



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

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ARTMAP

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Β. ΠΑΡΟΛΑΣ

Επιβλέπων : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014



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

ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ARTMAP

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Β. ΠΑΡΟΛΑΣ

Επιβλέπων : ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

.....
ΙΩΑΝΝΗΣ Β. ΠΑΡΟΛΑΣ

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

Copyright © Ιωάννης Β. Παρόλας , 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση στο βαθμό διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο τον περιορισμό της χρήσης των συμβατικών πηγών, που ρυπαίνουν το περιβάλλον. Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, γεγονός που επαληθεύεται από τη διαρκή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τόσο στην Ευρώπη αλλά και παγκοσμίως. Ωστόσο, η διακοπτόμενη φύση της και η έντονη μεταβλητότητά της καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωσή της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Προς την κατεύθυνση της επίλυσης του προβλήματος αυτού συμβάλλει αποφασιστικά η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, έτσι ώστε να καθίσταται ευκολότερη η διαχείριση και ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας. Είναι άλλωστε χαρακτηριστικό ότι έχει καταβληθεί προσπάθεια και έχουν αναπτυχθεί ποικίλα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.

Οι προβλέψεις της αιολικής ισχύος παρέχονται συνήθως σε μορφή προβλέψεων σημείου, οι οποίες αντιστοιχούν στην πιο πιθανή τιμή της μελλοντικής παραγόμενης αιολικής ισχύος, για ένα δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος δέχονται ως είσοδο δεδομένα από τα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού, τα οποία παρέχουν προβλέψεις για τις μελλοντικές τιμές των καιρικών μεταβλητών (πχ. ταχύτητα ανέμου) στην περιοχή του αιολικού πάρκου και στην έξοδό τους δίνουν την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για δεδομένο χρονικό ορίζοντα. Κάθε πρόβλεψη όμως, εμπεριέχει ένα βαθμό αβεβαιότητας, με αποτέλεσμα οι προβλέψεις σημείου να είναι ανεπαρκείς. Για το λόγο αυτό, ερευνούνται τρόποι για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων της αιολικής ισχύος, με στόχο τη διευκόλυνση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων από τους τελικούς χρήστες των προβλέψεων. Οι προβλέψεις αυτές ονομάζονται πιθανοτικές προβλέψεις της αιολικής ισχύος.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η δημιουργία ενός μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με χρήση νευρωνικών δικτύων. Αναλυτικότερα, το μοντέλο που αναπτύσσεται βασίζεται στη θεωρία των νευρωνικών δικτύων τύπου ARTMAP και των δικτύων ακτινωτής βάσης (RBF). Ως είσοδος χρησιμοποιούνται τα δεδομένα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, όπως αυτά προκύπτουν από το μοντέλο ECMWF και στην έξοδο παρουσιάζονται οι πιθανότητες εμφάνισης των τιμών της αιολικής ισχύος για δεδομένο χρονικό ορίζοντα.

Αρχικά πραγματοποιείται μια αναλυτική παρουσίαση του ανέμου και της αιολικής ισχύος, ενώ γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην αξία της πρόβλεψης και στη μελέτη της αβεβαιότητας που αυτή παρουσιάζει. Έπειτα, περιγράφονται εκτενώς τα κυριότερα μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού και παρουσιάζονται τα χρησιμοποιούμενα πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής καθώς και η μεθοδολογία αποτίμησής τους. Στη συνέχεια, περιγράφεται η γενική θεωρία των νευρωνικών δικτύων με ιδιαίτερη αναφορά στα δίκτυα ARTMAP και RBF. Ακολουθεί η ανάπτυξη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε αιολικό πάρκο της Κρήτης, με παρουσίαση αποτελεσμάτων, αποτίμηση της μεθόδου και εξαγωγή συμπερασμάτων για το συγκεκριμένο μοντέλο πρόβλεψης.

Λέξεις Κλειδιά: Αιολική ισχύς, πιθανοτική πρόβλεψη, ανεμογεννήτρια, καμπύλη ισχύος, νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης, αριθμητικές προβλέψεις καιρού, σφάλμα της πρόβλεψης, εκατοστημόρια, αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO, θεωρία προσαρμόσιμου συντονισμού, διαστήματα πρόβλεψης, αυτό-οργανούμενοι χάρτες.

Abstract

During the past years a remarkable growth of renewable energy sources for the production of electrical energy has been observed in order to limit down the use of conventional energy sources, which result in environmental pollution. Wind energy is one of the most widely used alternative forms of energy, a fact that is confirmed by the rapid increase in its installed capacities in Europe as well as all over the world. However, due to the intermittence and huge randomness of wind generation, its incorporation into a power system is rather difficult. In order to alleviate the problem decisive is the contribution of wind power forecasting, so that management and incorporation of wind energy into a power system can be achieved. Therefore, time and effort have been put into developing various models for wind power forecasting.

Wind power forecasts are traditionally provided in the form of point predictions, which correspond to the most-likely power production for a given horizon. Specifically, the models for wind power forecasting receive as input data from Numerical Weather Predictions (NWP), which provide estimations about the future value of weather variables (e.g. wind speed) concerning the region of the wind farm, and produce as output forecasts about the wind power generation for a given time horizon. Each prediction however, includes a degree of uncertainty and as a result, point predictions are insufficient. Due to this fact, investigations on possible ways of estimating the uncertainty of wind power forecasts are made, in order to accommodate end-users needs regarding the decision-making process. These forecasts are called probabilistic forecasts of wind power generation.

The goal of this diploma thesis is the development of a probabilistic forecasting model for wind power generation using Neural Networks. In more detail, the model developed is based on the theory of Artmap neural networks and Radial Basis Functions (RBF). As input, the data obtained from Numerical Weather Predictions (NWP) using the ECMWF model are used and as output, the probabilities of certain values of the wind power generation for a given time period are presented.

Initially, a thorough analysis of wind and wind power generation is presented, while the significance of the value of wind power forecasting and the estimation of its uncertainty are highlighted. After that, the most commonly numerical weather prediction models are described and the current probabilistic wind power forecasting models are presented along with their methods of evaluation. Next, the general theory of neural networks is described where great detail is given in the description of Artmap and Radial Basis Function neural networks. Moreover, a model for probabilistic wind power forecasting in a wind farm in Crete is proposed in the current diploma thesis, with presentation of results, evaluation of the method and drawing conclusions for the proposed forecasting model.

Keywords: Wind power, probabilistic forecast, wind turbine, power curve, radial basis function neural networks (RBF), numerical weather predictions (NWP), prediction error, quantiles, particle swarm optimization algorithm (PSO), adaptive resonance theory (ART), prediction intervals, self-organizing maps (SOM).

*Ευχαριστίες προς τον κ. Γ. Σιδεράτο για τη συνεργασία και τις
πολύτιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση της παρούσας
διπλωματικής εργασίας.*

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)	13
1.2 Η Αιολική Ενέργεια	14
1.2.1 Μετατροπή του ανέμου σε αιολική ενέργεια.....	15
1.2.2 Η εξέλιξη της παραγόμενης αιολικής ενέργειας	16
1.2.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα.....	18
1.3 Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής	20
1.3.1 Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς (TSO).....	20
1.3.2 Η σημασία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.....	21
1.4 Δομή της εργασίας	22

Κεφάλαιο 2: Κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου και αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP)

2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Θεωρητική προσέγγιση του ανέμου	24
2.2.1 Δυνάμεις και είδη ανέμου	25
2.2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου	26
2.3 Η μετατροπή της αιολικής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια	28
2.3.1 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και η ισχύς του ανέμου	28
2.3.2 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας από τον κατασκευαστή	31
2.4 Αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP)	33
2.4.1 Εισαγωγή.....	33
2.4.2 Μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού	34
2.4.3 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις	36
2.4.3.1 Αφομοίωση δεδομένων για την αρχικοποίηση των μοντέλων	37
2.4.3.2 Τυποποίηση των μοντέλων (Model Formulation)	38
2.4.3.3 Πακέτα φυσικών διεργασιών των μοντέλων	38
2.4.4 Τοπικά και μεσαία κλίμακα μοντέλα.....	39
2.4.5 Βασικά μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού.....	40
2.4.6 Το μοντέλο E.C.M.W.F	44
2.4.6.1 Οι εξισώσεις του μοντέλου	44
2.4.6.2 Χωρική και χρονική ανάλυση.....	45
2.4.6.3 Παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών	46
2.4.6.4 Παρακολούθηση του συστήματος αφομοίωσης	47
2.4.7 Αξιολόγηση της επίδοσης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού	48
2.4.8 Η επίδραση του σφάλματος των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.....	49

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή των ευρύτερα διαδεδομένων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής

3.1 Εισαγωγή	51
3.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης.....	52
3.3 Μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων	53
3.3.1 Γενικά	53
3.3.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικών προσεγγίσεων	55
3.4 Μοντέλα στατιστικών προσεγγίσεων	57
3.4.1 Γενικά.....	57
3.4.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικών προσεγγίσεων.....	59
3.5 Συνδυασμός φυσικών και στατιστικών μοντέλων	61
3.6 Μοντέλα πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής	61

Κεφάλαιο 4: Αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης της Αιολικής Παραγωγής

4.1 Εισαγωγή	63
4.2 Ορισμός του σφάλματος της πρόβλεψης	64
4.3 Αξιολόγηση σημειακών προβλέψεων.....	65
4.4 Αξιολόγηση πιθανοτικών προβλέψεων	67
4.4.1 Προβλέψεις Συνόλου (Ensemble Forecasts).....	67
4.4.2 Προβλεπόμενες κατανομές (Density Forecasts).....	67
4.4.3 Προβλέψεις Εκατοστημορίων (Quantile Forecasts)	68
4.4.4 Διαστήματα πρόβλεψης (Prediction Intervals)	68
4.4.5 Ορισμός σημείων αναφοράς στις πιθανοτικές προβλέψεις	69
4.4.6 Αποτίμηση πιθανοτικών προβλέψεων	71
4.5 Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων	74

Κεφάλαιο 5: Θεωρία των Νευρωνικών Δικτύων

5.1 Εισαγωγή	75
5.2 Τα τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks).....	76
5.2.1 Μοντέλα Νευρώνων	76
5.2.2 Τύποι συνάρτησης ενεργοποίησης.....	77
5.2.3 Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών δικτύων	80
5.2.4 Αναπαράσταση Γνώσης.....	82
5.3 Θεωρία προσαρμόσιμου συντονισμού (Adaptive Resonance Theory-ART) ..	84
5.3.1 Εισαγωγή.....	84
5.3.2 Διάφοροι τρόποι εκμάθησης.....	84
5.3.3 Κωδικοποίηση, ταίριασμα και εκτίμηση	85
5.3.4 Προσοχή, αναζήτηση συντονισμός και εκμάθηση	86
5.3.5 Επιβλεπόμενη εκμάθηση και πρόβλεψη	87
5.4 Αναλυτική περιγραφή του δικτύου ARTMAP για σταδιακή εκμάθηση.....	89
5.4.1 Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP.....	89
5.4.2 Η παραπλήσια με ART μονάδα (ART-like μονάδα)	91
5.4.3 Η παραπλήσια με RBF μονάδα (RBF-like μονάδα)	92
5.4.4 Η διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP.....	94

5.4.5 Η διαμόρφωση της εξόδου του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP	97
5.5 Αυτό-οργανούμενοι χάρτες (Self-organizing Maps, SOM)	99
5.5.1 Γενικά.....	99
5.5.2 Το μοντέλο NTUA.....	100

Κεφάλαιο 6: Πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής με χρήση του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP

6.1 Εισαγωγή	103
6.2 Πρόβλεψη χωρίς βελτιστοποίηση.....	103
6.3 Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO (Particle Swarm Optimization)	112
6.3.1 Γενικά.....	112
6.3.2 Χρήση του αλγορίθμου PSO για ελαχιστοποίηση του CRPS	114
6.4 Αποτίμηση της τελικής πρόβλεψης	115

Κεφάλαιο 7: Επίλογος

7.1 Σύνοψη και παρατηρήσεις	123
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....	124

Βιβλιογραφία.....	125
--------------------------	------------

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της σύγχρονης ενεργειακής πραγματικότητας είναι η αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) έναντι των συμβατικών πηγών, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια στις αναπτυσσόμενες χώρες καθώς και της σταδιακής μείωσης των αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα, γίνεται φανερό ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων και θα χρησιμοποιηθούν σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό στο άμεσο μέλλον. Αν μάλιστα συνυπολογιστεί το γεγονός ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας που εκλύουν ρύπους στην ατμόσφαιρα, τότε γίνεται κατανοητή η ανάγκη για εκτενέστερη εκμετάλλευση της ενέργειας που προκύπτει από τις ανανεώσιμες πηγές. Είναι άλλωστε χαρακτηριστικό ότι κατά τη διάρκεια των 3 τελευταίων δεκαετιών οι τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες καταβάλλουν προσπάθειες προσαρμογής στα νέα αυτά δεδομένα, με τη λήψη κατάλληλων νομοθετικών μέτρων και ενημέρωση των πολιτών με στόχο την εξάπλωση των ΑΠΕ και την ανάπτυξη της τεχνολογίας τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, η βιομάζα, οι κυψέλες καυσίμου και η ενέργεια από γεωθερμικούς σταθμούς. Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΑΠΕ κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το κόστος εκμετάλλευσής τους να είναι συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών πηγών ενέργειας. Αρκετές από τις τεχνολογίες των ΑΠΕ που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό ώστε να χαρακτηρίζονται αποδοτικές, όμως η αιολική ενέργεια, που αξιοποιείται μέσω των ανεμογεννητριών (Α/Γ), παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, με τιμές που είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες των συμβατικών πηγών ενέργειας, και είναι η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ^[3]. Για το λόγο αυτό εξετάζεται λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα.

1.2 Η Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Οι άνεμοι οφείλονται στην κίνηση αέριων μαζών, γεγονός που προκαλείται από τις διαφορές θερμοκρασιών εντός της ατμόσφαιρας. Αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας και κατά συνέπεια οι άνεμοι οφείλονται στους εξής παράγοντες:

- Στη διαφορά γεωγραφικού πλάτους, καθώς υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των πόλων και του ισημερινού, γεγονός που δίνει σχετική σταθερότητα στους ανέμους (εποχικοί άνεμοι με μεγάλη περίοδο μεταβολής)
- Στη διαφορετική μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους (πχ. βουνά, πεδιάδες, θάλασσες), που διαφέρουν στην ικανότητά τους να απορροφούν θερμότητα και έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμοκρασιακών διαφορών στην επιφάνεια της γης. Χαρακτηριστικό αυτών των ανέμων είναι οι γρήγορες μεταβολές.

Το αποτέλεσμα είναι τα διάφορα τμήματα της ατμόσφαιρας να θερμαίνονται διαφορετικά, τα ζεστά θερμά ρεύματα αέρα να ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα μειώνοντας την ατμοσφαιρική πίεση και να αντικαθιστούνται από ψυχρότερα. Η κυκλοφορία του ανέμου θα μπορούσαμε να πούμε ότι συμβάλλει άμεσα στη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια της γης.^[2]

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια σχετικά νέα μορφή ενέργειας, αλλά ήδη από νωρίς φάνηκε πολλά υποσχόμενη, όχι μόνο για τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά γενικότερα για την παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους. Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων και πολύ αργότερα οι ανεμόμυλοι στην ξηρά. Ονομάζεται αιολική γιατί στην ελληνική μυθολογία ο Αίολος ήταν ο θεός του ανέμου.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και δωρεάν. Δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα. Επίσης, τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας είναι αξιοσημείωτα.

1.2.1 Μετατροπή του Ανέμου σε Αιολική Ενέργεια

Με τη συμβολή των ανεμογεννητριών η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική χωρίς την πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων. Συνεπώς, δεν υπάρχει αποβολή διοξειδίου του άνθρακα ή άλλων βλαβερών ουσιών στην ατμόσφαιρα. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Οι Α/Γ χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από τις ανεμογεννήτριες ηλεκτρικό ρεύμα είτε καταναλώνεται επί τόπου, είτε εγχέεται και διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να καταναλωθεί αλλού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις Α/Γ, όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, συχνά αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή. Η αποθήκευση σήμερα γίνεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, ανάλογα με το μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης Η/Ε, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες. Η άντληση ύδατος με χρήση Η/Ε παραγόμενης από Α/Γ και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό, είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη Η/Ε είναι μεγάλη.^[22]

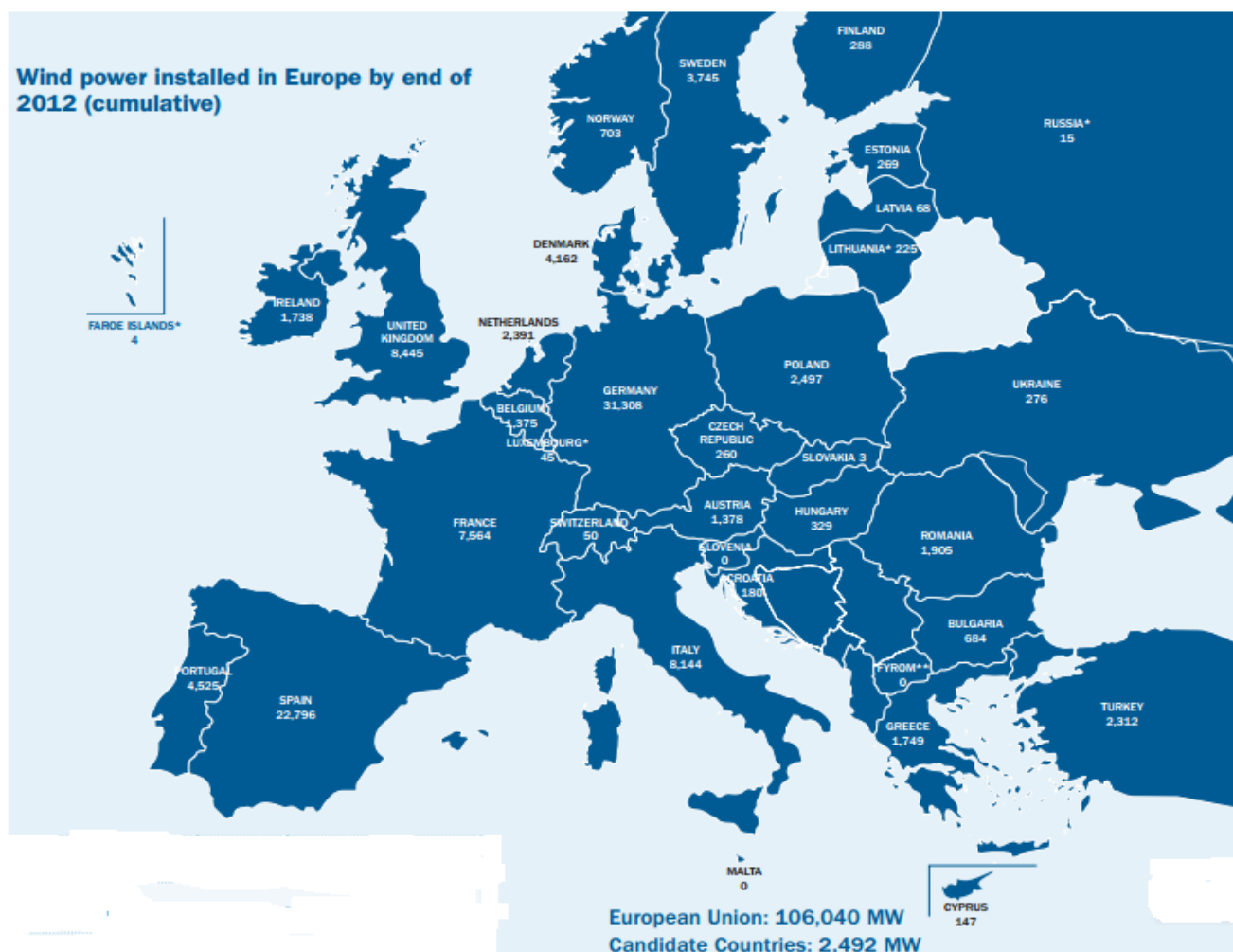
Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, ο ρυθμός παροχής ενέργειας (δηλαδή της ταχύτητας του ανέμου) είναι εντελώς μη ελεγχόμενος αλλά και ταχέως μεταβαλλόμενος, πράγμα που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τις συμβατικές πηγές (π.χ. Ντηζελοκινητήρες, ατμοστροβίλους). Για το λόγο αυτό ενδείκνυται η χρήση ασύγχρονων γεννητριών. Επιπλέον, η σύγχρονη τεχνολογία των μετατροπέων συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος, καθιστά πρακτικά εφικτό, όχι βέβαια τον έλεγχο της παροχής της πρωτογενούς ενέργειας, αλλά τη δυνατότητα παραγωγής τάσεως ελεγχόμενης συχνότητας και μεγέθους. Αυτό επιτρέπει, αφ' ενός μεν καλύτερη απόδοση των μηχανών, αφετέρου δε την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με καλύτερα χαρακτηριστικά, ώστε να είναι «φιλικότερες» προς το δίκτυο του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) στο οποίο συνδέονται.^[4]

Όταν εντοπιστεί μια ανεμώδης περιοχή – και εφόσον βέβαια έχουν προηγηθεί οι απαραίτητες μετρήσεις και μελέτες – για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες, οι οποίες απαρτίζουν ένα «αιολικό πάρκο». Η εγκατάσταση κάθε ανεμογεννήτριας διαρκεί 1-3 μέρες. Αρχικά ανυψώνεται ο πύργος και τοποθετείται τμηματικά πάνω στα θεμέλια. Μετά ανυψώνεται η άτρακτος στην κορυφή του πύργου. Στη βάση του πύργου συναρμολογείται ο ρότορας ή δρομέας (οριζοντίου άξονα, πάνω στον οποίο είναι προσαρτημένα τα πτερύγια), ο οποίος αποτελεί το κινητό μέρος της ανεμογεννήτριας. Η άτρακτος περιλαμβάνει το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια ο ρότορας ανυψώνεται και συνδέεται στην άτρακτο. Τέλος, γίνονται οι απαραίτητες ηλεκτρικές συνδέσεις.

1.2.2 Η εξέλιξη της παραγόμενης αιολικής ενέργειας

Το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται έντονο κυρίως στις Η.Π.Α μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση (1973), αλλά πλέον προσανατολίζεται σχεδόν αποκλειστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την ανάπτυξη των ανεμογεννητριών (Α/Γ), με τις οποίες η μηχανική ενέργεια του ανεμοκινητήρα μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική. Οι κύριοι λόγοι για την αλλαγή αυτή είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με μεγάλο βαθμό αποδόσεως, κυρίως όμως γιατί ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται ήδη ευρύτατα στην ικανοποίηση των αναγκών του ανθρώπου, λόγω των γνωστών πλεονεκτημάτων του. Επιπλέον όμως, δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης των Α/Γ στα δίκτυα διανομής των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), γεγονός που επιτρέπει την πληρέστερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.^[4]

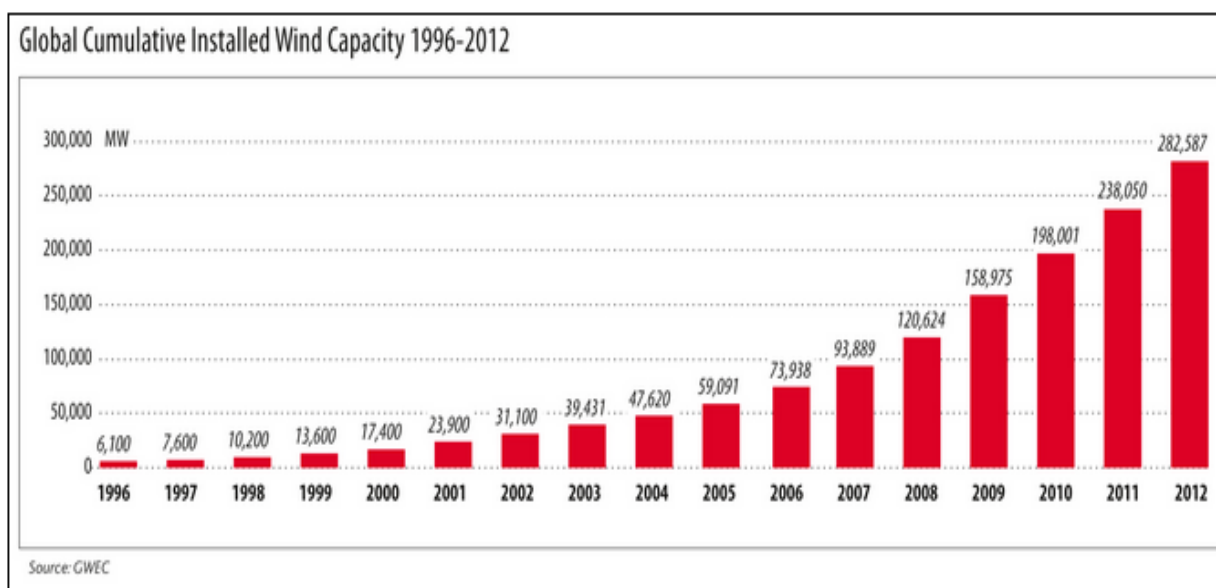
Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ραγδαία αύξηση στην εγκατεστημένη αιολική ισχύ στην Ευρώπη με πρωτοπόρους τη Δανία (που έχει γίνει ο μεγαλύτερος εξαγωγέας ανεμογεννητριών προς τις Η.Π.Α και έχει εγκαταστήσει ανεμογεννήτριες και μέσα στη θάλασσα), τη Γερμανία (τη χώρα με τις περισσότερες αιολικές εγκαταστάσεις) και την Ισπανία. Η εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατά το τέλος του 2012 παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς (σε MW) των χωρών της Ε.Ε. κατά το τέλος του 2012

Ειδικότερα, η ετήσια εγκατάσταση αιολικής ισχύος στις χώρες της Ε.Ε. αυξήθηκε σταθερά κατά τα τελευταία 12 χρόνια, από 3,2 GW το 2000 σε 11,9 GW το 2012, με ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης πάντοτε μεγαλύτερο του 11,6%. Έτσι πλέον στην Ε.Ε. είναι εγκατεστημένα 106 GW αιολικής ισχύος, εκ των οποίων 101 GW παράγονται ηπειρωτικά και τα υπόλοιπα 4993 MW παράγονται σε θαλάσσιες περιοχές, ποσοστό αυξημένο κατά 12,6% σε σχέση με τον προηγούμενο χρόνο. Η Γερμανία παραμένει η χώρα με τις περισσότερες αιολικές εγκαταστάσεις, ακολουθούμενη από την Ισπανία, την Αγγλία και την Ιταλία, ενώ ένα σύνολο 15 κρατών μελών έχουν συνολική εγκατεστημένη ισχύ άνω του 1 GW. Από το σύνολο των αιολικών εγκαταστάσεων παρήχθησαν 231 TWh ηλεκτρικής ενέργειας κατά το 2012, ποσό που αντιστοιχεί στο 7% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ε.Ε., νούμερο που είναι αυξημένο σε σχέση με το 6,3% του προηγούμενου έτους. Προβλέπεται ότι στο εγγύς μέλλον οι εγκαταστάσεις αιολικής ισχύος θα συνεχίσουν να αυξάνονται, παρότι θα υπάρξει μια μείωση του ρυθμού αύξησης σε μεγάλες αγορές όπως η Ισπανία και η Ιταλία λόγω της οικονομικής κρίσης.^[9]

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η ανάπτυξη που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στην Ασία (Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία) στον τομέα της αιολικής εγκατεστημένης ισχύος. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω γεγονότων, ο μέσος ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας την τελευταία δεκαετία σε παγκόσμιο επίπεδο ανήλθε περίπου στο 24%, με 282.587 MW εγκατεστημένη ισχύ στο τέλος του 2012. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 1.2) παρουσιάζεται η εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως μέχρι το 2012.



Σχήμα 1.2: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας 1996-2012
 Πηγή: Global Wind Energy Council, 2012

1.2.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα

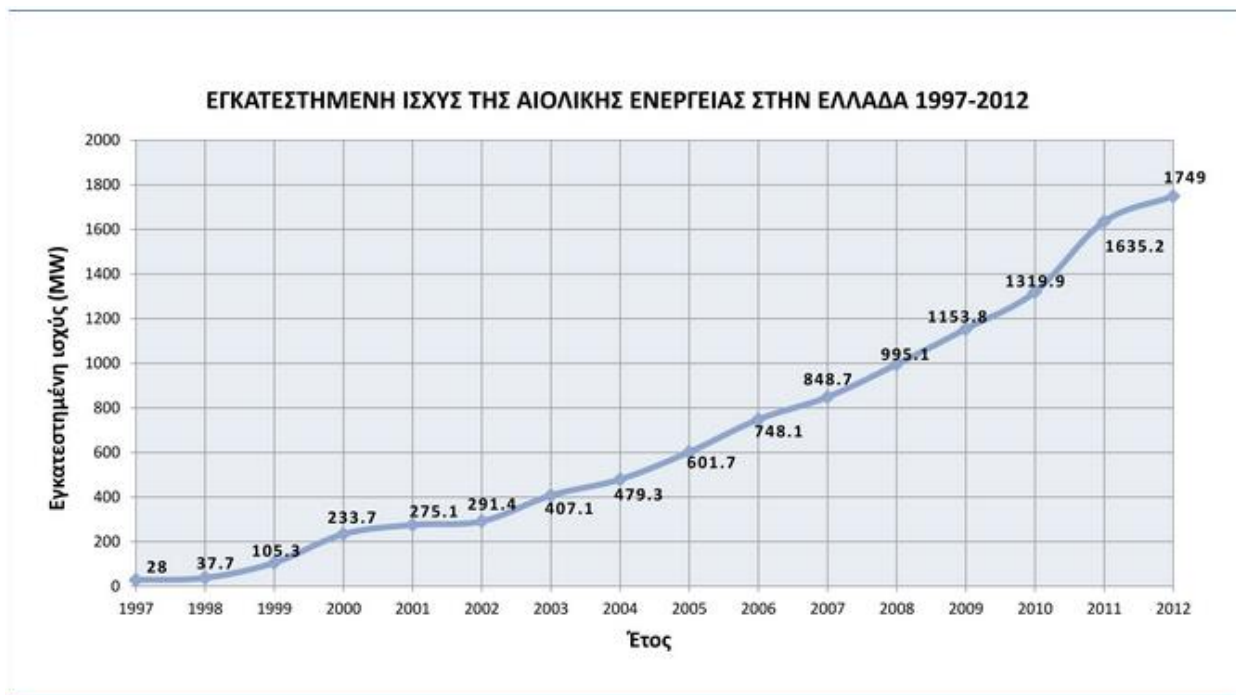
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας.

Ενέργειες για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, ενώ στο γεγονός αυτό έχει συμβάλει και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις ΑΠΕ, η οποία ενθαρρύνει και επιδοτεί επενδύσεις στις Ήπιες μορφές ενέργειας. Αλλά και σε εθνική κλίμακα έχουν θεσπιστεί νόμοι που παρέχουν ισχυρότατα κίνητρα ακόμα και για επενδύσεις μικρής κλίμακας.

Η περιφέρεια της Δυτικής Ελλάδας αν και έχει μικρότερο αιολικό δυναμικό σε σύγκριση με άλλες περιοχές, διαθέτει ένα ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο και το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ύπαρξη ανεμωδών «νησίδων» (λόφοι, υψώματα κλπ. με εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό) την καθιστούν ενδιαφέρουσα για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων.

Αιολικά πάρκα υπάρχουν και σε πλήθος νησιών, όπως το Αιολικό Πάρκο «Μανολάτη - Ξερολίμπα» του Δ.Δ. Διλινάτων Δήμου Αργοστολίου στην Κεφαλονιά. Στο ίδιο νησί έχουν ήδη δημιουργηθεί δύο ακόμη αιολικά πάρκα: το Αιολικό Πάρκο "Αγία Δυνατή" του Δήμου Πυλαρέων, και το Αιολικό Πάρκο "Ημεροβίγλι" στα διοικητικά όρια των Δήμων Αργοστολίου και Πυλαρέων. Με τη λειτουργία των τριών αιολικών πάρκων ο Νομός Κεφαλληνίας τροφοδοτεί το δίκτυο ηλεκτροδότησης της χώρας με σύνολο 75,6 MW ηλεκτρικής ισχύος. Επιπλέον, σε διαδικασία αδειοδότησης βρίσκονται πέντε ακόμη μονάδες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανάγκες του νησιού σε ηλεκτρική ενέργεια και σε περίοδο αιχμής (Αύγουστος) ανέρχονται σε 50MW. Η αντιστοιχία μεταξύ της ισχύος που αποδίδει η Κεφαλονιά στο δίκτυο και της ισχύος που καταναλώνει είναι εξαιρετικά ενθαρρυντική για την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας και σε πολλά ακόμη νησιά της επικράτειας.^[9]

Παρά τη σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τα τελευταία χρόνια, είναι κοινά αποδεκτό ότι αυτή η αύξηση είναι πολύ μικρή δεδομένου του πλούσιου αιολικού δυναμικού της χώρας μας.



Σχήμα 1.3: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα 1997- 2012

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. Όμως 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 1320 MW. 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 7500 MW. Ωστόσο παρατηρούνται καθυστερήσεις που οφείλονται στη μακροσκελή και περίπλοκη αδειοδοτική διαδικασία, την αδυναμία του δικτύου σε πολλές περιπτώσεις (π.χ. Εύβοια, Κρήτη) να υποστηρίξει επιπλέον εγκατεστημένη ισχύ, στις αντιδράσεις των κατοίκων κυρίως για θέματα οπτικής όχλησης και στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού. Τα παραπάνω προβλήματα έχουν τεθεί υπό συζήτηση και έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για την επίλυση τους με κατάλληλα νομικά πλαίσια.^[9]

1.3 Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής

Όπως γίνεται φανερό από τα παραπάνω, η αιολική ενέργεια έχει διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός όμως ότι χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και τυχαιότητα αποτελεί τροχοπέδη για την εξέλιξη και την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο ισχύος. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας απαιτούνται εργαλεία πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η διαχείριση και 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.

1.3.1 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 την 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.^[1]

Οι προβλέψεις της ζήτησης φορτίου είναι συνήθως αρκετά ακριβείς, με σφάλμα μόλις 1,5-2% 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^[11]. 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 ημέρας, 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.^{[11],[12]}

1.3.2 Η σημασία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής

Με την αυξανόμενη διείσδυση της αιολικής παραγωγής στα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι χειριστές του συστήματος μεταφοράς έρχονται αντιμέτωποι με αυξανόμενα επίπεδα μεταβλητότητας και αβεβαιότητας. Αυτό συμβαίνει καθώς η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και συνεπώς η αιολική παραγωγή ισχύος μεταβάλλεται τόσο από ώρα σε ώρα όσο και από ημέρα σε ημέρα. Δεδομένου μάλιστα ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι συνάρτηση των καιρικών συνθηκών, η ταχύτητα του ανέμου για την επόμενη ημέρα που περιμένει ο χειριστής του δικτύου υπόκειται στην αβεβαιότητα των καιρικών προβλέψεων για την επόμενη ημέρα.

