζονται χρησιμοποιώντας ένα "Gaussian mixture model" (GMM) με κυκλικές διακυμάνσεις, με τη βοήθεια του αλγορίθμου μέγιστης-προσδοκώμενης τιμής (EM algorithm). Το μοντέλο μιγμάτων αρχικοποιείται χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου K-μέσων.

Ο αλγόριθμος προσδοκίας μεγιστοποίησης (ή Expectation-Maximization ή EM) χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα όπου υπάρχουν κρυφά ή ελλιπή δεδομένα. Ο αλγόριθμος EM επαναλαμβάνει διαδοχικά βήματα πρόβλεψης (E steps) και μεγιστοποίησης (M steps). Κατά το E-βήμα (Expectation), υπολογίζεται η προσδοκώμενη τιμή του λογαρίθμου της πιθανοφάνειας του πλήρους σετ δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τα παρατηρηθέντα στοιχεία και τις κατ' εκτίμηση παραμέτρους από την προηγούμενη επανάληψη. Στο M-βήμα (Maximization), η δεσμευμένη προσδοκώμενη τιμή του λογαρίθμου της πιθανοφάνειας (log-likelihood) του πλήρους σετ δεδομένων μεγιστοποιείται. Η τιμή αυτή αυξάνεται έως ότου επιτευχθεί ένα στάσιμο σημείο. Ο αλγόριθμος δηλαδή επαναλαμβάνεται μέχρι η παρατηρηθείσα πιθανοφάνεια που παράγεται σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις να είναι σχεδόν η ίδια.

Συμβολίζουμε τα ανολοκλήρωτα δεδομένα που αποτελούνται μόνο από τις παρατηρούμενες μεταβλητές με y και με z τις πληροφορίες που λείπουν. Μαζί τα y και τα z αποτελούν το σύνολο των δεδομένων. Έστω ακόμη p η συνάρτηση πυκνότητα πιθανότητας όλων των δεδομένων με παραμέτρους που δίνονται σε ένα διάνυσμα θ , $p(y, z | \theta)$. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να θεωρηθεί ως η ολική πιθανότητα και μπορεί επιπλέον να θεωρηθεί ως συνάρτηση του θ . Επιπλέον, η υπό συνθήκη κατανομή των πληροφοριών που λείπουν, δεδομένων όμως των παρατηρούμενων, με την εφαρμογή του κανόνα Bayes και το νόμο της ολικής πιθανότητας, εκφράζεται ως εξής:

$$p(z|y, \theta) = \frac{p(y, z|\theta)}{p(y|\theta)} = \frac{p(y|z, \theta)p(z|\theta)}{\int p(y|\hat{z}, \theta)p(\hat{z}|\theta)d\hat{z}}$$

Αυτή η μέθοδος απαιτεί μόνο τη γνώση της πιθανότητας των παρατηρούμενων μεταβλητών, δεδομένου των άγνωστων μεταβλητών, και την πιθανότητα των άγνωστων δεδομένων $p(z|\theta)$. Ο EM αλγόριθμος βελτιώνει επαναληπτικά την εκτιμώμενη αρχική τιμή του θ_0 παράγοντας νέες εκτιμήσεις θ_1, θ_2 κ.ο.κ. Σε κάθε νέο βήμα προκύπτει ένα νέο θ_{n+1} από το προηγούμενο θ_n σύμφωνα με τη σχέση :

$$\theta_{n+1} = \operatorname{argmax}_{\theta} Q(\theta)$$

Όπου $Q(\theta)$ είναι η προσδοκώμενη τιμή της log-likelihood. Με άλλα λόγια, εφόσον δεν γνωρίζουμε το πραγματικό σύνολο των δεδομένων, δεν μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή τιμή αυτής της πιθανότητας. Δεδομένων όμως των στοιχείων που μπορούμε να παρατηρήσουμε (y), έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την a posteriori τιμή της πιθανότητας για διάφορες τιμές του άγνωστου z . Για κάθε σύνολο του z υπάρχει μία τιμή της πιθανότητας συναρτήσεως του θ , και μπορούμε έτσι να υπολογίσουμε και την προσδοκώμενη τιμή της πιθανότητας βάσει των δοσμένων τιμών του y . Δηλαδή :

$$Q(\theta) = \sum_z p(z|y, \theta_n \log p(y, z|\theta))$$

Ο αλγόριθμος *k-means* αποτελεί μια μέθοδο για την ταξινόμηση N παρατηρήσεων σε K συστάδες (clusters) S_j που περιέχουν N_j παρατηρήσεις. Κάθε συστάδα έχει ένα κέντρο, το οποίο ισούται με το μέσο όρο των παρατηρήσεων που ανήκουν σε αυτήν. Κάθε παρατήρηση, αναθέτεται στη συστάδα που έχει το πιο "κοντινό" κέντρο στη συγκεκριμένη παρατήρηση. Σκοπός της μεθόδου είναι να ελαχιστοποιήσει το συνολικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*Total Mean Squared Error*) ανάμεσα στο εκπαιδευόμενο δείγμα και τα κέντρα των αντίστοιχων συστάδων. Η συνάρτηση του συνολικού μέσου τετραγωνικού σφάλματος είναι:

$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{n \in S_j} |x_n - \mu_j|^2$$

όπου x_n είναι ένα διάνυσμα που αναπαριστά τη n -στή παρατήρηση και μ_j είναι το κέντρο της συστάδας S_j .

Η συνάρτηση ελαχιστοποίησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\operatorname{arg min}_{m, \eta} \sum_{i=1}^N \|x_i - \mu_{\eta(i)}\|^2$$

όπου η είναι η συνάρτηση ανάθεσης της κάθε παρατήρησης σε μια συστάδα, δηλαδή η σχέση $\eta(i)=j$ σημαίνει ότι η i -στή παρατήρηση θα ανήκει στο j -στή συστάδα. Το εκπαιδευόμενο δείγμα ταξινομείται στις συστάδες με τέτοιο τρόπο ώστε να βρίσκεται πολύ κοντά στα κέντρα, για αυτό το λόγο θεωρούμε τα κέντρα ως μια συμπαγή αναπαράσταση του συνόλου εκπαίδευσης.

Στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος αποτελείται από επαναλήψεις της παραπάνω διαδικασίας. Αρχικά, τα δεδομένα ταξινομούνται σε K συστάδες, όπου ο αριθμός των συστάδων επιλέγεται τυχαία από το χρήστη. Το πρώτο βήμα είναι το εξής: για κάθε συστάδα υπολογίζονται τα κέντρα, τα οποία όπως έχει προαναφερθεί ισούνται με τη μέση τιμή των δεδομένων που ανήκουν σε κάθε συστάδα. Στη συνέχεια ακολουθεί το δεύτερο βήμα: Οι παρατηρήσεις θα πρέπει να ταξινομηθούν ξανά, ώστε κάθε μια από αυτές να ανήκει στη συστάδα, της οποίας το κέντρο είναι η πιο κοντινή τιμή στην τιμή της παρατήρησης. Τα δύο αυτά βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη που θα τερματίζει τον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος συγκλίνει κι επομένως μια τέτοια συνθήκη αποτελεί η τελική ταξινόμηση των δεδομένων, όπου κάθε μία παρατήρηση ανήκει σε μια συστάδα και περαιτέρω επαναλήψεις δεν επιφέρουν κάποια αλλαγή σε αυτή την ταξινόμηση.

Ο αλγόριθμος k-means ανήκει στις μη επιβλεπόμενης μάθησης μεθόδους και δεν εξασφαλίζει τη βέλτιστη σύγκλιση του συνόλου των δεδομένων, αφού το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον αριθμό των συστάδων που ορίζονται αρχικά. Παρόλα αυτά, επειδή είναι ένας γρήγορος αλγόριθμος, είναι δυνατόν να βρεθεί με δοκιμές ο βέλτιστος αριθμός των συστάδων.

6.2.2 Βελτιστοποίηση της εκπαίδευσης των RBFNN με χρήση γενετικού αλγορίθμου στο MATLAB

Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης RBFNN των μοντέλων της παρούσας εργασίας εκπαιδεύονται με έναν υβριδικό αλγόριθμο που συνδυάζει την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με τους γενετικούς αλγορίθμους. Γενικά, ένα χαρακτηριστικό ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που το κάνει κατάλληλο για μια εφαρμογή πρόβλεψης χρονοσειρών, είναι ότι η απόδοση του μπορεί να βελτιωθεί όταν κανονικοποιούνται κατάλληλα οι μεταβλητές εισόδου του. Στις περισσότερες εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων, τα δεδομένα εισόδου προεξεργάζονται, έτσι ώστε όλες οι τιμές των μεταβλητών εισόδου να βρίσκονται στο ίδιο διάστημα $[0..1]$ ή $[-1..1]$. Αυτή όμως είναι η περίπτωση που όλες οι μεταβλητές εισόδου συμβάλουν ισοδύναμα στην έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Στην περίπτωση, όμως, της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, επειδή η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση με την χρονοσειρά της αιολικής ισχύος, παρέχει τη σημαντικότερη πληροφορία σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές, όπως η διεύθυνση του ανέμου ή η θερμοκρασία.

Θέτοντας λοιπόν έναν συντελεστή w_j σε κάθε μεταβλητή εισόδου ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης, η απόδοσή του βελτιστοποιείται σημαντικά. Στην πραγματικότητα, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεταβλητές που παρουσιάζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Η έξοδος a_i του κρυμμένου επιπέδου ενός RBFNN έχει τη μορφή:

$$a_m = f \left(w_j \cdot \|\Phi_{m,j} - X_j\|^2 / r_m^2 \right)$$

όπου $\Phi_{m,j}$ είναι τα κέντρα των συναρτήσεων βάσης (νευρώνες του πρώτου επιπέδου) και r_m είναι η ακτίνα τους. Επίσης, το j είναι ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου, το m είναι ο αριθμός των νευρώνων και το f συμβολίζει τη Γκαουσιανή συνάρτηση.

Από την παραπάνω σχέση, η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου ενός RBFNN εξαρτάται από τους νευρώνες του, οι οποίοι είναι πλησιέστεροι στα δεδομένα εισόδου. Λόγω της ευκλείδειας απόστασης στη σχέση, η έξοδος του πρώτου επιπέδου αλλάζει αν μεταβάλουμε την τάξη μεγέθους μίας από της μεταβλητές εισόδου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ή να μειώνεται η επίδραση της στη τελική έξοδο του δικτύου ανάλογα με τη μεταβολή. Αυτό φαίνεται στο επόμενο παράδειγμα:

Έστω ότι ο πίνακας βαρών του κρυμμένου επιπέδου του RBFNN έχει δύο διανύσματα (δηλαδή στο κρυμμένο στρώμα έχει δύο νευρώνες) που αποτελούνται από δύο μεταβλητές, την αιολική παραγωγή της προηγούμενης ώρας και την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.

$$\Phi (1)=\{2 \text{ MW}, 7 \text{ m/s} \}, \quad \Phi (2)=\{6 \text{ MW}, 8 \text{ m/s}\}$$

Ας θεωρήσουμε ως δείγμα ελέγχου το παρακάτω

$$\text{Δείγμα}=\{5 \text{ MW}, 7.1 \text{ m/s}\}$$

Τότε η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου θα είναι

$$\alpha(1) = 9+0.01 \quad \alpha(2) = 1+0.81$$

Δηλαδή από την αποτίμηση του παραπάνω δείγματος, η έξοδος του νευρωνικού δικτύου θα εξαρτάται περισσότερο από τον δεύτερο νευρώνα και κατ' επέκταση από την αιολική παραγωγή της προηγούμενης ώρας αντί να εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Μειώνοντας το εύρος τιμών της αιολικής παραγωγής της προηγούμενης ώρας και αυξάνοντας το εύρος τιμών της ταχύτητας του ανέμου, είναι δυνατόν να επιλεγεί ο νευρώνας που περιέχει την πλησιέστερη τιμή της ταχύτητας του ανέμου με την αντίστοιχη τιμή του δείγματος.