Οι χειριστές του συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούν προβλέψεις φορτίου για την επόμενη ημέρα έτσι ώστε να αποφασίσουν πόση ενέργεια απαιτείται κάθε ώρα της επόμενης ημέρας για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών. Αυτή η πρόβλεψη επιτρέπει την έγκαιρη ενεργοποίηση των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κάποιες από τις οποίες μπορεί να χρειάζονται αρκετές ώρες για να τεθούν σε λειτουργία. Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλο βαθμό διείσδυσης αιολικών χρησιμοποιούν προβλέψεις σχετικά με την παραγωγή αιολικής ισχύος για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Έτσι, συνδυάζοντας την πρόβλεψη για την αιολική ισχύ με την πρόβλεψη για το φορτίο της επόμενης ημέρας, οι χειριστές είναι σε θέση να αποφασίζουν ποιες από τις συμβατικές πηγές και σε ποιο βαθμό χρειάζεται να λειτουργήσουν ώστε σε συνδυασμό με την αιολική παραγωγή να εξασφαλίζουν την εξυπηρέτηση του φορτίου της επόμενης ημέρας.^[13]

Οι προβλέψεις ωστόσο δεν είναι τέλειες. Η πρόβλεψη φορτίου είναι μια αρκετά δοκιμασμένη επιστήμη καθώς η ημερήσια πρόβλεψη φορτίου χρησιμοποιείται από τους χειριστές του συστήματος μεταφοράς εδώ και δεκαετίες με αποτέλεσμα το σφάλμα στην πρόβλεψη φορτίου για κάθε ώρα του επόμενου 24ωρου να κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3%. Αντίθετα, οι προβλέψεις της αιολικής παραγωγής παρουσιάζουν σφάλμα μεταξύ 15 και 20% για ένα μόνο αιολικό πάρκο. Έτσι, η μεταβλητότητα και αβεβαιότητα του ανέμου έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η επίπτωση σε οικονομικό κόστος καθορίζεται από το κόστος λειτουργίας των εφεδρικών μονάδων που απαιτούνται ώστε να αντιμετωπίζεται η αβεβαιότητα και μεταβλητότητα του ανέμου και το σύστημα να παραμένει αξιόπιστο.

Ακόμη όμως και με τα μεγάλα σφάλματα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, μεγάλης κλίμακας μελέτες έχουν αποδείξει ότι η χρήση μοντέλων προβλέψεων αιολικής παραγωγής για το επόμενο 24ωρο μπορεί να βελτιώσει δραστικά τη λειτουργία του συστήματος, περιορίζοντας το συνολικό κόστος λειτουργίας καθώς και την αχρησιμοποίητη ενέργεια, διατηρώντας παράλληλα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος. Κατά συνέπεια, γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι με βελτίωση των προβλέψεων της αιολικής ισχύος, έστω και κατά μικρό ποσοστό, μπορούν να επιτευχθούν πολύ σημαντικά οφέλη στον περιορισμό του κόστους λειτουργίας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και για το λόγο αυτό καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες.^[13]

1.4 Δομή της εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής με χρήση νευρωνικών δικτύων τύπου Artmap και η αξιολόγηση της επίδοσής του. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να «μαθαίνει» πώς να συμπεριφέρεται ανάλογα με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που παρουσιάζονται στην είσοδό του, χωρίς να «ξεχνάει» την πρότερη γνώση από παλαιότερες παρατηρήσεις. Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των κεφαλαίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δόμηση της εργασίας, που αποσκοπούν στην απόκτηση μιας σφαιρικής αντίληψης γύρω από την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος και τα χαρακτηριστικά της πιθανοτικής πρόβλεψης.

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιήθηκε μια αναλυτική περιγραφή του ανέμου και της αιολικής ενέργειας, ενώ παρουσιάστηκαν στοιχεία για τη ραγδαία ανάπτυξη της κατά τις τελευταίες δεκαετίες τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως. 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 μια σύντομη αναφορά των βασικών χαρακτηριστικών του ανέμου από τη σκοπιά της επίδρασής τους στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, ενώ πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, οι οποίες προέρχονται από τις προβλέψεις μετεωρολογικών μοντέλων για τη μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας και είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της αιολικής παραγωγής.

Στο **Κεφάλαιο 3** πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των κυριότερων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με ιδιαίτερη έμφαση στις πιθανοτικές προβλέψεις.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται ανάλυση των μεθόδων και των τρόπων αξιολόγησης για τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, τόσο για τη σημειακή όσο και για την πιθανοτική πρόβλεψη. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην μεθοδολογία αντιμετώπισης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται μια αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας των νευρωνικών δικτύων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα δίκτυα προσαρμόσιμου συντονισμού (ARTMAP) καθώς και στο νευρωνικό δίκτυο HS-ARTMAP (Hyper Spherical ARTMAP), που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη του μοντέλου της παρούσας διπλωματικής.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται η ανάπτυξη του μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, με παράθεση των βημάτων που ακολουθήθηκαν από την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου μέχρι την εξαγωγή των τελικών προβλέψεων.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της πορείας που ακολουθήθηκε και γίνεται η εξαγωγή των συμπερασμάτων από την προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε σε Matlab. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις που χρίζουν περαιτέρω μελέτης και έρευνας.

Κεφάλαιο 2

Κύρια χαρακτηριστικά του ανέμου και αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP)

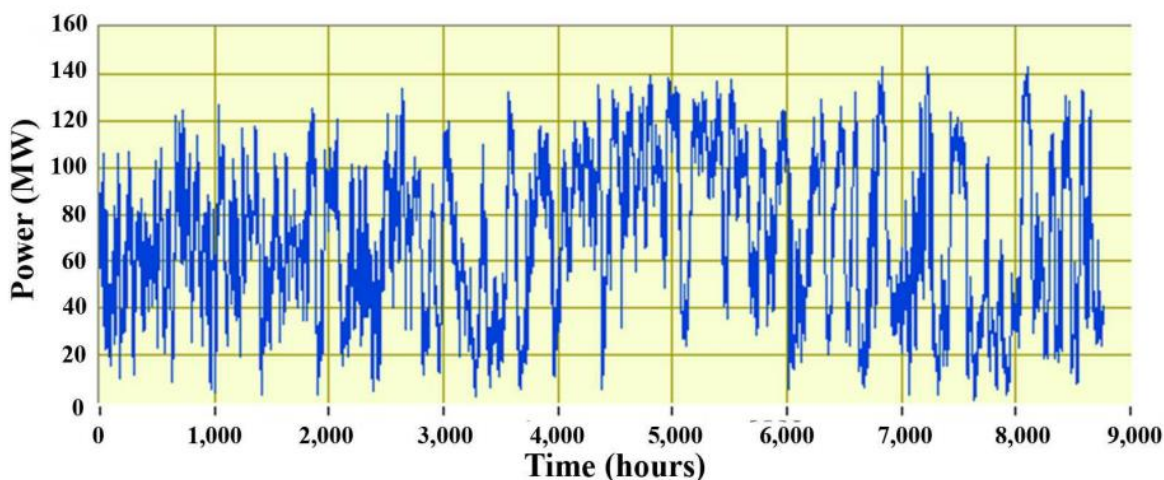
2.1 Εισαγωγή

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου αποτελεί αδήριτη ανάγκη για τις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει. Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η δημιουργία των ανέμων οφείλεται σε δύο παράγοντες. Αφ' ενός στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των πόλων και του ισημερινού, με αποτέλεσμα την αένια κίνηση αερίων μαζών από τους πόλους στον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες) και αντίστροφα (θερμές μάζες), αφετέρου στο ανάγλυφο της γης (βουνά, πεδιάδες, θάλασσες) και τη διαφορετική τους ικανότητα στην απορρόφηση θερμότητας. Έτσι δημιουργούνται διαφορές θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την πρόκληση ανέμων. Συνεπώς, ο άνεμος είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο-διαδικασία που χαρακτηρίζεται από τη διαρκώς μεταβαλλόμενη και διακοπτόμενη φύση του, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια της γης (οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα), που ενδιαφέρει τον τομέα της πρόβλεψης της ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτριες. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης των αιολικών συστημάτων οφείλουμε να γνωρίζουμε τα ακόλουθα του χαρακτηριστικά:

- Την ταχύτητα του ανέμου.
- Τη διεύθυνση του ανέμου.
- Το στροβιλισμό του ανέμου.
- Τη μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου).
- Τις ακραίες τιμές ταχύτητας του ανέμου (ριπές).

Ωστόσο, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ανέμου, που σχετίζονται με την αλληλεπίδρασή του με την επιφάνεια της γης ή τη μεταβολή της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του κατώτερου ατμοσφαιρικού στρώματος, μεταβάλλονται σε πολύ μικρότερη κλίμακα, από αυτή που μπορεί να περιγράψει η μετεωρολογία ή η κλιματολογία. Επομένως, η χρήση στατιστικών μεθόδων για την επίλυση του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής θεωρείται απαραίτητη, σε συνδυασμό με τον κλάδο της μετεωρολογίας.^[8]

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η αναφορά των βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών του ανέμου από τη σκοπιά της επίδρασής τους στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, ενώ πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (Numerical Weather Predictions-NWP), οι οποίες προέρχονται από τις προβλέψεις μετεωρολογικών μοντέλων για τη μελλοντική κατάσταση της ατμόσφαιρας και είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της αιολικής παραγωγής.



Σχήμα 2.2: Τυπική χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου για την περίοδο ενός έτους.

2.2.1 Δυνάμεις και είδη ανέμου

Για τον προσδιορισμό του ανέμου απαιτούνται δύο στοιχεία, η διεύθυνσή του (direction) και η ένταση (speed), δηλαδή η ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα. Προτού γίνει αναφορά στη μοντελοποίηση και τον τρόπο προσέγγισης του ανέμου, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέριας μάζας και τα διάφορα είδη ανέμου που αυτές προκαλούν.

Οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέριας μάζας είναι οι εξής:

- **Δύναμη βαροβαθμίδας:** ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε μια αέρια μάζα εξαιτίας των διαφορετικών πιέσεων που υπάρχουν σ' αυτήν και ωθεί την αέρια μάζα από τις υψηλές στις χαμηλές πιέσεις.
- Η **δύναμη Coriolis:** ασκείται σε κάθε σώμα που κινείται πάνω στη γη και δίνεται ποσοτικά από τη σχέση $F = m \cdot u \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)$, όπου m η μάζα του αέρα, u η ταχύτητά του, ω η κυκλική συχνότητα και φ η γωνία που σχηματίζει με το νοητό άξονα που διέρχεται από το κέντρο της γης.
- Η **δύναμη τριβής** αναπτύσσεται λόγω της τραχύτητας του εδάφους και της θάλασσας, πάνω στην οποία υποχρεώνεται να κινηθεί η αέρια μάζα.
- Η **φυγόκεντρη δύναμη**, που είναι η δύναμη με την οποία αντιδρά κάθε σώμα κινούμενο σε κυκλική τροχιά.

Με βάση τις παραπάνω δυνάμεις προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι ανέμου:

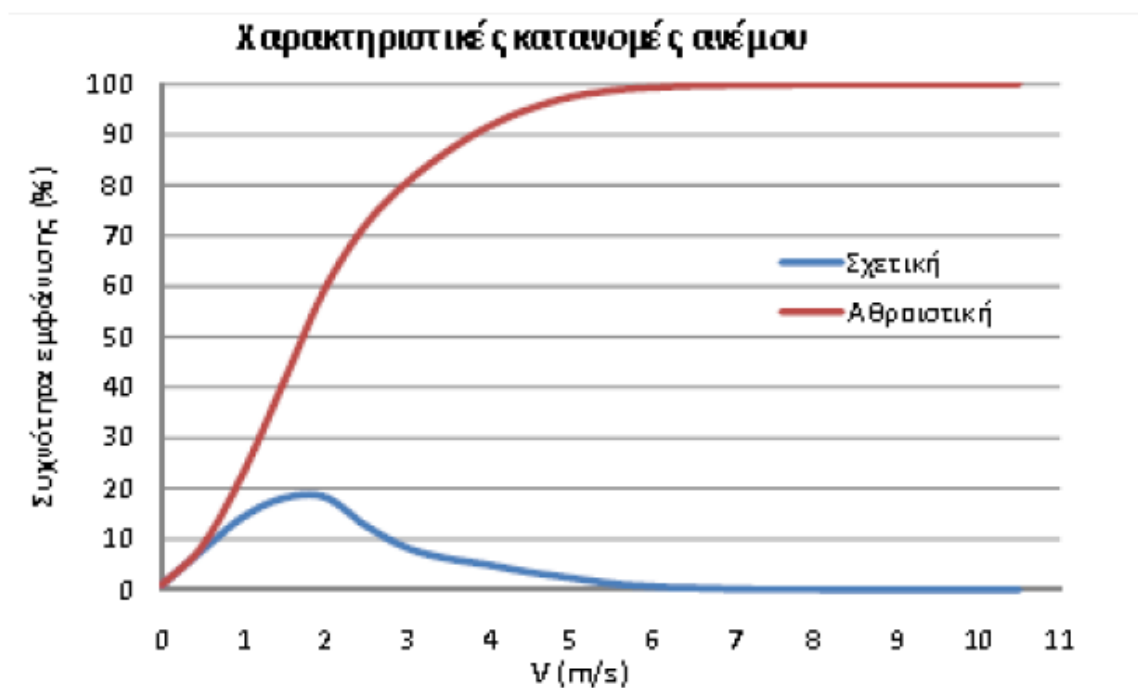
- **Γεωστροφικός άνεμος:** Ο άνεμος που δημιουργείται από τις δυνάμεις βαροβαθμίδας και Coriolis ονομάζεται γεωστροφικός. Όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε ένα χάρτη, τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη βαροβαθμίδας και κατά συνέπεια μεγαλύτερη η ταχύτητα του ανέμου.

- **Άνεμος υπό κλίση (gradient wind):** Όταν οι ισοβαρείς είναι καμπύλες και η κίνηση του ανέμου εκτελείται σε περιοχές όπου η δράση της τριβής είναι αμελητέα, τότε η κίνηση του ανέμου 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), παρατηρείται εξαιτίας της συγκεκριμένης ισορροπίας δυνάμεων σύγκλιση του ανέμου προς το κέντρο του συστήματος, που έχουν ως συνέπεια τη δημιουργία ανοδικών κινήσεων στο κέντρο. Αντίθετα, στο αντικυκλωνικό σύστημα (υψηλό βαρομετρικό), η ισορροπία των δυνάμεων δημιουργεί απόκλιση του ανέμου από το κέντρο του συστήματος, με συνέπεια τη δημιουργία καθοδικών κινήσεων στο κέντρο. Απότοκος των ανοδικών κινήσεων στο κέντρο ενός κυκλωνικού συστήματος είναι η δημιουργία νεφών με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, όταν φυσικά υπάρχει και αρκετή υγρασία στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, οι καθοδικές κινήσεις σε ένα υψηλό βαρομετρικό τείνουν να κάνουν την ατμόσφαιρα πιο ευσταθή.
- **Ημερήσιοι άνεμοι:** σε αυτήν την κατηγορία των ανέμων ανήκουν αυτοί που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του 24ώρου, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται μεταξύ στεριάς και θάλασσας ή ορεινών και πεδινών περιοχών.
- **Θαλάσσια και απόγεια αύρα:** Η **θαλάσσια αύρα** εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της ταχύτερης θέρμανσης του αέρα πάνω από τη στεριά σε σχέση με τον αέρα πάνω από τη θάλασσα και έχει διεύθυνση από τη θάλασσα προς τη στεριά. Η **απόγεια αύρα** αντίθετα, 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 στη θάλασσα.
- **Τοπικοί άνεμοι:** Η τοπογραφική διαμόρφωση σε διάφορες περιοχές της γης, σε συνδυασμό με ορισμένες καιρικές συνθήκες δημιουργεί τοπικούς ανέμους με χαρακτηριστικές πολλές φορές ονομασίες. Οι άνεμοι αυτοί χαρακτηρίζονται τοπικοί και είναι μικρής κλίμακας (π.χ. Βαρδάρης).
- **Μελέμια:** 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.^[6]

2.2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου

Ως χαρακτηριστικό για το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής θεωρείται η μέση ταχύτητα του ανέμου. Όμως, η γνώση μόνο αυτής δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο για την εκτίμηση της αιολικής ενέργειας που μπορεί να προσφέρει μία περιοχή. Απαιτείται, επιπλέον, πληροφόρηση σχετικά με τη συχνότητα της κάθε ταχύτητας ανέμου. Η στατιστική κατανομή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου μπορεί να προκύψει από ανεμολογικά δεδομένα μετρούμενα σε ένα καθορισμένο ύψος (10 μέτρα συνήθως). Κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται η χρήση μέσων τιμών δεκαλέπτων, τα οποία αξιολογούνται σε διάστημα ενός έτους, ώστε να προκύψει η ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου και η ετήσια σχετική κατανομή του.

Για να προκύψουν αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα, χρειάζονται δεδομένα τουλάχιστον μερικών ετών, μέχρι δέκα σύμφωνα με τη μετεωρολογική επιστήμη. Η στατιστική κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου συνηθίζεται να μετράται ως συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας (συνεχής κατανομή) ή της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Όπως φαίνεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα, η πρώτη δείχνει απευθείας τις ταχύτητες ανέμου που εμφανίζονται περισσότερο σε μία περιοχή, ενώ η δεύτερη δείχνει ως ποσοστό την περίοδο μέσα στο διάστημα ενός χρόνου, κατά την οποία η ταχύτητα ανέμου έχει τιμή μικρότερη ή ίση από το συγκεκριμένο σημείο της εν λόγω καμπύλης. Ένα επίσης χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται, είναι ο όρος της ταχύτητας μέγιστης πιθανοφάνειας (V_{mode} ή V_{median}) και αποτελεί την ταχύτητα που βρίσκεται στην αιχμή της σχετικής κατανομής και αντίστοιχα στο 50% της αθροιστικής και συνήθως είναι χαμηλότερη της μέσης ταχύτητας κατά 0,3 - 0,5 m/s.

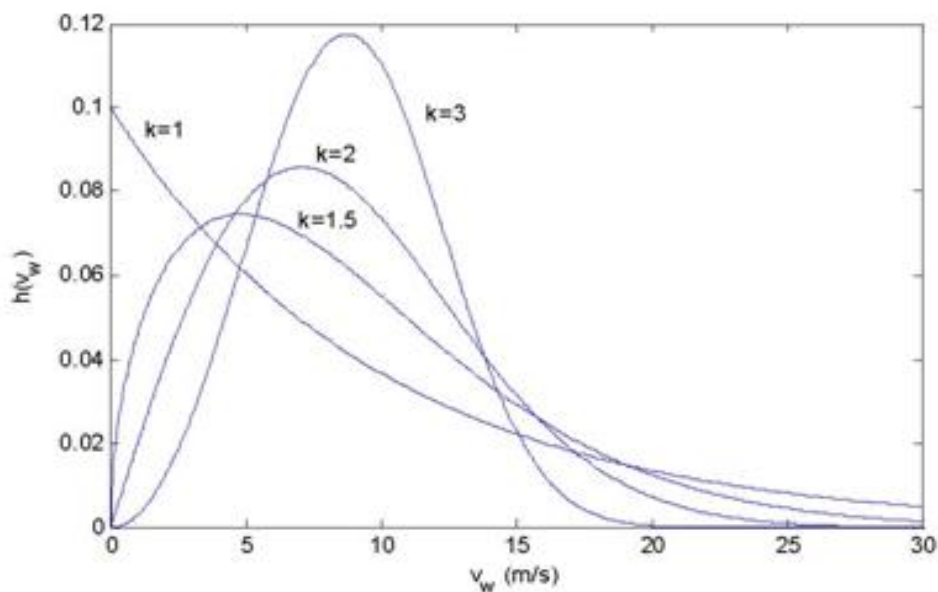


Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές κατανομές ανέμου

Για το χαρακτηρισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, χρησιμοποιείται η μαθηματική συνάρτηση Weibull, η οποία προσεγγίζει σε πολύ καλό βαθμό την κατανομή του ανέμου. Η συνάρτηση αυτή εξαρτάται από την «παράμετρο κλίμακας» c_w , η οποία καθορίζει την μέση ταχύτητα ανέμου και μετράται σε m/s, και την παράμετρο μορφής k_w , που συνήθως παίρνει τιμές από 1,5 έως 2,5. Στον Ελλαδικό χώρο συνήθως λαμβάνονται τιμές μεταξύ 1,5 και 2,0. Συχνά (όταν είναι γνωστή μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου) και επειδή είναι δύσκολος ο υπολογισμός της παραμέτρου μορφής, λαμβάνεται η τιμή $k_w=2$. Στην περίπτωση αυτή η κατανομή Weibull ονομάζεται κατανομή Rayleigh. Οι μαθηματικές εκφράσεις τους φαίνονται παρακάτω:

$$\text{Κατανομή Weibull: } f(u) = \left(\frac{k_w}{c_w}\right) \left(\frac{V_w}{c_w}\right)^{k_w-1} \exp\left(-\left(\frac{V_w}{c_w}\right)^2\right) \quad (2.1)$$

$$\text{Κατανομή Rayleigh: } f(u) = \frac{2}{c_w^2} V_w \exp\left(-\left(\frac{V_w}{c_w}\right)^2\right) \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.4: Μορφή της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής k , με παράμετρο κλίμακας $c_w=10$.

2.3 Η μετατροπή της αιολικής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια

2.3.1 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος και η ισχύς του ανέμου

Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική είναι οι ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες λαμβάνουν την κινητική ενέργεια του ανέμου μέσω της έλικας (συνήθως τρίπτερης), η οποία αποδίδει το απαραίτητο μηχανικό έργο στο δρομέα της ανεμογεννήτριας περιστρέφοντάς τον με αποτέλεσμα την μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική. Αρχικά, η περιεχόμενη από τον άνεμο ισχύς, μέρος της οποίας θα μετατραπεί σε ηλεκτρική από την ανεμογεννήτρια δίνεται από τον τύπο:

$$P_{\text{ανέμου}}(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (2.3)$$

όπου:

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

Η αεροδυναμική ποιότητα του δρομέα παρουσιάζεται μέσω του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος C_p και εξαρτάται από τον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, μέσω των οποίων γίνεται ουσιαστικά η απορρόφηση της αιολικής ισχύος και εμφανίζει απώλειες λόγω:

- της αναπόφευκτης καθυστέρησης λόγω της γωνίας πλαγιολίσθησης (yaw) του δρομέα
- της επιδείνωσης της ποιότητας της επιφάνειας των πτερυγίων
- του φαινομένου της σκίασης του πύργου (tower shadow) (2-3%).

Ο συντελεστής ισχύος ενός ανεμοκινητήρα, C_p ορίζεται από την σχέση:

$$C_p = \frac{P_M}{P_{\text{ανέμου}}} \quad (2.4)$$

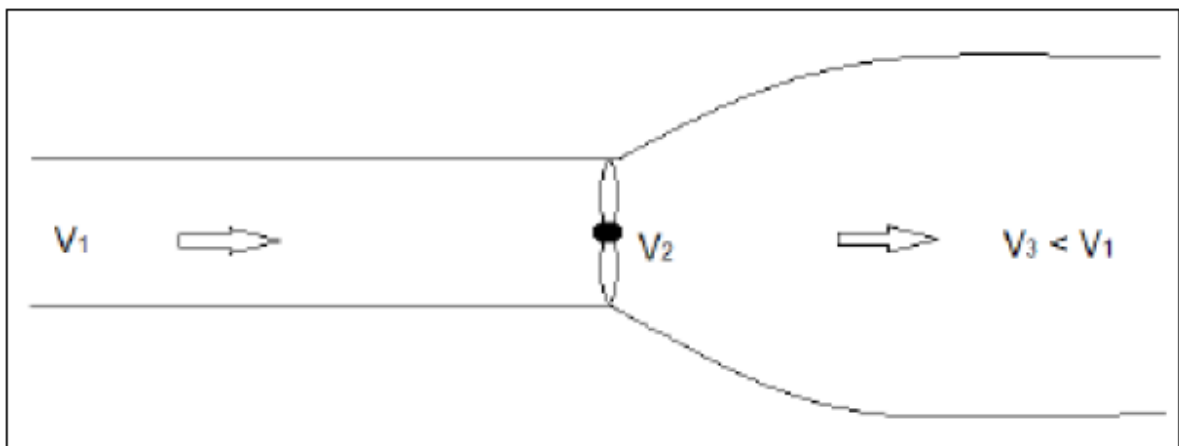
, όπου P_M είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται τελικά από την ανεμογεννήτρια. Συνεπώς, η παραγόμενη μηχανική ισχύς της Α/Γ κάθε χρονική στιγμή είναι:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho A_r C_p u^3 \quad (2.5)$$

Βλέπουμε δηλαδή ότι εξαρτάται από την κυβική δύναμη της ταχύτητας του ανέμου, το εμβαδόν της έλικας και τον αεροδυναμικό συντελεστή C_p .

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (στο δρομέα) C_p προκύπτει από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων. Η θεωρία των στοιχείων περυγώσεως χωρίζει το πτερύγιο του δρομέα σε στοιχειώδεις λωρίδες πλάτους dr και συνδέει τις δυνάμεις και ροπές, που το ρευστό (αέρας) εξασκεί κατά τη διέλευση διαμέσου του δακτυλιοειδούς τμήματος του δίσκου πάχους dr πάνω στο δίσκο, με τις αεροδυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στις λωρίδες πτερυγίου του δρομέα. Με ολοκλήρωση σε όλο το μήκος του πτερυγίου προκύπτει μια αναλυτική σχέση για το συντελεστή ισχύος C_p από την οποία συμπεραίνουμε ότι ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων.

Παρακάτω δίνεται ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής C_p που υπολογίζεται με βάση το ροϊκό σωλήνα του ανεμοκινητήρα σύμφωνα με τον οποίο, ο αέρας πολύ μακριά στα προσήνεμα του δίσκου έχει πίεση p και πλησιάζει το δίσκο με ταχύτητα v_1 . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και υπήνεμα από το δίσκο, όπου η πίεση του αέρα θα έχει αποκατασταθεί από την πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου v_3 θα είναι μικρότερη από τη v_1 .



Σχήμα 2.5: Ρεύμα ανέμου διερχόμενο από τη φτερωτή μια ανεμογεννήτριας

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p έχει υπολογιστεί ότι είναι $C_{p,max}=0,592$, γνωστή ως όριο του Betz, όταν:

$v_3 = \frac{1}{3}v_1$ και $v_2 = \frac{2}{3}v_1$. Έτσι, σύμφωνα με το νόμο του Betz, στην καλύτερη περίπτωση, μόνο το 59,2% της κινητικής ενέργειας του ανέμου μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια μέσω μιας ανεμογεννήτριας. Γενικά, ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ προσδιορίζει πόσο αποδοτικά η μηχανή μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε μηχανική και συνεπώς επιδιώκουμε όσο το δυνατόν υψηλότερες τιμές του.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και από τη γωνία βήματος β (pitch) των πτερυγίων εάν υπάρχει.

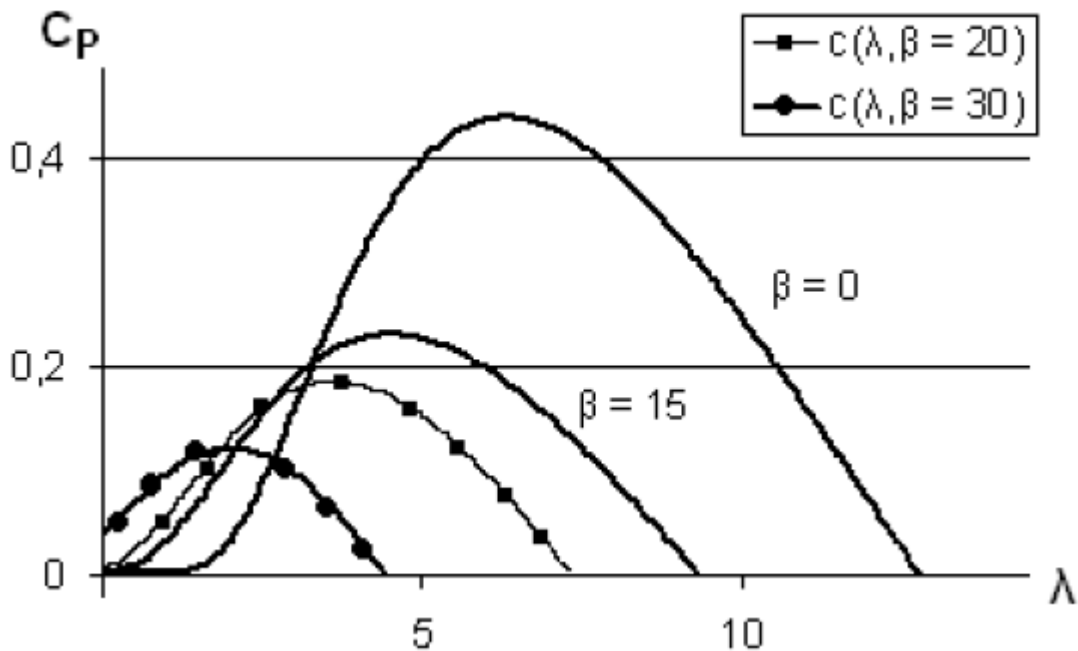
Ο λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{\omega R}{u} \quad (2.6)$$

όπου R η ακτίνα της έλικας,
 ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και
 u η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.

Συνεπώς: $R\omega$ είναι η ταχύτητα του άκρου της έλικας και
 u η ταχύτητα του ανέμου μακριά της έλικας.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες $C_p(\lambda)$ με παράμετρο τη γωνία του βήματος της έλικας β .



Σχήμα 2.6: Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει των β και λ

Είναι αξιοσημείωτη η μεταβολή του C_p , και κατά συνέπεια του της μηχανικής ισχύος P_M , από τη γωνία του βήματος της έλικας β , μέσω της οποίας γίνεται συχνά ο έλεγχος της ροής ισχύος.

Μια μαθηματική έκφραση που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τον υπολογισμό της μεταβολής του C_p είναι η ακόλουθη: $C_p = (1,12 - 0,022\beta^2 - 2,8)e^{-0,38\frac{u}{\omega}}$ (2.7),

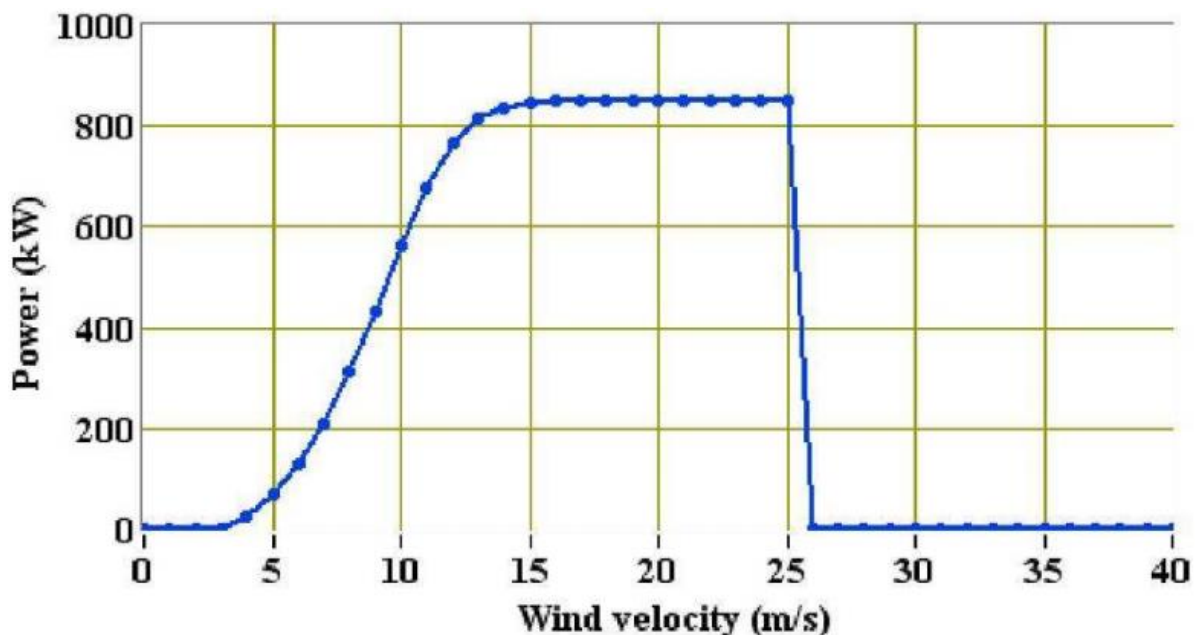
όπου: u η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας σε rad/s

β η γωνία του βήματος της έλικας (σε μοίρες).^[4]

2.3.2 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας από τον κατασκευαστή

Με δεδομένο τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p , είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την ισχύ που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Η γραφική παράσταση της παραγόμενης ισχύος από μια ανεμογεννήτρια για όλες τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας και δίνεται από τον κατασκευαστή της, καθώς εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια παρατίθεται η καμπύλη ισχύος μια τυπικής ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 2.7: Καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας

Παρατηρώντας την παραπάνω καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, βλέπουμε ότι για μικρές ταχύτητες του ανέμου (0-4 m/s), η ισχύς που παράγεται είναι μηδενική. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου, η Α/Γ μπορεί να αναπτύξει ισχύ που υπερβαίνει τις μηχανικές απώλειες (π.χ. τριβές) και τίθεται σε λειτουργία. 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 (συνήθως 4-5 m/s περίπου). Για τιμές ταχύτητας του ανέμου μεγαλύτερες της u_{cut-in} και μέχρι τα 12 m/s περίπου, η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

$$P = n_t P_M = \frac{1}{2} \rho A C_p U^3 n_t \quad (2.8)$$

, όπου n_t είναι ο συνολικός βαθμός αποδόσεως της ανεμογεννήτριας. Συνεπώς, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από την Α/Γ είναι ανάλογη της κυβικής δύναμης της ταχύτητας του ανέμου όπως είχε επισημανθεί και προηγουμένως. Για τιμές ταχύτητας μεγαλύτερες των 12 m/s και μέχρι τα 25 m/s περίπου, η Α/Γ παράγει την ονομαστική της ισχύ. Δηλαδή για τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ 12-25 m/s η παραγόμενη από την Α/Γ ισχύ παραμένει σταθερή, καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα προκαλούνταν υπερφόρτιση των επιμέρους στοιχείων της Α/Γ (π.χ. του πολλαπλασιαστή στροφών, της γεννήτριας κ.λ.π.) . Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή του βήματος της έλικας, έτσι ώστε η παραγωγή ισχύος να διατηρείται σταθερή και ίση με την ονομαστική. Τέλος, για μια οριακή τιμή της ταχύτητας ανέμου (στην προκειμένη περίπτωση 25 m/s) η λειτουργία της Α/Γ διακόπτεται και ο δρομέας λαμβάνει τη θέση της ελάχιστης αντιστάσεως στον άνεμο για να αποφευχθεί η υπέρβαση των ορίων αντοχής της σε μηχανικές καταπονήσεις. Το άνω όριο αυτό της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται όριο αποκοπής (cut-off wind speed) και κυμαίνεται συνήθως από 20 μέχρι 30 m/s . Αξίζει να σημειωθεί ότι η αποσύνδεση ανεμογεννητριών λόγω ισχυρών ανέμων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αιολική παραγωγή και συνεπώς πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία της πρόβλεψης.

Επιπλέον, συνδυάζοντας το γεγονός 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), με τη μορφή της κατανομής Weibull , προκύπτει ότι οι μικρές μεταβολές της ταχύτητας των ασθενών ή των μέτριων ανέμων οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές της αιολικής παραγωγής. Το γεγονός αυτό συνάγεται, καθώς στην κατανομή 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 ^[8]. Συνεπώς, ο συνδυασμός της μεγάλης συχνότητας των ανέμων, που αντιστοιχούν στα μη γραμμικά και απότομα τμήματα της καμπύλης ισχύος, με την έντονη μεταβλητότητα του ανέμου, καθιστά το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής ιδιαίτερα περίπλοκο.