Για τη βέλτιστη κανονικοποίηση της εισόδου των νευρωνικών δικτύων RBFNN των προτεινόμενων μοντέλων, εφαρμόστηκε ένας γενετικός αλγόριθμος που προσεγγίζει το κατάλληλο εύρος τιμών της κάθε μεταβλητής εισόδου. Οι υπόλοιπες παράμετροι του νευρωνικού δικτύου RBFNN, δηλαδή ο αριθμός των συναρτήσεων

βάσης (νευρώνες του κρυμμένου επιπέδου) και η ακτίνα τους επιλέχθηκαν με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, με τη βοήθεια τεσσάρων κριτηρίων γενίκευσης. Ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης καθορίζει την πολυπλοκότητα του δικτύου και παράλληλα την ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου. Ένα νευρωνικό δίκτυο με πολύ λίγες συναρτήσεις βάσεις δίνει προβλέψεις με υψηλή πόλωση στις συναρτήσεις αυτές και με χαμηλή διασπορά, ενώ ο μεγάλος αριθμός συναρτήσεων βάσης δίνει προβλέψεις με υψηλή διασπορά αλλά προσαρμοσμένες στα δεδομένα εκπαίδευσης (χαμηλή πόλωση). Έτσι η καλύτερη απόδοση του νευρωνικού δικτύου λαμβάνεται από την εξισορρόπηση των δύο αυτών ιδιοτήτων, έτσι ώστε το δίκτυο να αποδίδει εξίσου καλά τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης όσο και στο σύνολο αποτίμησης. Με σκοπό τη βέλτιστη γενίκευση των νευρωνικών δικτύων αφαιρούνται δύο υποσύνολα δεδομένων (σύνολο επικύρωσης και σύνολο έλεγχο) από το σύνολο εκπαίδευσης. Έτσι κατά την εκπαίδευση, υπάρχουν διαθέσιμα δύο σύνολα δεδομένων ανεξάρτητα από το σύνολο εκπαίδευσης. Για να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων, εφαρμόστηκαν τέσσερα κριτήρια γενίκευσης στα παραπάνω δύο σύνολα: το Μπαεζιανό κριτήριο πληροφορίας, ο αμερόληπτος εκτιμητής ρίσκου του Stein, το γενικευμένο κριτήριο αντί-επικύρωσης και το μέσο απόλυτο σφάλμα. Τα κριτήρια περιγράφονται ειδικά για τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$BIC(M) = \left(\frac{N}{2\sigma^2}\right) \left[e(M) + \frac{M+1}{N} (\log N)\sigma^2 \right]$$

$$SURE(M) = e(M) - N\sigma^2 + 2\sigma^2(M+1)$$

$$GCV(M) = (N-M) \cdot \frac{t^T P P^T t}{trunc(P)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|p - t|}{t}$$

όπου e είναι το τετραγωνικό σφάλμα του νευρωνικού δικτύου που περιέχει M συναρτήσεις βάσης, N είναι ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων του συνόλου επικύρωσης και αποτίμησης και σ^2 η διασπορά που μπορεί να εκτιμηθεί από το τετραγωνικό σφάλμα του μοντέλου. Επίσης, το t είναι το διάνυσμα στόχου, το p είναι η πρόβλεψη του νευρωνικού δικτύου και το P ο πίνακας προβολής της ορθογώνιας μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

Συνεπώς, κατά την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων ακτινικών συναρτήσεων βάσης της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήσαμε τον πολυκριτηριακό γενετικό αλγόριθμο του matlab, *gamultiobj*. Ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει ως fitness function την εκάστοτε συνάρτηση δημιουργίας του RBF, ενώ περιλαμβάνονται στις εισόδους του κάποιες παράμετροι για την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων, όπως ο μέγιστος αριθμός των γενεών (Generations) για τις οποίες θα επαναλαμβάνεται ο

αλγόριθμος, άνω και κάτω όρια για το αρχικό εύρος των τιμών του πληθυσμού (PopInitRange), αλλά και το μέγεθος του πληθυσμού κάθε γενιάς (PopulationSize).

6.2.3 Εφαρμογή του αναδρομικού αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων RLS στην περιφερειακή πρόβλεψη

Για το συνδυασμό των επιμέρους προβλέψεων ισχύος από τα πάρκα της Κρήτης και την εξαγωγή μιας συνολικής-περιφερειακής πρόβλεψης, χρειαζόταν ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος που θα υπολογίζει τα βάρη του σταθμισμένου αθροίσματος, αναγνωρίζοντας τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στη μνήμη των νευρωνικών δικτύων τα οποία παρέχουν τις αρχικές επιμέρους προβλέψεις. Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος που επιλέχθηκε είναι ο αναδρομικός αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων RLS, ο οποίος είναι κατάλληλος να προσαρμόζει σε κάθε αλλαγή τις παραμέτρους ενός δυναμικού προβλήματος σε λίγες επαναλήψεις ^[101].

Το κυριότερο στοιχείο του RLS που καθορίζει την απόδοσή του είναι ο παράγοντας λήθης. Ο παράγοντας λήθης ορίζει το βαθμό που θα ληφθούν υπ' όψιν τα παλαιότερα δεδομένα. Η επιλογή του παράγοντα λήθης προκύπτει από τον συμβιβασμό μεταξύ της ικανότητας να αναγνωρίζει τις αλλαγές του προβλήματος με την ανάγκη να μειωθεί η διασπορά του σφάλματος της πρόβλεψης. Το να δίνεται βάρος στα πρόσφατα δεδομένα έχει σαν αποτέλεσμα οι παράμετροι του σταθμισμένου αθροίσματος να αλλάζουν πολύ γρήγορα, αλλά με το κόστος να αυξηθεί πολύ η μεταβλητότητα του σφάλματος. Η επιλογή λοιπόν του παράγοντα λήθης έχει ουσιώδη επίδραση στην ακρίβεια των προβλέψεων.

Οι εξισώσεις του RLS είναι οι εξής:

$$\hat{p}_t = [\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \dots]$$

$$P_t = \frac{1}{\lambda_t} \left(P_{t-1} - \frac{P_{t-1} \hat{p}_t^T \hat{p}_t P_{t-1}}{\lambda_t + \hat{p}_t^T P_{t-1} \hat{p}_t} \right)$$

$$e_t = p_t - w_{t-1} \hat{p}_t$$

$$w_t = w_{t-1} + P_t \hat{p}_t^T e_t$$

όπου $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \dots$ είναι οι επιμέρους προβλέψεις βάσης, p_t η μέτρηση της συνολικής παραγωγής, P ο πίνακας διασποράς του σφάλματος και w_t οι συντελεστές του σταθμισμένου αθροίσματος.

Επίσης, από τις εξισώσεις το λ_t είναι ο παράγοντας λήθης που όσο μικρότερος είναι, τόσο χαμηλότερη είναι η επίδραση των παλαιότερων τιμών στην εκτίμηση.

Στην παρούσα διπλωματική, ο παράγοντας λήθης εξαρτάται τόσο από τα δεδομένα εισόδου, όσο κι από το σφάλμα της τελικής πρόβλεψης. Στη περίπτωση αυτή, η επιλογή του παράγοντα λήθης γίνεται με χρήση της απόστασης Cook. Η

απόσταση Cook σχεδιάστηκε για την μέτρηση της επίδρασης του κάθε σημείου από το σύνολο δεδομένων στην εκτίμηση των παραμέτρων της γραμμικής παλινδρόμησης. Εδώ θα εξεταστεί η επίδραση των νέων δεδομένων της ισχύος στην γραμμική εξίσωση του συνδυασμού των προβλέψεων, πριν εφαρμοστεί κάποιος παράγοντας λήθης. Δηλαδή την επίδραση της μέτρησης που λαμβάνεται την χρονική στιγμή $t=T$ θεωρώντας το $\lambda_t=1$. Τυπικά, ορίζεται η επίδραση ενός σημείου ως επιπέδου α αν οι υπό εκτίμηση παράμετροι μετακινηθούν στο $1-\alpha$ διάστημα εμπιστοσύνης. Αυτό σημαίνει ότι

$$\frac{(w_{t|\lambda=1} - w_t)^T P_{t|\lambda=1}^{-1} (w_{t|\lambda=1} - w_t)}{\sigma_{t-1}^2} \leq \chi_{m|1-\alpha}^2$$

όπου m είναι το μέγεθος του διανύσματος w , $w_{t|\lambda=1}$ είναι μία εκτίμηση του w χωρίς την εφαρμογή κάποιου παράγοντα λήθης στις προηγούμενες παρατηρήσεις, δηλαδή

$$w_{t|\lambda=1} = w_{t-1} + P_{t|\lambda=1} \hat{p}_t e_t$$

και σ_{t-1}^2 είναι η διασπορά του σφάλματος. Όμως ισχύει ότι

$$\hat{p}_t^T P_{t|\lambda=1} \hat{p}_t = \frac{\hat{p}_t^T P_{t-1} \hat{p}_t}{1 + \hat{p}_t^T P_{t-1} \hat{p}_t}$$

Άρα η απόσταση Cook υπολογίζεται τελικά με την παρακάτω εξίσωση

$$C_t = \frac{\hat{p}_t^T P_{t|\lambda=1} \hat{p}_t e_t}{\sigma_{t-1}^2 (1 + \hat{p}_t^T P_{t|\lambda=1} \hat{p}_t)}$$

6.3 Περιφερειακή πρόβλεψη παραγωγής ισχύος αιολικών πάρκων στην Κρήτη

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας που εκτελέστηκε κατά την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

6.3.1 Προετοιμασία των δεδομένων και εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων

Όπως προαναφέρθηκε, για την προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης επιλέχτηκε η περιοχή της Κρήτης. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά οι χρονοσειρές της αιολικής ισχύος 27 διαφορετικών αιολικών πάρκων,

εγκατεστημένων διάσπαρτα σε όλη την έκταση της Κρήτης. Οι χρονοσειρές αυτές είναι ωριαίες, δηλαδή αφορούν την αιολική παραγωγή των πάρκων ανά ώρα, ενώ καλύπτουν όλη την περίοδο του έτους 2013. Ωστόσο, λόγω της ύπαρξης πολλών μη έγκυρων ή μη διαθέσιμων τιμών στις χρονοσειρές κάποιων πάρκων, αποφασίστηκε η τελική χρήση μόνο 17 πάρκων στο μοντέλο πρόβλεψης, δεδομένου ότι τα υπόλοιπα δε διέθεταν ικανοποιητικό αριθμό δειγμάτων στις χρονοσειρές τους, τέτοιον ώστε να συμβάλλουν στην ανάπτυξη του μοντέλου. Σημειώνεται πως μεταξύ των 17 τελικών πάρκων, τα 5 έχουν εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως των 10.000kW και άνω, ενώ η εγκατεστημένη ισχύς των υπολοίπων κυμαίνεται από τα 9.900kW μέχρι και τα 2.500kW.

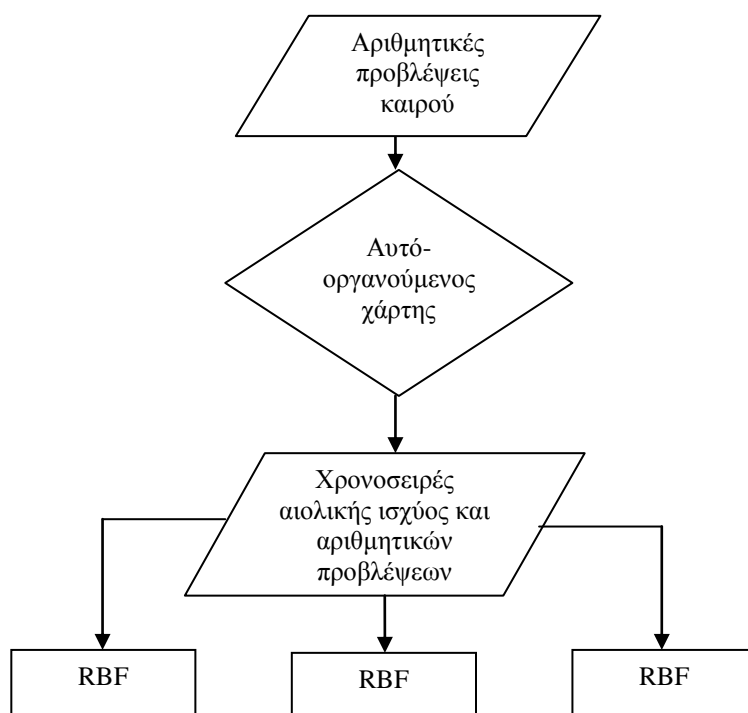
Όσον αφορά στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού NWP, αυτές παρέχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο SKIRON, που περιγράφηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο, έχουν ωριαία χρονική ανάλυση, πενήνήμερο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης και καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Με βάση τις συντεταγμένες του εκάστοτε πάρκου, χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το πλέγμα της Μεσογείου για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία της Κρήτης, στα οποία βρίσκονται τα αιολικά πάρκα. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη πως οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού κάλυπταν την περίοδο από την 1^η Μαΐου 2013 μέχρι την 30^η Νοεμβρίου 2013, αυτή ήταν τελικά και η περίοδος για την οποία χρησιμοποιήθηκαν οι χρονοσειρές της αιολικής ισχύος των πάρκων.

Με τη βοήθεια των παραπάνω NWP προβλέψεων από το μετεωρολογικό μοντέλο για τις καιρικές μεταβλητές, δημιουργήθηκε το διάνυσμα εισόδου (input) που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στα διάφορα νευρωνικά δίκτυα του προτεινόμενου μοντέλου για την παραγωγή των προβλέψεων. Δεδομένου μάλιστα ότι ο ορίζοντας πρόβλεψης επιλέχτηκε σταθερός και ίσος με 1 ώρα, δηλαδή όλες οι προβλέψεις γίνονται για μία ώρα μπροστά, το διάνυσμα εισόδου είχε συνολικά 8 παραμέτρους, χωρίς βεβαίως να περιλαμβάνει τον ορίζοντα πρόβλεψης. Αντιθέτως, περιλαμβάνονται η τρέχουσα (τελευταία παρατηρηθείσα) τιμή της αιολικής ισχύος, καθώς και η ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη. Επιπλέον, 4 παράμετροι συνίστανται από δύο ζευγάρια τιμών για την ταχύτητα του ανέμου την ώρα της πρόβλεψης και μια ώρα μετά από αυτήν, ενώ οι υπόλοιπες 2 παράμετροι αποτελούνται από ένα ζευγάρι τιμών για τη διεύθυνση του ανέμου την ώρα της πρόβλεψης. Είναι ανάγκη να διευκρινιστεί πως για την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιούμε ζευγάρια τιμών, καθώς για κάθε πάρκο λαμβάνουμε υπόψη 2 διπλανά του σημεία, μεταξύ των οποίων βρίσκονται οι συντεταγμένες του.