2.4 Αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP)

2.4.1 Εισαγωγή

Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού (Numerical Weather Predictions-NWP) χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικά μοντέλα και υπολογιστικές τεχνικές. Η παραγωγή αιολικής ισχύος σχετίζεται άμεσα άλλωστε με τις καιρικές συνθήκες και για το λόγο αυτό, το πρώτο βήμα για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών στο επίπεδο του αιολικού πάρκου.^[8]

Η ιστορία της αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού άρχισε από το 1920 με τις προσπάθειες του Lewis Fry Richardson, ο οποίος χρησιμοποίησε διαδικασίες που αρχικά αναπτύχθηκαν από τον Vilhelm Bjerknes για να παράγει χειρωνακτικά μια εξάωρη πρόβλεψη για την κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από δύο σημεία στην Κεντρική Ευρώπη, δαπανώντας τουλάχιστον έξι εβδομάδες για να το πράξει^[14]. Μόλις με την εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των προσομοιώσεων μέσω υπολογιστών, μειώθηκε ο χρόνος υπολογισμού σε λιγότερο από την ίδια περίοδο πρόβλεψης. Ο ENIAC χρησιμοποιήθηκε για την πρώτη πρόγνωση καιρού μέσω υπολογιστή το 1950. Το 1954, η ομάδα του Carl Gustav-Rossby στο Σουηδικό Μετεωρολογικό και Υδρολογικό Ινστιτούτο χρησιμοποίησε το ίδιο μοντέλο για να παράγει την πρώτη λειτουργική πρόβλεψη (δηλαδή προβλέψεις ρουτίνας για πρακτική χρήση)^[15]. Η λειτουργική αριθμητική πρόγνωση του καιρού στις Ηνωμένες Πολιτείες ξεκίνησε το 1955 στο πλαίσιο της κοινής Αριθμητικής Μονάδας Πρόγνωσης Καιρού (JNWPU), ένα κοινό πρόγραμμα από την Πολεμική Αεροπορία των Η.Π.Α., του Ναυτικού και της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Το 1956, ο Norman Phillips ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο που θα μπορούσε να απεικονίζει ρεαλιστικά μηνιαίες και εποχιακές τάσεις στην τροπόσφαιρα. Αυτό έγινε το πρώτο επιτυχημένο κλιματικό μοντέλο. Ακολουθώντας την εργασία του Phillips, πολλές ομάδες άρχισαν να εργάζονται για να δημιουργήσουν μοντέλα γενικής κυκλοφορίας^[16]. Το πρώτο κλιματικό μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, που συνδύαζε τις ωκεάνιες και ατμοσφαιρικές αλλαγές αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στο NOAA Εργαστήριο Γεωφυσικής Fluid Dynamics.

Καθώς οι υπολογιστές έχουν γίνει πιο ισχυροί, το μέγεθος των αρχικών συνόλων δεδομένων έχει αυξηθεί και νεότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να επωφεληθούν από την συνεχώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ. Αυτά τα νεότερα μοντέλα περιλαμβάνουν περισσότερες φυσικές διεργασίες στις απλουστεύσεις των εξισώσεων της κίνησης σε αριθμητικές προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας^[15]. 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^[14]. 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 καιρού και τις επακόλουθες συνθήκες 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 και να επεκτείνει το χρονικό ορίζοντα στον οποίο η αριθμητική πρόγνωση του καιρού είναι βιώσιμη βαθύτερα στο μέλλον από ό,τι άλλο είναι δυνατό. ^[17]

2.4.2 Μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν και προηγουμένως, 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 (0,6 mi) 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 εισερχόμενα 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 ωριαία METAR εκθέσεις, ή 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. ^[21]

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 πλοιαρχών 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 επίσης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις οι οποίες είναι αδύνατο να λυθούν ακριβώς με αναλυτικές μεθόδους, με εξαίρεση λίγες εξιδανικευμένες περιπτώσεις [18]. 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.^[19]

Κάνοντας χειρισμούς στον τεράστιο αριθμό δεδομένων και εκτελώντας πολύπλοκους υπολογισμούς που είναι απαραίτητοι στη σύγχρονη αριθμητική πρόγνωση του καιρού, απαιτεί 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 μετά τη διαδικασία, 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, και 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.

2.4.3 Παγκόσμια μοντέλα και μεσοπρόθεσμες προβλέψεις

Τα παγκόσμια μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού αποτελούν τον πυρήνα των καιρικών προβλέψεων, αφού υποστηρίζουν στο μεγαλύτερο βαθμό την διαδικασία αφομοίωσης δεδομένων και παράγουν τις αρχικές και οριακές συνθήκες, που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα περιορισμένης περιοχής. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν ευρέως ως κύρια πηγή κλιματολογικών δεδομένων μέσω της διεξαγωγής παγκοσμίων επαν-αναλύσεων. Η επαν-ανάλυση δεδομένων αφορά το αποτέλεσμα της αφομοίωσης δεδομένων που παράγεται από ένα σταθερό μοντέλο ενώ η λειτουργική ανάλυση παράγεται από δυναμικά μοντέλα διαφορετικού τύπου διότι τα μοντέλα ενημερώνονται συνεχώς.^[22]

2.4.3.1 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 κ.λ.π. , 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 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 και 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 ^[8].

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.α. οι οποίες μπορεί σύντομα να φανούν χρήσιμες για τα τοπικής χρήσης μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού ^[24].

2.4.3.2 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 διαμορφωμένη ανάλογα με την πίεση κατακόρυφη συντεταγμένη σε ένα σιγμοειδές κατά *Phillips* σύστημα που ακολουθεί την επιφάνεια της γης, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα υπολογισμού των επιφανειακών συνοριακών συνθηκών για το διάλυμα 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 (*Rdöm et al, Skamarock et al.*) [25],[26]

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, πάγος κ.τ.λ. . 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. [27]

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 .

2.4.3.3 Πακέτα φυσικών διεργασιών των μοντέλων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα 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 παγκόσμια κλίμακα 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 αξιοσημείωτη ελάττωση του υπολογιστικού κόστους.^[27]

2.4.4 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 χλμ). 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. Τέτοια μοντέλα 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 τρέχοντες μετεωρολογικές μελέτες υπ' όψιν. 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 τα: Σύστημα Τοπικού Ατμοσφαιρικού Μοντέλου (Regional Atmospheric Modeling System, RAMS), το μοντέλο του Αμερικάνικου Ναυτικού COAMPS, the Meteo-France ερευνητικό μοντέλο, MesoNH και το νέο Ευρωπαϊκό μοντέλο, AROME. Το κοινό που έχουν όλα αυτά τα μοντέλα με το MM5 και WRF μοντέλο 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 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» και 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 καθετής 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.

2.4.5 Βασικά μετεωρολογικά μοντέλα αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος συνεπάγεται τη χρήση της εξόδου κάποιου μετεωρολογικού μοντέλου. Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, συνήθως, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού που παρέχονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες της κάθε χώρας.. Το πιο ευρέως διαδεδομένο μέσης κλίμακας μοντέλο είναι το MM5 ενώ το πιο γνωστό μικρής κλίμακας CFD μοντέλο είναι το WAsP. Τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που είναι σε χρήση είναι το HIRLAM, το SKIRON και το ALADIN. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια περιληπτική αναφορά των παραπάνω μοντέλων.

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 ορογραφικές 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, 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 ορογραφίας 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 που 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 τη 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^[10].

MM5

Το MM5 είναι ένα ακόμη μοντέλο αριθμητικής πρόβλεψης καιρού. Είναι ένα μοντέλο μέσης κλίμακας και δημιουργήθηκε από το Pennsylvania State University και στο National Center for Atmospheric Research με δυνατότητα προσομοίωσης ατμοσφαιρικών συνθηκών με ανάλυση από 100km μέχρι 1km. Είναι ένα μοντέλο περιορισμένης εμβέλειας, μη υδροστατικό, με λεπτομερή περιγραφή της πίεσης, της ταχύτητας και της θερμοκρασίας. Εξαρτάται άμεσα από τη συντεταγμένη του εδάφους σίγμα (σ). Ο αριθμητικός υπολογισμός γίνεται πάνω σε ένα εναλλασσόμενο ορθογώνιο σύστημα με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών. 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 ^[10].

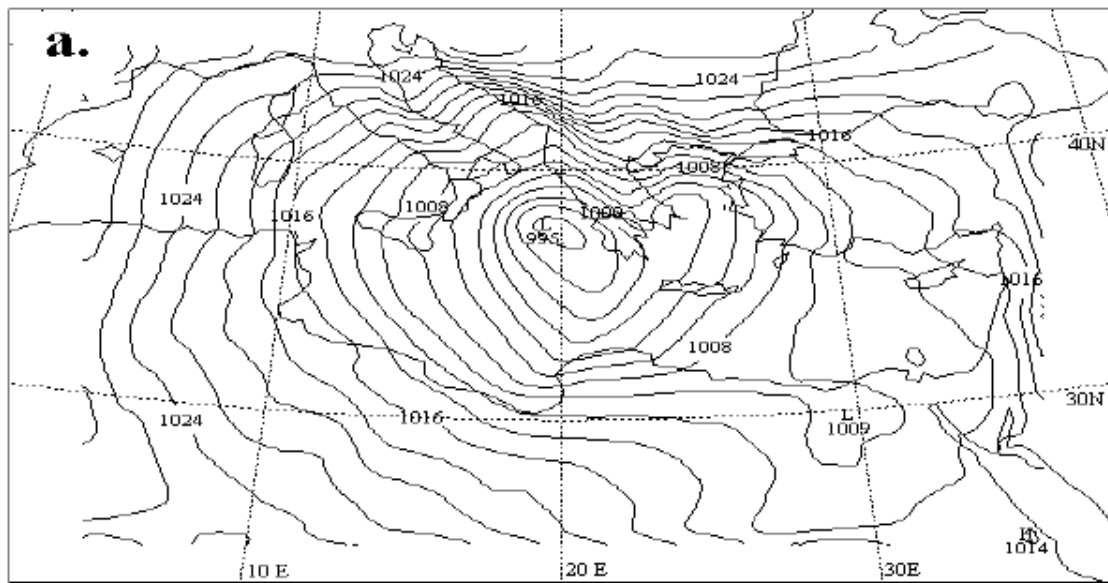
HIRLAM

Το μοντέλο Hirlam (High Resolution Limited Area Model) είναι ένα μοντέλο πρόγνωσης του καιρού σε μικρής κλίμακας περιοχή και για μικρό ορίζοντα πρόβλεψης. Σκοπός του είναι να αναπτύξει ένα σύστημα μετεωρολογικής πρόγνωσης που να παρέχει μεγάλης ακρίβειας αριθμητικές προβλέψεις καιρού και να είναι λειτουργικό για τα μέλη του. 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 μετεωρολογικά υπηρεσία εφαρμόζονται. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν οι μετεωρολογικές υπηρεσίες των χωρών Δανίας, Φιλανδίας, Ισλανδίας, Ιρλανδίας, Ολλανδίας, Νορβηγίας, Ισπανίας και Σουηδίας, καθώς και η Meteo-France. Το HIRLAM δίνει μεγάλο ενδιαφέρον στη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Κάθε διαδικασία που σχετίζεται με την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες σε υψηλή ανάλυση. Για παράδειγμα, στην παραμετροποίηση της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας, μπορούν να προκύψουν καταστάσεις όπου η μετάδοση ακτινοβολίας σε γειτονικά κουτιά του πλαισίου μπορεί να συμβάλλει σε τοπικές θερμικές κινήσεις του αέρα. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται για αναλύσεις μικρότερες από 10 Km και δεν έχουν αντιμετωπιστεί πλήρως από το HIRLAM. Το HIRLAM παρέχει αναλύσεις με τη μέθοδο σημείων πλέγματος και με την φασματική μέθοδο ^{[28],[29]}.

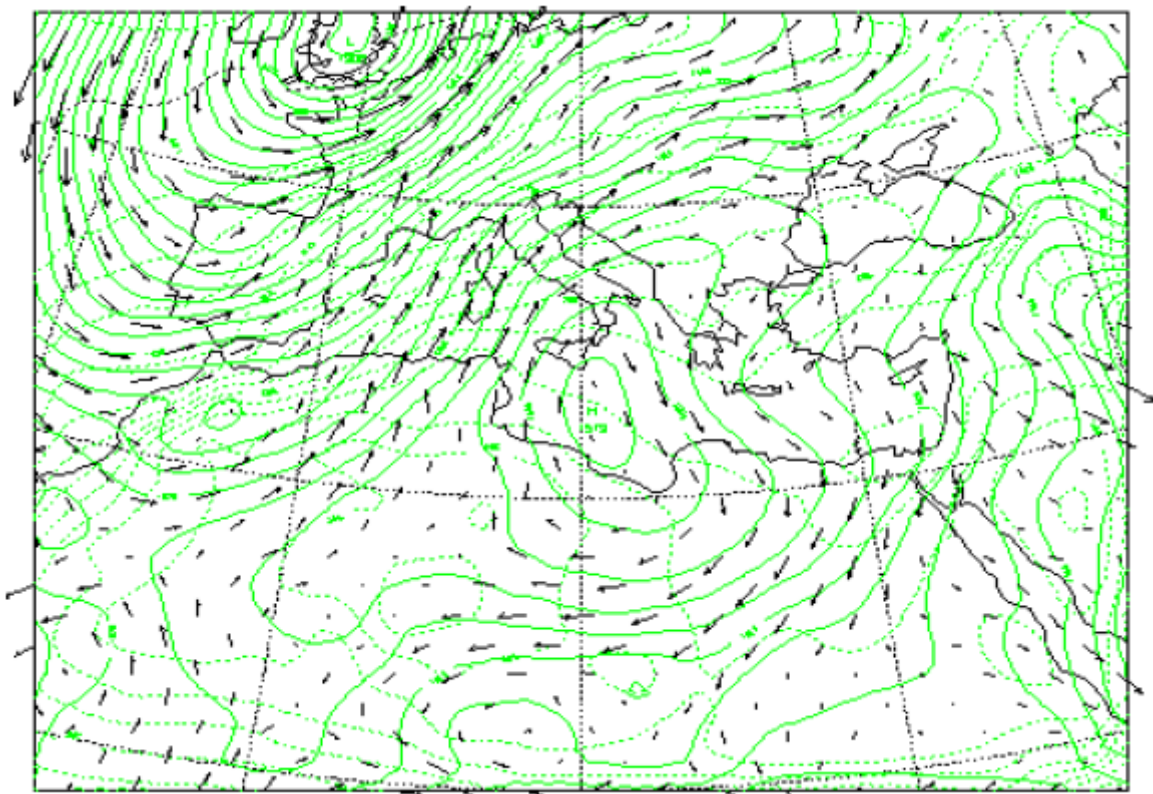
SKIRON

Το μετεωρολογικό σύστημα SKIRON αναπτύχθηκε από στο Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας με σκοπό την εφαρμογή του στην Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EEMY) για την τοπική πρόγνωση καιρού στην περιοχή της Μεσογείου. Είναι ένα αξιόπιστο υπολογιστικό σύστημα το οποίο παράγει προβλέψεις καιρού και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το SKIRON είναι η εξέλιξη του μοντέλου Eta το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου με σκοπό την πρόγνωση του καιρού σε περιοχές με απότομη κλίση βουνά. Το Eta μοντέλο έχει σχεδιαστεί ως ένα υδροστατικό μοντέλο που χρησιμοποιεί στοιχειώδεις εξισώσεις βασισμένες σε υδροστατική προσέγγιση. Συνεπώς η καλύτερη οριζόντια ανάλυση που μπορεί να εκτελεστεί είναι περίπου 5-10 Km. Μέσω του ερευνητικού προγράμματος SKIRON, το μοντέλο Eta επεκτάθηκε ώστε να μπορεί να προβλέπει την παραγωγή και διασπορά της ατμοσφαιρικής σκόνης καθώς και άλλες μορφές ρύπανσης. Συνοπτικά ένα μοντέλο αναπτύχθηκε που να εκτελείται πλήρως αυτόματα και να παρέχει ένα κατάλληλο περιβάλλον για επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμών για την εκτέλεση του μοντέλου Eta. Ο βασικός σκοπός του ερευνητικού προγράμματος ήταν η δημιουργία ενός υπολογιστικά ευέλικτου μοντέλου που να παράγει προβλέψεις ιδιαίτερα για τοπικές συνθήκες καιρού. Το σύστημα SKIRON περιέχει και ένα μοντέλο γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων. Αυτό χρησιμοποιεί εξόδους από διάφορα εργαλεία, με τρισδιάστατες και τετραδιάστατες απεικονίσεις. Επίσης, παρέχει τα αποτελέσματά του σε μορφή *derpi* (*derpi format*). Τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου χρησιμοποιούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού με τη μορφή αυτή κειμένου. Τις αρχικές και οριακές συνθήκες τις λαμβάνει από την ECMWF οι οποίες ανανεώνονται κάθε τρεις ώρες. Η συχνότητα ενημέρωσης των μετεωρολογικών προβλέψεων είναι μια φορά τη

μέρα και η πρόγνωση καλύπτει τις επόμενες 72 ώρες. Το SKIRON τρέχει καθημερινά και για αυτό χρειάζονται 16 επεξεργαστές^[30].



(α)



(β)

Σχήμα 2.8 Προβλέψεις του SKIRON: (α) Πίεση στο επίπεδο της θάλασσας σε ισοβαρείς καμπύλες σχεδιασμένες κάθε 2 hPa στις 12 UTC 14 Ιανουαρίου 2005
(β) άνεμος και γεωδυναμικό 850hPa στις 12 UTC 4 Ιουλίου 2005

ALADIN

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ALADIN (Limited Area, dynamical Adaptation, International Development) είναι ένα λειτουργικό υδροστατικό μοντέλο με ημί-λανγρανζιανό πλαίσιο εξισώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από επιμέρους τμήματα που περιγράφουν τις διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες όπως τον στροβιλισμό, τις επιρροές της ορεογραφίας και της βαρύτητας, λεπτομερή ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας, την κίνηση των σύννεφων και την ακτινοβολία. Η οριζόντια ανάλυση του πλέγματος είναι 10 Km και ενώ γίνεται ανάλυση σε 41 κάθετα επίπεδα. Το μοντέλο ALADIN αναβαθμίζει τις προβλέψεις του 4 φορές την ημέρα, που καλύπτουν την περίοδο των επόμενων δύο ημερών ^[31].

2.4.6 Το μοντέλο ECMWF

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών των καιρικών μεταβλητών, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο νευρωνικό δίκτυο, είναι το E.C.M.W.F (European Center Meteorological Weather Forecasts) και χρησιμοποιείται από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Στο E.C.M.W.F. τρέχουν δύο “φόρμες”. Η μία παράγει παγκόσμιες αναλύσεις για τέσσερις κύριες συνοπτικές ώρες στις 00, 06, 12 και 18UTC και δεκαήμερες προγνώσεις βασισμένες στην ανάλυση των 12UTC. 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 συγκεκριμένη υγρασία. Αυτές οι βασικές παράμετροι μετατρέπονται σε άλλες ατμοσφαιρικές παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι υπολογίζονται για ένα χρονικό διάστημα 3 ωρών από 3 έως 72 ώρες και κάθε 6 ώρες από 72 έως 240 ώρες βασισμένες στα στοιχεία των 12 UTC. ^[20]

2.4.6.1 Οι εξισώσεις του μοντέλου

Από τις έξι εξισώσεις που επικρατούν στις πρωτογενείς εξισώσεις του ατμοσφαιρικού μοντέλου E.C.M.W.F., οι δύο από αυτές είναι διαγνωστικές και εκφράζουν την στατική σχέση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων:

Ο **Νόμος Αερίων** δίνει την σχέση μεταξύ πίεσης, πυκνότητας και θερμοκρασίας.

Η **Υδροστατική Εξίσωση** δείχνει την σχέση μεταξύ της πυκνότητας του αέρα και της αλλαγής της πίεσης με το ύψος.

Οι άλλες τέσσερις εξισώσεις είναι προγνωστικές και περιγράφουν τις αλλαγές με το χρόνο των συνιστωσών του οριζοντίου ανέμου, της θερμοκρασίας και της περιεκτικότητας υδρατμών σε ένα σωματίδιο του αέρα και της επιφανειακής πίεσης.

Η **Εξίσωση Συνέχειας** εκφράζει την διατήρηση της μάζας και καθορίζει την κάθετη ταχύτητα και την αλλαγή της πίεσης της επιφάνειας.

Η **Εξίσωση Κίνησης** περιγράφει πως η ορμή ενός μορίου του αέρα αλλάζει εξαιτίας της δύναμης βαροβαθμίδας και της δύναμης Coriolis. Σε αυτά επίσης συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις της τριβής της ανάμιξης και της διακοπής των βαρυτικών κυμάτων (gravity wave breaking).

Η **Θερμοδυναμική Εξίσωση** εκφράζει πως μεταβάλλεται η θερμοκρασία ενός σωματιδίου του αέρα από την αδιαβατική ψύξη ή θέρμανση που υπόκειται εξαιτίας των κάθετων μετατοπίσεων. Άλλες φυσικές διαδικασίες όπως η συμπύκνωση, η εξάτμιση, η μεταφορά της διαταραχής (turbulent transport) συμπεριλαμβάνονται όπως επίσης και οι επιδράσεις της ακτινοβολίας.

Η **Εξίσωση Διατήρησης για την Υγρασία** υποθέτει ότι η περιεκτικότητα υγρασίας ενός σωματιδίου του αέρα είναι σταθερή, εκτός από τις απώλειες που οφείλονται στον υετό και στην συμπύκνωση ή τα “κέρδη” από την εξάτμιση από τα νέφη και βροχή ή από τους ωκεανούς και τα ηπειρωτικά. Σε αυτό το κομμάτι πρέπει να προστεθεί ότι υπάρχουν συγκεκριμένες προγνωστικές εξισώσεις για το κλάσμα των νεφών (cloud fraction), το νερό, την περιεκτικότητα πάγου και το όζον.

Η απελευθέρωση λανθάνουσας θερμότητας, η ακτινοβολία από τον ήλιο και την επιφάνεια της γης, οι διαδικασίες τριβής ή ανάμιξης (διάχυση) οι οποίες διέπονται από τις βασικές εξισώσεις, εξαιτίας της μικρής τους κλίμακας, περιγράφονται με στατιστικό τρόπο ως διαδικασίες παραμετροποίησης.^[6]

2.4.6.2 Χωρική και χρονική Ανάλυση

Το παρόν σύστημα χρησιμοποιεί μια χρονική ανάλυση των 15 λεπτών. Το υπολογιστικό χρονικό βήμα έχει επιλεγεί με σκοπό να αποφευχθούν οι αριθμητικές αστάθειες και να εξασφαλιστεί η ακρίβεια. Η κάθετη ανάλυση (υπολογισμένη σε γεωδυναμικό ύψος) είναι μεγαλύτερη στο πλανητικό οριακό στρώμα και μικρότερη στην στρατόσφαιρα και στα χαμηλά ύψη της μεσόσφαιρας.

Η ατμόσφαιρα χωρίζεται σε 60 επίπεδα μέχρι το 0.1 hPa (περίπου 64 km). Αυτά ονομάζονται σ – levels τα οποία ακολουθούν την επιφάνεια της γης στην χαμηλότερη και στην μέση τροπόσφαιρα και χρησιμοποιούνται ως s κάθετα συστήματα συντεταγμένων (s vertical coordinates) αλλά είναι επιφάνειες σταθερής πίεσης στην ανώτερη τροπόσφαιρα και στην μεσόσφαιρα. Για την οριζόντια ανάλυση του μοντέλου, το E.C.M.W.F. χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές αριθμητικές απεικονίσεις.

Επίσης χρησιμοποιείται μια απεικόνιση διακριτών σημείων για τον υπολογισμό των δυναμικών τάσεων και των διαβατικών φυσικών παραμετροποιήσεων. Ονομάζεται πλέγμα Gaussian (Gaussian grid), το οποίο είναι κανονικό στο γεωγραφικό μήκος και σχεδόν κανονικό στο γεωγραφικό πλάτος (Hortal και Simmons, 1991). Εξαιτίας της σύγκλισης των γεωγραφικών μηκών προς τους πόλους, η απόσταση ανατολής – δύσης μεταξύ των διακριτών σημείων μειώνεται κινούμενο προς τους πόλους. Για να αποφευχθούν αριθμητικά προβλήματα γύρω από τους πόλους, αλλά κυρίως για εξοικονόμηση

υπολογιστικού χρόνου, ένα “μειωμένο” πλέγμα Gaussian παρουσιάστηκε το 1991 με την μείωση των διακριτών σημείων κατά μήκος των μικρότερων γραμμών γεωγραφικού πλάτους κοντά στους πόλους, έτσι ώστε να διατηρηθεί ο διαχωρισμός ανατολή – δύση μεταξύ σημείων διαφορετικών γεωγραφικών πλατών σχεδόν σταθερός. Με την υπάρχουσα ανάλυση το πλέγμα είναι παρόμοιο με ένα κανονικό πλέγμα Gaussian μεταξύ 24N και 24S. Η επιφάνεια του μοντέλου είναι χωρισμένη σε θαλάσσια και χερσαία σημεία, με την χρησιμοποίηση μιας διεπαφής ξηράς – θάλασσας (land – sea mask). Ένα διακριτό σημείο ορίζεται ως χερσαίο αν παραπάνω από το 50% της πραγματικής επιφάνειας του “κουτιού” του πλέγματος (grid box) είναι ξηρά. Με την ανάλυση του TL511, νησιά όπως η Κορσική, η Κρήτη και η Κύπρος αντιπροσωπεύονται από περίπου 5 διακριτά σημεία ξηράς, ενώ η Μαγιόρκα από δύο. Τα νησιά Φερόε και η Ρόδος δεν αντιπροσωπεύονται από κάποιο σημείο ξηράς. Η μόνη κύρια λίμνη η οποία απεικονίζεται από θαλάσσιο σημείο είναι η Βάνερν (Vanern) στην βόρεια Σουηδία.

2.4.6.3 Παραμετροποίηση των φυσικών διεργασιών

Η βασική συνάρτηση των προγνωστικών παραμέτρων στο μοντέλο E.C.M.W.F., διαμορφώνει την επίδραση τους στην συνολική ατμοσφαιρική ροή. Μια ολοκλήρωση των 10 ημερών απαιτεί να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις με σχετικά μεγάλη χρονική κλίμακα ακόμα και την πλέον “δυσδιάκριτη” όπως είναι η εξάτμιση από την βλάστηση με σκοπό να αναπαρασταθεί η ροή με περισσότερη ακρίβεια. Οι διαφορετικές χρονικές κλίμακες και οι μηχανισμοί ανάδρασης μεταξύ διάφορων διαδικασιών κάνουν τους υπολογισμούς πολύ σύνθετους και χρονοβόρους

Η απεικόνιση της ορεογραφίας χρησιμοποιεί τη μέση ορεογραφία και τέσσερα πρόσθετα πεδία περιγράφοντας την απόκλιση, τον προσανατολισμό, την ανισοτροπία και την ορεογραφία υποπλέγματος. Το παραπάνω συμβάλει στη μεταβλητότητα της ορεογραφίας, χωρίς να αλλάζει το γεγονός ότι για την χρησιμότητα των μετεωρολογικών παραμέτρων, η ορεογραφία του μοντέλου είναι πιο ομαλή από ότι είναι στην πραγματικότητα. Η παραμετροποίηση επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της τριβής που προκαλείται από τα βουνά, η οποία είναι σημαντική για την δημιουργία ατμοσφαιρικών στροβιλισμών μεγαλύτερης κλίμακας. Ένα καινούργιο και σημαντικό τμήμα του σχεδίου είναι ότι, βασισμένο σε δυναμικά κριτήρια, μπορεί να εμποδιστεί η ροή στα χαμηλά επίπεδα παρά να αναγκαστεί ο αέρας να κινηθεί πάνω από την ορεογραφία.^[6]

Η αντιμετώπιση του πλανητικού οριακού στρώματος (Planetary Boundary Layer) παίζει πρωταρχικό ρόλο για ολόκληρο το σύστημα ατμόσφαιρα – γη. Δημιουργείται μέσω των ανταλλαγών της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας της ορμής, της θερμότητας και της υγρασίας οι οποίες κάνουν την ατμόσφαιρα να τροποποιείται διαφορετικά όταν κινείται πάνω από μια τραχιά έκταση ή πάνω από μια λεία θάλασσα (Beljaars και Viterbo, 1993). Τα 13 χαμηλότερα επίπεδα βρίσκονται περίπου 10, 30, 60, 100, 160, 240, 340, 460, 600, 760, 950, 1170, και 1400m πάνω από την επιφάνεια του μοντέλου. Ακόμα και με αυτή την λεπτομερή ανάλυση οι κάθετες βαθμίδες της θερμοκρασίας, του ανέμου, της υγρασίας κ. α. στο πλανητικό οριακό στρώμα δεν μπορούν να περιγραφούν με μεγαλύτερη ακρίβεια, αγνοώντας τις τυρβώδεις μεταφορές της ορμής, της θερμότητας και της υγρασίας. Για την εκτίμηση αυτών των παραμέτρων το μοντέλο χρησιμοποιεί μεταβλητές μεγαλύτερης κλίμακας όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία και η συγκεκριμένη υγρασία, με την υπόθεση ότι οι μεταφορές είναι ανάλογες με τις κάθετες βαθμίδες.

Σε ό,τι αφορά τη σημασία της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας των νεφών στις μεγάλες και μικρές χρονικά διαδικασίες, το E.C.M.W.F. έχει δώσει μεγάλη έμφαση στην αντιμετώπιση της απορρόφησης και της σκέδασης από τα νέφη της ηλιακής ακτινοβολίας και της αντίστοιχης της επιφάνειας. Περίπου το 15% του συνολικού υπολογιστικού χρόνου χρησιμοποιείται για την ακτινοβολία. Το φάσμα της ακτινοβολίας χωρίζεται σε οκτώ μπάντες συχνοτήτων: δύο στο φάσμα των κυμάτων μικρού μήκους [απευθείας από τον ήλιο και ακτινοβολία διάχυσης και 15 στο φάσμα των κυμάτων μεγάλου μήκους (από την γη και μέσα στην ατμόσφαιρα)]. Η ανοδική και η καθοδική ακτινοβολία διάχυσης υπολογίζονται για κάθε μία από τις 16 φασματικές μπάντες. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την εκπομπή και την απορρόφηση είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η υγρασία, η νεφοκάλυψη και η περιεκτικότητα νερού στο νέφος, το διοξείδιο του άνθρακα, όζον, μεθάνιο, πρωτοξειδίο του αζώτου, CFC – 11 και CFC – 12. Το σχέδιο για την ακτινοβολία έχει δημιουργηθεί έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη λεπτομερώς οι αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας των νεφών. Για “συννεφιασμένα” διακριτά σημεία, οι υπολογισμοί γίνονται τόσο για αίθριες όσο και για νεφοσκεπείς συνθήκες και η συνολική ποσότητα προκύπτει σύμφωνα με την προγνωστική ποσότητα νεφών.

Ο κύριος σκοπός του σχεδίου για τα νέφη είναι να παράγει δεδομένα εισόδου στους υπολογισμούς της ακτινοβολίας και να υπολογιστεί η κατακρήμνιση. Τα νέφη δημιουργούνται από ανοδικές κινήσεις μεγάλης κλίμακας, τη μεταφορά των cumulus (είδη νεφών), τις διαταραχές στο οριακό στρώμα και την ψύξη από ακτινοβολία. Διαλύονται από την εξάτμιση που οφείλεται στις καθοδικές κινήσεις μεγάλης κλίμακας, τη θέρμανση από ακτινοβολία και την τύρβη τόσο στις κορυφές των νεφών όσο και στις πλευρές του, καθώς και από φαινόμενα κατακρήμνισης. Το σχέδιο για τα νέφη είναι μοναδικό στην αντιμετώπιση των κύριων διαδικασιών που σχετίζονται με τα νέφη, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η πρόγνωση του λόγου των νεφών και της περιεκτικότητας νερού / πάγου μέσα σε αυτά, να γίνεται με τις δικές τους προγνωστικές εξισώσεις.^[20]

2.4.6.4 Παρακολούθηση του συστήματος αφομοίωσης

Το E.C.M.W.F. δίνει μεγάλη έμφαση στην παρακολούθηση του δικτύου παρατήρησης. Η διερεύνηση μιας “κακής” πρόγνωσης γίνεται με την απάντηση των τριών παρακάτω ερωτημάτων:

- Πότε εισήλθε το σφάλμα στην ανάλυση;
- Που εισήλθε;
- Τι προκάλεσε το σφάλμα;

Για να καθοριστεί η γεωγραφική γέννηση του σφάλματος, διάφοροι μέθοδοι εμπειρικοί ως και αντικειμενικοί έχουν αναπτυχθεί, όπως λανθασμένοι προγνωστικοί χάρτες, ανάλυση ευαισθησίας και διαταραχές EPS (Ensemble Perturbation System). Η ταχύτητα αυτής της μεταφοράς καθορίζεται από την ανώτερη τροποσφαιρική ροή. Για μια ταχύτητα 30m/s υπάρχει μια ανταπόκριση 30°/ ημέρα στο γεωγραφικό πλάτος των 45°, η οποία συμφωνεί με τους θεωρητικούς υπολογισμούς για τη διάδοση των κυμάτων Rossby. Σε ένα λανθασμένο χάρτη αυτό εμφανίζεται ως αρχικό σφάλμα το οποίο θα κινηθεί αργά καθοδικά, ενώ θα παράγει ένα κύμα με την αύξηση του γεωγραφικού μήκους. Η μεγάλη

ταχύτητα της επίδρασης σημαίνει ότι μια πρόγνωση τριών ημερών για την Ευρώπη εξαρτάται από μια μεγάλη επέκταση στις αρχικές συνθήκες πάνω από ολόκληρο το Β. Ατλαντικό. Μια πρόγνωση πέντε ημερών εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες πάνω από τη Β. Αμερική και μια πρόγνωση επτά ημερών από τις αρχικές συνθήκες πάνω από το Β. Ειρηνικό. Το καλοκαίρι η διάδοση της επιρροής είναι λίγο πιο αργή.^[6]

2.4.7 Αξιολόγηση της επίδοσης των Αριθμητικών προβλέψεων καιρού

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 10-ήμερων 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 80, παρατηρούμε ότι στις παρούσες 5ήμερες προβλέψεις υπάρχει μια αύξηση κέρδους του μεγέθους των 2 ημερών στην προβλεψιμότητα σε σύγκριση με τις 3ήμερες προβλέψεις του '80 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).

Διάφοροι συγγραφείς έχουν κατά καιρούς προσπαθήσει να βρουν διαφορετικούς τρόπους αξιολόγησης των συστημάτων, με σκοπό τη βελτίωση των νέων μοντέλων υψηλής ανάλυσης. Το 2004 οι Case et al.^[35] ανέπτυξαν μια τεχνική για την επιβεβαίωση των προβλέψεων υψηλής ανάλυσης του RAMS μοντέλου όσον αφορά τις θαλάσσιες αύρες, χρησιμοποιώντας έναν Περιγραμματοεικό Χάρτη Σφαλμάτων για τον εντοπισμό των χρόνων εναλλαγής των θαλάσσιων αυρών και για μια υποκειμενική σύγκριση των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων δεικτών. Από την άλλη, οι Rife et al.^[32] μελέτησαν τις προβλέψεις ανέμων χαμηλού ύψους κατά τη διάρκεια των Χειμερινών Ολυμπιακών Αγώνων στο Salt Lake City (2002) χρησιμοποιώντας τέσσερα μοντέλα (ETA, Rapid Update Cycle-2[RUC-2], GFS, MM5). Συνολικά, κατέληξαν ότι τα μοντέλα με την υψηλή ανάλυση δεν παρείχαν καλύτερα σημειακά σφάλματα, παρ' όλο που προσέφεραν μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση των ρευμάτων αέρα σε αντίθεση με τα μοντέλα χαμηλής ανάλυσης. Γι' αυτό πρότειναν μια νέα μεθοδολογία η οποία ασχολιόταν με την στατιστική των «γεγονότων του ανέμου», τα οποία ορίζονται σαν αλλαγές στο διάνυσμα του ανέμου πάνω από ένα σημείο κατωφλίου σε συγκεκριμένο σημείο του πλέγματος. Επιπλέον, οι Mass et al.^[33] ύστερα από

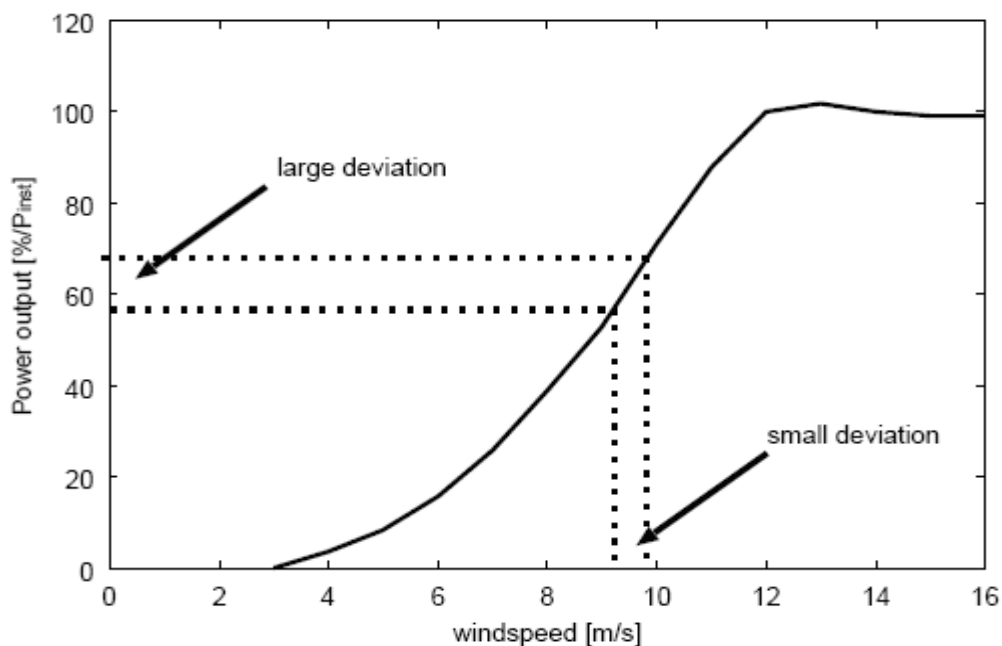
προβλέψεις δύο χρόνων με το MM5 μοντέλο στις βορειοδυτικές Η.Π.Α. κατέληξαν ότι η στατιστική επαλήθευση είναι, κατά βάση, υποκειμενική ανάλογα με το χρήστη. Μερικοί χρήστες ενδιαφέρονται για την πρόβλεψη συγκεκριμένων φαινομένων, όπως π.χ. ανέμους πάνω από ένα σημείο κατωφλίου, ενώ άλλοι ενδιαφέρονται για πιο λεπτομερείς χρονοσειρές. Τέλος, οι Gritmit και Mass^[34], χρησιμοποιώντας ένα συνονθύλευμα οριακών συνθηκών από διαφορετικά κέντρα πρόβλεψης, τα οποία χρησιμοποιούσαν διαφορετικά παγκόσμια μοντέλα και κώδικες αφομοίωσης δεδομένων, έκαναν μια βμηνη πρόβλεψη με το MM5 μοντέλο στις βορειοδυτικές Η.Π.Α. όπου βρήκαν σημαντική συσχέτιση (πάνω από 60%) μεταξύ του πλάτους της πρόβλεψης, του σφάλματος πρόβλεψης στη διεύθυνση του ανέμου και στην εκτιμώμενη αβεβαιότητα της πρόβλεψης. Παρ' όλα αυτά, όμως, βρήκαν ότι η συνολική μέση τιμή δεν παρείχε καλύτερα αποτελέσματα όταν συγκρινόταν με μεμονωμένα μέλη του συνόλου.

2.4.8 Η επίδραση του σφάλματος των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου

Οι προβλέψεις του ανέμου για χρήση σε εφαρμογές αιολικής ενέργειας βασίζονται περισσότερο στην ταχύτητα του ανέμου και στην κατεύθυνσή του στα 50 με 100m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, στην κορυφή του επιπέδου του ατμοσφαιρικού στρώματος και μόνο λίγο στην πρόβλεψη της πυκνότητας του αέρα. Εξαιτίας των συναρτήσεων μεταφοράς των διαθέσιμων ανεμογεννητριών, με καμπύλη ισχύος την παρακάτω, η μετατροπή της διαθέσιμης αιολικής ισχύος (η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου εις τον κύβο) σε πραγματική ισχύ μεταβάλλεται μη γραμμικά, με μηδενική έξοδο κάτω από ένα κατώφλι ταχύτητας στα 3 m/s, μια ξαφνική αύξηση στην έξοδο μέχρι η μηχανή να αποκτήσει την ονομαστική της ισχύ στα 15 m/s περίπου και μια σταθερή έξοδο πάνω από αυτό το επίπεδο, μέχρι την ταχύτητα αποκοπής στα 25 m/s.

Επειδή οι γεννήτριες σε ένα αιολικό πάρκο (Α.Π.) μπορεί να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους είτε από τις αναταράξεις κατά την εκκίνησή τους είτε εξαιτίας των τοπικών τοπογραφικών φαινομένων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, οι συναρτήσεις μεταφοράς ενός Α.Π. μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Από την άλλη μεριά, οι γεννήτριες χρειάζονται ένα σημαντικό χρονικό περιθώριο ώστε να ευθυγραμμιστούν με τον άνεμο που επικρατεί, ειδικά όταν θα πρέπει να σταματήσουν ενώ έχουν ήδη αποκτήσει την μέγιστη ταχύτητά τους σε μια κατεύθυνση. Γι' αυτό και η αιολική ισχύς είναι επίσης συνάρτηση της μεταβολής της κατεύθυνσης του ανέμου και επιπλέον, η λειτουργία των γεννητριών μπορεί να επηρεαστεί από μικρές αναταράξεις του ανέμου.

Εξαιτίας της μη-γραμμικότητας των συναρτήσεων μεταφοράς, τα σφάλματα στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου έχουν σοβαρές επιπτώσεις. Τα σφάλματα σε χαμηλές ταχύτητες είναι αδιάφορα αφού ούτως ή αλλιώς η έξοδος εκεί είναι μηδενική όπως επίσης και τα σφάλματα στην περιοχή μεταξύ 12 και 25 m/s όπου η έξοδος είναι ευθεία και σταθερή, εκτός βέβαια και αν λάβουμε υπ' όψιν τις αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου ή την ένταση των αναταράξεών του. Τα σφάλματα, όμως, στις μεσαίες ταχύτητες (3-12 m/s) και κοντά στην ταχύτητα αποκοπής (25 m/s) έχουν τις σημαντικότερες επιπτώσεις αφού, στην πρώτη περίπτωση, το παραμικρό σφάλμα στην ταχύτητα μπορεί να προκαλέσει μεγάλο σφάλμα στην ισχύ και στην δεύτερη περίπτωση, ακόμα χειρότερα, το σύστημά μας μεταβαίνει από την κατάσταση όπου έχει αποκτήσει την μέγιστη έξοδο σε κατάσταση μηδενικής εξόδου (ή αντίστροφα).^[22]



Σχήμα 2.8: Καμπύλη ισχύος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας και αποκλίσεις. Για μικρή μεταβολή ταχύτητας ανέμου έχουμε μεγάλη μεταβολή στην παραγωγή ισχύος.

Η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια της γης και η κατεύθυνσή του επηρεάζονται από τα τοπογραφικά φαινόμενα σε διαφορετικό βαθμό, γεγονός που κάνει την ανάλυση της πρόβλεψης του ανέμου ιδιαίτερος σχετική. Τα επιφανειακά προφίλ εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η τραχύτητα και η στατική σταθερότητα και κατά συνέπεια, οι προβλέψεις των ανέμων χαμηλού ύψους αναμένεται να επηρεάζονται από τις παραμέτρους των οριακών στρωμάτων σε ένα μοντέλο αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Από την άλλη, οι άνεμοι χαμηλού υψομέτρου μπορεί να ενισχύονται από ετερογένειες στην επιφανειακή θερμοκρασία προκαλούμενες από σημαντικές αποκλίσεις στις ιδιότητες του εδάφους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων ελαφρών ρευμάτων αέρα, το οποίο δείχνει τη σχετικότητα του επιφανειακού μοντέλου.

Περιγραφή των ευρύτερα διαδεδομένων μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

3.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι απαραίτητη έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η διαχείριση και η ενσωμάτωσή της στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο. Συνεπώς, ερευνητικά κέντρα και εταιρείες έχουν επενδύσει κατά τις τελευταίες δεκαετίες, στην ανάπτυξη των μεθόδων και των λειτουργικών εργαλείων, οδηγώντας σε μια πληθώρα μοντέλων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής. Τα εργαλεία αυτά χαρακτηρίζονται από τον ορίζοντα της πρόβλεψης (μερικά λεπτά, ώρες ή ημέρες), τις υπολογιστικές μονάδες και την επιθυμητή ακρίβεια. Κοινό χαρακτηριστικό των ποικίλων μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος που έχουν αναπτυχθεί, είναι η χρήση αποτελεσμάτων από τη μετεωρολογία και τις Αριθμητικές Προβλέψεις Καιρού που αναλύθηκαν προηγουμένως.

Με τον όρο μοντέλο θεωρούμε μια μαθηματική αναπαράσταση της πραγματικότητας. Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να διακριθούν σε διάφορες κατηγορίες. Τα απλά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στην κλιματολογία και σε μετρήσεις προηγούμενων ετών, ονομάζονται μοντέλα αναφοράς και είναι εύκολο να εφαρμοστούν. Τέτοια μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα σύγκρισης. Επίσης, υπάρχουν τα εξελιγμένα μοντέλα, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τις μελέτες που γίνονται για τη μετάβαση από τις μετεωρολογικές προβλέψεις στην αναμενόμενη παραγωγή αιολικής ισχύος. Η πρώτη περίπτωση είναι η λεγόμενη φυσική προσέγγιση, που επικεντρώνεται στην περιγραφή της ροής του ανέμου στην περιοχή που βρίσκεται το αιολικό πάρκο αλλά και γύρω από αυτή. Η δεύτερη είναι η στατιστική προσέγγιση που μοντελοποιεί τα ιστορικά δεδομένα και τις μετεωρολογικές προβλέψεις με την παραγόμενη ισχύ, χωρίς να γίνονται υποθέσεις για τα φυσικά φαινόμενα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή των προσεγγίσεων που χρησιμοποιούν τα ευρύτερα διαδεδομένα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, καθώς επίσης αναλύονται οι θεμελιώδεις αρχές που ακολουθούν. Τέλος, γίνεται αναφορά στα πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

3.2 Χρονικοί ορίζοντες των μοντέλων πρόβλεψης

Η παραγωγή αιολικής ισχύος που προβλέπεται στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή t για μια χρονική στιγμή $t+k$ είναι η μέση ισχύς $P_{t+k|t}$ που αναμένεται να παράγει ένα αιολικό πάρκο σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα αν λειτουργούσε υπό συνεχή σταθερό άνεμο ^[1]. Οι προβλέψεις γίνονται για ένα χρονικό ορίζοντα T , δείχνοντας το συνολικό μέγεθος της περιόδου προβλέψεως (π.χ. 72 ώρες μπροστά) στο μέλλον. Η χρονική ανάλυση της πρόβλεψης υποδηλώνεται από το χρονικό βήμα k , το οποίο είναι σχετικό με το μέγεθος του χρονικού ορίζοντα. Τα περισσότερα συστήματα πρόβλεψης παρέχουν πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος από 0 έως 72 ώρες και με ανάλυση μιας ώρας. Η προβλεπόμενη ποσότητα είναι μέση ωριαία τιμή αιολικής παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι πολύ σημαντικός, διότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις λεγόμενες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, κλίμακας ορισμένων ημερών και στις πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, τάξης λίγων ωρών. Ενώ μακρύτερες περίοδοι περιγράφονται καλύτερα από αριθμητικά συστήματα πρόβλεψης καιρού, τα οποία μοντελοποιούν λεπτομερώς τη δυναμική της ατμόσφαιρας, μικρότερα χρονικά διαστήματα κυριαρχούνται από μόνιμες μετεωρολογικές συνθήκες, όπου απλές στατιστικές προσεγγίσεις οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης.

Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κατηγοριοποιείται σε κάποια από τις 3 ακόλουθες κατηγορίες με κριτήριο το χρονικό της ορίζοντα:

- **Πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις** : Ο χρονικός τους ορίζοντας είναι μερικές ώρες, χωρίς να υπάρχει ωστόσο συμφωνία για τον αριθμό των ωρών. 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 τους ορίζοντας κυμαίνεται από το όριο των πολύ βραχυπρόθεσμων προβλέψεων μέχρι τις 48 ή 72 ώρες. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνουν οι προβλέψεις τέτοιου χρονικού ορίζοντα, με πιο άμεσα ενδιαφερόμενη την αγορά βασισμένη στην «επόμενη ημέρα». 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 γι' αυτό ένας 38ωρος χρονικός ορίζοντας 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), έτσι ο χρονικός ορίζοντας των προβλέψεων μπορεί να προσαρμοστεί ανάλογα. Οι προβλέψεις αυτές, ιδίως όταν ο ορίζοντας είναι 72 ώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για προγραμματισμούς συντήρησης.
- **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

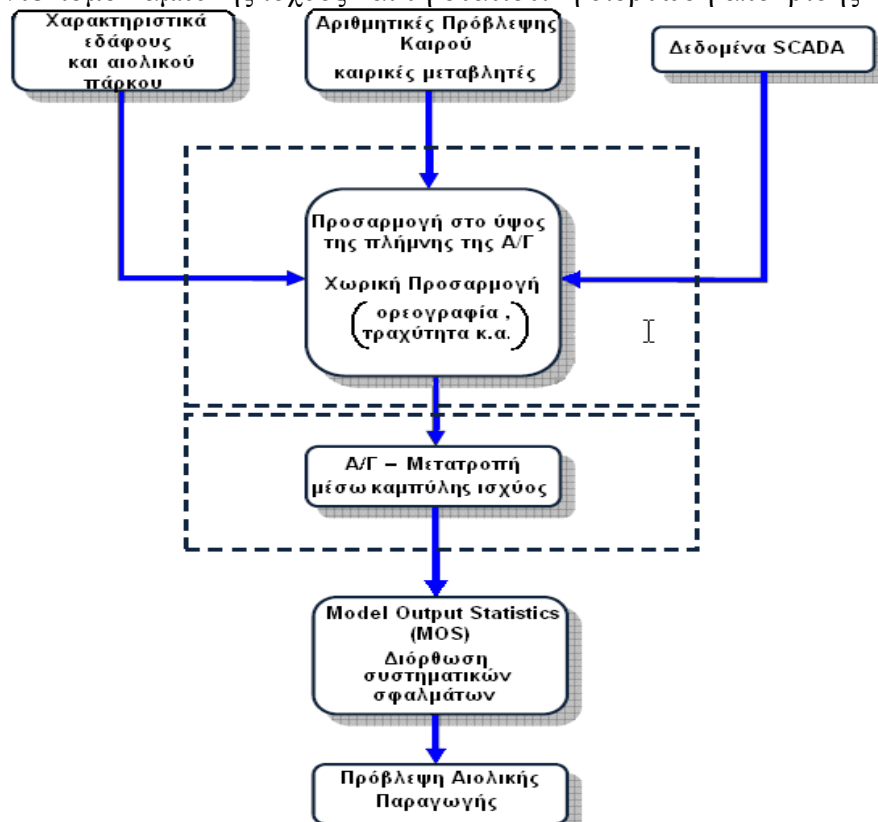
προβλέψεις αυτές ως εισόδους, είναι δυνατόν να προγραμματιστεί η συντήρηση και των γραμμών μεταφοράς αλλά και των αιολικών πάρκων. Οι μεσοπρόθεσμες προβλέψεις (3 έως 7 ημερών) για λειτουργικές χρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν, με μεμονωμένη χρήση μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού από μεγάλα κέντρα όπως το ECMWF, που αναφέρθηκε προηγουμένως.

3.3 Μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων

3.3.1 Γενικά

Τα μοντέλα φυσικών προσεγγίσεων για την πρόβλεψη της παραγωγής αιολικής ενέργειας, επικεντρώνονται στην περιγραφή της ροής του ανέμου γύρω και μέσα στο αιολικό πάρκο και 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 εμφολιασμένα σε κάποιο κομμάτι του οριζόντιου πλέγματος ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού και συνήθως αποτελούν 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).

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 ^[37].



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα παρουσίασης σταδίων μιας φυσικής προσέγγισης

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 ^[27]). Τα τελευταία εκτελούνται σε κάθε αναβάθμιση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ή 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) ^[1].

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, η θερμική διαστρωμάτωση κ.α., με σκοπό την αναγνώριση του λογαριθμικού προφίλ του ανέμου, δηλαδή τη μελέτη του στον κατακόρυφο άξονα. Στο σημείο αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμος και ο κώδικας της Υπολογιστικής Δυναμικής των Ρευστών (Computational Fluid Dynamics - CFD), ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού του πεδίου των ανέμων στο αιολικό πάρκο, λαμβάνοντας υπόψη μια πλήρη περιγραφή του εδάφους του πάρκου. Η απαιτούμενη είσοδος κατά το στάδιο της βαθμονόμησης συμπεριλαμβάνει μια λεπτομερή περιγραφή της τοπολογίας του πάρκου, της τραχύτητας του εδάφους της ορογραφίας κ.α. ^[27]

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.

Προκειμένου να υπολογίσουμε τα συστηματικά σφάλματα των προβλέψεων που θα μπορούσαν να αποδοθούν στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού ή την προσέγγιση της μοντελοποίησης που ακολουθούν ,οι μελετητές συχνά διεξάγουν στατιστικές διορθώσεις απόκρισης (MOS) για μετά-επεξεργασία των προβλέψεων ισχύος. Για ένα NWP μοντέλο οι στατιστικές σχέσεις μεταξύ ,των προβλεπόμενων από το μοντέλο, μεταβλητών και των παρατηρούμενων καιρικών μεταβλητών χρησιμοποιούνται τόσο για τη διόρθωση των πρώτων όσο και για πρόβλεψη άλλων μεταβλητών που δεν υπολόγιζε με σαφήνεια το μοντέλο. Οι μέθοδοι ,με χρήση πολυγραμμικών εξισώσεων, παράγουν προβλέψεις καιρικών μεταβλητών ,οι οποίες έως ένα βαθμό σχετίζονται με τα τυχαία ή συστηματικά σφάλματα των μοντέλων NWP. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι απαιτούν δεδομένα από μετρήσεις (online ή offline) και καλή ποιότητα δεδομένων .Στην συνέχεια ακολουθεί ένα πλήρες διάγραμμα των σταδίων και διαδικασιών μιας φυσικής προσέγγισης.

3.3.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων φυσικών προσεγγίσεων

Το πρώτο μοντέλο φυσικής προσέγγισης που θα περιγραφεί είναι το **Previento**, το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Oldenburg, της Γερμανίας. Το Previento χρησιμοποιεί δεδομένα NWP από το Localmodell (LM) της Γερμανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (DWD). Το Previento, με διάφορα υπο-μοντέλα, βελτιώνει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού μοντελοποιώντας τις τοπικές συνθήκες της περιοχής. Σύμφωνα με τον Moennich, το σημαντικότερο υπο-μοντέλο είναι αυτό για την ατμοσφαιρική σταθερότητα, καθώς τα μοντέλα για την ορογραφία και την τραχύτητα δεν οδηγούν πάντα σε βελτίωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των ανεμογεννητριών. 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 διασπαρμένα 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 συναρτηθεί 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^{[38],[39]}.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό είναι το **Prediktor**, που παρουσιάστηκε στην αρχική του μορφή από τον Landberg. 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 ταχύτητας 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^[34]. Αντίθετα, δεν περιλαμβάνει μονάδες που να περιγράφουν τα θερμικά φαινόμενα, όπως το φαινόμενο όρους/κοιλιάδας ή τη γέφυρα θάλασσα/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.^{[38],[39]}

Το **LocalPred** και το **RegioPred** είναι μια οικογένεια εργαλείων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε περίπλοκα εδάφη, που αναπτύχθηκαν από τον Marti 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 στατιστική και φυσική διαμόρφωση. 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 Α/Π αναφοράς^[40].

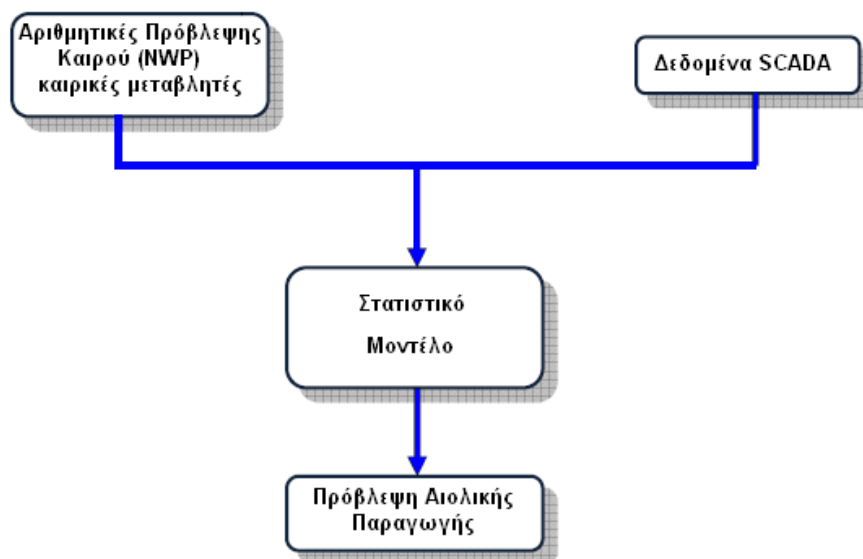
Το μοντέλο **Ewind**, που αναπτύχθηκε από την True Wind Inc, συνδυάζει τις φυσικές θεωρήσεις με στατιστικές μεθόδους. Το EWind χρησιμοποιεί αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι, ώστε να παρέχουν ακριβή πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου^[41]. 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 σ' 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 πχ. 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 και με αλυσίδες Markov. ^[42]

3.4 Μοντέλα στατιστικών προσεγγίσεων

3.4.1 Γενικά

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 και 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 κ.τ.λ., τα οποία είναι διαθέσιμα μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, και online μετρήσεις της αιολικής ισχύος, της ταχύτητας και της διεύθυνσης ανέμου κ.α. οι οποίες δίνονται από ένα σύστημα SCADA ^[1]. 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, όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα που ακολουθούν:



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα παρουσίασης σταδίων μιας στατιστικής προσέγγισης

Επί της ουσίας, για τη θεμελίωση μιας στατιστικής προσέγγισης, το κυρίαρχο μέλημα του ερευνητή είναι να βρει την πιο κατάλληλη συνάρτηση f , που να μεταφέρει τον χώρο του διανύσματος που περιγράφει την ατμοσφαιρική κατάσταση, στο χώρο της αιολικής ισχύος. Η επιλογή της συνάρτησης μεταφοράς f , καθώς και ο υπολογισμός των παραμέτρων της, πραγματοποιείται με τη συσχέτιση της χρονοσειράς των μετρήσεων της εξόδου του υπό μελέτη πάρκου με τις αντίστοιχες για κάθε χρονική στιγμή αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς f δέχεται ως είσοδο την περιγραφή της προβλεπόμενης ατμοσφαιρικής κατάστασης και την ανάγει σε αιολική παραγωγή. Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς f είναι μία συνάρτηση της ακόλουθης γενικής μορφής :

$$p_{t+k} = f(p_t, p_{t-1}, \mathbf{K}, p_{t-1}, x_t, x_{t-1}, \mathbf{K}, x_{t-m}, x_{t+k/t}) = f(\Phi_t) \quad (3.1)$$

Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα της στατιστικής προσέγγισης ανάγεται σε πρόβλημα προσαρμογής της παραπάνω μοντελοποίησης στα δεδομένα εισόδου του πάρκου (δεδομένα εκμάθησης) με σκοπό τη βέλτιστη επίτευξη σύνδεσης των μεταβλητών εισόδου με την προβλεπόμενη χρονοσειρά της αιολικής ισχύος. Η προσαρμογή αυτή ανάγεται λοιπόν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα στην ελαχιστοποίηση με επαναληπτική μέθοδο μιας συνάρτησης κόστους (Cost Function) που σχετίζεται με την απόδοση του στατιστικού μοντέλου. Η πιο συνηθισμένη συνάρτηση κόστους που εφαρμόζεται, είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος rms (root mean square), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$C(e_t) = rms(e_t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^N e_t^2} \quad (3.2)$$

,όπου e_t το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του μοντέλου ^[1].

Το στατιστικό μπλοκ μπορεί να περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα γραμμικά ή μη γραμμικά στατιστικά μοντέλα διαφορετικών τύπων. Κάποια παραδείγματα είναι τα αποκαλούμενα μοντέλα «μαύρου κουτιού», τα οποία συμπεριλαμβάνουν τα περισσότερα από τα βασισμένα στην τεχνητή νοημοσύνη μοντέλα, όπως για παράδειγμα τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks- NNs) ή SVMs (Support Vector Machines). Διαφορετικού τύπου μοντέλα, είναι τα μοντέλα «γκρι κουτιού», τα οποία εκπαιδεύονται εμπειρικά από ένα σύνολο δεδομένων και με οποιαδήποτε γνώση μπορεί να τους δοθεί (π.χ. ημερήσιες μεταβολές). Υπάρχουν επίσης μοντέλα με αναλυτικές εκφράσεις όπως τα μοντέλα παλινδρόμησης Kernel. Στα στατιστικά μοντέλα ενσωματώνεται και η αυτοπαλινδρόμηση, η οποία χρησιμοποιείται για να συλλάβει την παραμένουσα συμπεριφορά του ανέμου και ένα «μετεωρολογικό» τμήμα που αποτελείται από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των προβλέψεων από NWP μοντέλα. Η αυτοπαλινδρόμηση δίνει τη δυνατότητα σημαντικής ενίσχυσης της ακρίβειας των προβλέψεων για ορίζοντες χρόνου από 6 έως 10 ώρες μπροστά, γεγονός που σημαίνει ότι για το χρονικό αυτό διάστημα οι προβλέψεις από NWP μοντέλα δεν είναι τόσο σημαντικές ώστε να υπερνικήσουν την επιμονή του ανέμου (persistence) ^[27].

Σήμερα οι κύριες εξελίξεις στις στατιστικές προσεγγίσεις της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, εστιάζουν στη χρήση πολλαπλών μετεωρολογικών προβλέψεων (συνόλων) σαν συνδυασμό εισόδου και πρόβλεψης. Την ίδια στιγμή, οι σχεδιασμοί επίσης εστιάζουν στη

χρήση χωρικά διανεμημένων δεδομένων από μετρήσεις, για τη διόρθωση των σφαλμάτων των προβλέψεων (κυρίως φασικών σφαλμάτων) ή για την προειδοποίηση σε περίπτωση μεγάλης αβεβαιότητας.

3.4.2 Περιγραφή κυριότερων μοντέλων στατιστικών προσεγγίσεων

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. Οι μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν στο WPPT, είναι η τοπικά σταθμισμένη παλινδρόμηση (off-line) και η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (on-line).

Ένα άλλο μοντέλο είναι το **Sipreólico** 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 είσοδοι χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σε μη παραμετρικά στατιστικά μοντέλα, μαζί με διαφορετικές καμπύλες ισχύος. Υπάρχουν εννιά διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων: 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. Χρησιμοποιείται ένας αυτοπαλινδρομικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων και το φίλτρο Kalman (εκτιμητής του γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων). Τέλος, τα αποτελέσματα από τα 18 μοντέλα, συγκρίνονται και συναγωνίζονται το ένα το άλλο. 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^[43].

Το ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) σχεδίασε έναν αλγόριθμο που θα δίνει online υπολογισμούς της συνολικής παραγωγής ισχύος βασισμένος σε δεδομένα που συλλέγονται σε μερικά ενδεικτικά αιολικά πάρκα. Το μοντέλο ονομάστηκε Advanced Wind Power Prediction Tool (**AWPT**) και από το 2000 χρησιμοποιεί τις μετεωρολογικές προβλέψεις της Γερμανικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας (DWD) και νευρωνικά δίκτυα. Οι Ernst και Rohrig περιέγραψαν τη διαδικασία της πρόβλεψης, η οποία τους επέτρεψε την πρόβλεψη του 95% της συνολικής αιολικής ισχύος της Γερμανίας. Έγινε χρήση δεδομένων από 16 αιολικά πάρκα (συνολικά γύρω στα 425MW), που περνάνε μέσα από ένα κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο για να προκύψει η συνολική έξοδος, που είναι γύρω στα 3.2GW για όλα τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται στην περιοχή που έγιναν οι έρευνες (περίπου 5000 ανεμογεννήτριες).

Για την ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος, αναδρομικό πολυεπίπεδο αναγνωριστή υψηλής τάξης χρησιμοποίησε και ο Καρινιοτάκης^[40]. Η διαφορά αυτού του αναγνωριστή με του Sipreólico, είναι ότι οι κόμβοι ενός επιπέδου συνδέονται με τους κόμβους του ίδιου επιπέδου, μέσω του γινομένου τους. Το μοντέλο ονομάζεται **AWPPS** και

αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης LEMNOS, τέθηκε σε on-line λειτουργία στο νησί της Λήμνου και έδινε προβλέψεις για τις επόμενες 12 ώρες, χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος^[37]. Σε μία επόμενη δημοσίευση του ιδίου, συγκρίνονται τα μοντέλα ARMA, νευρωνικά δίκτυα wavelet, πολυεπίπεδοι αναγνωριστές, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης και μοντέλα ασαφούς λογικής. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι τα μοντέλα ασαφούς λογικής αποδίδουν καλύτερα. Η μελέτη αυτή έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος CARE, που είχε σκοπό τη δημιουργία και ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και την εγκατάστασή τους στην Κρήτη και στη Μαδέρα της Ισπανίας^[44]. Τα μοντέλα ασαφούς λογικής διακριτοποιούν κάθε μεταβλητή εισόδου σε ασαφή σύνολα και την περιγράφουν με συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια κανόνων του τύπου «If ... then ...», προκύπτει το αποτέλεσμα. Στο επίπεδο εξόδου του ασαφούς μοντέλου, ο Καρινιοτάκης πρόσθεσε ARX μοντέλα. Για την εκπαίδευση των ασαφών μοντέλων εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος του οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος, με κριτήριο γενίκευσης τη μέθοδο της αντεπικύρωσης (cross-validation criterion). Η τελική μορφή του μοντέλου εφαρμόστηκε σε πολλά τοπικά και εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, με επιτυχία. Τέλος, στο μοντέλο που ονομάζεται πλέον AWPPS (Advanced Wind Power Prediction System), ενσωματώθηκε μία μονάδα εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, σχεδιασμένη από τον Pinson, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS^[45].

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι 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. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη και στην παρούσα διπλωματική.

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 αλγορίθμου εκμάθησης.

3.5 Συνδυασμός 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, από τη μία, από την υψηλή ακρίβεια των μοντέλων των χρονοσειρών σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες και, από την άλλη, 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.

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 Sipleolico (Spanish Sipleolico). 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 βασισμένη στην πρόσφατη απόδοση κάθε μοντέλου ξεχωριστά.

3.6 Μοντέλα πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής

Βασικό μειονέκτημα των σημειακών προβλέψεων είναι ότι δεν παρέχουν πληροφορία για τη διασπορά των παρατηρήσεων γύρω από τη μέση τιμή. Για παράδειγμα, θα ήταν χρήσιμη η εύρεση ενός επιπέδου αιολικής παραγωγής το οποίο με μεγάλη πιθανότητα δεν υπερβαίνεται. Για το σκοπό αυτό όμως, απαιτείται η επιπλέον πληροφορία της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τις προβλέψεις της μελλοντικής παραγωγής αιολικής ενέργειας. Πρόσφατες έρευνες έχουν εστιάσει στο συσχετισμό εκτιμήσεων αβεβαιότητας με σημειακές προβλέψεις, λαμβάνοντας υπόψη τη μορφή πιθανοτικών προβλέψεων, δείκτες ρίσκου ή σενάρια βραχυπρόθεσμης παραγωγής της αιολικής ισχύος.^[27]

Πολλές μελέτες έχουν αναδείξει τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την πληροφορία της αβεβαιότητας των προβλέψεων. Στην [77], το βέλτιστο επίπεδο εφεδρικής παραγωγής υπολογίζεται με χρήση της αβεβαιότητας των αιολικών προβλέψεων. Στις [75,89] ερευνάται ο βέλτιστος συντονισμός υδροπαραγωγής και αιολικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις ενός μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης. Στη [12] αναδεικνύονται τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν όταν οι στρατηγικές προσφορές βασίζονται σε προβλεπόμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος σε αγορές ηλεκτρικής ενέργειας με ορίζοντα ημέρας (day-ahead electricity markets).

Τα μοντέλα πιθανοτικής πρόβλεψης αιολικής ισχύος χρησιμοποιούν μετεωρολογικά σύνολα (meteorological ensembles) που αποκτώνται από ένα μετεωρολογικό μοντέλο υψηλής ανάλυσης^{[79],[80]} ή από παραδοσιακές χρονοσειρές αιολικής ισχύος και αριθμητικών προβλέψεων καιρού (NWP). Στη δεύτερη περίπτωση εφαρμόζεται μια στατιστική μέθοδος για να εκτιμηθούν οι κατανομές πρόβλεψης στη μορφή εκατοστημορίων ή διαστημάτων. Έτσι, στην [81] εφαρμόζεται μια τοπική γραμμική παλινδρόμηση εκατοστημορίων για τον

υπολογισμό δέκα διαφορετικών εκατοστημορίων. Παρόμοια μέθοδος χρησιμοποιείται στη μελέτη [82] όπου γίνεται συνδυασμός με ομαλές πολυωνυμικές συναρτήσεις για την εκτίμηση του σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου WWPT^[83]. Στην εργασία [84] μια μέθοδος που παρέχει τη συνεχή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος προτείνεται βάσει των εκτιμητριών πυκνότητας πυρήνα (kernel density estimators). Παρόμοια μεθοδολογία ακολουθείται και στην [85], όπου χρησιμοποιούνται χρονικά προσαρμοζόμενοι πυρήνες. Στην [86] τα διαστήματα πρόβλεψης εκτιμώνται με προσαρμόσιμη αναδειγματοληψία, όπου γίνεται χρήση της πληροφορίας αβεβαιότητας ενός κατάλληλου δείκτη ρίσκου που προκύπτει από συνεχόμενες προβλέψεις καιρού. Ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιούν τις σημειακές προβλέψεις που προκύπτουν από κάποιο μοντέλο σημειακής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και αντλούν την πληροφορία της αβεβαιότητας από τις χρονοσειρές NWP^[82,88].