Ως προς το επιθυμητό διάνυσμα στόχου (target), αυτό αποτελείται από μία και μόνο μεταβλητή και αφορά βεβαίως την πραγματική τιμή της αιολικής ισχύος του εκάστοτε πάρκου κατά την ώρα της πρόβλεψης, δηλαδή μία ώρα μπροστά.

Αναφέρθηκε νωρίτερα πως για το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης που αναπτύχθηκε στο παρόν μέρος της διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων, και ειδικότερα τόσο αυτό-οργανούμενοι χάρτες (SOM), όσο και νευρωνικά δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης (RBFNN). Πιο ειδικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, το μοντέλο μας, για καθένα από τα 17 πάρκα, έχει στην είσοδό του έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη. Ένα τέτοιο νευρωνικό

δίκτυο είναι κατάλληλο να διαχωρίζει ένα σύνολο δεδομένων σε επιμέρους υποσύνολα με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών εισόδου του. Ο αυτό-οργανούμενος χάρτης εδώ, χρησιμοποιείται για να χωρίζει τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε τρεις κατηγορίες με βάση το μέγεθός τους. Τελικά, την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος την παρέχουν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης, διαφορετικά μεταξύ τους, που το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μία κατηγορία της αιολικής ταχύτητας.



Σχήμα 6.1: Δομή του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Αναλυτικά, ο αυτό-οργανούμενος χάρτης δέχεται στην είσοδό του 4 τιμές ταχύτητας που προέρχονται, όπως είδαμε παραπάνω, από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, δηλαδή τα δύο ζευγάρια τιμών για την ταχύτητα του ανέμου την ώρα της πρόβλεψης και μια ώρα μετά από αυτήν αντίστοιχα. Αυτός ο SOM αποτελείται από ένα επίπεδο νευρώνων το οποίο περιέχει τόσους νευρώνες, όσες είναι και οι κατηγορίες του συνόλου που διαχωρίζει. Οι νευρώνες αυτοί προκύπτουν από μη επιβλεπόμενη μάθηση και στη προκειμένη εφαρμογή είναι τρεις. Επομένως, η ταχύτητα του ανέμου ταξινομείται σε 3 κατηγορίες (χαμηλή, μεσαία και υψηλή), για καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιείται και ένα διαφορετικό RBF. Με τον τρόπο αυτό, πετυχαίνουμε αρχικά καλύτερη ομαδοποίηση των δεδομένων μας, κατ' επέκταση, ορθότερο διαχωρισμό του αρχικού συνόλου των δειγμάτων κάθε πάρκου σε ομάδες ομοειδών δειγμάτων για την εκπαίδευση των RBF, και κατά συνέπεια, βελτιστοποίηση της πρόβλεψης.

Στη συνέχεια, αφού πραγματοποιηθεί η παραπάνω ταξινόμηση, ενσωματώνονται και οι υπόλοιπες παράμετροι, δηλαδή η πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος, η ώρα της πρόβλεψης και το ζευγάρι τιμών της διεύθυνσης του ανέμου (από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού) την ώρα της πρόβλεψης, ώστε να

δημιουργηθεί το προαναφερθέν διάνυσμα εισόδου των συνολικά 8 παραμέτρων. Διαμορφώνονται, λοιπόν, τρία υποσύνολα εκπαίδευσης, αποτελούμενα από δείγματα-εισόδους των 8 παραπάνω μεταβλητών, με κάθε υποσύνολο να εκπαιδεύει ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινικής βάσης. Σημειώνεται πως σε αυτό το μέρος της διπλωματικής εργασίας, που αφορά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε επιμέρους κατηγορία αποκλειστικά τα RBF του Mark Orr, που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα, για λόγους ομοιομορφίας.

Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι ο αριθμός των δειγμάτων εκπαίδευσης για κάθε RBF προκύπτει σχετικά μικρός, εξαιτίας του διαμερισμού του αρχικού συνόλου δειγμάτων από τον SOM. Για το λόγο αυτό, στη διαδικασία εκπαίδευσης όλων των RBF τα ανάλογα δείγματα χωρίστηκαν τυχαία για εκπαίδευση (training), επικύρωση (validation) και δοκιμή (testing) σε αναλογία 80%, 10% και 10% αντίστοιχα. Επιπλέον, τα νευρωνικά αυτά δίκτυα βελτιστοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευσή τους με έναν γενετικό αλγόριθμο, στον οποίο έγινε αναφορά προηγουμένως.

Τέλος, είναι ευνόητο πως η παραπάνω διαδικασία εκπαίδευσης των SOM και των αντίστοιχων RBF πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά για καθένα από τα 17 αιολικά πάρκα της Κρήτης, ενώ σημειώνεται πως ως περίοδος εκπαίδευσης για όλα τα πάρκα επιλέχτηκε το διάστημα από την 1^η Μαΐου 2013 έως την 30^η Σεπτεμβρίου 2013. Οι μήνες του Οκτωβρίου και του Νοεμβρίου χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση του μοντέλου, η οποία περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

6.3.2 Αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης

Σε αυτό το τελικό στάδιο της προσομοίωσης, προσπαθούμε να εξετάσουμε την ορθότητα της εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων του μοντέλου, κάτι που συνεπάγεται και την αντίστοιχη ευστοχία στην παραγωγή προβλέψεων της αιολικής ισχύος των αιολικών πάρκων. Παράλληλα, γίνεται έλεγχος στον τελικό αριθμό των αιολικών πάρκων της Κρήτης που είναι βέλτιστο να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά στο μοντέλο, ώστε να προκύψει μια περιφερειακή πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ισχύος της Κρήτης με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί το τελευταίο αυτό βήμα, δηλαδή η περιφερειακή πρόβλεψη της αιολικής ισχύος για πολλαπλά πάρκα, είναι προφανώς απαραίτητη η ύπαρξη έγκυρων τιμών στις χρονοσειρές αιολικής ισχύος των επιμέρους πάρκων ακριβώς κατά τις ίδιες ημέρες και ώρες, τουλάχιστον όσον αφορά την περίοδο Οκτωβρίου – Νοεμβρίου στην οποία γίνεται η αποτίμηση. Επομένως, λόγω της μη διαθεσιμότητας ορισμένων τιμών στις χρονοσειρές των πάρκων σε διάφορες ημέρες και ώρες, αυτές συμπληρώθηκαν με βάση τη διαθέσιμη ισχύ του πιο κοντινού τους πάρκου, βάσει συντεταγμένων, κατά την ίδια ώρα, τηρουμένης βεβαίως και της μεταξύ τους αναλογίας της εγκατεστημένης ισχύος. Η διαδικασία αυτή στηρίχτηκε στην παραδοχή πως κοντινά μεταξύ τους πάρκα επηρεάζονται από παραπλήσιες καιρικές συνθήκες, συνεπώς είναι λογικό να παράγουν την ίδια στιγμή τέτοια ισχύ, που θα συσχετίζεται αναλογικά με την εγκατεστημένη ισχύ τους.

Μετά από αυτό το αρχικό βήμα, ακολουθήθηκε διαδικασία πανομοιότυπη με αυτήν που περιγράφηκε στην ενότητα της προετοιμασίας των δεδομένων, όσον αφορά στη δημιουργία του συνόλου αποτίμησης των δειγμάτων εισόδου για κάθε πάρκο. Πιο επεξηγηματικά, κάθε δείγμα ήταν ένα διάνυσμα 8 παραμέτρων, ίδιων προφανώς με αυτών της προηγούμενης ενότητας και δημιουργημένων με αντίστοιχη μέθοδο, δηλαδή η τρέχουσα τιμή της αιολικής ισχύος, η ώρα της πρόβλεψης, 2 ζευγάρια τιμών για την ταχύτητα του ανέμου και 1 ζευγάρι τιμών για τη διεύθυνση αυτού. Φυσικά, τα δείγματα αυτά προήλθαν από την περίοδο Οκτωβρίου-Νοεμβρίου, για την οποία δε πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων, ώστε η αποτίμηση να γίνει σε εισόδους που δεν έχουν "συναντήσει" στο παρελθόν.

Ακόμα, στην περίπτωση της αποτίμησης, επιλέχτηκε να δοκιμαστούν ορίζοντες πρόβλεψης από 1 ώρα μέχρι και 48 ώρες μπροστά για καλύτερη εκτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου. Ωστόσο, δεδομένου ότι στην εκπαίδευση ο ορίζοντας ήταν σταθερός και ίσος με μία ώρα, η παράμετρος κάθε εισόδου που αφορά την τρέχουσα-τελευταία παρατηρηθείσα τιμή της αιολικής ισχύος, για τις ανάγκες της αποτίμησης, δημιουργήθηκε ως εξής: Όταν πρόκειται για πρόβλεψη της πρώτης ώρας, λαμβάνεται η τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος, ενώ για πρόβλεψη πάνω από δύο ώρες μπροστά, χρησιμοποιείται η αμέσως προηγούμενη πρόβλεψη ισχύος του μοντέλου.

Με τον τρόπο αυτό, τα δημιουργημένα δείγματα-είσοδοι κάθε πάρκου για την περίοδο αποτίμησης χρησιμοποιήθηκαν στα αντίστοιχα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα του ίδιου πάρκου (SOM και RBF). Σε κάθε δείγμα, οι 4 παράμετροι της ταχύτητας του ανέμου, μέσω της εισόδου τους στον SOM, καθόριζαν ποιο από τα 3 RBF θα ενεργοποιηθεί σε αυτήν την περίπτωση, ενώ με την ενσωμάτωση και των υπόλοιπων παραμέτρων και την είσοδό τους στο επιλεγμένο RBF, προέκυπτε η τιμή της τελικής πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Αυτό επαναλήφθηκε για όλες τις ώρες της περιόδου αποτίμησης, για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης (48) και φυσικά για όλα τα αιολικά πάρκα (17).

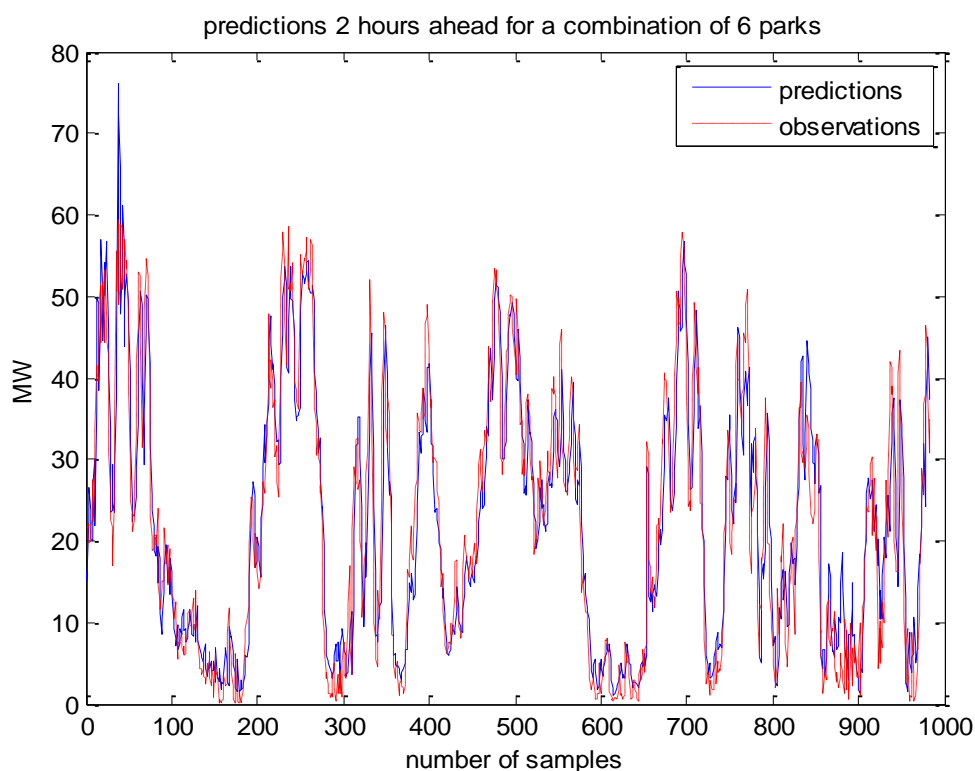
Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η δημιουργία, για καθένα από τα 17 πάρκα, 48 χρονοσειρών με τις προβλέψεις του μοντέλου, όπου κάθε χρονοσειρά αντιστοιχεί σε διαφορετικό ορίζοντα πρόβλεψης. Παράλληλα, αποθηκεύτηκαν και οι αντίστοιχες πραγματικές τιμές-παρατηρήσεις ισχύος των πάρκων, για λόγους σύγκρισης, υπολογισμού των όποιων αποκλίσεων από τις προβλέψεις και εξαγωγής των αντίστοιχων σφαλμάτων του μοντέλου.