Οι Pinson και Kariniotakis (2004) ορίζουν ένα δείκτη μετεωρολογικού ρίσκου (meteorisk index-MRI) για τη μέτρηση της διασποράς των προβλέψεων καιρού σε δεδομένο χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας τη διακύμανση των προβλέψεων προηγούμενων αναβαθμίσεων του παρόχου. Μια σχετική προσέγγιση είναι η συσχέτιση της διάδοσης των συνόλων (ensembles) αιολικής ισχύος με το σφάλμα πρόβλεψης ελέγχου της αιολικής ισχύος. Από έρευνες σχετικά με τον τρόπο που μπορούν οι επαγγελματίες να χρησιμοποιούν πιθανοτικές προβλέψεις για τη λήψη αποφάσεων, φαίνεται ότι τέτοιοι δείκτες ρίσκου μπορεί να είναι επωφελείς ώστε να εκφραστεί το επίπεδο της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη. Η προσέγγιση αυτή αναπτύχθηκε περαιτέρω στη μελέτη των Pinson et al. (2009a), όπου ως είσοδοι θεωρούνται διαφορετικοί τύποι συνόλου προβλέψεων μετεωρολογικών μεταβλητών. Αυτές περιλαμβάνουν τις ECMWF προβλέψεις συνόλου, καθώς επίσης και μια εναλλακτική μέσου όρου χρονικής υστέρησης (lagged-average) που αποτελείται από τις χρονικά καθυστερημένες ECMWF προβλέψεις ελέγχου (5 μέλη). Προτού υπολογιστούν οι δείκτες ρίσκου, μετατρέπονται όλες σε προβλέψεις συνόλου αιολικής ισχύος. Σε αυτή τη μελέτη, διαπιστώθηκε ότι οι προβλέψεις μέσου όρου χρονικής υστέρησης επιτρέπουν την επίλυση καταστάσεων με ποικίλα επίπεδα αβεβαιότητας πρόγνωσης.

Στην εργασία [74] ένα νέο regime switching μοντέλο βασισμένο στην τεχνητή νοημοσύνη προτείνεται για την παροχή προβλέψεων με χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο της μίας ημέρας με ιδιαίτερη μέριμνα για την πρόβλεψη ακραίων γεγονότων. Το μοντέλο που προτάθηκε κατάφερε να βελτιώσει την προβλεψιμότητα της παραγωγής αιολικής ενέργειας θεωρώντας τα ακραία γεγονότα ως ξεχωριστό regime σχετιζόμενο με την αβεβαιότητα των NWP. Για τον υπολογισμό του regime εφαρμόζεται ένα νευρωνικού δικτύου που στηρίζεται στη θεωρία προσαρμόσιμου συντονισμού (adaptive resonance theory-ART). Το επονομαζόμενο RBF-pARTMAP εκτιμά την πιθανότητα εμφάνισης των regime. Οι προβλέψεις αιολικής ισχύος παράγονται από νευρωνικά δίκτυο ακτινωτής βάσης RBFNN (Radial Basis Function Neural Networks), όπου το καθένα εκπαιδεύεται με δεδομένα που αντιστοιχούν σε διαφορετικά regime. Η τελική έξοδος του προτεινόμενου μοντέλου αποκτάται συνδυάζοντας τις προβλέψεις των RBFNN με τις πιθανότητες των regime όπως αυτές εκτιμώνται από το δίκτυο RBF-pARTMAP. Για τον εμπλουτισμό των RBFNN με νέα πληροφορία εφαρμόζεται ένα υβριδικό μοντέλο που βασίζεται στη συνδυασμένη χρήση αλγορίθμου MRAN (Minimal Resource Allocation Network)^[55] και γενετικών αλγορίθμων GMRAN^[56].

Αξιολόγηση των μοντέλων πρόβλεψης της Αιολικής Παραγωγής

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια περιγραφή των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και των μεθόδων που αυτά χρησιμοποιούν. Ωστόσο, κανένα μοντέλο δεν είναι σε θέση να αποδώσει την ακριβή τιμή της παραγόμενης αιολικής ισχύος για κάποια στιγμή στο μέλλον, καθώς για τη διαμόρφωση της τιμής αυτής υπεισέρχονται πολλές παράμετροι που δεν είναι καθόλου εύκολο να εκτιμηθούν επακριβώς. Έτσι, για την επιλογή του καλύτερου μοντέλου πρόβλεψης πρέπει να γίνει αξιολόγηση των σφαλμάτων που αυτά παρουσιάζουν κατά τη διαδικασία της πρόβλεψης.

Η σπουδαιότητα της επιλογής του κατάλληλου μοντέλου για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος έγκειται στο γεγονός ότι κατά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η απόκλιση από τις πραγματικές τιμές συνεπάγεται οικονομικές απώλειες για του τελικούς χρήστες των προβλέψεων. Συνεπώς, η αποτίμηση των προβλέψεων είναι ύψιστης σημασίας μέρος της διαδικασίας της πρόβλεψης, όχι μόνο για τη διαμόρφωση πλήρους άποψης σχετικά με τη λειτουργία της επιλεγμένης προσέγγισης, αλλά επίσης και για την απόκτηση βαθύτερης διορατικότητας σε ό,τι αφορά την αβεβαιότητα της πρόβλεψης.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται ο ορισμός του σφάλματος της πρόβλεψης και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος αξιολόγησης των σημειακών και πιθανοτικών προβλέψεων. Κατά την παράθεση αυτή γίνεται αναφορά σε ένα σύνολο εκ των σημαντικότερων δεικτών σφάλματος που απασχολούν τη βιβλιογραφία των προβλέψεων και διακρίνοντάς τους σε συγκεκριμένες κατηγορίες, γίνεται μια προσπάθεια εντοπισμού των βασικών προτερημάτων και αδυναμιών του καθενός. Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους παρακολούθησης χρονοσειρών, οι οποίες έχουν ως σκοπό την εύρεση διαρθρωτικών ή άλλων απρόσμενων αλλαγών στο πρότυπο της χρονοσειράς των δεδομένων. Η εύρεση αυτή πρέπει να γίνεται αποτελεσματικά και όσο το δυνατόν πιο έγκυρα από τη χρονική στιγμή που θα συντελεστούν οι εν λόγω αλλαγές.^[50]

4.2 Ορισμός σφάλματος της πρόβλεψης

Ένας αξιοσημείωτος αριθμός από διαφορετικούς στατιστικούς δείκτες μέτρησης του σφάλματος έχουν κατά καιρούς προταθεί. Το απλό σφάλμα της πρόβλεψης ενός μεγέθους ορίζεται ως η διαφορά της προβλεπόμενης τιμής που προέρχεται από το μοντέλο πρόβλεψης και της παρατηρούμενης τιμής, όπως αυτή προκύπτει από τα όργανα μέτρησης. Έτσι, το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ενός μοντέλου που αντιστοιχεί στις επόμενες k ώρες μπορεί να γραφεί:

$$\varepsilon_{t+k|t} = \hat{Y}_{t+k|t} - Y_{t+k|t} \quad (4.1)$$

, όπου $\hat{Y}_{t+k|t}$ είναι η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής μετά από k ώρες και $Y_{t+k|t}$ είναι η πραγματική παραγωγή ισχύος k ώρες μετά. Σημειώνεται ότι η πρόβλεψη $\hat{Y}_{t+k|t}$ προκύπτει από την γνώση των παραγόντων της πρόβλεψης που είναι διαθέσιμοι 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:

$$\varepsilon_{t+k|t} = \frac{1}{P_n} (\hat{Y}_{t+k|t} - Y_{t+k|t}) \quad (4.2)$$

, όπου P_n είναι η εγκατεστημένη ισχύς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσίαση του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ως ποσοστό επί τοις εκατό της μετρούμενης τιμής καθίσταται αδύνατη, αφού η παραγωγή ενός αιολικού πάρκου σε δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να ισούται με μηδέν. Επίσης, εφαρμόζοντας το κανονικοποιημένο σφάλμα καθίσταται δυνατή η σύγκριση της απόδοσης ενός μοντέλου σε διαφορετικά πάρκα ανεξάρτητα από το μέγεθός τους^[1]. 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 το συντελεστή απόδοσης του αιολικού πάρκου.

4.3 Αξιολόγηση σημειακών προβλέψεων ^[51]

Η πιο απλή και συνηθισμένη μορφή πρόβλεψης είναι η παροχή της καλύτερης εικασίας για τη μελλοντική τιμή της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Έστω ότι οι χρονοσειρές που σχηματίζονται από την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε διακριτές χρονικές στιγμές t εκφράζονται με τη μεταβλητή y_t . Τότε κάθε σημειακή πρόβλεψη με ορίζοντα k βημάτων στο μέλλον μπορεί να γραφεί ως $\hat{y}_{t+k|t} = f(\Omega_t, k)$, όπου Ω_t είναι το σύνολο πληροφορίας τη χρονική στιγμή t και αποτελείται από όλες τις παρατηρήσεις που είναι διαθέσιμες μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Η ιδέα αυτή της παροχής της καλύτερης εικασίας υπονοεί την ύπαρξη μιας συνάρτησης ωφελείας (utility function) του επαγγελματία που θα δράσει στη μεταφερόμενη με την πρόβλεψη πληροφορία.

Για την ανάδειξη του καλύτερου μοντέλου πρόβλεψης για κάποια συγκεκριμένη χρονοσειρά παραγωγής αιολικής ενέργειας, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους, εξετάζοντας κάποιο συγκεκριμένο μέτρο ακρίβειας της πρόβλεψης. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας σύγκρισης των μοντέλων χρησιμοποιούνται ορισμένα απλά σημεία αναφοράς (benchmarks) που στόχο έχουν να προσδιορισθεί το επίπεδο ακρίβειας που θα πρέπει να αναμένεται. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα παρακάτω σημεία αναφοράς:

- **Παραμένουσα τιμή (persistence):** Αποτελεί την πιο απλή στατιστική μέθοδο. Η πρόβλεψη που προκύπτει από τη μέθοδο αυτή (στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως Naive) για μια χρονική στιγμή $t + k$ είναι ίση με την πραγματική παρατήρηση της τελευταίας διαθέσιμης χρονικής περιόδου t :

$$\hat{y}_{t+k|t}^{per} = y_t \quad (4.3)$$

Για προβλέψεις μικρού χρονικού ορίζοντα η παραμένουσα τιμή παρέχει ένα καλό σημείο αναφοράς.

- **Απλός κινητός μέσος όρος (simple moving average):** Χρησιμοποιώντας τον απλό κινητό μέσο όρο των παρατηρήσεων που έγιναν κατά τα τελευταία m χρονικά βήματα επιτυγχάνεται συνήθως βελτίωση του σημείου αναφοράς persistence, ιδιαίτερα για χρονοσειρές αιολικής ισχύος που έχουν έντονο το στοιχείο της μεταβλητότητας: $\hat{y}_{t+k|t}^{sma} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{t-i+1}$ (4.4)

- **Απόλυτος μέσος όρος (unconditional mean):** Αποτελεί ειδική περίπτωση του απλού κινητού μέσου όρου και προκύπτει όταν το m ισούται με το σύνολο των διαθέσιμων παρατηρήσεων, δηλαδή το μήκος της χρονοσειράς. Αυτό το σημείο αναφοράς αντιστοιχεί στο μακροπρόθεσμο μέσο όρο και συμβολίζεται ως \bar{y} . Για μεγάλους ορίζοντες πρόβλεψης παρέχει ένα καλό σημείο αναφοράς.

- **Σταθμισμένο σημείο αναφοράς (weighted benchmark):** Το σημείο αυτό αναφοράς δίνει καλά αποτελέσματα για ενδιάμεσους ορίζοντες πρόβλεψης. Μπορεί να κατασκευαστεί θεωρώντας έναν σταθμισμένο μέσο όρο όπου τα βάρη είναι συνάρτηση του ορίζοντα πρόβλεψης:

$$\hat{y}_{t+k|t}^{wb} = a_k y_t + (1 - a_k) \bar{y} \quad (4.5)$$

, όπου οι παράμετροι a_k πρέπει να εκτιμώνται χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο σύνολο εκπαίδευσης δεδομένων και με βάση το χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης. Παρατηρείται άλλωστε ότι για $a_k = 1$ έχουμε τη μέθοδο της παραμένουσας τιμής, ενώ για $a_k = 0$ προκύπτει το σημείο αναφοράς του απόλυτου μέσου όρου.

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένοι στατιστικοί δείκτες σφάλματος που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για τη σύγκριση μεταξύ των σημειακών μοντέλων πρόβλεψης:

- **Κλίση πρόβλεψης (forecast bias):** Αναφέρεται στο συστηματικό λάθος που παρατηρείται κατά την πρόβλεψη. Η ποσότητα αυτή εκτιμάται ως το μέσο λάθος κατά την περίοδο αποτίμησης και υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης. Ο τύπος του συγκεκριμένου δείκτη είναι:

$$Bias(k) = \bar{\varepsilon}_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon_{t+k|t} \quad (4.6)$$

- **Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (root mean square error):** Αυτό το μέτρο ακρίβειας της πρόβλεψης δίνει πολύ μεγάλο βάρος στα μεγάλα σφάλματα και μικρότερο βάρος στα μικρά, δεδομένου ότι το σφάλμα τετραγωνίζεται. Υπολογίζεται από τον

τύπο:
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon_{t+k|t}^2} \quad (4.7)$$

Ακόμη, το RMSE σχετίζεται με την υπόθεση των ανεξάρτητων και κατανομημένων λαθών πρόβλεψης. Αν το μοντέλο παράγει κανονικά κατανομημένα λάθη πρόβλεψης τότε η εκτιμήτρια μέγιστης πιθανοφάνειας των παραμέτρων συμπίπτει με τις τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από την ελαχιστοποίηση του RMSE χρησιμοποιώντας το σύνολο εκπαίδευσης δεδομένων (training data set), όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια.

- **Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error) :** Εκφράζει ένα μέτρο της ακρίβειας της πρόβλεψης έναντι των πραγματικών τιμών διατηρώντας τις μονάδες μέτρησης της αρχικής χρονοσειράς. Δηλώνει ένα μέτρο της αστοχίας της πρόβλεψης, χωρίς να δίνεται έμφαση στην κατεύθυνση της πρόβλεψης. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη, τόσο μικρότερη προκύπτει η ακρίβεια της μεθόδου που εφαρμόστηκε. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\varepsilon_{t+k|t}| \quad (4.8)$$

Εφόσον είναι επιθυμητό να ελαχιστοποιηθεί το MAE, η σημειακή πρόβλεψη θα πρέπει να αντιστοιχεί στη διάμεσο της προβλεπόμενης κατανομής.

- **Κανονικοποιημένα μοντέλα (normalized scores):** Πολύ συχνά παρουσιάζεται η ανάγκη σύγκρισης της ακρίβειας στην πρόβλεψη ανταγωνιστικών τεχνικών σε αιολικά πάρκα διαφορετικού όμως μεγέθους. Για να καθίσταται δυνατή η σύγκριση των μεθόδων πρόβλεψης σε διαφορετικά πάρκα θεωρούμε τα κανονικοποιημένα λάθη πρόβλεψης εκφρασμένα ως κλάσμα της εγκατεστημένης χωρητικότητας. Διαιρούμε δηλαδή τους προαναφερθέντες δείκτες με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του πάρκου κι έτσι αυτοί μπορούν πλέον να συγκριθούν.

4.4 Αξιολόγηση πιθανοτικών προβλέψεων ^[51]

Η πιθανοτική πρόβλεψη (probabilistic forecasting) παρέχει πληροφορίες για τη μελλοντική πιθανότητα ενός ή περισσότερων γεγονότων και έρχεται σε αντίθεση με τη ντετερμινιστική πρόβλεψη, όπου παρέχεται μία προβλεπόμενη τιμή για τον υπό μελέτη χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης. Οι πιθανοτικές προβλέψεις μπορούν να έχουν διαφορετικές «μορφές» (forms), ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών για τις οποίες γίνεται η πρόβλεψη. Για τις διακριτές (discrete) μεταβλητές, π.χ. για ένα συγκεκριμένο αριθμό πιθανών γεγονότων, οι πιθανοτικές προβλέψεις ονομάζονται προβλέψεις πιθανοτήτων (probability forecasts). Στην περίπτωση της πρόβλεψης συνεχών μεταβλητών, υπάρχουν διάφορα είδη προβλέψεων. Η πρόβλεψη εκατοστημορίου (quantile forecast) είναι η τιμή που η παρατήρηση έχει προκαθορισμένη πιθανότητα να είναι μικρότερη ή ίση από αυτή. Τα διαστήματα πρόβλεψης (predictive intervals) παρέχουν το κατώτερο και το ανώτερο όριο ενός διαστήματος, στο οποίο αναμένεται να ανήκει η παρατήρηση με κάποια προκαθορισμένη πιθανότητα. Συνεπώς, οι προβλέψεις εκατοστημορίων προβλέψεις μπορούν να θεωρηθούν σαν ανοιχτά προγνωστικά διαστήματα.

4.4.1 Προβλέψεις Συνόλου (Ensemble Forecasts)

Αρκετοί πάροχοι μετεωρολογικών προβλέψεων παράγουν πλέον πολλαπλές προσομοιώσεις του μοντέλου τους σχετικά με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού (NWP), καταλήγοντας σε μία πρόβλεψη συνόλου. Το σύνολο παρέχει διαφορετικά, εξίσου πιθανά, σενάρια δεδομένων των αρχικών συνθηκών και του δυναμικού μοντέλου της ατμόσφαιρας. Διαφορετικά μέρη του συνόλου επιχειρούν να εκφράσουν την εξάπλωση της αβεβαιότητας στη διαδικασία μοντελοποίησης. Αυτή η αβεβαιότητα προκύπτει από εκλιπούσες ή λανθασμένες παρατηρήσεις, παραμετρική αβεβαιότητα και σφάλμα προτύπου (model error). Υπάρχουν ποικίλες διαφορετικές διαθέσιμες τεχνικές για την κατασκευή προβλέψεων συνόλου, όπως τα «μοναδιαία διανύσματα» και τα «αναπαραχθέντα διανύσματα», που παρουσιάζονται από τους Leutbecher and Palmer (2008). Συγκεκριμένα το ECMWF παρέχει μια πρόβλεψη συνόλου από 50 μέλη, μια πρόβλεψη ελέγχου και μια ντετερμινιστική πρόβλεψη υψηλής ανάλυσης. Οι προβλέψεις συνόλου χρησιμοποιούνται ως ακατέργαστη είσοδος από το μοντέλο NWP και μπορεί να απαιτούν βαθμονόμηση για βελτίωση των στατιστικών τους ιδιοτήτων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της αιολικής παραγωγής.

4.4.2 Προβλεπόμενες κατανομές (Density Forecasts)

Η προβλεπόμενη κατανομή αναφέρεται σε μια συνάρτηση συνεχούς πυκνότητας πιθανότητας που αφορά την παραγωγή αιολικής ισχύος και παρέχει μια εκτενή περιγραφή του μέλλοντος για δεδομένο χρονικό διάστημα. Η διακύμανση της προβλεπόμενης κατανομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έκφραση της αντίστοιχης με την πρόβλεψη αβεβαιότητας. Με το συμβολισμό $\hat{f}_{t+k|t}$ αναπαρίσταται η προβλεπόμενη κατανομή για την παραγωγή αιολικής ισχύος σε χρόνο t και χρόνο οδήγησης $t+k$. Όμοια, με $\hat{F}_{t+k|t}$ δηλώνεται η αντίστοιχη συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative Density Function-CDF) μιας πιθανοτικής πρόβλεψης. Μια σημειακή πρόβλεψη μπορεί να προκύψει από την προβλεπόμενη κατανομή υπολογίζοντας το μέσο όρο.

4.4.3 Προβλέψεις εκατοστημορίων (Quantile Forecasts)

Με τη μέθοδο παλινδρόμησης εκατοστημορίων (*Quantile Regression*) υπολογίζεται ένας πεπερασμένος αριθμός από εκατοστημόρια (*quantiles*) της πιθανολογικής κατανομής της παραγόμενης ενέργειας, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα. Το εκατοστημόριο θ ορίζεται ως η τιμή όπου η πιθανότητα για παραγωγή ισχύος μικρότερη από αυτή, ισούται με θ . Δεδομένου ότι η F_t είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση, το εκατοστημόριο (quantile) $q_t^{(\alpha)}$ της τυχαίας μεταβλητής P_t (με $\alpha \in [0,1]$) ορίζεται μονοσήμαντα ως η τιμή του x τέτοια ώστε :

$$P(P_t < x) = \alpha \quad (4.9)$$

ή ισοδύναμα,

$$q_t^{(\alpha)} = F_t^{-1}(\alpha)$$

Με άλλα λόγια στο πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, το εκατοστημόριο $q_t^{(\alpha)}$ ορίζεται ως η τιμή της αιολικής ισχύος ,από την οποία η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι μικρότερη, με καθορισμένη πιθανότητα η οποία ισούται με α . Για παράδειγμα το εκατοστημόριο $q_t^{(75\%)}$ είναι η τιμή της ισχύος, από την οποία η αιολική παραγωγή είναι μικρότερη με πιθανότητα 0,75 (ή 75%).

4.4.4 Διαστήματα Πρόβλεψης (Prediction Intervals)

Τα διαστήματα πρόβλεψης χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν ένα εύρος πιθανών τιμών μέσα στο οποίο το πραγματικό γεγονός P_t ,αναμένεται να βρίσκεται με μια συγκεκριμένη πιθανότητα. Αυτή η πιθανότητα μπορεί να καθοριστεί ως ένας δείκτης κάλυψης (coverage rate) $1-\beta$ τέτοιος ώστε $\beta \in [0,1]$. Ένα διάστημα πρόβλεψης , που παρέχεται τη χρονική στιγμή t και με χρόνο οδήγησης $t+k$, καθορίζεται από τη διαφορά του άνω από του κάτω ορίου, τα οποία όρια στην πραγματικότητα είναι εκατοστημόρια :

$$\hat{I}_{t+k|t} = [\hat{q}^{(a_l)}_{t+k|t}, \hat{q}^{(a_u)}_{t+k|t}] \quad (4.10)$$

, όπου για τα a_l και a_u ισχύει η σχέση: $a_u - a_l = 1 - \beta$. Έτσι από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι ένα διάστημα πρόβλεψης δεν ορίζεται μονοσήμαντα από το ονοματικό ποσοστό κάλυψής του. Για τις περισσότερες εφαρμογές πρόβλεψης, ένα πολύ σημαντικό ζήτημα που προκύπτει για τα διαστήματα πρόβλεψης είναι η επιλογή του βέλτιστου ποσοστού κάλυψης ^[48] .^[49] Για να παρέχεται ένας μονοσήμαντος ορισμός πρέπει να αποφασιστεί με ποιο τρόπο θα κεντραριστεί το διάστημα στην πυκνότητα πρόβλεψης. Μια τυπική προσέγγιση είναι ο ορισμός κεντρικών διαστημάτων πρόβλεψης κεντράροντας τα διαστήματα στη διάμεσο, γεγονός που εξασφαλίζει την ύπαρξη ίσης πιθανότητας ότι η επαλήθευση θα επεκτείνεται πάνω ή κάτω του διαστήματος πρόβλεψης. Αυτό θέτει έναν επιπλέον περιορισμό στις παραμέτρους της μορφής $a_l = 1 - a_u = \frac{1-\beta}{2}$.

4.4.5 Ορισμός σημείων αναφοράς στις πιθανοτικές προβλέψεις

Στη συνέχεια θα οριστούν ορισμένα κατάλληλα σημεία αναφοράς που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της απόδοσης μεταξύ ανταγωνιστικών μεθόδων στις πιθανοτικές προβλέψεις.

Κατανομή παραμένουσας τιμής (persistence)

Η κατανομή παραμένουσας τιμής είναι κατασκευασμένη να εκφράζει την κατανομή πυκνότητας που αντιστοιχεί στην έκδοση της σημειακής πρόβλεψης παραμένουσας τιμής (persistence point forecast). Μία πρόσφατη παρατήρηση είναι αρκετή για την παροχή της σημειακής πρόβλεψης διατήρησης, ωστόσο απαιτείται μια μεγαλύτερη καταχώρηση παρατηρήσεων για την περιγραφή της πυκνότητας. Στην περίπτωση της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, συνίσταται η χρήση της κατανομής των παρατηρήσεων που συμβαίνουν τις προηγούμενες 12 ώρες για την κατασκευή του σημείου αναφοράς για τη διατήρηση.

Απόλυτη κατανομή (unconditional distribution)

Η απόλυτη κατανομή σχηματίζεται χρησιμοποιώντας όλες τις παρελθοντικές παρατηρήσεις για την κατασκευή μιας πιθανοτικής πρόβλεψης. Αυτό το σημείο αναφοράς αντιπροσωπεύει την ιδέα ότι η τοπική χρονική πληροφορία δεν είναι προβλέψιμη και ότι η χρονική διάταξη των προβλέψεων είναι ασύνδετη όταν κατασκευάζεται μια πρόβλεψη. Στη μετεωρολογική κοινότητα, ο όρος κλιματολογία χρησιμοποιείται συχνά για να υποδηλώσει το μακροπρόθεσμο μέσο όρο μιας συγκεκριμένης μετεωρολογικής μεταβλητής. Το κίνητρο πίσω από αυτό το σημείο αναφοράς είναι όμοιο με αυτό της απόλυτης κατανομής, με τη διαφορά ότι η κλιματολογία μπορεί επίσης να εξαρτάται από τη συγκεκριμένη χωρική τοποθεσία και από την περίοδο του έτους. Στην πράξη, χρειάζονται καταχωρήσεις από 25 έως 40 χρόνια για τον ορισμό αυτών των σημείων αναφοράς.

Ομοιόμορφη κατανομή

Η ομοιόμορφη κατανομή επιλέγεται έτσι ώστε να εκτείνεται ανάμεσα στην ελάχιστη παραγωγή αιολικής ισχύος (μηδενική τιμή) και στη μέγιστη κανονικοποιημένη παραγωγή αιολικής ισχύος (τιμή 1). Η σημασία αυτού του σημείου αναφοράς της προβλεπόμενης κατανομής είναι ότι υπάρχει ίση πιθανότητα η παραγωγή αιολικής ισχύος να λάβει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0 και 1.

Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στα επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας πιθανοτικής πρόβλεψης.

Αξιοπιστία (reliability)

Το κριτήριο της αξιοπιστίας αναφέρεται στο βαθμό ομοιότητας μεταξύ προβλέψεων και παρατηρήσεων. Στις πιθανοτικές προβλέψεις, η αξιοπιστία μπορεί να θεωρηθεί ως μέτρο της κλίσης ενός συστήματος πιθανοτικής πρόβλεψης. Αναμένεται ότι η εμπειρική κάλυψη που επιτυγχάνεται από κάθε πρόβλεψη εκατοστημορίου θα πρέπει να ισούται με το καθορισμένο τμήμα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το y_{t+k} πρέπει να πέφτει κάτω από την πρόβλεψη εκατοστημορίου σε $\alpha\%$ των προβλέψεων. Η αξιοπιστία των προβλέψεων θα πρέπει να ελέγχεται για κάθε συγκεκριμένο ορίζοντα πρόβλεψης k . Η αξιοπιστία δεν είναι

αρκετή για το χαρακτηρισμό της ποιότητας της πιθανοτικής πρόβλεψης, αλλά αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα για τη λήψη αποφάσεων και μπορεί να βελτιώνεται με τεχνικές επαναβαθμονόμησης.

Αιχμηρότητα (sharpness)

Η αιχμηρότητα αναφέρεται στο βαθμό συγκέντρωσης της πιθανοτικής πρόβλεψης. Για παράδειγμα, αν η προβλεπόμενη κατανομή έχει τη μορφή μιας συνάρτησης Δέλτα, τότε αυτό θα σήμαινε μέγιστη αιχμηρότητα εφόσον αυτός που κάνει την πρόβλεψη αναμένει ότι μια συγκεκριμένη τιμή θα εμφανιστεί με απόλυτη βεβαιότητα. Αυτό ισοδυναμεί με την ιδέα μιας σημειακής πρόβλεψης. Αντίθετα, η απόλυτη κατανομή (unconditional distribution) δεν είναι οξεία εφόσον υπάρχει πιθανότητα η μελλοντική παρατήρηση να πάρει οποιαδήποτε τιμή που έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν. Μια ομοιόμορφη κατανομή, που καλύπτει προηγούμενα παρατηρηθείσες τιμές θα έχει την ελάχιστη αιχμηρότητα. Σε αντίθεση με την αξιοπιστία, η αιχμηρότητα είναι μια εγγενής ιδιότητα του συστήματος πρόβλεψης και δεν μπορεί να βελτιωθεί με τεχνικές επαναβαθμονόμησης. Η αξιοπιστία σχετίζεται με την αιχμηρότητα με τον ίδιο τρόπο που η κλίση σχετίζεται με τη μεταβλητότητα στη ντετερμινιστική αποτίμηση. Πράγματι, μπορεί κανείς να αυξήσει την αιχμηρότητα εφαρμόζοντας έναν παράγοντα κλίμακας για μείωση της διασποράς της προβλεφθείσας κατανομής. Αυτό ενδέχεται να αυξήσει την αιχμηρότητα αλλά οδηγήσει σε απώλεια αξιοπιστίας.

Ανάλυση (Resolution)

Η ανάλυση παρέχει ένα μέτρο ακρίβειας της πρόβλεψης με βάση μία ή περισσότερες διευκρινιστικές μεταβλητές. Στην περίπτωση της παραγωγής αιολικής ισχύος, τέτοιες μεταβλητές μπορεί να είναι η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνσή του και το τρέχον ή προβλεπόμενο επίπεδο παραγωγής αιολικής ισχύος. Όπως και στην περίπτωση της αιχμηρότητας, η ανάλυση είναι εγγενές χαρακτηριστικό του συστήματος πρόβλεψης. Στη μετεωρολογία, η αιχμηρότητα μετρά την ικανότητα των προβλέψεων να αποκλίνουν από την κλιματολογία, ενώ η ανάλυση εκφράζει την ικανότητα παροχής διαφορετικών προβλεπόμενων κατανομών. Στην ιδανική περίπτωση των απόλυτα αξιόπιστων πιθανοτικών προβλέψεων οι δύο έννοιες ταυτίζονται.

Οικονομική Αποτίμηση (Economic Value)

Για πολλούς επαγγελματίες το σωστό μέτρο ακρίβειας της πρόβλεψης μπορεί να σχετίζεται άμεσα με την τελική χρήση του συστήματος πρόβλεψης. Οι προγνώσεις μπορεί να είναι μέρος μιας διαδικασίας λήψης απόφασης που μπορεί να αξιολογηθεί με όρους προστιθέμενης αξίας από τη χρησιμοποίηση μιας πρόβλεψης έναντι άλλων. Με βάση την οπτική αυτή θα μπορούσε να θεωρήσει κανείς τις προβλέψεις ως μέρος μιας ανάλυσης κόστους-οφέλους (cost-benefit) όπου το απόλυτο μέτρο είναι το οικονομικό κόστος ή ανταμοιβή μετρημένα με χρηματικούς όρους. Σημειώνεται ότι κάθε διαδικασία λήψης απόφασης υπονοεί μια συνάρτηση κόστους με κάποια μαθηματική δομή που είναι πιθανώς διαφορετική από τη συνήθως χρησιμοποιούμενη τετραγωνική συνάρτηση κόστους που υποστηρίζει το μέτρο RMSE. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι αδύνατο να περιγραφεί συνάρτηση κόστους με χρήση αναλυτικής μαθηματικής σχέσης και το μόνο μέσο για την επιλογή του καλύτερου συστήματος πρόβλεψης για τη λήψη απόφασης είναι η αριθμητική βελτιστοποίηση.

4.4.6 Αποτίμηση Πιθανοτικών προβλέψεων

Με την αύξηση των πιθανοτικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος καθίσταται απαραίτητη η ανάγκη κατάταξής τους για την επιλογή του μοντέλου εκείνου που επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, ενώ η επιλογή μεταξύ σημειακών μοντέλων πρόβλεψης είναι μια σχετικά ξεκάθαρη διαδικασία, τα πράγματα περιπλέκονται στην περίπτωση των πιθανοτικών προβλέψεων. Στη συνέχεια περιγράφονται τα σημαντικά διαγνωστικά εργαλεία για την αποτίμηση των χαρακτηριστικών ενός συστήματος πιθανοτικής πρόβλεψης.

Διαγράμματα αξιοπιστίας (reliability diagram)

Το διάγραμμα αξιοπιστίας παρέχει ένα μέσο οπτικοποίησης του (πιθανοτικού) bias του συστήματος πιθανοτικής πρόβλεψης. Μπορεί να κατασκευάζεται με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το αν θεωρηθούν γεγονότα πολλών κατηγοριών (multi-categorical events) ή συνεχείς μεταβλητές. Στην πρώτη περίπτωση, το διάγραμμα κατασκευάζεται σχεδιάζοντας την παρατηρηθείσα συχνότητα του γεγονότος σε συνάρτηση με την προβλεπόμενη πιθανότητα, όπου το εύρος των προβλεπόμενων πιθανοτήτων διαιρείται σε διαστήματα (π.χ. 0-5%, 5-10% κτλ.). Η διαγώνια γραμμή δείχνει την τέλεια αξιοπιστία (η μέση παρατηρηθείσα συχνότητα ισούται με την προβλεφθείσα πιθανότητα για κάθε κατηγορία) και η οριζόντια γραμμή αναπαριστά την κλιματολογική συχνότητα. Στη δεύτερη περίπτωση, όταν δηλαδή πρόκειται για συνεχείς μεταβλητές, τα διαγράμματα αξιοπιστίας είναι όμοια με τις γραφικές εκατοστημορίων-εκατοστημορίων στο ότι δίνουν το παρατηρηθέν τμήμα των διαφόρων εκατοστημορίων που αποτελούν τις προβλεπόμενες πυκνότητες σε συνάρτηση με τις ονομαστικές.

Ιστογράμμα κατάταξης (Rank Histogram)

Μια διαφορετική προσέγγιση στην ανάλυση της βαθμονόμησης μιας πιθανοτικής πρόβλεψης ενός συστήματος συνόλου (ensemble system) είναι η κατασκευή ενός ιστογράμματος κατάταξης. Τα ιστογράμματα κατάταξης συνήθως παράγονται για συστήματα συνόλου με περιορισμένο αριθμό μελών. Αν η πιθανοτική πρόβλεψη ενός τέτοιου συνόλου είναι καλά βαθμονομημένη, η παρατήρηση είναι εξίσου πιθανό να βρίσκεται μεταξύ δύο οποιονδήποτε διατεταγμένων διπλανών μελών, συμπεριλαμβανομένων των περιπτώσεων όπου η παρατήρηση θα βρίσκεται έξω από το εύρος του συνόλου σε οποιαδήποτε πλευρά της κατανομής. Τότε το ιστογράμμα κατάταξης θα πρέπει να είναι επίπεδο με τον ίδιο αριθμό επιβεβαιώσεων σε κάθε διάστημα. Λόγω του περιορισμένου μεγέθους του συνόλου, η παρατήρηση μπορεί να βρίσκεται εκτός του εύρους του συνόλου. Για παράδειγμα, στο ECMWF που είναι ένα σύνολο με 51 μέλη, αυτό θα συμβεί για 2/51 ή περίπου 4% του χρόνου.