Στο τελικό στάδιο των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε ο αναδρομικός αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων RLS που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, προκειμένου οι επιμέρους προβλέψεις ισχύος των αιολικών πάρκων να πολλαπλασιαστούν με τα κατάλληλα βάρη πριν αθροιστούν, ώστε να προκύψει μια περιφερειακή πρόβλεψη για την αιολική ισχύ της Κρήτης. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε επαναληπτικά, και μάλιστα έγιναν τόσες επαναλήψεις όσα είναι και τα δείγματα των χρονοσειρών πρόβλεψης, με σκοπό τη βέλτιστη προσαρμογή ανά επανάληψη των βαρών του σταθμισμένου αθροίσματος. Η προσαρμογή αυτή λάμβανε βεβαίως υπόψη το αντίστοιχο άθροισμα των πραγματικών τιμών ισχύος των αιολικών πάρκων, που ήταν και το αποτέλεσμα προς προσέγγιση. Ταυτόχρονα, καταγραφόταν για κάθε επανάληψη η απόκλιση του σταθμισμένου αθροίσματος

πρόβλεψης από το πραγματικό άθροισμα ισχύος, ώστε να εξαχθεί ένας μέσος όρος σφάλματος. Είναι ευνόητο πως η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τους 48 ορίζοντες πρόβλεψης, με την εξαγωγή ξεχωριστών αποτελεσμάτων για κάθε ορίζοντα.

Ο απότερος σκοπός της προσομοίωσης ήταν η εύρεση του τελικού αριθμού των αιολικών πάρκων που έπρεπε να συμπεριληφθούν στο σταθμισμένο άθροισμα προβλέψεων, ώστε να έχουμε το ελάχιστο δυνατό σφάλμα σε σχέση με το αντίστοιχο άθροισμα πραγματικών τιμών ισχύος. Για το λόγο αυτό, η αρχική προσομοίωση περιέλαβε τη χρήση μόλις τεσσάρων αιολικών πάρκων, αυτών με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ, ώστε να υπολογιστεί η τελική μέση απόκλιση μεταξύ του σταθμισμένου προβλεπόμενου αθροίσματος και του αθροίσματος ισχύος τους, για κάθε ορίζοντα αλλά και για όλους τους ορίζοντες κατά μέσο όρο. Στη συνέχεια, προστέθηκε ακόμη ένα πάρκο στο άθροισμα και πραγματοποιήθηκαν ακριβώς τα ίδια βήματα, ενώ συνεχίστηκε η σταδιακή ενσωμάτωση των πάρκων, κατά ένα κάθε φορά, μέχρι να συμπεριληφθούν και τα 17 αιολικά πάρκα στην παραγωγή περιφερειακής πρόβλεψης ισχύος. Σημειώνεται πως τα πάρκα προστέθηκαν κατά φθίνουσα εγκατεστημένη ισχύ.

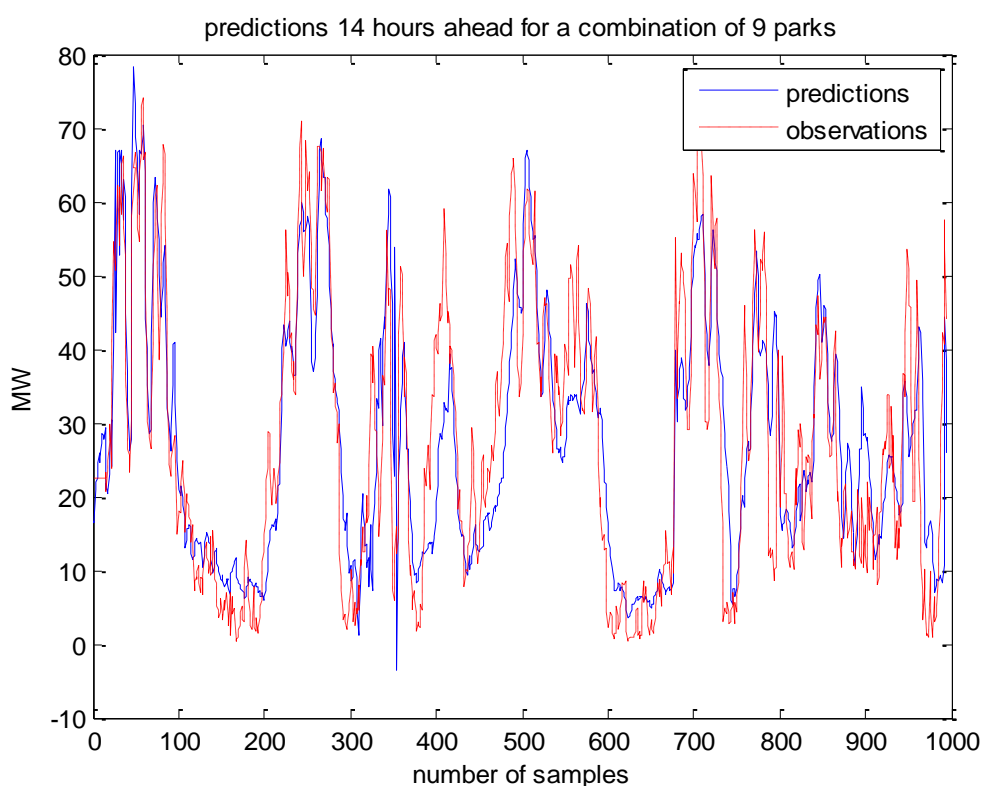
Παρακάτω ακολουθούν κάποια αντιπροσωπευτικά διαγράμματα που μας εμφανίζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς επίσης υποδεικνύουν την τελική επιλογή του αριθμού των πάρκων της Κρήτης που θα συμπεριληφθούν στο προτεινόμενο μοντέλο, προκειμένου να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης και πιο ακριβούς περιφερειακής πρόβλεψης.



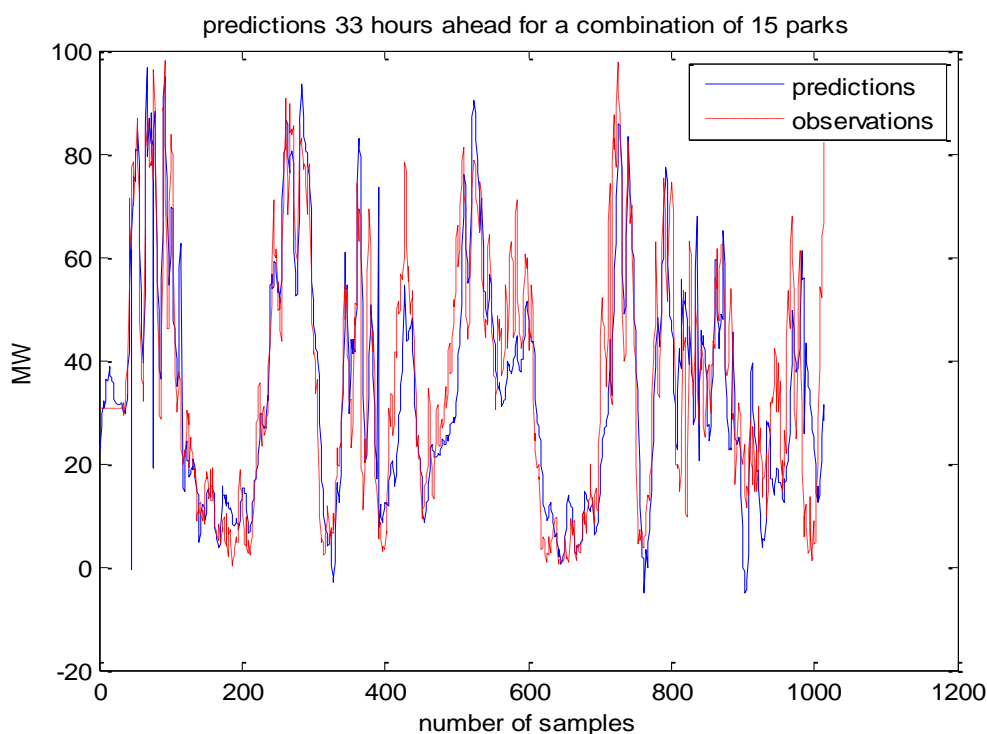
Σχήμα 6.2: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 6 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών

Στο παραπάνω διάγραμμα, εμφανίζονται ενδεικτικά τόσο οι προβλέψεις του μοντέλου που προέκυψαν από την περιφερειακή πρόβλεψη 6 πάρκων για 2 ώρες μπροστά, όσο και οι αντίστοιχες πραγματικές παρατηρήσεις αιολικής ισχύος. Παρατηρείται πως οι προβλέψεις ακολουθούν με σχετικά πολύ καλή ακρίβεια τη χρονοσειρά των πραγματικών τιμών, ενώ αποκλίσεις εμφανίζονται κυρίως σε λίγα δείγματα όπου τελικά είχαμε είτε αρκετά υψηλή είτε αρκετά χαμηλή παραγωγή ισχύος. Η καλή ακρίβεια των προβλέψεων που επετεύχθη εδώ οφείλεται βεβαίως και στο μικρό ορίζοντα πρόβλεψης της συγκεκριμένης περίπτωσης, αφού είναι λογικό η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη να προσεγγίζεται με μικρότερο σφάλμα.

Το τελευταίο επιβεβαιώνεται εν μέρει και στα επόμενα 2 διαγράμματα, όπου επιλέχτηκε δειγματοληπτικά η αντίστοιχη αναπαράσταση ίδιων δεδομένων, πρώτα από την περιφερειακή πρόβλεψη 9 πάρκων για 14 ώρες μπροστά, και κατόπιν από την πρόβλεψη 15 πάρκων για 33 ώρες μπροστά. Οι αποκλίσεις εδώ φαίνονται σε αρκετά σημεία σαφώς πιο μεγάλες σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, λόγω και του μεγαλύτερου ορίζοντα πρόβλεψης, ωστόσο και πάλι παρατηρείται ιδιαίτερη συνέπεια στην παρακολούθηση της χρονοσειράς των πραγματικών τιμών από αυτήν των προβλέψεων. Έτσι, προκύπτει ένα πρώτο συμπέρασμα πως η ενσωμάτωση επιπρόσθετων πάρκων στο προτεινόμενο μοντέλο συντελεί εν γένει στην επίτευξη μιας βελτιστοποιημένης περιφερειακής πρόβλεψης με χαμηλότερο αντίστοιχο σφάλμα.



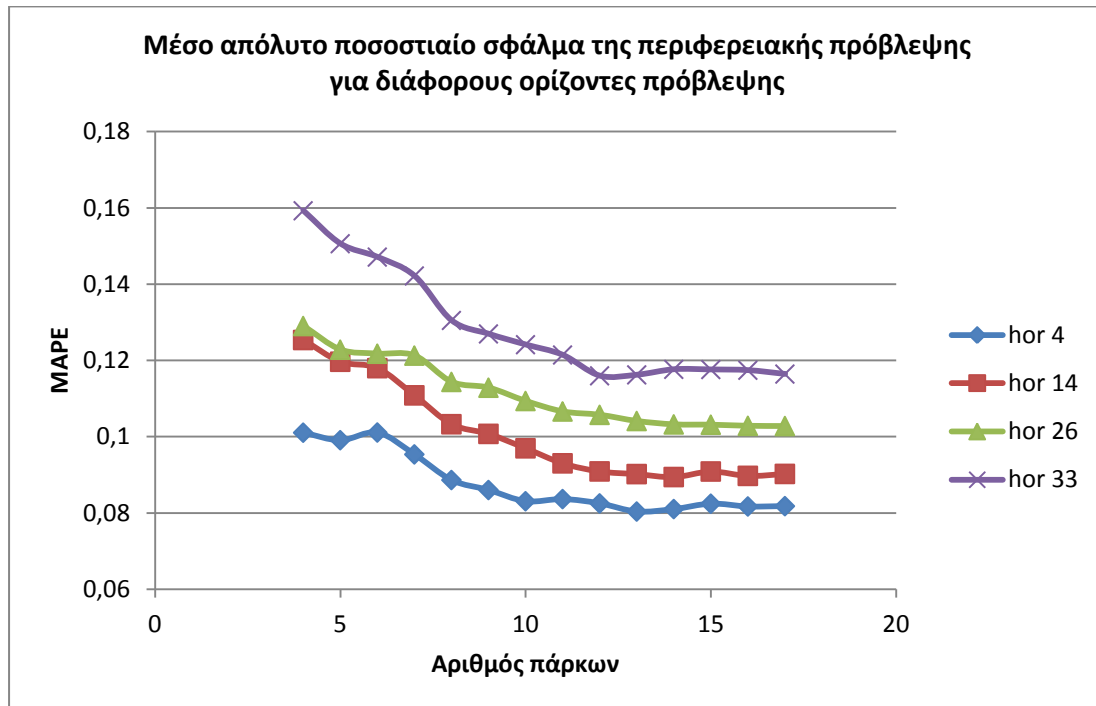
Σχήμα 6.3: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 9 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 14 ωρών



Σχήμα 6.4: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 15 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 33 ωρών

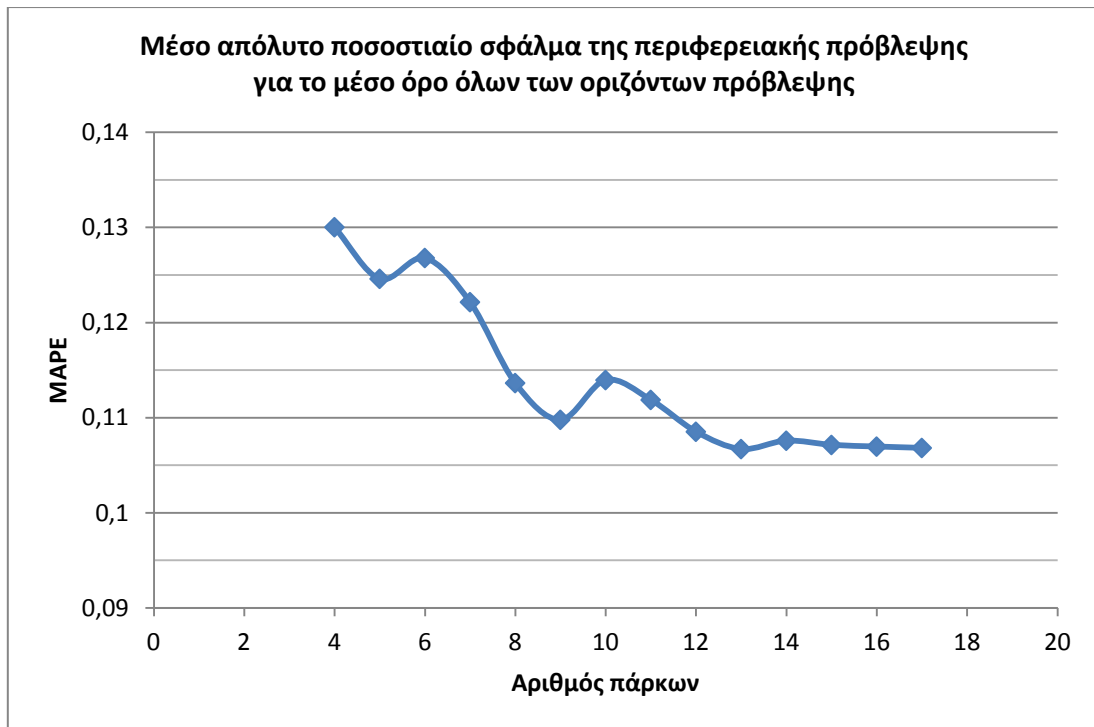
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περιφερειακή πρόβλεψη όλων των συνδυασμών των πάρκων που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις, ώστε να προκύψει το πλήθος των πάρκων για το οποίο έχουμε ακριβέστερη πρόβλεψη και μικρότερο ποσοστιαίο σφάλμα.

Το ακόλουθο διάγραμμα μας δίνει το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) που εμφανίζουν 4 τυχαία επιλεγμένοι ορίζοντες πρόβλεψης στις προβλέψεις τους, κατά την εφαρμογή τους σε όλα τα δυνατά πλήθη αιολικών πάρκων. Καταρχάς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι αναμενόμενο το γεγονός πως όσο μικρότερος είναι ο ορίζοντας πρόβλεψης, τόσο μικρότερο μέσο σφάλμα παρουσιάζει στην περιφερειακή πρόβλεψή του, ανεξάρτητα από τον αριθμό των πάρκων που συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν. Ένα δεύτερο σημαντικό συμπέρασμα, που προκύπτει από το διάγραμμα, είναι η καταγραφή της ξεκάθαρης τάσης του εκάστοτε ορίζοντα να εμφανίζει αρκετά μικρότερο σφάλμα, μετά την ενσωμάτωση επιπρόσθετων πάρκων στην περιφερειακή πρόβλεψη. Ειδικότερα, το σφάλμα κάθε ορίζοντα, άσχετα από τον αριθμό των ωρών που προβλέπει μπροστά, ξεκινάει από ένα υψηλότερο σημείο στο συνδυασμό 4 πάρκων, τείνει να μειώνεται σταθερά, στη γενική περίπτωση, τουλάχιστον μέχρι να συμπεριληφθούν συνολικά 11 ή 12 πάρκα, ενώ μέχρι την περιφερειακή πρόβλεψη και των 17 πάρκων σταθεροποιείται κοντά στο κατώτερο σημείο που προσεγγίζει στην εκάστοτε περίπτωση. Συνεπώς, είναι φανερό πως το προτεινόμενο μοντέλο αποδίδει καλύτερα, όταν στην περιφερειακή πρόβλεψη έχει ενσωματωθεί ένας ικανός αριθμός αιολικών πάρκων.



Σχήμα 6.5: MAPE της περιφερειακής πρόβλεψης για διάφορους ορίζοντες πρόβλεψης και για κάθε συνολικό πλήθος πάρκων

Η τελευταία παρατήρηση αποτυπώνεται ακόμα καλύτερα στο επόμενο διάγραμμα, όπου έχει ληφθεί το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της περιφερειακής πρόβλεψης των πάρκων, για το μέσο όρο όλων των οριζόντων πρόβλεψης. Πράγματι, στο συνδυασμό 4 πάρκων, το σφάλμα ξεκινά από το υψηλότερο σημείο του, γύρω στο 13%, έπειτα μειώνεται κατά κανόνα μέχρι την ενσωμάτωση συνολικά τουλάχιστον 12 πάρκων και τέλος σταθεροποιείται κάτω από το επίπεδο του 11%, μέχρι να συμπεριληφθούν όλα τα αιολικά πάρκα. Μάλιστα, η ελάχιστη τιμή του σφάλματος εμφανίζεται στην περιφερειακή πρόβλεψη 13 συνολικά πάρκων, όπου προσεγγίζει το 10,5%, χωρίς βέβαια η πρόσθεση των υπολοίπων πάρκων να μεταβάλλει σημαντικά τη συγκεκριμένη τιμή. Σημειώνεται πως οι διακυμάνσεις που εμφανίζονται στη γραφική παράσταση του σφάλματος, κατά την ενσωμάτωση των πρώτων επιπρόσθετων πάρκων, οφείλονται ενδεχομένως στην επιλογή της συγκεκριμένης σειράς με την οποία προστέθηκαν τα πάρκα.



Σχήμα 6.6: ΜΑΡΕ της περιφερειακής πρόβλεψης για το μέσο όρο των οριζόντων πρόβλεψης και για κάθε συνολικό πλήθος πάρκων

Παρακάτω ακολουθεί ένα ακόμα διάγραμμα, το οποίο μας δίνει το ΜΑΡΕ της περιφερειακής πρόβλεψης 13 πάρκων, που προέκυψε το βέλτιστο πλήθος για το προτεινόμενο μοντέλο, για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης. Οι ορίζοντες των πρώτων ωρών εμφανίζουν αναμενόμενα μικρότερη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές, οι ορίζοντες κοντά στις 2 ημέρες παρουσιάζουν αντίστοιχα τη μεγαλύτερη απόκλιση, ενώ οι ενδιάμεσοι κινούνται εκατέρωθεν του επιπέδου του 10%, ώστε να προκύψει ο μέσος όρος σφάλματος που αναφέρθηκε προηγουμένως και αποτέλεσε τον ελάχιστο σε όλες τις δοκιμές των προσομοιώσεων που έγιναν.



Σχήμα 6.7: MAPE της περιφερειακής πρόβλεψης 13 πάρκων για 48 ορίζοντες πρόβλεψης

Συμπερασματικά, το προτεινόμενο μοντέλο λειτουργεί βέλτιστα, όσον αφορά την περιοχή της Κρήτης, κατά την ενσωμάτωση 13 αιολικών πάρκων στην εξαγωγή της περιφερειακής πρόβλεψης. Η χρήση λιγότερων πάρκων οδηγεί, όπως φάνηκε, σε παραγωγή προβλέψεων με μεγαλύτερο σφάλμα, ανεξάρτητα από τον ορίζοντα πρόβλεψης. Αντίθετα, η χρήση επιπλέον πάρκων, τουλάχιστον όσων ήταν διαθέσιμων στην προσομοίωση, επηρεάζει σχεδόν ανεπαίσθητα την απόδοση του μοντέλου, και συνεπώς δεν κρίνεται απαγορευτική.

6.4 Περιφερειακή πρόβλεψη παραγωγής ισχύος φωτοβολταϊκών πάρκων στην Κρήτη

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία και την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης της ηλιακής ισχύος για την περιφέρεια της Κρήτης.

6.4.1 Προετοιμασία των δεδομένων και εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων

Τα αρχικά δεδομένα που μας δόθηκαν ήταν οι χρονοσειρές της ηλιακής ισχύος των 20 φωτοβολταϊκών πάρκων της Κρήτης, τα οποία βρίσκονται διάσπαρτα εγκατεστημένα σε ολόκληρη την περιφέρειά της, οι συντεταγμένες των πάρκων και οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οι χρονοσειρές της ηλιακής ισχύος που μας δόθηκαν για κάθε πάρκο καλύπτουν την περίοδο από 1^η Μαΐου 2013 μέχρι την 29^η Νοεμβρίου 2013. Αυτές οι τιμές αφορούν την ωριαία παραγωγή του κάθε πάρκου στο διάστημα αυτό. Από αυτές τις τιμές, οι πρώτοι 5 μήνες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Οι άλλοι 2 μήνες, δηλαδή ο Οκτώβριος και ο Νοέμβριος, χρησίμευσαν για την αποτίμηση της επίδοσης της μεθόδου και την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το μοντέλο SKIRON. Οι προβλέψεις καιρού NWP που παρέχονται από ένα υψηλής ανάλυσης μετεωρολογικό μοντέλο, έχουν τη μορφή πολλαπλών οριζοντίων πλεγμάτων με ανάλυση 15km και καλύπτουν μια εκτεταμένη περιοχή, όπως τη Μεσόγειο. Το μοντέλο αυτό δίνει ωριαίες προβλέψεις με πενθήμερο ορίζοντα πρόβλεψης και ανανεώνεται κάθε μέρα στις 8 π.μ. Από τις NWP χρησιμοποιήθηκαν οι προβλέψεις για την ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, για την ποσοστιαία επικάλυψη νεφών και για την θερμοκρασία, για κάθε σημείο της περιφέρειας που είναι εγκατεστημένο ένα ηλιακό πάρκο.

Για να περιορίσουμε το πλέγμα των προβλέψεων καιρού γύρω από κάθε πάρκο, πήραμε τις οριακές τιμές των συντεταγμένων του καθενός και υπολογίσαμε τις παραπάνω προβλέψεις για αυτά τα δυο σημεία. Άρα για κάθε πάρκο αντιστοιχούν δύο οριακές τιμές για την ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, για την ποσοστιαία επικάλυψη νεφών και για την θερμοκρασία.

Σκοπός του μοντέλου που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη ενότητα είναι η πραγματοποίηση πρόβλεψης στις 12 π.μ. κάθε ημέρας για την ακριβώς επόμενη, δηλαδή για ορίζοντα από 1 μέχρι 24.

Αρχικά έπρεπε να περιοριστεί το πλέγμα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στην περιοχή της Κρήτης. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη των πάρκων και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, καταφέραμε να εντοπίσουμε τις μετεωρολογικές μεταβλητές για τις αντίστοιχες μέρες και ώρες, για τις οποίες έχουμε διαθέσιμη την ηλιακή παραγωγή.

Μέσω της συνάρτησης `read_grib`, προέκυψαν για την περίοδο που μας ενδιαφέρει πληροφορίες για την θερμοκρασία, τη νέφωση και την ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε για κάθε πάρκο ένα διάνυσμα εισόδου (`input`) με ορίζοντα δεδομένων από 1 έως 24. Το διάνυσμα αυτό περιλαμβάνει την θερμοκρασία, τη νέφωση, την ηλιακή ακτινοβολία, την ώρα και το μήνα που γίνεται η πρόβλεψη και τέλος τον ορίζοντα πρόβλεψης. Είναι ανάγκη να διευκρινιστεί ότι για την θερμοκρασία, τη νέφωση και την ηλιακή ακτινοβολία

χρησιμοποιούμε ζευγάρια τιμών, καθώς για κάθε πάρκο λαμβάνουμε υπόψη 2 διπανά του σημεία, μεταξύ των οποίων βρίσκονται οι συντεταγμένες του.

Για κάθε πάρκο προέκυψε ένα διάνυσμα με 4.519 δείγματα, και 9 μεταβλητές σε καθένα από αυτά. Οι πρώτες 3.512 τιμές αντιστοιχούν στους μήνες που χρησιμεύουν για την εκπαίδευση των νευρωνικών και οι υπόλοιπες για την αποτίμηση της μεθόδου.

Παράλληλα, δημιουργήθηκε και ένα διάνυσμα εξόδου (target) με τις πραγματικές αναμενόμενες τιμές παραγωγής ηλιακής ισχύος, όπως δόθηκαν από τα αρχικά δεδομένα και χρησιμεύουν για την αξιολόγηση της πρόβλεψης του μοντέλου.

Για την πρόβλεψη της παραγωγής των πάρκων έπρεπε να γίνει η επιλογή ανάμεσα στα τρία διαφορετικά διαθέσιμα RBF, τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Το κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ήταν το μέσο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (MAPE).

Η επιλογή για το καταλληλότερο RBF έγινε με κριτήριο το σφάλμα της πρόβλεψης για το φ/β πάρκο στη τοποθεσία Βάχος του Ηρακλείου. Το τμήμα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των νευρωνικών διασπάστηκε σε τρία τμήματα. Το 50% αυτών για την εκπαίδευση (training) του κάθε νευρωνικού, 25% για την επικύρωση (validation) της πρόβλεψης και 25% για την εξακρίβωση (testing) της ορθότητας αυτής. Επιπλέον, τα νευρωνικά αυτά δίκτυα βελτιστοποιήθηκαν κατά την εκπαίδευσή τους με έναν γενετικό αλγόριθμο, στον οποίο έγινε αναφορά προηγουμένως.