Για συνεχείς προβλεπόμενες κατανομές, απαιτείται διαφορετική μέθοδος για την αξιολόγηση της βαθμονόμησης. Αυτό επιτυγχάνεται με το μετασχηματισμό του πιθανοτικού ολοκληρώματος. Ο μετασχηματισμός που αντιστοιχεί στην CDF πρόβλεψη, $\hat{F}_{t+k|t}$ και στην πραγματική αιολική παραγωγή $Y_{t+k|t}$ δίνεται από τον τύπο:

$$Z_{t,k} = \hat{F}_{t+k|t} \cdot$$

Λογαριθμικό αποτέλεσμα (Logarithmic score)

Η λογαριθμική πιθανότητα για μια πιθανοτική πρόβλεψη που παράγεται τη χρονική στιγμή t και με χρονικό ορίζοντα $t+k$ δίνεται από τη σχέση

$$L_{t+k|t} = \ln(\hat{f}_{t+k|t}(y_{t+k})) \quad (4.11)$$

, όπου $\hat{f}_{t+k|t}(y_{t+k})$ είναι η εκτίμηση της πιθανότητας την οποία παρέχει η προβλεπόμενη κατανομή $\hat{f}_{t+k|t}(y)$, υπολογισμένη στη συγκεκριμένη τιμή της παρατήρησης αιολικής ισχύος y_{t+k} . Αυτή μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά εκτιμώντας την παράγωγο της CDF πρόβλεψης $\hat{F}_{t+k|t}(y)$, της αιολικής ισχύος. Ο μέσος όρος των λογαριθμικών πιθανοτήτων κάθε ζευγαριού πρόβλεψης/επιβεβαίωσης παρέχει ένα αποτέλεσμα για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης:

$$LS(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{L}_{t+k|t} \quad (4.12)$$

Continuous ranked probability score (CRPS)

Το CRPS χρησιμοποιείται ευρύτατα ως μέσο αποτίμησης πιθανοτικών προβλέψεων. Το CRPS για μια CDF πρόβλεψη, $\hat{F}_{t+k|t}(y)$ και η αντίστοιχη επιβεβαίωση y_{t+k} ορίζονται ως εξής:

$$crps(\hat{F}_{t+k|t}(y), y_{t+k}) = \int_{-\infty}^{+\infty} (F_{t+k|t}(y) - I(y \geq y_{t+k}))^2 dy \quad (4.13)$$

, όπου $I(\cdot)$ είναι μια ενδεικτική συνάρτηση, που ισούται με 1 αν το γεγονός εντός της παρενθέσεως είναι αληθές και με 0 αλλιώς. Ο μέσος όρος αυτών των CRPS τιμών πάνω σε κάθε ζευγάρι πρόβλεψης/επιβεβαίωσης παρέχει ένα αποτέλεσμα για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης:

$$CRPS(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N crps(\hat{F}_{t+k|t}(y), y_{t+k}) \quad (4.14)$$

Το CRPS είναι το βασικότερο μέτρο σύγκρισης για τις πιθανοτικές προβλέψεις, με την έννοια ότι μεταξύ ανταγωνιστικών μεθόδων πρόβλεψης επιλέγεται αυτή που ελαχιστοποιεί το συγκεκριμένο δείκτη. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για σημειακές προβλέψεις, το CRPS εκφυλίζεται στο μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE).

Συνάρτηση απώλειας εκατοστημορίων (quantile loss function)

Η συνάρτηση απώλειας εκατοστημορίων γνωστή και ως «συνάρτηση ελέγχου», χρησιμοποιείται τυπικά για τον ορισμό ενός συγκεκριμένου εκατοστημορίου μιας κατανομής. Για ένα συγκεκριμένο τμήμα $\alpha \in [0,1]$, η συνάρτηση απώλειας εκατοστημορίων είναι μια τμηματικά γραμμική συνάρτηση που δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_\alpha(u) = u(a - I(u < 0)) \quad (4.15)$$

, όπου u είναι η διαφορά ανάμεσα στην παρατηρηθείσα και την υπολογισμένη τιμή. Το πρόβλημα της εκτίμησης του εκατοστημορίου με τμήμα α μπορεί να γραφεί ως:

$$\hat{q}^{(\alpha)} = \min_q \sum_{t=1}^N \rho_\alpha(y_t - q) \quad (4.16)$$

Εκτός της χρησιμοποίησης της συνάρτησης απώλειας εκατοστημορίων για εκτίμηση του εκατοστημορίου με αυτόν τον τρόπο, μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση των προβλέψεων εκατοστημορίων. Μια σειρά προβλέψεων εκατοστημορίων, $\hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}(y)$ εκδοθείσες σε χρόνους t , με ορίζοντα k και τμήμα α , μπορεί να αποτιμηθεί χρησιμοποιώντας την:

$$QL(k, \alpha) = \sum_{t=1}^N \rho_{\alpha}(y_{t+k} - \hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}(y)) \quad (4.17)$$

Στην απλή περίπτωση όπου $\alpha=0,5$, το αποτέλεσμα αυτό εκφυλίζεται στο μισό του MAE.

Αποτίμηση πρόβλεψης εκατοστημορίων

Για μια συγκεκριμένη πρόβλεψη εκατοστημορίων, $\hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}$, εκδοθείσα σε χρόνο t , με χρονικό ορίζοντα $t+k$ και επαλήθευση y_{t+k} , ορίζουμε τη μεταβλητή ένδειξης:

$$\xi_{t,k}^{(\alpha)} = I(y_{t+k} < \hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}) \quad (4.18)$$

Η χρονοσειρά που αποτελείται από τα $\xi_{t,k}^{(\alpha)}$, αποτελεί μια δυαδική ακολουθία που αντιστοιχεί στα “hits” αν η επαλήθευση είναι κάτω από την πρόβλεψη εκατοστημορίων, αλλιώς καταγράφεται ως “miss”. Για κάθε ορίζοντα k , μπορούμε να υπολογίσουμε την πραγματική κάλυψη της πρόβλεψης εκατοστημορίων θεωρώντας ένα μέσο όρο του συνόλου αποτίμησης:

$$\hat{a}_k^{(\alpha)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi_{t,k}^{(\alpha)} \quad (4.19)$$

Για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας μπορούμε να μετρήσουμε την πόλωση (bias) του συστήματος πρόβλεψης:

$$b_k^{(\alpha)} = \alpha - \hat{a}_k^{(\alpha)} \quad (4.20)$$

Για την αξιολόγηση της απόδοσης της πρόβλεψης μπορεί να είναι χρήσιμη η παροχή τιμών bias για κάθε ονομαστικό τμήμα εκατοστημορίου, ως ένας μέσος όρος πάνω από ολόκληρο το μήκος των αντίστοιχων οριζόντων πρόβλεψης

$$\bar{b}^{(\alpha)} = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} b_k^{(\alpha)} \quad (4.21)$$

Αποτίμηση διαστημάτων πρόβλεψης

Εφόσον ένα διάστημα πρόβλεψης περιλαμβάνει 2 εκατοστημόρια, ό,τι αφορά ένα μόνο quantile σχετίζεται με την αξιολόγηση της απόδοσης ενός διαστήματος πρόβλεψης. Πράγματι, δεν αρκεί απλώς να ελεγχθεί η κάλυψη που παρέχεται από το διάστημα πρόβλεψης, αλλά είναι σημαντικό να αξιολογηθεί αν και τα δύο quantiles που απαιτούνται για τον ορισμό της πρόβλεψης διαστημάτων είναι αμερόληπτα (unbiased). Μια προσέγγιση

για τον έλεγχο της αιχμηρότητας της πρόβλεψης διαστημάτων είναι η εστίαση στο πλάτος τους. Για διαστήματα πρόβλεψης κεντραρισμένα στη διάμεσο με τιμή κάλυψης $(1-\beta)$, το πλάτος δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_{t,k}^{(\beta)} = \hat{q}_{t+k|t}^{(1-\frac{\beta}{2})} - \hat{q}_{t+k|t}^{(\frac{\beta}{2})} \quad (4.22)$$

και το μέτρο της αιχμηρότητας των διαστημάτων αυτών δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\delta}_k^{(\beta)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \delta_{t,k}^{(\beta)} \quad (4.23)$$

Μπορεί ακόμη να είναι χρήσιμη η πληροφορία σχετικά με την αιχμηρότητα των διαστημάτων πρόβλεψης σε ένα εύρος οριζόντων θεωρώντας το μέσο όρο:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} \bar{\delta}_k^{(\alpha)} \quad (4.24)$$

4.5 Σύγκριση μεταξύ των μοντέλων

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι αναγκαία η ποσοτικοποίηση του κέρδους κάποιων προχωρημένων συστημάτων πρόβλεψης σε ένα επιλεγμένο σύστημα αναφοράς. Αυτό το κέρδος, δηλωμένο ως μια βελτίωση σε σχέση με το σύστημα αναφοράς της πρόβλεψης που έχουμε θεωρήσει, ονομάζεται “Skill Score” και ορίζεται ως εξής:

$$SkillScore(k) = \frac{ScoreREF(k) - Score(k)}{ScoreREF(k)} = 1 - \frac{Score(k)}{ScoreREF(k)} \quad (4.25)$$

, όπου k είναι ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης και $Score$ είναι το θεωρημένο κριτήριο αποτίμησης και μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστικό είτε πιθανοτικό μέτρο. Ένα κατάλληλο σύστημα αναφοράς μπορεί να είναι κάποιο από τα προαναφερθέντα benchmarks (π.χ. persistence) ή κάποια προγενέστερη εκδοχή του μοντέλου.

Θεωρία των Νευρωνικών Δικτύων

5.1 Εισαγωγή

Το έργο στο επιστημονικό πεδίο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων βασίστηκε, από τις απαρχές του, στο γεγονός ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος εκτελεί τους υπολογισμούς με εντελώς διαφορετικό τρόπο σε σχέση με το συμβατικό ψηφιακό υπολογιστή. Ο εγκέφαλος είναι ένας εξαιρετικά πολύπλοκος, μη γραμμικός, παράλληλος υπολογιστής (σύστημα επεξεργασίας πληροφοριών). Έχει τη δυνατότητα να οργανώνει τα δομικά του στοιχεία, γνωστά ως νευρώνες με τέτοιο τρόπο ώστε να εκτελούν συγκεκριμένους υπολογισμούς (π.χ. αναγνώριση προτύπων, αντίληψη και έλεγχος της κίνησης) με ταχύτητα πολλαπλάσια από αυτή του γρηγορότερου ψηφιακού υπολογιστή που υπάρχει σήμερα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ανθρώπινη όραση, που αποτελεί μια διαδικασία επεξεργασίας πληροφοριών.

Σε αναλογία με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από τεχνητούς νευρώνες. Στην πλέον γενική μορφή του, ένα νευρωνικό δίκτυο είναι μια μηχανή σχεδιασμένη ώστε να μοντελοποιεί τον τρόπο με τον οποίο ο εγκέφαλος εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία ή λειτουργία. Για να επιτύχουν καλή απόδοση, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν τεράστιο αριθμό απλών, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους υπολογιστικών κυττάρων, τα οποία αποκαλούνται νευρώνες ή μονάδες επεξεργασίας^[54]. Μπορούμε επομένως να διατυπώσουμε τον ακόλουθο ορισμό ενός νευρωνικού δικτύου: Ένα νευρωνικό δίκτυο είναι ένας τεράστιος παράλληλος επεξεργαστής με κατανεμημένη αρχιτεκτονική, ο οποίος αποτελείται από απλές μονάδες επεξεργασίας και έχει από τη φύση του τη γνώση να την καθιστά διαθέσιμη για χρήση. Μοιάζει ακόμη με τον ανθρώπινο εγκέφαλο σε 2 σημεία:

1. Το δίκτυο περιλαμβάνει τη γνώση από το περιβάλλον του μέσω μιας διαδικασίας μάθησης.
2. Η ισχύς των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, που αποκαλείται συναπτικό βάρος, χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της γνώσης που αποκτιέται.

Η διαδικασία μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η μάθηση αποκαλείται αλγόριθμος μάθησης και η λειτουργία του είναι να τροποποιεί τα συναπτικά βάρη του δικτύου με τον κατάλληλο τρόπο για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου^[54].

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η αναλυτική περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική και αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP, που συνδυάζει χαρακτηριστικά νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και νευρωνικών δικτύων ART, τα οποία έχουν τη βάση τους στη Θεωρία του Προσαρμόσιμου Συντονισμού (Adaptive Resonance Theory). Η περιγραφή του εν λόγω μοντέλου αρχικά περιλαμβάνει την παρουσίαση των γενικών αρχών και χαρακτηριστικών των νευρωνικών δικτύων ART και της αντίστοιχης θεωρίας, με σκοπό την καλύτερη

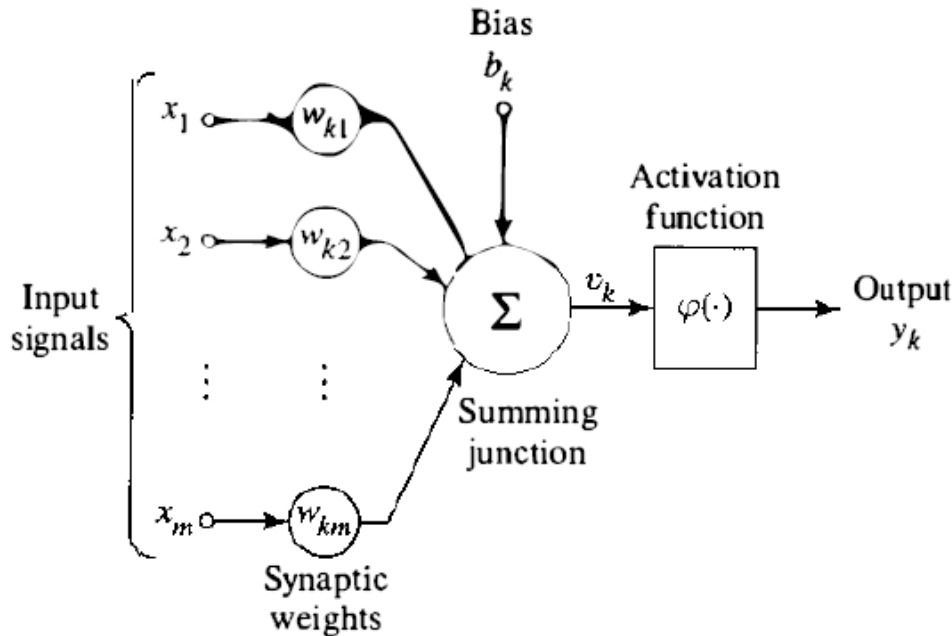
κατανόηση της διαδικασίας εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP για την ταξινόμηση (classification) των επιπέδων αιολικής παραγωγής. Κατόπιν περιγράφεται διεξοδικά η αρχιτεκτονική του δικτύου HS-ARTMAP και οι γενικές αρχές των αλγορίθμων εκπαίδευσης του. Τέλος γίνεται μια αναφορά στους αυτο-οργανωμένους χάρτες (Self Organised Maps) και παρουσιάζεται το μοντέλο NTUA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για την εξαγωγή των διανυσμάτων εισόδου, του νευρωνικού δικτύου HS_ARTMAP, επεξεργαζόμενο τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού..

5.2 Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks)

5.2.1 Μοντέλα νευρώνων

Ένας νευρώνας είναι μια μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας, η οποία είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία του νευρωνικού δικτύου. Το σχηματικό διάγραμμα (Σχήμα 5.1) παρουσιάζει το μοντέλο ενός νευρώνα, που αποτελεί τη βάση για τη σχεδίαση μιας μεγάλης οικογένειας νευρωνικών δικτύων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

1. Ένα σύνολο συνάψεων(ή διασυνδέσεων). Κάθε μία εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από το δικό της βάρος ή δύναμη. Συγκεκριμένα, ένα σήμα x_j στην είσοδο της σύναψης j που συνδέεται με το νευρώνα k πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος w_{kj} . Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να εξηγηθεί ο τρόπος αναγραφής των δεικτών στο συμβολισμό του συναπτικού βάρους w_{kj} . Ο πρώτος δείκτης στο w_{kj} αναφέρεται στον εν λόγω νευρώνα και ο δεύτερος δείκτης αναφέρεται στο άκρο εισόδου της σύναψης στην οποία αναφέρεται το βάρος. Ανόμοια με το βάρος μιας σύναψης στον ανθρώπινο εγκέφαλο, το συναπτικό βάρος ενός τεχνητού νευρώνα μπορεί να λαμβάνει και αρνητικές και θετικές τιμές.
2. Έναν αθροιστή (adder) για την άθροιση των σημάτων εισόδου, σταθμισμένων από τα αντίστοιχα συναπτικά βάρη του νευρώνα.
3. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) για τον περιορισμό του πλάτους εξόδου του σήματος ενός νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης αναφέρεται επίσης ως συνάρτηση περιορισμού (squashing function), επειδή περιορίζει το επιτρεπτό εύρος πλάτους του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή. Τυπικά, το κανονικοποιημένο εύρος τιμών πλάτους της εξόδου ενός νευρώνα γράφεται ως μοναδιαίο κλειστό διάστημα, με τη μορφή $[0,1]$ ή $[-1,1]$.



Σχήμα 5.1: Το μοντέλο ενός νευρώνα

Το μοντέλο νευρώνα του παραπάνω σχήματος περιλαμβάνει επίσης μια εξωτερικά εφαρμοζόμενη πόλωση, η οποία συμβολίζεται ως b_k . Η πόλωση b_k έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση της δικτυακής διέγερσης της συνάρτησης ενεργοποίησης, ανάλογα με το αν είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα. Με μαθηματικούς όρους μπορούμε να περιγράψουμε το νευρώνα k που απεικονίζεται στο σχήμα γράφοντας το ακόλουθο ζεύγος εξισώσεων:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \quad (5.1)$$

και

$$y_k = \varphi(u_k + b_k) \quad (5.2)$$

, όπου x_1, x_2, \dots, x_m είναι τα σήματα εισόδου και $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ είναι τα αντίστοιχα συναπτικά βάρη του νευρώνα k , u_k είναι η έξοδος του γραμμικού συνδυαστή που οφείλεται στα σήματα εισόδου, b_k είναι η πόλωση, $\varphi(\cdot)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και y_k είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα. Η χρήση της πόλωσης b_k έχει ως αποτέλεσμα την εφαρμογή ενός αφινικού μετασχηματισμού στην έξοδο u_k του γραμμικού συνδυαστή στο μοντέλο του σχήματος, όπως αποδεικνύει η σχέση: $v_k = u_k + b_k$.

5.2.2 Τύποι της συνάρτησης ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία συμβολίζεται ως $\varphi(v)$, ορίζει την έξοδο ενός νευρώνα βάσει του τοπικού πεδίου v . Στη συνέχεια περιγράφονται δύο βασικοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης.

1. Συνάρτηση κατωφλίου: Για τον τύπο αυτό συνάρτησης ενεργοποίησης έχουμε

$$\begin{aligned} \varphi(v) &= 1, \text{ αν } v \geq 0 \\ \varphi(v) &= 0, \text{ αν } v < 0. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Στους κλάδους της μηχανικής, αυτή η μορφή συνάρτησης κατωφλίου αναφέρεται και ως Heaviside. Αντίστοιχα, η έξοδος του νευρώνα k που χρησιμοποιεί μια τέτοια συνάρτηση κατωφλίου εκφράζεται ως:

$$\begin{aligned} y_k &= 1, \text{ αν } v_k \geq 0 \\ y_k &= 0, \text{ αν } v_k < 0. \end{aligned} \quad (5.4)$$

, όπου v_k είναι το τοπικό πεδίο του νευρώνα, δηλαδή:

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k. \quad (5.5)$$

Το παραπάνω μοντέλο νευρώνα αναφέρεται ως μοντέλο McCulloch-Pitts, ως αναγνώριση του πρωτοποριακού έργου των McCulloch και Pitts^[55]. Στο μοντέλο αυτό, η έξοδος του νευρώνα λαμβάνει τιμή 1 εάν το τοπικό πεδίο του συγκεκριμένου νευρώνα είναι μη αρνητικό και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση. Η δήλωση αυτή περιγράφει το χαρακτήρα «όλα ή τίποτα» του μοντέλου των McCulloch –Pitts.

2. Σιγμοειδής συνάρτηση: Η σιγμοειδής συνάρτηση, της οποίας η γραφική παράσταση έχει σχήμα «S», είναι η πλέον κοινή μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται στην κατασκευή νευρωνικών δικτύων. Ορίζεται ως αυστηρά αύξουσα συνάρτηση που επιδεικνύει κομψή ισορροπία μεταξύ γραμμικής και μη γραμμικής συμπεριφοράς. Ένα παράδειγμα της σιγμοειδούς συνάρτησης είναι η αποκαλούμενη λογιστική συνάρτηση η οποία ορίζεται ως:

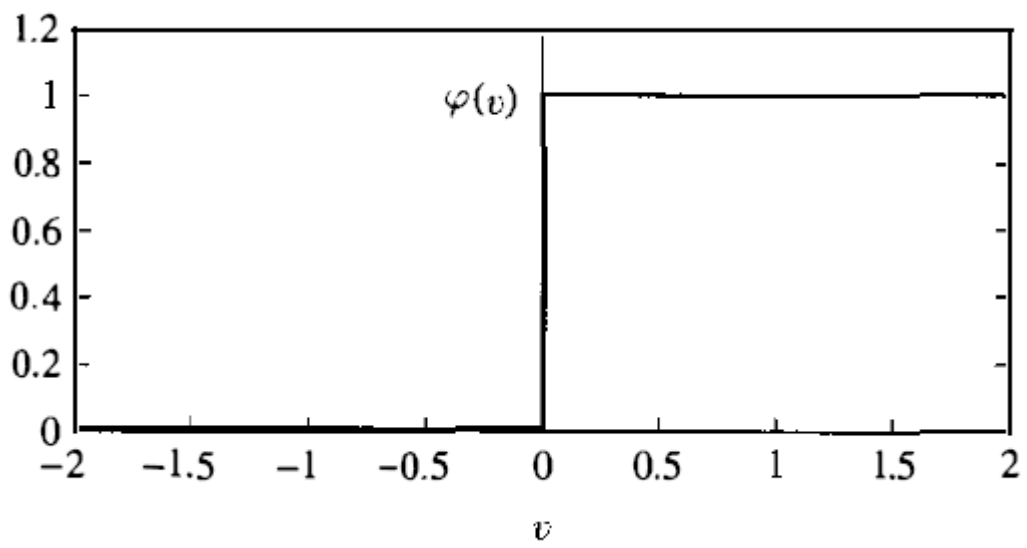
$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (5.6)$$

, όπου a είναι η παράμετρος κλίσης της σιγμοειδούς συνάρτησης. Μεταβάλλοντας την παράμετρο a , παίρνουμε σιγμοειδείς συναρτήσεις διαφορετικών κλίσεων. Στην πραγματικότητα, η κλίση στο σημείο αρχής των αξόνων ισούται με $a/4$. Στο όριο, καθώς η παράμετρος κλίσης προσεγγίζει το άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση εκφυλίζεται σε μια συνάρτηση κατωφλίου. Ενώ μια συνάρτηση κατωφλίου λαμβάνει τιμή 0 ή 1, μια σιγμοειδής συνάρτηση μπορεί να λαμβάνει τιμές από ένα συνεχές πεδίο τιμών από 0 έως 1. Σημειώνεται επίσης ότι η σιγμοειδής συνάρτηση είναι διαφορίσιμη ενώ η συνάρτηση κατωφλίου όχι.

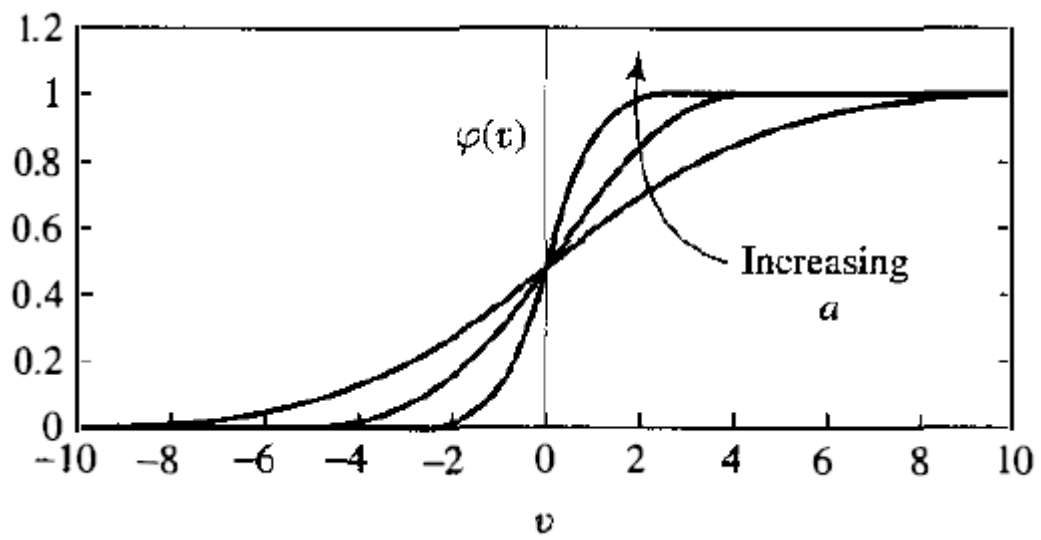
Οι συναρτήσεις που ορίστηκαν παραπάνω έχουν πεδίο τιμών από 0 έως +1. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επιθυμητό να έχουμε για τη συνάρτηση ενεργοποίησης πεδίο τιμών από -1 έως +1. Τότε, η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μια περιττή συνάρτηση του τοπικού πεδίου. Συγκεκριμένα η συνάρτηση κατωφλίου ορίζεται τώρα ως:

$$\begin{aligned} \varphi(v) &= 1, \text{ αν } v > 0 \\ \varphi(v) &= 0, \text{ αν } v = 0. \\ \varphi(v) &= -1, \text{ αν } v < 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

, η οποία είναι γνωστή και ως συνάρτηση προσήμου. Για την αντίστοιχη μορφή μιας σιγμοειδούς συνάρτησης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης: $\varphi(v) = \tanh(v)$ (5.8)



(α)



(β)

Σχήμα 5.2: (α) Συνάρτηση κατοφλίου
(β) Παραδείγματα σιγμοειδών συναρτήσεων

Το μοντέλο νευρώνα που αναπτύχθηκε προηγουμένως είναι ντετερμινιστικό(αιτιοκρατικό), καθώς η συμπεριφορά του (είσοδος-έξοδος) είναι επακριβώς καθορισμένη για όλες τις εισόδους. Σε ορισμένες εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων είναι επιθυμητό η ανάλυση να βασίζεται σε ένα στοχαστικό μοντέλο νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης του μοντέλου McCulloch-Pitts μπορεί να λάβει μια πιθανοκρατική ερμηνεία με μια αναλυτικά βατή προσέγγιση. Συγκεκριμένα, ένας νευρώνας επιτρέπεται να βρίσκεται μόνο σε μία από δύο καταστάσεις, για παράδειγμα +1 και -1. Η απόφαση για την ενεργοποίηση ενός νευρώνα (δηλαδή τη μετάβαση από την κατάσταση «off» στην κατάσταση «on») είναι πιθανοκρατική. Έστω ότι το x συμβολίζει την κατάσταση του νευρώνα και το $P(v)$ την πιθανότητα ενεργοποίησης, όπου v είναι το τοπικό πεδίο του νευρώνα. Μπορεί να γραφεί: $x=+1$ με πιθανότητα $P(v)$
 $x=-1$ με πιθανότητα $1-P(v)$.

Μια τυπική επιλογή για την $P(v)$ είναι η σιγμοειδούς σχήματος συνάρτηση

$$P(v) = \frac{1}{1+\exp(-\frac{v}{T})} \quad (5.9)$$

, όπου T είναι μια ψευδοθερμοκρασία (μέγεθος δανεισμένο από τη θερμοδυναμική) η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της στάθμης του θορύβου και κατά συνέπεια, την αβεβαιότητα αναφορικά με την ενεργοποίηση. Για $T \rightarrow 0$, ο στοχαστικός νευρώνας αποκτά μια άνευ θορύβου (δηλαδή ντετερμινιστική) μορφή, συγκεκριμένα το μοντέλο McCulloch-Pitts.^[55]

5.2.3 Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών Δικτύων

Ο τρόπος με τον οποίο είναι δομημένοι οι νευρώνες ενός νευρωνικού δικτύου σχετίζεται στενά με τον αλγόριθμο μάθησης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου. Γενικά, μπορεί κανείς να αναγνωρίσει 3 θεμελιωδώς διαφορετικές κατηγορίες νευρωνικών δικτύων:

(α) Ενός επιπέδου δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης

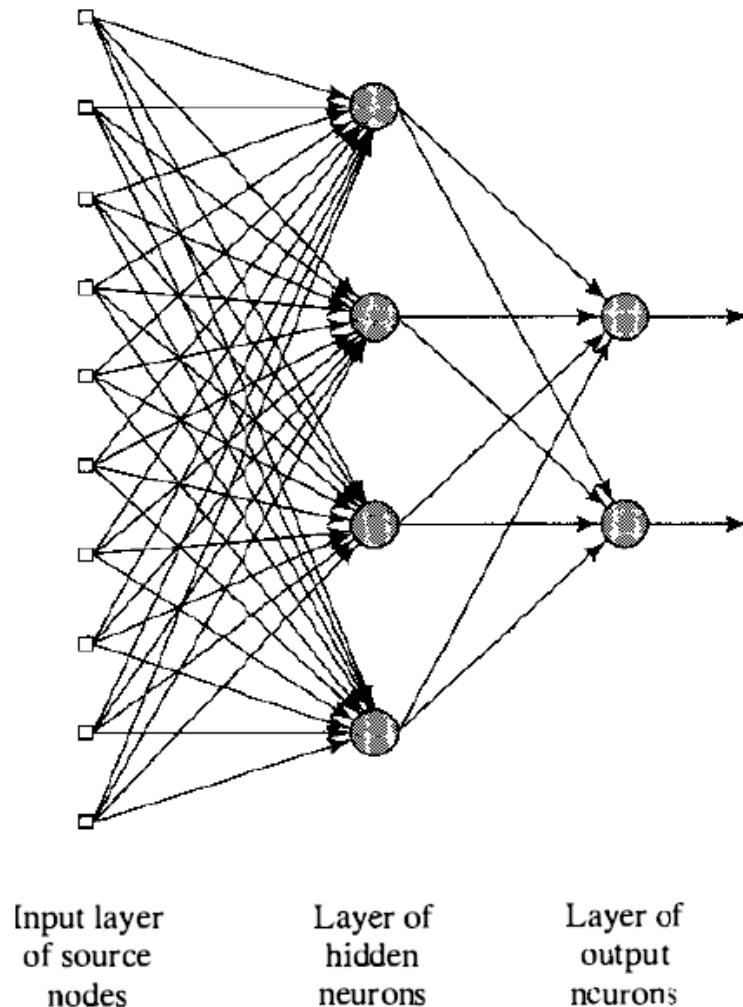
Σε ένα νευρωνικό δίκτυο, οι νευρώνες οργανώνονται σε μορφή επιπέδων. Στην απλούστερη δυνατή μορφή ενός δικτύου, έχουμε ένα επίπεδο εισόδου (αποτελούμενο από πηγαίους κόμβους) το οποίο συνδέεται απευθείας σε ένα επίπεδο νευρώνων εξόδου (υπολογιστικοί κόμβοι), αλλά όχι αντίστροφα. Το δίκτυο αυτό είναι τύπου πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward). Ένα τέτοιο δίκτυο αποκαλείται δίκτυο ενός επιπέδου, με το χαρακτηρισμό του «ενός επιπέδου» να αναφέρεται στο επίπεδο εξόδου των υπολογιστικών κόμβων. Το επίπεδο εισόδου, δηλαδή των πηγαίων κόμβων, δεν προσμετράται γιατί δεν εκτελείται κανένας υπολογισμός σε αυτό.^[54]

(β) Πολυεπίπεδα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης

Η δεύτερη κατηγορία νευρωνικών δικτύων πρόσθιας τροφοδότησης χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός ή περισσότερων κρυφών επιπέδων, των οποίων οι υπολογιστικοί κόμβοι αποκαλούνται κρυφοί νευρώνες ή κρυφές μονάδες. Ο όρος κρυφός αναφέρεται στο γεγονός ότι αυτό το μέρος του νευρωνικού δικτύου δεν είναι άμεσα ορατό ούτε από την είσοδο ούτε

από την έξοδο του δικτύου. Η λειτουργία των κρυφών νευρώνων είναι να παρεμβαίνουν μεταξύ της εξωτερικά παρεχόμενης εισόδου και της εξόδου του δικτύου με κάποιο χρήσιμο τρόπο. Προσθέτοντας ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα, το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να εξαγάγει χαρακτηριστικά υψηλότερης τάξης από την είσοδό του. Υπό μία έννοια, το δίκτυο αποκτά μια γενική προοπτική, παρά τον τοπικό χαρακτήρα των συνδέσεών του, λόγω του επιπλέον συνόλου συναπτικών συνδέσεων και της επιπλέον διάστασης των νευρωνικών αλληλεπιδράσεων ^[56].

Οι πηγαίοι κόμβοι στο επίπεδο εισόδου του δικτύου παρέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία του προτύπου ενεργοποίησης (διάνυσμα εισόδου), τα οποία συνιστούν τα σήματα εισόδου που εφαρμόζονται στους νευρώνες (υπολογιστικούς κόμβους) του δευτέρου επιπέδου, δηλαδή του πρώτου κρυφού επιπέδου. Τα σήματα εξόδου του δευτέρου επιπέδου χρησιμοποιούνται ως εισοδοί στο τρίτο επίπεδο και αυτό συνεχίζεται για όλα τα υπόλοιπα επίπεδα του δικτύου. Τυπικά, οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο του δικτύου έχουν ως εισόδους τα σήματα εξόδου μόνο του προηγούμενου επιπέδου. Το σύνολο των σημάτων εξόδου των νευρώνων στο επίπεδο εξόδου (το τελικό επίπεδο) του δικτύου συνιστά τη συνολική απόκριση του δικτύου στο πρότυπο ενεργοποίησης που παρέχεται από τους πηγαίους κόμβους στο επίπεδο εισόδου (πρώτο επίπεδο του δικτύου).