Εκπαιδευοντας τα τρία RBF για τα δεδομένα εισόδου και εξόδου αυτού του πάρκου, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

	1° rbf	2° rbf	3° rbf
MAPE	0.0606	0.0572	0,4367

Πίνακας 6.1: Παρουσίαση των σφαλμάτων MAPE στο 1° πάρκο για τα τρία διαθέσιμα RBF

Από τον παραπάνω πίνακα αποδεικνύεται ότι το μικρότερο σφάλμα για το συγκεκριμένο φ/β πάρκο προκύπτει από το 2° RBF, οπότε είναι και αυτό που τελικά επιλέχθηκε για την προσομοίωση του μοντέλου.

6.4.2 Αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου πρόβλεψης

Το επόμενο βήμα ήταν να εκπαιδευτεί το συγκεκριμένο RBF και για όλα τα υπόλοιπα διαθέσιμα πάρκα. Έτσι δημιουργήθηκε μία δομή που περιλαμβάνει τα διανύσματα εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα για κάθε πάρκο.

Σκοπός του τελευταίου σταδίου της μεθόδου είναι ο έλεγχος και η επιλογή του τελικού αριθμού των φ/β πάρκων της Κρήτης που είναι βέλτιστο να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά, έτσι ώστε το σφάλμα πρόβλεψης της συνολικά παραγόμενης ηλιακής ισχύος να είναι το ελάχιστο δυνατό για όλους του ορίζοντες πρόβλεψης.

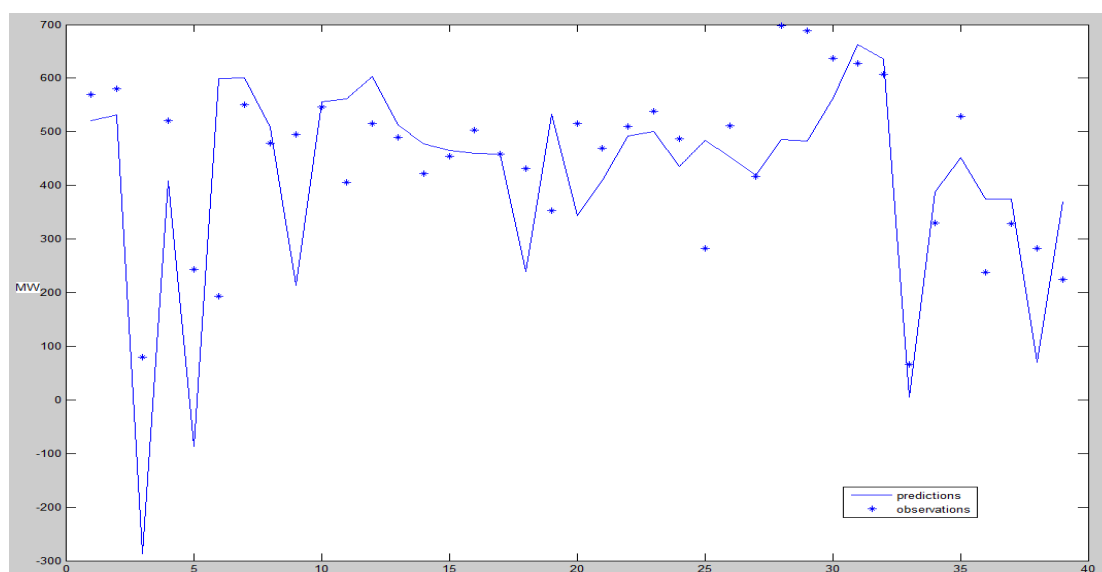
Σε αυτό το σημείο έχοντας εκπαιδεύσει όλα τα πάρκα για το συγκεκριμένο RBF, γίνεται η πρόβλεψη της παραγωγής ηλιακής ισχύος για την περίοδο αποτίμησης, δηλαδή τους μήνες Οκτώβρη και Νοέμβρη. Για να γίνει αυτό, τροφοδοτούμε το κομμάτι των διανυσμάτων εισόδου που αφορούν την εξεταζόμενη περίοδο στην συνάρτηση προσομοίωσης του RBF για την εξαγωγή της πρόβλεψης.

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει τη διαδικασία της πρόβλεψης για κάθε πάρκο ξεχωριστά, μένει το τελικό στάδιο που είναι ο συνδυασμός των επιμέρους προβλέψεων ανά ορίζοντα, προσθέτοντας κάθε φορά και από ένα πάρκο. Ξεκινήσαμε από το συνδυασμό των 4 πρώτων πάρκων και βήμα –βήμα προσθέτονταν τα επόμενα.

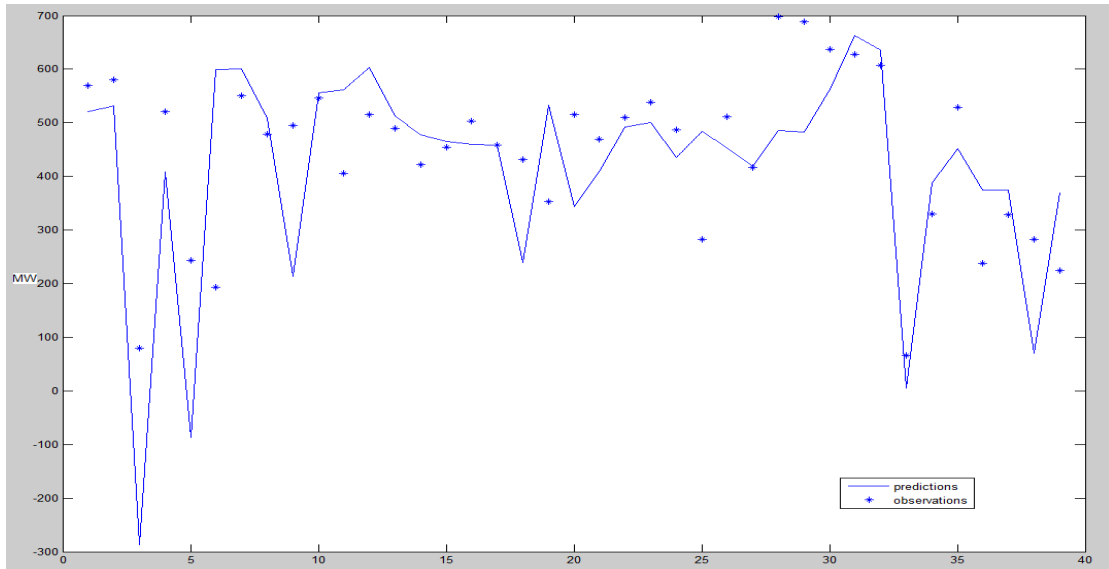
Στο τελικό στάδιο των προσομοιώσεων, χρησιμοποιήθηκε ο αναδρομικός αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων RLS που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, προκειμένου οι επιμέρους προβλέψεις ισχύος των ηλιακών πάρκων να πολλαπλασιαστούν με τα κατάλληλα βάρη πριν αθροιστούν, ώστε να προκύψει μια περιφερειακή πρόβλεψη για την ηλιακή ισχύ της Κρήτης.. Η αντίστοιχη συνολική πραγματική παραγόμενη ισχύς θα είναι το άθροισμα των επιμέρους τιμών που έχουμε για κάθε πάρκο. Ο αλγόριθμος αυτός εφαρμόστηκε επαναληπτικά, και μάλιστα έγιναν τόσες επαναλήψεις όσα είναι και τα δείγματα των χρονοσειρών πρόβλεψης, με σκοπό τη βέλτιστη προσαρμογή ανά επανάληψη των βαρών του σταθμισμένου αθροίσματος.

Επειδή όμως οι τιμές των δειγμάτων για την περίοδο αποτίμησης δεν ήταν πολλές, ώστε να γίνεται επαρκής και σωστή ενημέρωση των βαρών, χρησιμοποιήθηκαν και μερικές παλαιότερες τιμές.

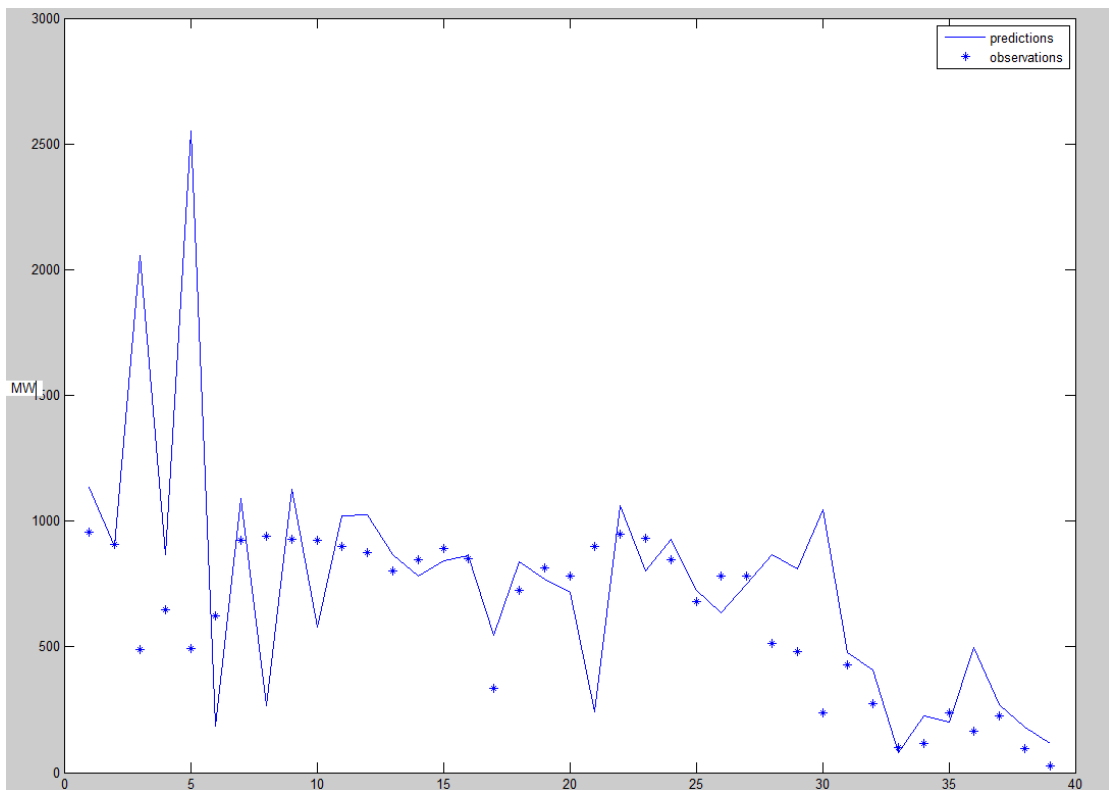
Παρακάτω ακολουθούν κάποια αντιπροσωπευτικά διαγράμματα που μας εμφανίζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, για διαφορετικό πλήθος συνδυασμένων πάρκων και ποικίλους ορίζοντες, καθώς επίσης υποδεικνύουν την τελική επιλογή του αριθμού των πάρκων της Κρήτης που θα συμπεριληφθούν στο προτεινόμενο μοντέλο, προκειμένου να επιτευχθεί η εύρεση της βέλτιστης και πιο ακριβούς περιφερειακής πρόβλεψης.



Σχήμα 6.8: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 7 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



Σχήμα 6.9: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 13 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



Σχήμα 6.10: Σύγκριση προβλέψεων και πραγματικών τιμών ισχύος από περιφερειακή πρόβλεψη 19 πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης 15 ωρών

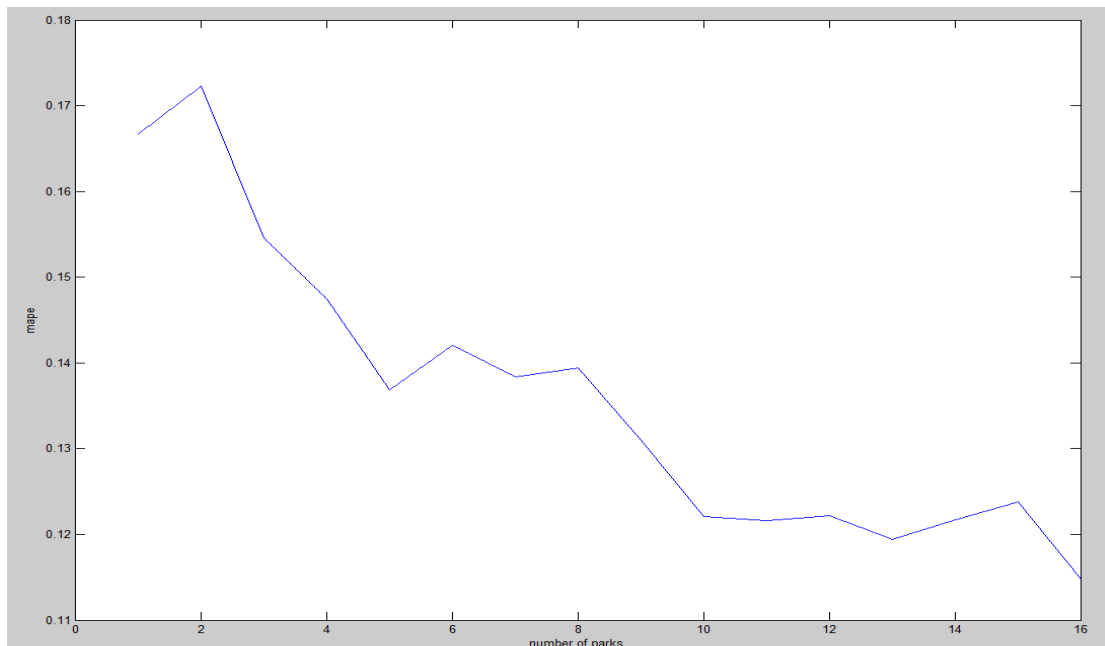
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι γενικά οι προβλέψεις ακολουθούν τις πραγματικές τιμές της παραγόμενης ηλιακής ισχύος. Σαφώς υπάρχουν αποκλίσεις και σε μερικά σημεία αρκετά μεγάλες, που οφείλονται στα τυχόν σφάλματα τόσο της μεθόδου όσο και των αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας που περιλαμβάνει τα σφάλματα της τελικής πρόβλεψης για όλους τους ορίζοντες και για όλα τα πλήθη των συνδυασμένων πάρκων.

	4 πάρκα	5 πάρκα	6 πάρκα	7 πάρκα	8 πάρκα	9 πάρκα	10 πάρκα	11 πάρκα	12 πάρκα	13 πάρκα	14 πάρκα	15 πάρκα	16 πάρκα	17 πάρκα	18 πάρκα	19 πάρκα
1	0,247	0,237	0,171	0,186	0,174	0,181	0,181	0,180	0,126	0,114	0,093	0,093	0,094	0,107	0,104	0,072
2	0,215	0,265	0,188	0,196	0,163	0,171	0,164	0,161	0,141	0,127	0,107	0,111	0,110	0,118	0,113	0,044
3	0,199	0,362	0,283	0,246	0,200	0,186	0,190	0,185	0,182	0,114	0,130	0,128	0,127	0,119	0,109	0,053
4	0,475	0,520	0,403	0,347	0,279	0,301	0,294	0,296	0,290	0,221	0,245	0,245	0,238	0,230	0,228	0,089
5	0,209	0,176	0,160	0,184	0,169	0,195	0,189	0,199	0,196	0,159	0,191	0,196	0,192	0,188	0,181	0,176
6	0,133	0,127	0,133	0,133	0,136	0,151	0,136	0,133	0,131	0,132	0,128	0,130	0,136	0,141	0,133	0,140
7	0,201	0,216	0,214	0,194	0,198	0,212	0,196	0,187	0,183	0,195	0,196	0,191	0,146	0,159	0,187	0,193
8	0,181	0,166	0,167	0,139	0,135	0,138	0,148	0,151	0,137	0,130	0,136	0,151	0,138	0,145	0,159	0,140
9	0,143	0,140	0,141	0,155	0,144	0,149	0,174	0,192	0,179	0,199	0,172	0,210	0,185	0,187	0,198	0,207
10	0,138	0,118	0,121	0,120	0,141	0,141	0,153	0,176	0,176	0,181	0,171	0,190	0,167	0,159	0,165	0,169
11	0,160	0,137	0,135	0,130	0,122	0,126	0,138	0,141	0,135	0,154	0,139	0,117	0,122	0,123	0,131	0,144
12	0,136	0,124	0,126	0,116	0,138	0,163	0,142	0,145	0,145	0,160	0,180	0,179	0,178	0,202	0,199	0,221
13	0,144	0,143	0,143	0,142	0,153	0,155	0,145	0,139	0,153	0,154	0,189	0,180	0,158	0,162	0,167	0,179
14	0,153	0,149	0,167	0,146	0,157	0,177	0,168	0,165	0,166	0,170	0,157	0,152	0,183	0,193	0,189	0,230
15	0,171	0,142	0,134	0,125	0,124	0,134	0,115	0,115	0,121	0,121	0,120	0,122	0,133	0,142	0,169	0,174
16	0,101	0,083	0,095	0,091	0,082	0,089	0,092	0,095	0,091	0,088	0,092	0,100	0,115	0,112	0,121	0,131
17	0,051	0,049	0,053	0,036	0,042	0,040	0,048	0,052	0,051	0,055	0,053	0,055	0,061	0,063	0,067	0,081
18	0,032	0,040	0,019	0,021	0,026	0,027	0,028	0,022	0,022	0,010	0,008	0,007	0,007	0,006	0,007	0,013
19	0,003	0,003	0,006	0,003	0,004	0,004	0,003	0,005	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,009
20	0,137	0,141	0,135	0,134	0,116	0,108	0,045	0,038	0,036	0,028	0,028	0,023	0,023	0,023	0,019	0,027
21	0,339	0,375	0,291	0,222	0,136	0,117	0,116	0,114	0,134	0,106	0,096	0,084	0,084	0,081	0,075	0,076
22	0,082	0,098	0,131	0,139	0,106	0,113	0,120	0,120	0,083	0,084	0,061	0,060	0,059	0,056	0,054	0,050
23	0,121	0,112	0,118	0,138	0,142	0,137	0,157	0,157	0,134	0,113	0,107	0,099	0,099	0,107	0,102	0,078
24	0,230	0,213	0,177	0,197	0,198	0,196	0,179	0,175	0,123	0,108	0,108	0,103	0,102	0,094	0,089	0,060

Πίνακας 6.2: Παρουσίαση των σφαλμάτων MAPE για όλους τους ορίζοντες και τους συνδυασμούς πάρκων

Επειδή όμως αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο βέλτιστος αριθμός πάρκων για την εξασφάλιση του ελάχιστου σφάλματος για ολόκληρη την επόμενη μέρα και όχι για κάθε ορίζοντα χωριστά, υπολογίζεται ο μέσος όρος των σφαλμάτων όλων των οριζόντων για τον καθένα συνδυασμό πάρκων. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 6.11: Σύγκριση του συνολικού σφάλματος για όλους τους ορίζοντες σε σχέση με το πλήθος των πάρκων

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται το πλήθος των πάρκων το σφάλμα μειώνεται με εξαίρεση κάποιους συνδυασμούς για τους οποίους αυξάνεται ελάχιστα. Φαίνεται ότι το ελάχιστο σφάλμα προκύπτει για το συνδυασμό και των 19 πάρκων.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το ζήτημα της περιφερειακής πρόβλεψης της ηλιακής και της αιολικής παραγωγής. Αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα πρόβλεψης, τόσο της ηλιακής όσο και της αιολικής ισχύος, που βασίστηκαν στα νευρωνικά δίκτυα και εφαρμόστηκαν στην περιοχή της Κρήτης, ώστε να εξεταστεί η επίδοσή τους. Τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο μοντέλα πρόβλεψης, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων τους, ήταν τα νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (RBF), με την παράλληλη χρήση αυτό-οργανούμενων χαρτών (SOM) στην περίπτωση του μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Το τελευταίο δέχεται ως βασικά δεδομένα εισόδου τις καιρικές μεταβλητές που αφορούν τον άνεμο, δηλαδή την ταχύτητα και τη διεύθυνσή του, όπως αυτές προκύπτουν από μοντέλο NWP, καθώς επίσης την τελευταία παρατηρηθείσα τιμή της αιολικής ισχύος και την ώρα της πρόβλεψης. Το επιθυμητό διάνυμα στόχου του δικτύου προσδιορίζεται με επισκόπηση των παρατηρούμενων χρονοσειρών της αντίστοιχης αιολικής ισχύος. Η έξοδος του μοντέλου αποδίδει τις προβλέψεις παραγωγής ισχύος που πραγματοποιεί για μια επιλεγμένη περίοδο αποτίμησης, ώστε τελικά αυτές να συγκριθούν με τις πραγματικές παρατηρήσεις ισχύος των πάρκων και να εξαχθούν οι αντίστοιχοι δείκτες σφάλματος. Αντίστοιχα, στο μοντέλο της ηλιακής πρόβλεψης, το επιλεγμένο RBF δέχεται σαν δεδομένα εισόδου την ηλιακή ακτινοβολία, την νέφωση και την θερμοκρασία, όπως προκύπτουν από το μοντέλο των NWP, καθώς επίσης και την ώρα, το μήνα και τον ορίζοντα πρόβλεψης. Όμοια, το επιθυμητό διάνυμα στόχου του δικτύου προσδιορίζεται με επισκόπηση των παρατηρούμενων χρονοσειρών της αντίστοιχης ηλιακής ισχύος και η έξοδος του μοντέλου αποδίδει τις προβλέψεις παραγωγής ισχύος.

Στο τελικό στάδιο των δύο παραπάνω μοντέλων, ελέγχθηκε η απόδοσή τους κατά την ενσωμάτωση διαφορετικού πλήθους πάρκων στην εξαγωγή περιφερειακής πρόβλεψης, προκειμένου να εντοπιστεί η περίπτωση όπου επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπεριφορά τους. Κοινή συνισταμένη των δύο μοντέλων αποτέλεσε η παρατήρηση πως η περιφερειακή πρόβλεψη ισχύος πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ακρίβεια, όταν συμπεριλαμβάνεται ένας ικανός αριθμός πάρκων κατά την εφαρμογή τους.

Συμπερασματικά, στην εργασία αυτή παρατίθενται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την πρόβλεψη της ηλιακής και αιολικής ισχύος ως αντικείμενο έρευνας, αναλύοντας μεταξύ άλλων την έντονη εξάρτησή της από τις καιρικές μεταβλητές, τις διαφορετικές προσεγγίσεις των μοντέλων πρόβλεψης, τα κριτήρια αποτίμησής τους και την εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης. Παράλληλα, μέσω της προσέγγισής μας αποδίδεται ένα κατευθυντήριο πλαίσιο εργασίας που περιλαμβάνει, σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο, τη μοντελοποίηση με τη χρήση νευρωνικών δικτύων, των οποίων η απόδοση στην επίλυση έντονα μη γραμμικών προβλημάτων

είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Φυσικά, η βελτίωση της απόδοσης των μοντέλων πρόβλεψης ισχύος συνιστά ένα ελκυστικό πεδίο έρευνας με σημαντικές μελλοντικές προοπτικές. Η παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφαλτήριο για περαιτέρω μελέτη.

Βιβλιογραφία

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
- [2] "Renewable energy target for Europe: 20% by 2020", Tech. Rep., European Renewable Energy Council, Jan. 2004
- [3] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A./L. Selvaraj, Progress in Solar PV technology: Research and achievement, Renewable and Sustainable Energy Reviews 20 (2013) 443-461
- [4] Loucas Tsakalacos, "Nanostructures for photovoltaics", Materials Science and Engineering R 62 (2008) 175-189
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy
- [6] Jackson, Tim, and Mark Oliver, 1999, "The Market for Solar PV Photovoltaics," Energy Policy 27: 371–385.
- [7] GLOBAL MARKET OUTLOOK FOR PHOTOVOLTAICS 2014-2018, European Photovoltaic Industry Association (EPIA).
- [8] GREEK NATIONAL RENEWABLE ENERGY ACTION PLAN, in the scope of Directive 2009/28/EC, July 2010, Ministry of Environment, Energy and Climatic Change.
- [9] ARTEMIS SAITAKIS/DIRECTOR, SCIENCE & TECHNOLOGY PARK OF CRETE, FORTH Seminar: "Renewable Energies and Energy efficiency in European islands" La Laguna, Tenerife, Feb 11, 2011.
- [10] ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010 «Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών» Α' έκδοση, Αθήνα 2010.
- [11] ΚΑΠΕ, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, «*Η Αιολική Ενέργεια*» www.cres.gr/kape/, 1998
- [12] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος. «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*». ΕΜΠ. Αθήνα 1997.
- [13] www.nesea.org

- [14] GLOBAL WIND REPORT: ANNUAL MARKET UPDATE 2013, GWEC, <http://www.gwec.net>
- [15] Wind in power: 2013 European Statistics, EWEA, <http://www.ewea.org>
- [16] <http://www.allaboutenergy.gr>
- [17] <http://www.eunice-group.com>
- [18] <http://www.investingreece.gov.gr>
- [19] Η ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΑΝΑΔΡΟΜΗ, ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ, Γ. Α. Γληνού, Δ. Α. Παπαχρήστου και Α. Μ. Παπαδόπουλος
- [20] P. Pinson, C. Chevallier, G. Kariniotakis, ‘*Trading wind generation with short-term probabilistic forecasts of wind power*’, IEEE Trans. on Power Systems 22 (3), pp. 1148-1156, 2007
- [21] H. S. Hippert, C. E. Pedreira, R. C. Souza, ‘*Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation*’, IEEE Transactions on Power Systems In Power Systems, IEEE Transactions on, Vol. 16, No. 1. (2001), pp. 44-55
- [22] <http://blogs.worldwatch.org/revolt/winds-of-change-the-importance-of-wind-forecasting-for-the-future-of-wind-energy/>
- [23] Γεώργιος Ν. Σιδεράτος . «*Ανάπτυξη Μοντέλων Πρόβλεψης Παραγωγής Αιολικής Ισχύος με Χρήση Νευρωνικών Δικτύων και Τεχνικών Ασαφούς Λογικής*», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2010.
- [24] S. Haanpää, S. Lehtonen, L. Peltonen, and E. Talockaite, ‘*Impacts of winter storm Gudrun of 7th /U 9th January 2005 and measures taken in Baltic Sea Region*’. Astra Project, 2006, report.
- [25] Benjamin Y.H. Liu, Richard C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, Volume 4, Issue 3, Pages 1–19, July 1960.
- [26] Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ από τη θεωρία στην πράξη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [27] L.L.Freris, "Wind Energy Conversion Systems", Prentice Hall International, 1990

- [28] The Role and Importance Forecasting Plays for Wind Power Industry, Jeff Lerner – Director of Forecasting, Matt Garvert – Director of Assessment, 3TIER
- [29] Debra Lew and Michael Milligan, *National Renewable Energy Laboratory*, Gary Jordan and Richard Piwko, *GE Energy*, “The Value of Wind Power Forecasting”, Presented at the 91st American Meteorological Society Annual Meeting, the Second Conference on Weather, Climate, and the New Energy Economy Washington DC, January 26, 2011
- [30] I. van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 cycles per hour", *Journal of Meteorology*, vol. 14, pp. 160-4, 1957.
- [31] Aviation meteorology, θεματική ενότητα 8: άνεμος , <http://www.aviamet.gr>
- [32] G. Giebel. ”*On the benefits of distributed generation of wind energy in Europe*”. PhDthesis, University Carl von Ossietzky, Oldenburg, Germany, 2000.
- [33] I.Y.F. Lun, Lam KC. ‘*A study of Weibull parameters using long term wind observations*’. *Renewable Energy* **20** (2000), pp. 145-253
- [34] National oceanic and atmospheric administration, **The History of Numerical Weather Prediction** <http://celebrating200years.noaa.gov>
- [35] Lynch, Peter (March 2008). "The origins of computer weather prediction and climate modeling". *Journal of Computational Physics* (University of Miami) **227** (7): 3431–44.
- [36] Toth, Zoltan (December 1997). "Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method". *Monthly Weather Review* **125** (12): 3297–3319
- [37] R. Rõdm, P.M.A. Miranda, and A.J. Thorpe, “*Filtered non-hydrostatic models in Pressure-related coordinates*” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 127, pp. 1277–1292, 2001.
- [38] W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers, “*A Description of the Advanced Research WRF Version 2*” NCAR/TN–468, 2005.
- [39] C. Monteiro, R. Bessa, V. Miranda, A. Botterud, J. Wang, and G. Conzelmann, Argonne National Laboratory, “*Wind Power Forecasting : State-of-the-art 2009*”.

- [40] Ivarsson, K.-I., ‘Recent developments of the Rasch-Kristjansson scheme in HIRLAM, HIRLAM Newsletter 54, p. 107-112, 2008
- [41] Barbara Jimenez, Francesco Durante, Bernhard Lange, Torsten Kreutzer, Jens Tambke. “Offshore wind resource assessment with WAsP and MM5: Comparative Study for the German Bight”. Wind Energy Chichester 2007. Wiley Interscience, 13/12/2006.
- [42] <http://www.wrf-model.org>
- [43] <http://www.ecmwf.int>
- [44] Γκίκας Αντώνιος, «Ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού», πτυχιακή εργασία, Χανιά 2004
- [45] E. Lorenz, J. Hurka, D. Heinemann and H. G. Beyer, “Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 2, no. 1, pp. 2-10, March 2009.
- [46] R. Perez, K. Moore, S. Wilcox, D. Renne and A. Zelenka, “Forecasting Solar Radiation – Preliminary Evaluation of an Approach based upon the National Forecast Database,” *Solar Energy*, vol. 81, issue 6, pp. 809-812, June 2007.
- [47] R. J. Zamora, E. G. Dutton, M. Trainer, S. A. McKeen and J. M. Wilczak, “The Accuracy of Solar Irradiance Calculations used in Mesoscale Numerical Weather Prediction,” *Monthly Weather Review*, vol. 133, issue 4, pp. 783-792, April 2005.
- [48] P. Mathiesen and J. Kleissl, “Evaluation of Numerical Weather Prediction for Intra-day Solar Forecasting in the Continental United States,” *Solar Energy*, vol. 85, issue 5, pp. 967-977, May 2011.
- [49] E. Lorenz, D. Heinemann and A. Hammer, “Short-term Forecasting of Solar Radiation based on Satellite Data”, in *Proceedings of Eurosun (ISES Europe Solar Congress)*, Freiburg, Germany, 2004.
- [50] A. Hammer, D. Heinemann, E. Lorenz and B. Luckehe, “Short-term Forecasting of Solar Radiation: A Statistical Approach using Satellite Data”, *Solar Energy*, vol. 67, issue 1-3, pp. 139-150, July 1999.
- [51] C. W. Chow, B. Urquhart, M. Lave, A. Diminguez, J. Kleissl, J. Shields and B. Washom, “Intra-hour Forecasting with a Total Sky Imager at the UC San Diego Solar Energy Testbed,” *Solar Energy*, vol. 85, issue 11, pp. 2881-2893, November 2011.

- [52] R. Perez, S. Kivalov, J. Schlemmer, K. Hemker Jr., D. Renne and T. E. Hoff, “Validation of Short and Medium Term Operational Solar Radiation Forecasts in the US,” *Solar Energy*, vol. 84, issue 12, pp. 2161-2172, December 2010.
- [53] A. Moreno-Munoz, J. J. G. de la Rosa, R. Posadillo and F. Bellido, “Very Short-Term Forecasting of Solar Radiation ,” in *Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008*, San Diego, California, May 11–16, 2008.
- [54] R. Huang, T. Huang, R. Gadh, and N. Li, “Solar Generation Prediction using the ARMA Model in a Laboratory-level Micro-grid,” in *Proceedings of the IEEE Smart Grid Communications Conference, Taiwan*, October 2012.
- [55] Y. Dazhi, P. Jirutitijaroen and W. M. Walsh “Hourly solar irradiance time series forecasting using cloud cover index,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 3531–3543, 2012.
- [56] J. Wu and C. K. Chan “Prediction of hourly solar radiation using a novel hybrid model of ARMA and TDNN,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 808–817, 2011.
- [57] G. Mihalakakou and M. Santamouris and D. N. Asimakopoulos “The total solar radiation time series simulation in Athens, using neural networks,” *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 66, no. 3-4, pp. 185–197, 2000.
- [58] F. Wang, Z. Mi and S. Su “Short-Term Solar Irradiance Forecasting Model Based on Artificial Neural Network Using Statistical Feature Parameters,” *Energies*, vol. 5, no. 5, pp. 1355–1370, 2012.
- [59] M. Cococcioni, E. D'Andrea and B. Lazzerini “24-Hour-ahead forecasting of energy production in solar PV systems,” in *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems Design and Applications 2011*, Cordoba, Spain, Nov. 22–24, 2011.
- [60] H. T. C. Pedro and C. F. M. Carlos “Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 7, pp. 2017-2028, 2012.
- [61] C. Reikard “Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts,” *Solar Energy*, vol. 83, no. 3, pp. 342-349, 2009.
- [62] A. Mellit, M. Benghanem and S. A. Kalogirou “An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar-radiation,” *Applied Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 705-722, 2006.
- [63] A. Mellit, M. Benghanem and A. h. Arab “A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural

network and a library of Markov transition matrices approach,” *Solar Energy*, vol. 79, no. 5, pp. 469-482, 2005.

[64] A. Mellit and A. M. Pavan “A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 5, pp. 807-821, 2010.

[65] P. Bacher, H. Madsen and H. A. Nielsen, “Online Short-term Solar power Forecasting,” *Solar Energy*, vol. 83, issue 10, pp. 1772-1783, October 2009.

[66] Y. Huang, J. Liu, C. Liu, X. Xu, W. Wang and X. Zhou, “Comparative Study of Power Forecasting Methods for PV Stations”, *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2010.

[67] S. Bofinger and G. Heilscher, “Solar Electricity Forecast – Approaches and First Results,” in *Proceedings of 21st Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresden, Germany, 2006.

[68] L. A. Fernandez-Jimenez, A. Munoz-Jimenez, A. Falces, M. Mendoza-Villeba, E. Garcia-Garrido, P. M. Lara-Santillan, E. Zorzano-Alba and P. J. Zorzano-Santamaria, “Short-term Power Forecasting System for Photovoltaic Plants”, *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 311-317, August 2012.

[69] C. Chen, S. Duan, T. Cai and B. Liu, “Online 24-h Solar Power Forecasting based on the Weather Type Classification using Artificial Neural Network,” *Solar Energy*, vol. 85, issue. 11, pp. 2856-2870, November 2011.

[70] Lars Landberg: Short-term Prediction of Local Wind Conditions. PhD-Thesis, Riso-R-702(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1994, ISBN 87-550-1916-1

[71] U. Focken, M. Lange, H.-P. Waldl. “*Previento-Regional wind power prediction with risk control*”. In Proceedings of the Global Wind Power Conference, Paris 2002.

[72] B. Bailey, M. C. Brower, and J. Zack, ‘*Short-term wind forecasting, development and application of a meso-scale model*, in Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC’99, Nice, France, pp. 1062–1065 , 1999

[73] G. Giebel, L. Landberg, G. Kariniotakis, R. Brownsword. “*State-of-the-Art on Methods and Software Tools for Short-Term Prediction of Wind Energy Production*”. European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2003, Madrid, Spain.

[74] Jørgensen, J., C. Moehrlen, B. Ó Gallagher, K. Sattler and E. McKeogh, *HIRPOM: Description of an operational numerical wind power prediction model for*

large scale integration of on- and offshore wind power in Denmark’, Poster on the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, 2002

[75] T. S. Nielsen, H.Madsen, and J. Tøfting, *‘Experiences with statistical methods for wind power prediction*, in Proceedings of the 1999 European Wind Energy Conference, EWEC 99, Nice, France, pp. 1066–1069, 1999

[76] B. Ernst, K. Rohrig: On- Line Monitoring and Prediction of Wind Power in German Transmission System Operation Centres, Intitut für Solare Energievorschumdstechnik e.V., Kassel

[77] G. Giebel. *“On the Benefits Distributed Generation of Wind Energy in Europe”*. volume 444 of Fortschritt- Berichte VDI Reihe 6. VDI Verlag Düsseldorf, 2001.

[78] «Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα ΗΜΜΥ, Τομέας Συστημάτων, Δρ. Μανώλης

[79] W.McCulloch Walter Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943

[80] D.O.Hebb, “The Organization of Behavior”, New York, Willey, 1949

[81] M.Minsky, S.Papert, “Perceptrons”, Cambridge, MIT Press, 1969

[82] “Analog VLSI and Neural Systems”, Carver Mead, Addison Wesley Publishing Company, January 1989

[83] «ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Βιολογίας, Γλαροπουλος Αλέξιος

[84] Simon Haykin, *Νευρωνικά Δίκτυα και Μηχανική Μάθηση*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2009

[85] Amit, D. J., (1989), “Modeling Brain Functions: The World of Attractor Neural Networks”, Cambridge University Press, New York.

[86] Hagan, M. Demuth, H. and Beale M., (1995), “Neural Network Design”. International Thomson Publishing Company.

[87] ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ - ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΑΣΠΡΟΥΛΗΣ

- [88] Poggio T. and F. Girrosi “Networks for approximation and learning”. Proc. IEEE, 78: 1481-1497,1990
- [89] Broomhead D. S. and D. Low “Multivariable functional interpolation and adaptive networks”, *Complex Syst.* 2, 321-355,1988
- [90] Moody J. E. and C. J. Darken, “Fast learning in networks of locally-tuned processing units”. *Neural Comput.* 1, pp. 281-294, 1989
- [91] Βαγγέλης Δερματάς, “Αναγνώριση Προτύπων”, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [92] Σπύρος Γ. Τζαφέστας “Υπολογιστική Νοημοσύνη” Τόμος Α:Μεθοδολογίες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [93] Ι.Βλαχάβας, Π.Κεφάλας, Ν.Βασιλειάδης, Φ.Κόκορας, Η.Σακελλαρίου “ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ”, Β. Γκιούρδας Εκδοτική.
- [94] Λυκοθανάσης Σπυρίδων, Μαυρούδη Σεφερίνα, Σκάρλας Λάμπρος, Εισαγωγή στις Ευρετικές Μεθόδους, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πάτρα Δεκέμβριος 2007.
- [95] Λυκοθανάσης Σπυρίδων, Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Τόμος Γ του Εκπαιδευτικού υλικού για τη Θεματική Ενότητα Τεχνητή Νοημοσύνη – Εφαρμογές, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2001.
- [96] G.Sideratos and N.D. Hatziaergyriou, “Wind Power Forecasting Focused on Extreme Power System Events”.
- [97] G. Sideratos, N. Hatziaergyriou, ” An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 22, Issue 1, pp. 258-265, February 2007
- [98] G. Sideratos and N. Hatziaergyriou, “An Advanced Radial Base Structure for Wind Power Forecasting”, International journal on Power and Energy Systems, ACTA Press, Vol 12, November 2008
- [99] Β. Ασημακόπουλος, Φ. Πετρόπουλος, ‘Επιχειρησιακές προβλέψεις’, Αθήνα 2011
- [100] Mark J. L. Orr, “Matlab Functions for Radial Basis Function Networks”, June 30, 1999
- [101] Γ. Σιδεράτος, “Ανάπτυξη προηγμένου μοντέλου πρόβλεψης παραγωγής από ΑΠΕ συνδεδεμένες στη ΜΤ του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για την υποστήριξη της προβλεπόμενης ζήτησης και της δήλωσης φορτίου των πελατών της ΔΕΗ ΑΕ στην αγορά εργασίας”, 6^ο παραδοτέο του έργου, 2013