Σχήμα 5.3: Πλήρες συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ένα κρυφό επίπεδο νευρώνων και ένα επίπεδο εξόδου

(γ) Αναδρομικά Δίκτυα

Ένα αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο διαφέρει από ένα δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης στο ότι έχει τουλάχιστον ένα βρόχο ανάδρασης. Για παράδειγμα, ένα αναδρομικό δίκτυο μπορεί να αποτελείται από ένα μεμονωμένο επίπεδο νευρώνων, με κάθε νευρώνα να τροφοδοτεί το σήμα εξόδου του πίσω, στις εισόδους των άλλων νευρώνων. Η παρουσία βρόχων ανάδρασης έχει βαθιά επίδραση στη δυνατότητα μάθησης του δικτύου και στην απόδοσή του.^[54]

5.2.4 Αναπαράσταση γνώσης

Μια σημαντική εργασία για ένα νευρωνικό δίκτυο είναι να μάθει ένα μοντέλο του κόσμου (του περιβάλλοντος) στον οποίο υπάρχει και να διατηρεί αυτό το μοντέλο επαρκώς συνεπές με τον πραγματικό κόσμο για να μπορεί να επιτύχει τους στόχους για τους οποίους έχει σχεδιαστεί. Η γνώση του κόσμου αποτελείται από δύο είδη πληροφορίας:

1. Τη «γνωστή» κατάσταση του κόσμου, η οποία αντιπροσωπεύεται από γεγονότα και στοιχεία που καθορίζουν τι είναι και τι έχει γνωστό. Αυτή η μορφή γνώσης αναφέρεται ως πρότερη πληροφορία.
2. Τις παρατηρήσεις (μετρήσεις) επί του κόσμου, οι οποίες προσλαμβάνονται μέσω αισθητήρων, σχεδιασμένων ώστε να βολιδοσκοπούν το περιβάλλον εντός του οποίου υποτίθεται ότι πρέπει να λειτουργεί το νευρωνικό δίκτυο. Συνήθως αυτές οι παρατηρήσεις εμπεριέχουν θόρυβο, δεδομένου ότι υπόκεινται σε σφάλματα οφειλόμενα στο θόρυβο που συλλέγουν οι αισθητήρες και στις ατέλειες του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, οι παρατηρήσεις που λαμβάνονται κατ' αυτόν τον τρόπο αποτελούν τη δεξαμενή πληροφοριών από την οποία αντλούνται τα παραδείγματα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

Τα παραδείγματα μπορούν να είναι χαρακτηρισμένα (labeled) ή μη χαρακτηρισμένα (unlabeled). Στα χαρακτηρισμένα παραδείγματα, κάθε παράδειγμα που αναπαριστά ένα σήμα εισόδου σχετίζεται με μια αντίστοιχη επιθυμητή απόκριση (έξοδο). Από την άλλη, τα μη χαρακτηρισμένα παραδείγματα αποτελούνται από διαφορετικές υλοποιήσεις του σήματος εισόδου και μόνο. Σε κάθε περίπτωση, ένα σύνολο παραδειγμάτων αντιπροσωπεύει γνώση για το περιβάλλον, την οποία ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να μάθει μέσω της εκπαίδευσης. Σημειώνεται ωστόσο, ότι τα χαρακτηρισμένα παραδείγματα μπορεί να είναι «ακριβά» στη συγκέντρωσή τους, καθώς απαιτούν τη διαθεσιμότητα ενός «εκπαιδευτή» που θα παρέχει μια επιθυμητή (σωστή) απόκριση για κάθε χαρακτηρισμένο παράδειγμα. Αντίθετα, τα μη χαρακτηρισμένα παραδείγματα αφθονούν, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για τέτοιου είδους επίβλεψη.

Σε ένα νευρωνικό δίκτυο μιας συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής, η αναπαράσταση της γνώσης του περιβάλλοντος ορίζεται από τις τιμές που προσλαμβάνουν οι ελεύθερες παράμετροι (δηλαδή τα συναπτικά βάρη και οι πολώσεις του δικτύου). Η μορφή αυτής της αναπαράστασης γνώσης συνιστά την ίδια τη σχεδίαση του νευρωνικού δικτύου και κατά συνέπεια, αποτελεί το κλειδί για την απόδοσή του. Υπάρχουν 4 κανόνες για την αναπαράσταση γνώσης, οι οποίοι είναι γενικής φύσης και υπακούουν στην κοινή λογική:

1. Οι όμοιες εισόδοι που προέρχονται από όμοιες κλάσεις θα πρέπει συνήθως να παράγουν όμοιες αναπαραστάσεις μέσα στο δίκτυο και κατά συνέπεια, θα πρέπει να ταξινομούνται ως ανήκουσες στην ίδια κλάση.
2. Για στοιχεία που πρόκειται να ταξινομηθούν ως ξεχωριστές κλάσεις, θα πρέπει να δίνονται επαρκώς διαφορετικές αναπαραστάσεις στο δίκτυο.
3. Εάν ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό είναι σημαντικό τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός νευρώνων για την αναπαράστασή του στο δίκτυο.
4. Η πρότερη πληροφορία και τα αναλλοίωτα δεδομένα θα πρέπει να ενσωματώνονται στη σχεδίαση ενός νευρωνικού δικτύου οποτεδήποτε είναι διαθέσιμα, έτσι ώστε να απλοποιείται η σχεδίαση του δικτύου εφόσον δε θα είναι υποχρεωμένο να τα μάθει.

Υπάρχει πληθώρα μέτρων για τον καθορισμό της ομοιότητας μεταξύ των εισόδων. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέτρο ομοιότητας βασίζεται στην έννοια της Ευκλείδειας απόστασης. Συγκεκριμένα, έστω ότι x_i συμβολίζει ένα διάνυσμα m -επί-1, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]^T$ του οποίου όλα τα στοιχεία είναι πραγματικοί αριθμοί. Το διάνυσμα x_i ορίζει ένα σημείο σε έναν m -διάστατο χώρο που αποκαλείται ως ευκλείδειος χώρος και συμβολίζεται ως R^m . Η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ ενός ζεύγους διανυσμάτων x_i, x_j διαστάσεων m -επί-1 ορίζεται ως:

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = [\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5.10)$$

, όπου x_{ik}, x_{jk} είναι τα k -οστά στοιχεία των διανυσμάτων εισόδου x_i και x_j αντίστοιχα. Η ομοιότητα μεταξύ των εισόδων που αντιπροσωπεύουν τα δύο διανύσματα ορίζεται ως η Ευκλείδεια απόσταση $d(x_i, x_j)$. Όσο πλησιέστερα είναι τα μεμονωμένα στοιχεία των διανυσμάτων εισόδου x_i, x_j το ένα στο άλλο, τόσο μικρότερη είναι η Ευκλείδεια απόσταση $d(x_i, x_j)$ και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ομοιότητα μεταξύ των 2 διανυσμάτων x_i, x_j . Εφόσον τα διανύσματα x_i, x_j είναι όμοια, θα πρέπει να ανήκουν στην ίδια κλάση.

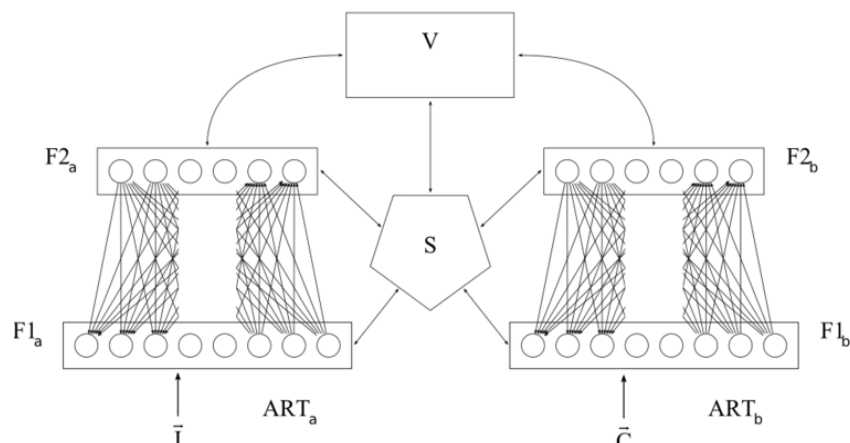
Ένα άλλο μέτρο ομοιότητας είναι το εσωτερικό γινόμενο, το οποίο προέρχεται από την άλγεβρα πινάκων. Δοθέντος ενός ζεύγους διανυσμάτων x_i, x_j ίδιας διάστασης, το εσωτερικό τους γινόμενο είναι $x_i^T x_j$ και ορίζεται ως προβολή του διανύσματος x_i πάνω στο x_j . Μπορούμε επομένως να γράψουμε $(x_i, x_j) = x_i^T x_j = \sum_{k=1}^m (x_{ik} x_{jk})$. (5.11)

Σημειώνεται ότι ελαχιστοποίηση της Ευκλείδειας απόστασης $d(x_i, x_j)$ αντιστοιχεί σε μεγιστοποίηση του εσωτερικού γινομένου (x_i, x_j) και κατά συνέπεια της ομοιότητας μεταξύ των διανυσμάτων x_i, x_j .

5.3 Θεωρία Προσαρμόσιμου Συντονισμού (Adaptive Resonance Theory - ART)

5.3.1 Εισαγωγή

Διάφορες αρχές που προήλθαν από τη μελέτη-ανάλυση της βιβλιογραφίας της έρευνας σε τομείς όπως η όραση, η ομιλία, ο σχηματισμός του εγκεφαλικού φλοιού, η ενισχυμένη εκμάθηση αλλά και οι γνωστικές-συναισθηματικές αλληλεπιδράσεις κ.α. οδήγησαν στη θεμελίωση της θεωρίας του προσαρμόσιμου συντονισμού ως μια θεωρία της ανθρώπινης γνωστικής επεξεργασίας πληροφοριών (Grossberg 1976). Η θεωρία εξελίχθηκε μέσω μιας σειράς πραγματικού χρόνου μοντέλων νευρωνικών δικτύων που επιτελούν μη-επιβλεπόμενη ή επιβλεπόμενη εκμάθηση, αναγνώριση προτύπων αλλά και πρόβλεψη (Duda, Hart και Stork 2001, Levine 2000). Στα μοντέλα μη επιβλεπόμενης μάθησης συμπεριλαμβάνονται τα μοντέλα ART1 (Carpenter και Grossberg 1987) ως μοντέλα για δυαδικές (binary) εισόδους, αλλά και τα ασαφή μοντέλα fuzzy ART (Carpenter, Grossberg και Rosen 1991), ως μοντέλα αναλογικών δεδομένων. Από την άλλη τα μοντέλα ARTMAP (Carpenter et al, 1992) συνδυάζουν δύο φόρμες μη-επιβλεπόμενης μάθησης με τρόπο τέτοιο ώστε τελικά να διεξάγουν επιβλεπόμενη εκμάθηση^{[57],[59]}.



Σχήμα 5.4: Γενική άποψη μιας δομής ARTMAP

Πολλές παραλλαγές των βασικών επιβλεπόμενων ή μη, δικτύων έχουν έκτοτε διατυπωθεί και προσαρμοστεί σε τεχνολογικές εφαρμογές και βιολογικές μελέτες.

5.3.2 Διάφοροι τρόποι εκμάθησης

Ένα κεντρικό χαρακτηριστικό όλων των ART συστημάτων είναι μια διαδικασία ταίριασματος προτύπων (pattern matching), με την οποία μια εξωτερική είσοδος συγκρίνεται με την εσωτερική μνήμη ενός ενεργού κώδικα. Από το ταίριασμα αυτό είναι δυνατόν να προκύψει είτε μια κατάσταση συντονισμού (resonant state), η οποία παραμένει για αρκετό χρόνο ώστε να επιτρέψει την εκμάθηση είτε παράλληλη αναζήτηση της μνήμης. Εάν η αναζήτηση ολοκληρωθεί με έναν επαληθευμένο κώδικα, τότε η αναπαράσταση της μνήμης μπορεί είτε να παραμείνει η ίδια ή να ενσωματώσει νέες πληροφορίες από ταίριασμα τμήματα της τρέχουσας εισόδου. Εάν ωστόσο η αναζήτηση ολοκληρωθεί σε ένα νέο κώδικα τότε η αναπαράσταση της μνήμης εκπαιδεύεται με την τρέχουσα είσοδο. Αυτή η βασισμένη στο ταίριασμα διαδικασία εκμάθησης είναι η αρχή της ευστάθειας του κώδικα ART. Η εκμάθηση με βάση το ταίριασμα-ομοιότητα επιτρέπει στις μνήμες να

αλλάζουν μόνο όταν μια είσοδος από το εξωτερικό περιβάλλον βρίσκεται αρκετά κοντά στις εσωτερικές προσδοκίες (internal expectations) ή όταν υφίσταται κάτι εντελώς καινούριο. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι που καθιστά τα συστήματα ART πολύ κατάλληλα για εφαρμογή σε προβλήματα που απαιτούν εκμάθηση εντός λειτουργίας (online) σε υπερμεγέθη και μεταβαλλόμενα δεδομένα^[57].

Η εκμάθηση με βάση την ομοιότητα (ταίριασμα) είναι συμπληρωματική της εκμάθησης με βάση τα σφάλματα (error based learning), η οποία οδηγεί σε διαχωρισμό με την τροποποίηση των μνημών, προκειμένου να μειωθεί η διαφορά μεταξύ της εξόδου-στόχου και της πραγματικής εξόδου, αντί να πραγματοποιήσει αναζήτηση με σκοπό το βέλτιστο ταίριασμα. Αυτή η μέθοδος εκμάθησης βασισμένη στα σφάλματα είναι εκ φύσεως κατάλληλη για εφαρμογή σε προβλήματα προσαρμόσιμου ελέγχου, ανάδρασης και προβλήματα που απαιτούν προσαρμογή στα τρέχοντα στατιστικά. Τα νευρωνικά δίκτυα που πραγματεύονται αυτόν τον τρόπο εκμάθησης, περιλαμβάνουν όπισθο-μετάδοση (backpropagation) και άλλους πολυεπίπεδους αναγνωριστές (multilayer perceptrons - MLPs)^[57].

Πολλές ART εφαρμογές χρησιμοποιούν την ταχεία εκμάθηση (fast learning), σύμφωνα με την οποία προσαρμόσιμα βάρη συγκλίνουν σε ισορροπία ως απόκριση κάθε πρότυπης εισόδου. Η ταχεία εκμάθηση δίνει τη δυνατότητα σε ένα σύστημα να προσαρμόζεται γρήγορα σε εισόδους που εμφανίζονται σπάνια, αλλά μπορεί ωστόσο να απαιτούν άμεση και ακριβή ανάκληση. Η ανάμνηση λεπτομερειών από μια συναρπαστική ταινία είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της εκμάθησης με μια δοκιμή. Η ταχεία εκμάθηση δημιουργεί μνήμες, οι οποίες εξαρτώνται από τη σειρά παρουσίασης των εισόδων. Πολλά ART συστήματα εκμεταλλεύονται αυτό το χαρακτηριστικό για να βελτιώσουν την ακρίβεια τους εκλέγοντας ανάμεσα από ένα σύνολο εκπαιδευμένων δικτύων, με τους εκλογείς να παρέχουν ένα μέτρο εμπιστοσύνης για κάθε πρόβλεψη.

5.3.3 Κωδικοποίηση, ταίριασμα και εκτίμηση

Ένας τυπικός ART κύκλος αναζήτησης περιλαμβάνει συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά μια πρότυπη είσοδος \mathbf{I} αναγνωρίζεται ως μια βραχυπρόθεσμη δραστηριότητα μνήμης \mathbf{x} σε ένα πεδίο κόμβων του δικτύου F_1 . Συγκλίνουσες ή αποκλίνουσες διαδρομές από το πεδίο F_1 στο πεδίο F_2 , καθεμία έχοντας βάρος ανάλογα με ένα προσαρμόσιμο μακροπρόθεσμο «ίχνος» πάνω στη μνήμη, μετατρέπουν το διάνυσμα \mathbf{x} σε ένα διάνυσμα-σήμα \mathbf{T} του δικτύου. Οι εσωτερικές ανταγωνιστικές δυναμικές του επιπέδου F_2 , μετασχηματίζουν περαιτέρω το διάνυσμα \mathbf{T} , παράγοντας έναν συμπιεσμένο κώδικα \mathbf{y} ή αλλιώς μια μνήμη διευθυνσιοδοτημένη κατά περιεχόμενο (content-addressable memory). Με ισχυρό ανταγωνισμό, η ενεργοποίηση πραγματοποιείται στον κόμβο του επιπέδου F_2 που λαμβάνει το πιο ισχυρό $F_1 \rightarrow F_2$ σήμα. Σε αυτήν λοιπόν την ανταγωνιστική λειτουργία, μόνο μία συνιστώσα του κώδικα-μνήμης παραμένει θετική.

Προτού η εκμάθηση μπορεί να επιφέρει αλλαγές στη μνήμη, η θεωρία προσαρμόσιμου συντονισμού συμπεριφέρεται στον επιλεγθέντα κώδικα ως μια «υπόθεση», την οποία και ελέγχει επιχειρώντας ταιριάσματα των, από πάνω μέχρι κάτω, προσδοκιών του \mathbf{y} με την είσοδο που την επέλεξε. Μια παράλληλη καθορισμένη ή ακαθόριστη ανάδραση από το επίπεδο F_2 υλοποιεί αυτό το ταίριασμα σαν έναν τοπικά ορισμένο πραγματικού χρόνου (real time) υπολογισμό του δικτύου. Έτσι οι κόμβοι του επιπέδου F_1 λαμβάνουν διαρκώς τόσο διεγείροντα σήματα όσο και άγνωστα (unlearned) ανασταλτικά σήματα από το

επίπεδο F_2 . Αυτού του είδους τα συμπληρωματικά σήματα δρουν έτσι ώστε να καταστείλουν τα τμήματα της εισόδου \mathbf{I} με κατεύθυνση από κάτω προς τα πάνω, τα οποία δεν ταιριάζουν με το πρότυπο \mathbf{V} των προσδοκιών από πάνω προς τα κάτω. Με την καταστολή των τμημάτων αυτών η παραμένουσα δραστηριότητα \mathbf{x}^* αναπαριστά ένα πρότυπο κρίσιμων χαρακτηριστικών (critical features) της τρέχουσας εισόδου σε σχέση με τον επιλεγμένο κώδικα \mathbf{y} . Εάν ο κώδικας \mathbf{y} δεν είχε υπάρξει ποτέ ενεργός στο παρελθόν τότε $\mathbf{x} = \mathbf{x}^* = \mathbf{I}$ και το επίπεδο F_1 καταχωρεί ένα τέλειο ταιριασμα. ^[57].

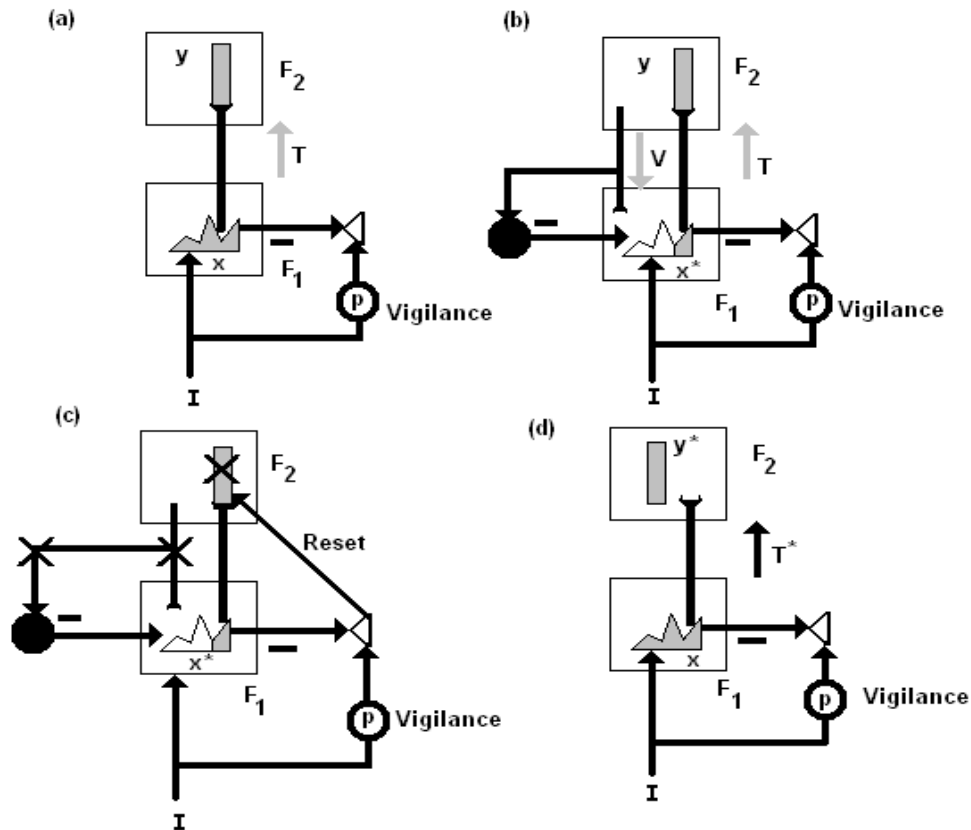
5.3.4 Προσοχή, αναζήτηση, συντονισμός και εκμάθηση

Εάν λοιπόν το ταιριασμένο διάνυσμα \mathbf{x}^* είναι αρκετά όμοιο με την είσοδο \mathbf{I} , τότε το ίχνος της μνήμης του ενεργού F_2 κώδικα συγκλίνει προς το \mathbf{x}^* . Η ιδιότητα της κωδικοποίησης των κρίσιμων χαρακτηριστικών με προσεκτική εστίαση (attentional focus) είναι το «κλειδί» για την ευστάθεια του κώδικα. Αυτή η στρατηγική εκμάθησης είναι που διαφοροποιεί τα ART δίκτυα από τους πολυεπίπεδους αναγνωριστές, οι οποίοι ουσιαστικά κωδικοποιούν την τρέχουσα είσοδο, αντί να προβούν σε μια διαδικασία ταιριάσματος, έτσι οι πολυεπίπεδοι αναγνωριστές περιλαμβάνουν αργή εκμάθηση πάνω σε πολλές δοκιμές εισόδων με σκοπό να αποφευχθεί η καταστροφική απώλεια μνήμης (forgetting).

Η αναζήτηση της ART μνήμης ξεκινά όταν το δίκτυο αποφασίζει ότι η, από κάτω προς τα πάνω, είσοδος \mathbf{I} φαίνεται αρκετά καινούρια ή απροσδόκητη, για να διαπιστωθεί το κατά πόσο ο ενεργός κώδικας ικανοποιεί ένα κριτήριο ταιριάσματος. Η διαδικασία αναζήτησης επαναφέρει τον κώδικα \mathbf{y} του επιπέδου F_2 , προτού μπορέσει να πραγματοποιηθεί μια εσφαλμένη συσχέτιση στην παραμένουσα είσοδο \mathbf{x}^* . Μετά την επαναφορά, οι μεσοπρόθεσμες μνήμες των διαδρομών $F_1 \rightarrow F_2$ (Carpenter και Grossberg 1990), στρέφουν το δίκτυο προς τον προηγούμενος επιλεγμένο κόμβο, έτσι ώστε ο νέος κώδικας \mathbf{y}^* να μπορεί να επιλεγθεί και να ελεγχθεί ως προς την ομοιότητα ^[57].

Πρακτικά το κριτήριο ταιριάσματος ενός ART συστήματος ορίζεται με τη βοήθεια μιας παραμέτρου p που ονομάζεται εγρήγορση (vigilance) και καθορίζει το ελάχιστο όριο στην είσοδο, για το οποίο η είσοδος θεωρείται επαρκώς όμοια-ταιριασμένη προκειμένου να υπάρξει συντονισμός. Οι χαμηλές τιμές της παραμέτρου vigilance δίνουν τη δυνατότητα για μια ευρεία γενίκευση, με μεγάλες γενικευμένες κατηγορίες και αφηρημένες μνήμες. Αντίθετα, οι υψηλές τιμές αυτής της παραμέτρου, οδηγούν σε πιο περιορισμένες γενικεύσεις, σαφώς καθορισμένες κατηγορίες και λεπτομερείς μνήμες. Για τη μέγιστη τιμή της παραμέτρου vigilance, η εκμάθηση των κατηγοριών εκφυλίζεται σε εκμάθηση υποδειγματικών τιμών. Ενώ η παράμετρος vigilance είναι ελεύθερη στα ART δίκτυα μη επιβλεπόμενης εκμάθησης, στα δίκτυα με επίβλεψη αποτελεί μια εσωτερικά ελεγχόμενη μεταβλητή, η οποία «πυροδοτεί» την αναζήτηση μετά την αύξησή της ως αποτέλεσμα ενός σφάλματος πρόβλεψης.

Λόγω του ότι η τιμή της παραμέτρου vigilance ποικίλει με τις διάφορες εφαρμογές εκμάθησης, οι μνήμες ενός συστήματος ARTMAP (σύστημα επιβλεπόμενης εκμάθησης) ουσιαστικά παρουσιάζουν ένα εύρος από βαθμούς λεπτομέρειας. Στην εικόνα που ακολουθεί αμέσως πιο κάτω φαίνονται τα διάφορα στάδια του κύκλου αναζήτησης ενός ART συστήματος :



Σχήμα 5.5: Ένας κύκλος αναζήτησης ART εφαρμόζει ένα κριτήριο ταιριάσματος, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια μιας αδιάστατης παραμέτρου p που ονομάζεται vigilance και καθορίζει το βαθμό ομοιότητας ανάμεσα στην από κάτω προς τα πάνω είσοδο I και την από πάνω προς τα κάτω προσδοκία V πάνω στην οποία έχει προηγουμένα εκπαιδευτεί ο κώδικας y στο επίπεδο F_2 επιλεγμένος από την είσοδο I ^[52].

5.3.5 Επιβλεπόμενη εκμάθηση και πρόβλεψη

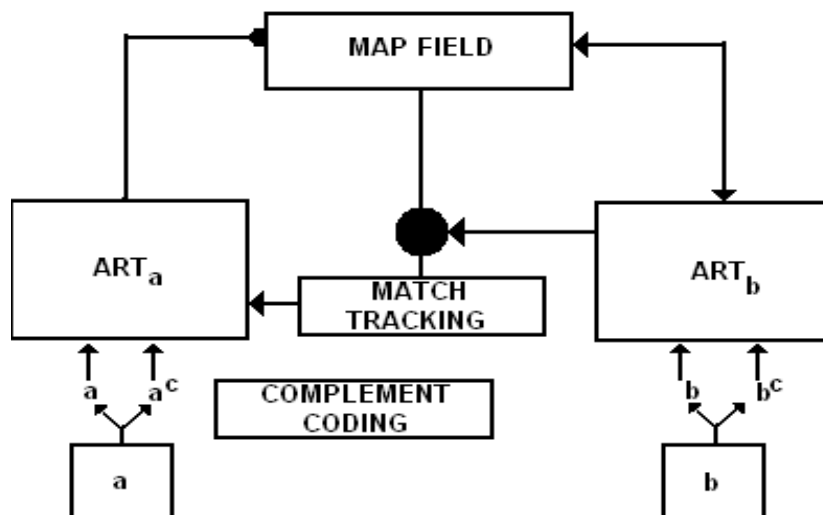
Ένα σύστημα ARTMAP περιλαμβάνει ένα ζεύγος από μονάδες ART : ART_a και ART_b . Κατά τη διάρκεια της εκμάθησης με επίβλεψη (supervised learning) η μονάδα ART_a λαμβάνει μια ροή από πρότυπα $\{\mathbf{a}^{(n)}\}$ και η μονάδα ART_b λαμβάνει αντίστοιχα μια ροή $\{\mathbf{b}^{(n)}\}$, όπου το σύνολο $\mathbf{b}^{(n)}$ αποτελεί την ορθή πρόβλεψη δοθέντος του συνόλου $\mathbf{a}^{(n)}$. Ένα συσχετιστικό δίκτυο εκμάθησης και ένας ελεγκτής της παραμέτρου vigilance, συνδέουν αυτές τις δύο μονάδες για σχηματίσουν το σύστημα ARTMAP, δίνοντάς του τη δυνατότητα να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, δημιουργώντας τον ελάχιστο αριθμό από ART_a κατηγορίες αναγνώρισης ή κρυφές μονάδες (hidden units), για ικανοποίηση των κριτηρίων της ακρίβειας.

Ένας κανόνας εκμάθησης βασισμένος στην εύρεση του ελαχίστου των μεγίστων (minimax learning) δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα ARTMAP να μαθαίνει γρήγορα, αποδοτικά και με ακρίβεια, καθώς ελαχιστοποιεί με ενσωματωμένο τρόπο το σφάλμα μιας πρόβλεψης, και μεγιστοποιεί τη συμπίεση του κώδικα εντός λειτουργίας (online). Μια τιμή κατωφλίου p_a της παραμέτρου vigilance ορίζει το ελάχιστο στο κριτήριο ομοιότητας. Με την επιλογή μικρότερης τιμής κατωφλίου δίνεται η δυνατότητα για σχηματισμό ευρύτερων κατηγοριών. Στην αρχή της διαδικασίας εκπαίδευσης ισχύει : $p_a = \bar{p}_a$. Ένα σφάλμα

πρόβλεψης στη μονάδα ART_b , αυξάνει την παράμετρο vigilance τόσο ώστε να εκκινήσει μια διαδικασία αναζήτησης, μέσω ενός μηχανισμού ελέγχου με ανάδραση που ονομάζεται ανίχνευση ταιριάσματος (*match tracking*). Ένας νέος ενεργός κώδικας εστιάζει την προσοχή του σε μια διαφορετική ομάδα των χαρακτηριστικών εισόδου και ελέγχει το κατά πόσο αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να δώσουν μια καλύτερη και διορθωμένη πρόβλεψη στην έξοδο^[52]. Η ανίχνευση ταιριάσματος επιτρέπει στο σύστημα ARTMAP να μαθαίνει να επιλέγει μια πρόβλεψη για ένα σπάνιο γεγονός μέσα από ένα συνονθύλευμα συχνών και παραπλήσιων γεγονότων που θα μπορούσαν να διαφοροποιήσουν την πρόβλεψη^{[58],[60]}.

Τα συστήματα ARTMAP περιέχουν ένα βήμα προεπεξεργασίας που ονομάζεται κωδικοποίηση συμπληρώματος (*complement coding*), το οποίο μέσω μιας κανονικοποίησης της εισόδου, επιλύει το πρόβλημα της πιθανής επανάληψης των κατηγοριών (*Carpenter, Grossberg και Rosen 1991*). Η κωδικοποίηση συμπληρώματος ουσιαστικά διπλασιάζει τον αριθμό των συνιστωσών της εισόδου, παρουσιάζοντας στο νευρωνικό δίκτυο τόσο το αυθεντικό χαρακτηριστικό διάνυσμα όσο και το συμπλήρωμα του. Με νευρο-βιολογικούς όρους η κωδικοποίηση συμπληρώματος χρησιμοποιεί ενεργά και μη ενεργά κύτταρα για την αναπαράσταση μιας πρότυπης εισόδου. Το σχετικό ενεργό τμήμα ενός διανύσματος βαρών, κωδικοποιεί τα χαρακτηριστικά που είναι διαρκώς παρόντα στις πρότυπες κατηγορίες, ενώ το ανενεργό τμήμα κωδικοποιεί τα διαρκώς απόντα χαρακτηριστικά. Τα μικρού μεγέθους βάρη στα συμπληρωματικά τμήματα της αναπαράστασης μιας κατηγορίας, κωδικοποιούν ως «μη περιέχοντα πληροφορία» αυτά τα χαρακτηριστικά, τα οποία ορισμένες φορές είναι παρόντα, ενώ άλλες φορές απουσιάζουν^[57].

Στο σχήμα που ακολουθεί συνοψίζονται οι αρχές που αναπτύχθηκαν στην παρούσα ενότητα :



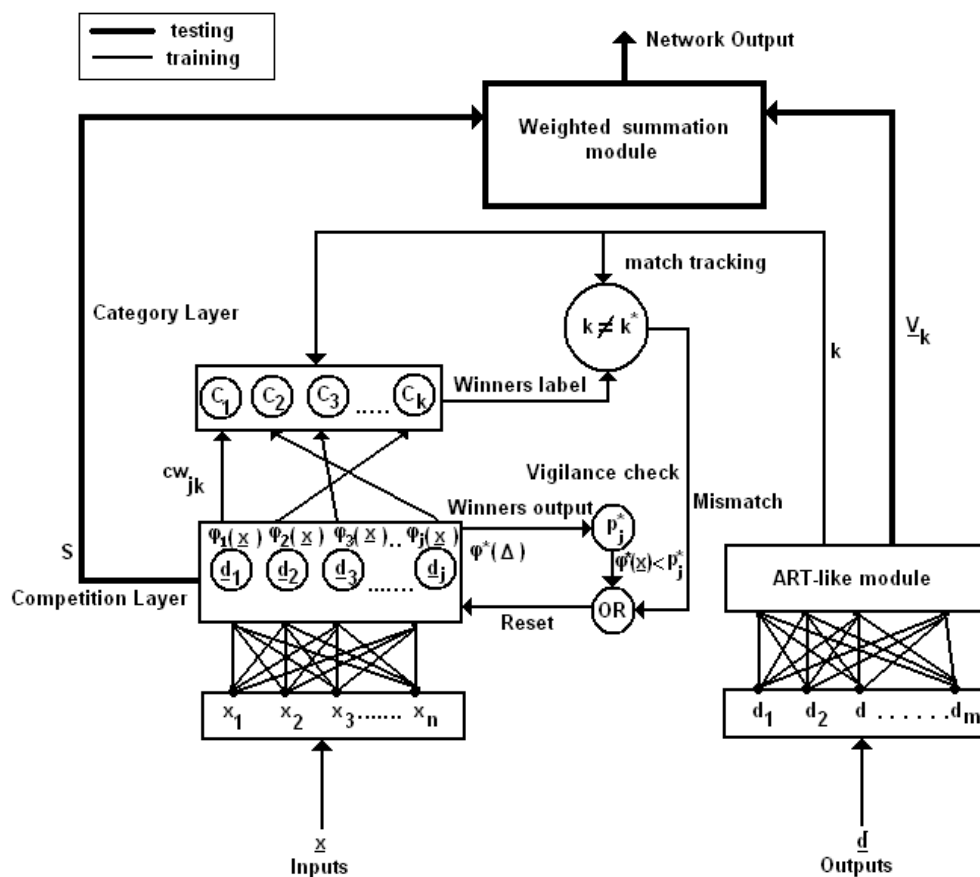
Σχήμα 5.6: Το γενικό ARTMAP δίκτυο για επιβλεπόμενη μάθηση περιέχει 2 μονάδες ART. Η μονάδα ART_b σε προβλήματα ταξινόμησης μπορεί να απλοποιείται.

5.4 Αναλυτική περιγραφή του νευρωνικού δικτύου ARTMAP για σταδιακή εκμάθηση^[61]

Έχοντας αποκτήσει μια γενική άποψη της θεωρίας του προσαρμόσιμου συντονισμού και των θεμελιωδών αρχών των νευρωνικών δικτύων που βασίζονται σε αυτή από την προηγούμενη ενότητα, στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στο νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των προβλέψεων της αιολικής παραγωγής στην παρούσα εργασία. Το νευρωνικό δίκτυο αυτό ονομάζεται HS-ARTMAP (Hyper Spherical ARTMAP) και προτάθηκε από τους *Mu-Chun Su, Jonathan Lee και Kuo-Lung Hsieh* το 2004. Το δίκτυο αποτελεί μια καινοφανή προσέγγιση της σταδιακής δόμησης ενός νευρωνικού δικτύου, που παρέχει τη δυνατότητα εκμάθησης νέων πληροφοριών χωρίς την απώλεια πρότερης γνώσης και προκύπτει από το συνδυασμό μιας μονάδας με χαρακτηριστικά δικτύου ακτινωτής βάσης (RBF) με μια μονάδα με χαρακτηριστικά ARTMAP συστήματος.

5.4.1 Η αρχιτεκτονική του HS-ARTMAP νευρωνικού δικτύου

Μια σχηματική άποψη του χρησιμοποιούμενου HS-ARTMAP δικτύου παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί :



Σχήμα 5.7: Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα τα βασικά δομικά στοιχεία του δικτύου HS-ARTMAP είναι μια μονάδα παραπλήσια με ένα RBF νευρωνικό δίκτυο, μια μονάδα παραπλήσια με ART δίκτυο και μια αθροιστική μονάδα συντελεστών-βαρών. Συγκρίνοντας με την εικόνα 5.6, όπου απεικονίζεται η γενική δομή ενός ARTMAP συστήματος, προκύπτει ότι οι τρεις προαναφερθείσες μονάδες του HS-ARTMAP δικτύου

χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση των μονάδων ART_a , ART_b και του πεδίου συσχέτισης (map field) αντίστοιχα. Καθώς τα RBF δίκτυα είναι λειτουργικά ισοδύναμα με συστήματα ασαφούς λογικής (fuzzy inference systems), αλλά και πολύ αποδοτικά από υπολογιστική άποψη, κατά τη δόμηση του δικτύου HS-ARTMAP αποφασίστηκε η χρήση της παραπλήσιας με RBF, μονάδας προς αντικατάσταση της μονάδας ART_a . Για να επιτραπεί ωστόσο το «χτίσιμο» της σύνδεσης μεταξύ της τιμής της παραμέτρου vigilance με την επιθυμητή τιμή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος που το μοντέλο HS-ARTMAP εκπαιδεύεται για να επιτύχει, η μονάδα ART_b αντικαθίσταται από μια παραπλήσια με ART δίκτυο μονάδα.

Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία ανίχνευσης ταιριάσματος που λαμβάνει χώρα στο πεδίο συσχέτισης είναι πολύ χρήσιμη για θέματα ταξινόμησης-επικύρωσης (classification), δεν έχει καλή απόδοση για αποτιμήσεις συναρτήσεων υπό θορυβώδεις συνθήκες. Έτσι, όπως και τα τροποποιημένα δίκτυα PRO-BART, το δίκτυο HS-ARTMAP αμελεί το πεδίο συσχέτισης. Αντίθετα, λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια μονάδα άθροισης βαρών (weighted summation module) που δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της εκτιμώμενης εξόδου από περισσότερους από έναν νευρώνες.

Η παραπλήσια με RBF δίκτυο μονάδα (RBF-like μονάδα στο εξής) αποτελείται από ένα ανταγωνιστικό επίπεδο και ένα επίπεδο κατηγοριών. Κατά τη διάρκεια της επιβλεπόμενης εκμάθησης, μια πρότυπη είσοδος, $\underline{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$ εμφανίζεται στο ανταγωνιστικό επίπεδο της RBF-like μονάδας, ενώ η επιθυμητή πρότυπη έξοδος (διάνυσμα στόχου) $\underline{d}_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im})^T$ εμφανίζεται στην ART-like μονάδα. Η ακατέργαστη πρότυπη είσοδος οδηγείται απευθείας στο ανταγωνιστικό επίπεδο, μέσω των συνδεδεμένων βαρών \underline{c}_j και r_j . Οι νευρώνες στο ανταγωνιστικό επίπεδο, ανταγωνίζονται ο ένας τον άλλο με βάση τις εξόδους τους, οι οποίες είναι συναρτήσεις των συνδεδεμένων βαρών \underline{c}_j και r_j και της εισόδου \underline{x}_i , μέχρι την ανάδειξη νικητή νευρώνα σε σχέση με την πρότυπη είσοδο \underline{x}_i . Το επίπεδο κατηγοριών διατηρεί τα αναγνωριστικά (labels) μόνο των K κατηγοριών (ή κλάσεων), τις οποίες το δίκτυο οφείλει να μάθει και η τιμή του K καθορίζεται από την ART-like μονάδα. Μόνο ένας νευρώνας στο ανταγωνιστικό επίπεδο μπορεί να παρέχει κωδικοποίηση για μία μόνο κατηγορία, έτσι ώστε να μπορεί να «δείχνει» σε έναν και μοναδικό κόμβο του επιπέδου των κατηγοριών.

Με παρόμοιο τρόπο όπως στα συμβατικά ART δίκτυα, η ART-like μονάδα σταδιακά ομαδοποιεί τις επιθυμητές πρότυπες εξόδους σε δέσμες (clusters). Κάθε νευρώνας της μονάδας αντιστοιχεί με μία δέσμη και συσχετίζεται με m-διάστατο διάνυσμα συνδεδεμένων βαρών, \underline{u} , το οποίο αναπαριστά το αντίστοιχο κέντρο της δέσμης. Ο αριθμός των δεσμών που σχηματίζονται έχει να κάνει με ένα προκαθορισμένο κατώφλι ομοιότητας θ_d που έχει ρόλο αντίστοιχο με αυτόν της παραμέτρου vigilance σε ένα ART δίκτυο. Εάν ο k-οστός νευρώνας της ART-like μονάδας και ο j-οστός νευρώνας του ανταγωνιστικού επιπέδου νικήσουν στη διαδικασία ανταγωνισμού αντίστοιχα, τότε το συνδεδετικό βάρος c_{jk} που συνδέει τον j-οστό νευρώνα του ανταγωνιστικού επιπέδου με τον κόμβο C_k του επιπέδου των κατηγοριών, ενεργοποιείται για να δώσει την ένωση. Ειδικά δεν υφίσταται σύνδεση μεταξύ των δύο κόμβων.

Το κατά πόσον τα βάρη του νικητή νευρώνα του ανταγωνιστικού επιπέδου, πρόκειται να ανανεωθούν, εξαρτάται από το αν το αναγνωριστικό κατηγορίας του νικητή κόμβου είναι το ίδιο με το αναγνωριστικό κατηγορίας της εισόδου. Εάν λοιπόν τα αναγνωριστικά δεν ταιριάζουν, τότε πραγματοποιείται ο επόμενος νικητής νευρώνας ή η προσθήκη ενός κόμβου στην έξοδο. Συνοψίζοντας το δίκτυο HS-ARTMAP μαθαίνει οποιοδήποτε πρότυπο εκπαίδευσης του παρουσιαστεί είτε με την ενσωμάτωσή του σε έναν ήδη υπάρχοντα νευρώνα του ανταγωνιστικού επιπέδου είτε με τη δημιουργία ενός νέου νευρώνα για αυτό το πρότυπο.

5.4.2 Η παραπλήσια με ART δίκτυο μονάδα (ART-like μονάδα)

Ουσιαστικά οι εφαρμογές μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες προβλημάτων: το πρόβλημα της αναγνώρισης προτύπων και το πρόβλημα της προσεγγιστικής αποτίμησης συναρτήσεων. Ενώ οι επιθυμητές εξόδους για ένα πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων είναι διακριτές, κατά την αποτίμηση συναρτήσεων μπορεί να έχουν πραγματικές τιμές. Ο κύριος στόχος της ART-like μονάδας είναι να μετασχηματίσει τις επιθυμητές εξόδους με πραγματικές τιμές σε ένα σύνολο διακριτών κλάσεων. Εάν πραγματοποιηθεί αυτό τότε το πρόβλημα της αποτίμησης μιας συνάρτησης μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων.

Στην ART-like μονάδα, κάθε νευρώνας συσχετίζεται με ένα m-διάστατο διάνυσμα συνδετικών βαρών \underline{u} , το οποίο θα αντιστοιχηθεί με ένα κέντρο δέσμης. Η βασική ιδέα πίσω από τη μονάδα αυτή είναι πολύ παραπλήσια με τα συμβατικά ART δίκτυα και τον αλγόριθμο ομαδοποίησης με βάση τον πλησιέστερο γείτονα (nearest neighbor). Η μονάδα λοιπόν αυτή ομαδοποιεί σταδιακά τις επιθυμητές πρότυπες εξόδους σε δέσμες. Ο αριθμός των δεσμών που σχηματίζονται αποφασίζεται με βάση ένα προκαθορισμένο κατώφλι ομοιότητας. Η βήμα προς βήμα λειτουργία της ART-like μονάδας περιγράφεται στη συνέχεια :

Βήμα 1^ο : Εάν η τρέχουσα πρότυπη έξοδος \underline{d}_i είναι η πρώτη στη σειρά τότε παράγεται ένας νευρώνας και το διάνυσμα συνδετικών βαρών του, \underline{u}_1 , αρχικοποιείται έτσι ώστε να ισούται με το \underline{d}_1 , (δηλαδή $\underline{u}_1 = \underline{d}_1$). Αν δεν ισχύει αυτό μεταβαίνουμε στο βήμα 2^ο.

Βήμα 2^ο : Εύρεση του νικητή νευρώνα k^* με βάση το κριτήριο της ελάχιστης ευκλείδειας απόστασης :

$$k^* = \underset{k=1, \dots, K}{\text{Arg min}} \|\underline{d}_i - \underline{u}_k\| \quad (5.12)$$

, όπου K ο αριθμός των υπάρχοντων νευρώνων.

Βήμα 3^ο : Έλεγχος εάν πληρείται η ακόλουθη συνθήκη :

$$\|\underline{d}_i - \underline{u}_{k^*}\| < \theta_d \quad (5.13)$$

,όπου θ_d είναι το προκαθορισμένο κατώφλι ομοιότητας. Εάν η συνθήκη (5.13) πληρείται ,τότε η πρότυπη έξοδος \underline{d}_i ανατίθεται στον k^* -οστό νευρώνα και ανανεώνεται το διάνυσμα συνδετικών βαρών της με χρήση της ακόλουθης εξίσωσης :

$$\underline{u}_{k^*} = \frac{N_{k^*}}{N_{k^*} + 1} \times \underline{u}_{k^*} + \frac{1}{N_{k^*} + 1} \times \underline{d}_i \quad (5.14)$$

,όπου το N_{k^*} αναπαριστά τον τρέχοντα αριθμό των προτύπων που έχουν ανατεθεί στον k^* -οστό νευρώνα. Η εξίσωση (5.14) είναι μια αναδρομική φόρμα για τον υπολογισμό του μέσου διανύσματος από $N_{k^*} + 1$ πρότυπα. Η τιμή του N_{k^*} αυξάνεται τότε κατά 1 ($N_{k^*} = N_{k^*} + 1$). Διαφορετικά, πρέπει να παραχθεί ένας νέος νευρώνας, προκειμένου να συμπεριληφθεί η τρέχουσα επιθυμητή πρότυπη έξοδος. Το διάνυσμα συνδετικών βαρών του νέου νευρώνα , \underline{u}_{K+1} αρχικοποιείται στην έξοδο \underline{d}_i (δηλαδή $\underline{u}_{K+1} = \underline{d}_i$) και ο αριθμός των νευρώνων επίσης αυξάνεται κατά 1, δηλαδή $K = K+1$.

Βήμα 4^ο : Τερματισμός της διαδικασίας εάν έχουν προσπελαστεί όλες οι πρότυπες έξοδοι, διαφορετικά εκτελείται το βήμα 2^ο .

Ο καθορισμός της τιμής του κατωφλίου ομοιότητας θ_d , εξαρτάται από το είδος του προβλήματος που αντιμετωπίζεται κάθε φορά. Εάν το πρόβλημα είναι μια αναγνώριση προτύπων K -κλάσης, τότε η παράμετρος θ_d τίθεται ίση με τη μονάδα, καθώς οι επιθυμητές έξοδοι για τη δεικτοδότηση K κλάσεων συνήθως είναι K συνεχείς ακέραιοι. Δίνοντας αυτή την τιμή, μια δέσμη θα αντιστοιχεί με μία επιθυμητή κλάση μία προς μία. Σε σχέση όμως με τα προβλήματα αποτίμησης-προσέγγισης μιας συνάρτησης, η τιμή της παραμέτρου θ_d καθορίζει την ασυμπτωτική ακρίβεια της προσέγγισης. Ως ένα βαθμό, αντιπροσωπεύει την ποσότητα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, την οποία θέλουμε το εκπαιδευμένο HS-ARTMAP δίκτυο να επιτύχει .

5.4.3 Η παραπλήσια με RBF δίκτυο μονάδα (RBF-like μονάδα)

Ως γνωστόν , ένα RBF δίκτυο είναι ένα δίκτυο τριών επιπέδων και επιτελεί μια μη γραμμική απεικόνιση από τον χώρο $\mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ μέσω του ακόλουθου μετασχηματισμού:

$$y = \sum_{j=1}^J u_j \phi_j(\underline{x}, \underline{w}_j) \quad (5.15)$$

,όπου $\underline{x}_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ είναι ένα n -διάστατο πρότυπο διάνυσμα δεδομένων, u_j είναι το διάνυσμα συνδετικών βαρών μεταξύ του κρυφού κόμβου j και του κόμβου εξόδου, J είναι ο αριθμός των κρυφών κόμβων , $\phi_j(\underline{x}, \underline{w}_j)$ είναι μια συνάρτηση ακτινωτής βάσης, \underline{w}_j είναι οι αντίστοιχες ρυθμιζόμενες παράμετροι της συνάρτησης ακτινωτής βάσης $\phi_j(\underline{x}, \underline{w}_j)$ και τέλος y είναι η έξοδος του νευρωνικού δικτύου.

Όπως και στην περίπτωση του μοντέλου NTUA η πιο δημοφιλής συνάρτηση ακτινωτής βάσης είναι η γκαουσιανή :

$$\phi_j(\underline{x}, \underline{w}_j) = e^{-\frac{\|\underline{x} - \underline{m}_j\|^2}{\sigma_j^2}} \quad (5.16)$$

, όπου \underline{m}_j και σ_j είναι το μέσο n-διάστατο διάνυσμα και η τυπική απόκλιση της j-οστής γκαουσιανής συνάρτησης βάσης. Ένα RBF δίκτυο που δουλεύει με γκαουσιανή συνάρτηση βάσης μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα, όταν οι επιθυμητές έξοδοι έχουν σταθερές τιμές σε συγκεκριμένες περιοχές. Για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία προτείνονται και άλλες συναρτήσεις βάσης. Για την RBF-like μονάδα του δικτύου HS-ARTMAP η συνάρτηση βάσης που προτείνεται για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των σταθερών τιμών είναι η υπερ-σφαιρική (hyper spherical) και ορίζεται ως εξής :

$$\phi_j(\underline{x}, \underline{w}_j) = \frac{d_{\max} - d_j(\underline{x})}{a + (d_{\max} - r_j)} \quad (5.17)$$

, όπου

$$d_{\max} = \sum_{i=1}^n (M_i - m_i) \quad (5.18) \quad \text{και}$$

$$d_j(\underline{x}) = \begin{cases} r_j, & \text{αν } \|\underline{x} - \underline{c}_j\| \leq r_j \\ \|\underline{x} - \underline{c}_j\|, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.19)$$

Οι παράμετροι M_i και m_i είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα, όλων των πρότυπων εισόδων στην i-οστή διάσταση. Ουσιαστικά η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή σε κάθε διάσταση είτε είναι διαθέσιμες εκ των προτέρων είτε μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με μια διαδικασία ταξινόμησης των πρότυπων δεδομένων σε κάθε διάσταση. Είναι λογικό να θεωρηθεί ότι τα άνω και κάτω όρια που χαρακτηρίζουν την είσοδο, είναι συνήθως διαθέσιμα εκ των προτέρων. Για παράδειγμα τα επίπεδα γκρι (gray levels) ενός pixel μιας ψηφιακής εικόνας φράσσονται στο διάστημα τιμών [0, 255] με κωδικοποίηση των 8 bits. Έτσι εάν τα άνω και κάτω όρια είναι διαθέσιμα εκ των προτέρων, όπως στο προηγούμενο παράδειγμα, τότε προτείνεται η χρήση τους για τον προσδιορισμό των παραμέτρων M_i και m_i . Στην περίπτωση που τα άνω και κάτω όρια δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων, τότε η μόνη επιλογή είναι η θεώρηση ακραίων τιμών για αυτά, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν μέσα από κάποια νέα πρότυπα δεδομένα με τιμές που κυμαίνονται εκτός του εύρους τιμών που ορίζουν οι παράμετροι M_i και m_i .

Οι ρυθμιζόμενες παράμετροι, \underline{w}_j αποτελούνται από τις παραμέτρους \underline{c}_j και r_j , συγκεκριμένα : $\underline{w}_j = (c_{j1}, \dots, c_{jn}, r_j)^T$. Ενώ οι παράμετροι M_i και m_i είναι έτοιμες αμέσως μετά τον υπολογισμό τους, οι παράμετροι \underline{c}_j και r_j πρέπει να ρυθμίζονται (προσαρμόζονται) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ως ένα βαθμό οι παράμετροι \underline{c}_j και r_j μπορούν να χαρακτηριστούν ως το διάνυσμα των κέντρων της συνάρτησης ακτινωτής βάσης (γενικευμένης σφαίρας HS_j) και η αντίστοιχη ακτίνα της

γενικευμένης σφαίρας, η οποία ορίζεται μέσω της συνάρτησης $\|x - c_j\| = r_j$. Ο αριθμός a (συνήθως είναι μικρότερος της μονάδας) είναι μια παράμετρος για διάκριση πολύ παραπλήσιων περιπτώσεων, επιλέγοντας τη γενικευμένη σφαίρα με τη μικρότερη ακτίνα r_j , όταν τα πρότυπα δεδομένα εμπίπτουν ταυτόχρονα σε περισσότερες γενικευμένες σφαίρες. Για μικρές τιμές της ακτίνας r_j (π.χ. $r_j = 0.1$) η συνάρτηση αυτή ακτινωτής βάσης μοιάζει ιδιαίτερα με τη γκαουσιανή συνάρτηση βάσης, ωστόσο για μεγαλύτερες τιμές της ακτίνας r_j (π.χ. $r_j = 0.5$) η υπερ-σφαιρική συνάρτηση βάσης προκύπτει σταθερή εντός μιας κυκλικής περιοχής.

Οι νευρώνες στο ανταγωνιστικό επίπεδο της RBF-like μονάδας αποτελούνται από τους νευρώνες με τις υπερ-σφαιρικές ακτινωτές συναρτήσεις βάσης. Ανταγωνίζονται ο ένας τον άλλο μέχρι να αναδειχτεί κάποιος νικητής με βάση το κριτήριο μέγιστης εξόδου (Maximum Output). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης όλου του δικτύου, η πληροφορία για το ποιος είναι ο νικητής νευρώνας θα διαδοθεί στο επίπεδο των κατηγοριών, για τη δεικτοδότηση των νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο και για σκοπούς ταιριάσματος (matching). Αν ο k -οστός νευρώνας της ART-like μονάδας και ο j -οστός νευρώνας του ανταγωνιστικού επιπέδου υπερσχύσουν στους ανταγωνισμούς αντιστοίχως, τότε το συνδετικό βάρος cw_{jk} που συνδέει το j -οστό κόμβο του ανταγωνιστικού επιπέδου με τον κόμβο C_k του επιπέδου των κατηγοριών γίνεται ίσο με τη μονάδα. Διαφορετικά δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των δύο κόμβων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας κόμβος του ανταγωνιστικού επιπέδου μπορεί να συνδεθεί με έναν μόνο κόμβο του επιπέδου των κατηγοριών. Επιπλέον μετά τη σύναψη και σύνδεση των κόμβων, οι τελευταίοι παραμένουν μόνιμα συνδεδεμένοι και το αντίστοιχο συνδετικό βάρος τους έκτοτε παραμένει ίσο με τη μονάδα. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ελέγχου, μόνο τα ενεργά διανύσματα συνδετικών βαρών θα τροφοδοτήσουν την αθροιστική μονάδα βαρών για τον υπολογισμό της τελικής εξόδου του εκπαιδευμένου δικτύου.

Εάν μόνο ο νικητής νευρώνας στο ανταγωνιστικό επίπεδο συνεισφέρει στον υπολογισμό της τελικής εξόδου, τότε υπό θορυβώδεις συνθήκες το δίκτυο δεν αναμένεται να αποδώσει καλά. Αυτός είναι και ο λόγος ύπαρξης της αθροιστικής μονάδας βαρών στο HS-ARTMAP δίκτυο για τον υπολογισμό της εξόδου του. Πιο αναλυτικά η αθροιστική μονάδα βαρών περιγράφεται στην ενότητα της διαδικασίας ελέγχου του δικτύου.

5.4.4 Η διαδικασία εκπαίδευσης του δικτύου HS-ARTMAP

Έχοντας περιγράψει πλήρως την αρχιτεκτονική του HS-ARTMAP δικτύου, στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στον αλγόριθμο εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται για το δίκτυο. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης ξεκινά με μηδενικό αριθμό νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο και στην πορεία προστίθενται σταδιακά νευρώνες στο δίκτυο προκειμένου να παράγουν ακριβείς προβλέψεις. Το πιο σημαντικό μέρος του αλγορίθμου εκπαίδευσης του HS-ARTMAP δικτύου συνοψίζεται στα βήματα που ακολουθούν:

Βήμα 1^ο: Επιλογή της τιμής κατωφλίου της παραμέτρου vigilance p_b , και της αρχικής τιμής της ακτίνας της γενικευμένης σφαίρας r_b , καθορισμός των τιμών των παραμέτρων Δr και a και αρχικοποίηση στην τιμή 0 του δείκτη J , που αναπαριστά τον τρέχοντα αριθμό των νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο.

Βήμα 2^ο : Παρουσίαση μιας πρότυπης εισόδου $\underline{\mathbf{x}}$, στην RBF-like μονάδα και της αντίστοιχης επιθυμητής πρότυπης εξόδου $\underline{\mathbf{d}}$ στην ART-like μονάδα. Στο σημείο αυτό υποτίθεται ότι ο νικητής νευρώνας είναι ο νευρώνας C_k όταν η επιθυμητή πρότυπη έξοδος είναι η $\underline{\mathbf{d}}$ στην ART-like μονάδα.

Βήμα 3^ο : Εάν δεν συναντηθεί ένας υπάρχων νευρώνας στο ανταγωνιστικό επίπεδο, τότε ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 8 για τη δημιουργία ενός νέου νευρώνα ,προς αντιστοιχία με την πρώτη στη σειρά πρότυπη είσοδο $\underline{\mathbf{x}}$. Διαφορετικά υπολογίζονται οι έξοδοι των υπάρχοντων νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο με χρήση της εξίσωσης (5.17).

Βήμα 4^ο : Μετά τον παραπάνω υπολογισμό ,ακολουθεί η εύρεση του νικητή νευρώνα j^* με κριτήριο τη μέγιστη έξοδο της συνάρτησης ακτινωτής βάσης :

$$\phi_{j^*}(\mathbf{x}) = \underset{j=1,\dots,J}{\text{Arg max}} \phi_j(\mathbf{x}) \quad (5.20)$$

Εδώ θεωρείται ότι ο τρέχων αριθμός των νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο είναι J . Αν όλοι οι υπάρχοντες νευρώνες προκύψουν ανενεργοί τότε ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 8 , ειδάλλως στο βήμα 5 .

Βήμα 5^ο : Έλεγχος αν η έξοδος του νικητή νευρώνα είναι μεγαλύτερη από την τιμή της παραμέτρου vigilance που σχετίζεται με το νικητή νευρώνα :

$$\phi_{j^*}(\mathbf{x}) \geq p_{j^*} \quad (5.21)$$

Εάν η συνθήκη πληρείται τότε ακολουθεί το βήμα 6, διαφορετικά γίνεται άλμα στο βήμα 8.

Βήμα 6^ο : Έλεγχος αν τα πρότυπα δεδομένα εισόδου $\underline{\mathbf{x}}$ περιέχονται στη γενικευμένη σφαίρα , HS_{j^*} , που ορίζεται από το νικητή νευρώνα j^* :

$$\|\underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{c}}_{j^*}\| \leq r_{j^*} \quad (5.22)$$

Περίπτωση 1η : Το διάνυσμα δεδομένων περιέχεται εντός της γενικευμένης σφαίρας HS_{j^*} .

Συνθήκη 1.1 : $cw_{j^*,k} = 1$

Εφόσον το αναγνωριστικό (label) του νικητή νευρώνα ταιριάζει με τον νευρώνα C_k δεν χρειάζεται κάποια ενημέρωση των βαρών του νικητή νευρώνα και ο αλγόριθμος μπορεί να μεταβεί στο βήμα 2 ,για να συνεχιστεί η διαδικασία εκμάθησης νέων προτύπων.

Συνθήκη 1.2 : $cw_{j^*,k} \neq 1$

Εφόσον το αναγνωριστικό (label) του νικητή νευρώνα δεν ταιριάζει με τον νευρώνα C_k τίθεται $p_{j^*} = 1$ και ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 8 ,για την προσθήκη ενός νέου νευρώνα. Θέτοντας $p_{j^*} = 1$ αποφεύγεται η συμμετοχή στον

j^* -οστό νευρώνα και άλλων προτύπων που ανήκουν σε κλάσεις διαφορετικές από αυτή του νικητή νευρώνα και μπορεί να συμπεριλαμβάνονται στην περιοχή της γενικευμένης σφαίρας HS_{j^*} .

Περίπτωση 2η : Το διάνυσμα δεδομένων δεν περιέχεται εντός της γενικευμένης σφαίρας HS_{j^*} .

Συνθήκη 2.1 : $cw_{j^*,k} = 1$

Εάν $p_{j^*} = 1$, απενεργοποιείται ο νικητής νευρώνας και εκτελείται το βήμα 4 για την αναζήτηση ενός άλλου νικητή. Αν όμως $p_{j^*} \neq 1$ εκτελείται το βήμα 7 για την ανανέωση των βαρών του νικητή νευρώνα.

Συνθήκη 2.1 : $cw_{j^*,k} \neq 1$

Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται ελάχιστα η τιμή της παραμέτρου vigilance που σχετίζεται με τον j^* -οστό νευρώνα, με την πρόσθεση μιας πολύ μικρής ποσότητας σε αυτήν (π.χ. $p_{j^*} = \min [1.0, p_{j^*} + \Delta p]$). Τότε απενεργοποιείται ο νευρώνας και εκτελείται το βήμα 4 για αναζήτηση επόμενου νικητή.

Βήμα 7^ο : Ανανέωση των βαρών του νικητή με την επέκταση της γενικευμένης σφαίρας που ορίζεται από τα βάρη του νικητή προκειμένου να επικαλύψει το τρέχον διάνυσμα εισόδου $\underline{\mathbf{x}}$:

$$c_{j^*,i} = x_i + \frac{r_{j^*} + \|\underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{c}}_{j^*}\|}{2r_{j^*}} (c_{j^*,i} - x_i) \quad \text{για } 1 \leq i \leq n \quad (5.23)$$

$$r_{j^*} = \frac{r_{j^*} + \|\underline{\mathbf{x}} - \underline{\mathbf{c}}_{j^*}\|}{2} \quad (5.24)$$

Εκτελείται το βήμα 2^ο.

Βήμα 8^ο : Ένας νέος νευρώνας προστίθεται και αρχικοποιείται ως ακολούθως :

$$p_{J+1} = p_b \quad (5.25) ,$$

$$c_{J+1} = x_i \quad \mu\epsilon \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.26) ,$$

$$r_{J+1} = r_b \quad (5.27) ,$$

$$cw_{(J+1),k} = 1 \quad (5.28) \quad \text{και}$$

$$J = J + 1 \quad (5.29).$$

Εκτελείται το βήμα 2^ο για την εκμάθηση του επόμενου προτύπου ^[61].

Διάφορες σημαντικές παρατηρήσεις μπορούν να εξαχθούν από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης του δικτύου HS-ARTMAP :

1. Μικρότερες γενικευμένες σφαίρες θα σχηματιστούν εντός των μεγαλύτερων σφαιρών , προκειμένου να παραχθούν σωστές προβλέψεις για σημειακά δεδομένα που περιέχονται στις μεγάλες γενικευμένες σφαίρες, έχοντας όμως διαφορετικά αναγνωριστικά κλάσεων από αυτά της επιθυμητής κλάσης δεδομένων.
2. Γενικευμένες σφαίρες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κλάσεις δεδομένων μπορεί να επικαλύπτονται. Αυτός είναι και ο λόγος σχηματισμού μικρότερων σφαιρών που περιγράφει η παρατήρηση 1.
3. Αν ένα σημείο δεδομένων περιέχεται ταυτόχρονα σε διάφορες σφαίρες με διαφορετικά αναγνωριστικά κλάσεων η καθεμία, τότε το σημείο αυτό θα συμπεριληφθεί στη μικρότερη σφαίρα για λόγους ακρίβειας .
4. Όταν μια σφαίρα περιέχει δεδομένα (σημεία) με διαφορετικό αναγνωριστικό κλάσης από αυτήν , τότε αυτόματα αυξάνεται η παράμετρος vigilance, έτσι ώστε η σφαίρα να μην επεκτείνεται περαιτέρω. Ειδάλλως μια σφαίρα μπορεί να έχει μεγάλη πιθανότητα να περιέχει σημεία με διαφορετικά ως προς αυτήν αναγνωριστικά κλάσης.
5. Όταν αναγνωρίζεται ότι μια σφαίρα είναι κοντά σε σημεία με διαφορετικά ως προς αυτήν αναγνωριστικά κλάσης, τότε αυξάνεται λίγο η παράμετρος vigilance με την πρόσθεση μιας μικρής ποσότητας σε αυτήν. Έτσι για τις υπόλοιπες επαναλήψεις η σφαίρα θα επεκτείνεται πολύ συντηρητικά, προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ανεπιθύμητων φωλιασμένων μικρών σφαιρών.

5.4.5 Η διαδικασία διαμόρφωσης της εξόδου του δικτύου HS-ARTMAP

Μετά τη διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP, ακολουθεί η διαδικασία του ελέγχου-αποτίμησης του. Στη διαδικασία αυτή το εκπαιδευμένο δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει μια έξοδο ,όταν μια πρότυπη είσοδος \underline{x} εμφανιστεί σε αυτό. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό της εξόδου του δικτύου, δύο από τις οποίες περιγράφονται στη συνέχεια:

Μέθοδος 1

Η απλούστερη εκδοχή ελέγχου είναι η υιοθέτηση της μεθόδου που εφαρμόζεται στα ασαφή ARTMAP συστήματα. Σύμφωνα με αυτή μόνο ο νικητής νευρώνας του ανταγωνιστικού επιπέδου μπορεί να συνεισφέρει στον υπολογισμό της εξόδου του δικτύου. Υποθέτοντας λοιπόν ότι ο j^* νευρώνας υπερικχύει στον ανταγωνισμό του αντίστοιχου επιπέδου, όταν η πρότυπη είσοδος \underline{x} παρουσιάζεται στο δίκτυο, η έξοδος του δικτύου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής :

$$\underline{y} = \underline{u}_k \quad \text{όταν} \quad cw_{j^*,k} = 1 \quad (5.30)$$

Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν αποδίδει πολύ καλά σε προβλήματα προσέγγισης συναρτήσεων υπό θορυβώδεις συνθήκες. Στη διαδικασία υπολογισμού της εξόδου, αν οι πρότυπες έξοδοι εμπεριέχουν ανεπιθύμητο θόρυβο, τότε αυτές οι θορυβώδεις έξοδοι μπορεί να οδηγήσουν την ART-like μονάδα του δικτύου να παράγει αχρειαστούς νευρώνες και έτσι αυτοί να απειλούν με το σχηματισμό ισχυρών νευρώνων στο ανταγωνιστικό επίπεδο. Για το λόγο αυτό, σε μια διαδικασία υπολογισμού της εξόδου ενός δικτύου, οι προβλεπόμενες έξοδοι για αυτές τις πρότυπες εισόδους, μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένες συνδέσεις μέσω συνδετικών βαρών με τους αχρειαστούς νευρώνες στην ART-like μονάδα. Προς αποφυγή αυτής της προβληματικής κατάστασης έχουν διατυπωθεί διάφορες προσεγγίσεις (PROBART, ART-EMAP, ART-IC κ.α.). Όλες οι προσεγγίσεις αυτές χρησιμοποιούν δυο ασαφείς ART μονάδες με πολύ παρόμοιο τρόπο όπως το ασαφές ARTMAP σύστημα και επί της ουσίας βασίζονται σε μια μορφή ενός σταθμισμένου μέσου (weighted average) που προκύπτει από τις μεμονωμένες προβλέψεις. Το HS-ARTMAP δίκτυο υιοθετεί κατά παρόμοιο τρόπο τη χρήση της αθροιστικής μονάδας βαρών (weighted summation module) για τον υπολογισμό της εξόδου του και διαφέρει από τις υπόλοιπες ως προς τον αριθμό των κόμβων που μετέχουν στον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου και τους παράγοντες βαρύτητας.

Μέθοδος 2

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, μόνο οι νευρώνες που έχουν τις υψηλότερες αποκρίσεις στις πρότυπες εισόδους μπορούν να συνεργαστούν για να παράγουν την έξοδο του δικτύου. Οι παράγοντες βαρύτητας προέρχονται από τις τιμές των παραμέτρων N_k που αποθηκεύουν τον αριθμό των πρότυπων εξόδων στις οποίες αποκρίθηκαν οι νευρώνες της ART-like μονάδας. Έτσι η έξοδος του δικτύου υπολογίζεται ως ακολούθως :

$$\underline{y} = \frac{\sum_{j \in S_{comp}} \sum_{k \in S_{ART}} cw_{j,k} N_k \underline{u}_k}{\sum_{j \in S_{comp}} \sum_{k \in S_{ART}} cw_{j,k} N_k} \quad (5.31)$$

, όπου

$$S_{comp} = \{j \mid \phi_j(\underline{\mathbf{x}}) \geq \theta_{recruited}\} \quad (5.32)$$

και

$$S_{ART} = \left\{ k \mid cw_{j,k} = 1 \quad \text{και} \quad j \in S_{comp} \right\} \quad (5.33)$$

Οι παράγοντες βαρύτητας είναι οι τιμές των N_k που υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης της ART-like μονάδας. Σε περιπτώσεις αιφνίδιας εμφάνισης θορύβων, οι νευρώνες που αντιστοιχούν στις θορυβώδεις συνιστώσες πιθανότατα θα σχετίζονται με πολύ μικρές τιμές N_k , έτσι η εξίσωση (5.31) έχει τη δυνατότητα να μειώνει την ευαισθησία του δικτύου στις θορυβώδεις συνθήκες. Η ποιότητα της προσέγγισης εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου $\theta_{recruited}$. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή αυτής της παραμέτρου τόσο μικρότερος είναι ο αριθμός των νευρώνων που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της εξόδου του δικτύου. Με μηδενική τιμή αυτής της παραμέτρου όλοι οι νευρώνες συμμετέχουν στον υπολογισμό της εξόδου.

5.5 Αυτό-οργανούμενοι Χάρτες (Self-organizing Maps, SOM)

5.5.1 Γενικά

Οι αυτό-οργανούμενοι χάρτες (SOM) είναι μια ειδική κατηγορία νευρωνικών δικτύων, τα οποία βασίζονται στην αναταγωνιστική μάθηση. Οι νευρώνες εξόδου ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το δικαίωμα ενεργοποίησης, με αποτέλεσμα μόνο ένας νευρώνας εξόδου, ή ένας νευρώνας ανά ομάδα, να είναι ενεργός ανά πάσα στιγμή. Ο νευρώνας εξόδου που νικά στον ανταγωνισμό (νικητής νευρώνας) απολαμβάνει το καθεστώς «ο νικητής τα παίρνει όλα». Ένας τρόπος για να προκαλέσουμε ανταγωνισμό του είδους «ο νικητής τα παίρνει όλα» μεταξύ των νευρώνων εξόδου είναι χρησιμοποιώντας πλευρικές ανασταλτικές συνδέσεις, δηλαδή διαδρομές αρνητικής ανάδρασης, μεταξύ τους.^[54]

Σε έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη, οι νευρώνες τοποθετούνται στους κόμβους ενός πλέγματος το οποίο συνήθως είναι μονοδιάστατο ή δισδιάστατο. Οι νευρώνες συντονίζονται (tuned) επιλεκτικά σε διάφορα πρότυπα εισόδου (ερεθίσματα) ή κλάσεις προτύπων εισόδου, κατά την πορεία μιας ανταγωνιστικής διαδικασίας μάθησης. Οι θέσεις των νευρώνων που συντονίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο (δηλαδή οι νικητές νευρώνες) διατάσσονται ο ένας σε σχέση με τον άλλο με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να δημιουργείται ένα λογικό σύστημα συντεταγμένων για διαφορετικά χαρακτηριστικά εισόδου πάνω στο πλέγμα. Συνεπώς, ένας αυτό-οργανούμενος χάρτης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό ενός τοπογραφικού χάρτη αποτελούμενου από τα πρότυπα εισόδου, στον οποίο οι χωρικές θέσεις (συντεταγμένες) των νευρώνων στο πλέγμα είναι ενδεικτικές των εσωτερικών στατιστικών χαρακτηριστικών που περιέχονται στα πρότυπα εισόδου.

Κάθε πρότυπο εισόδου που παρουσιάζεται στο δίκτυο αποτελείται τυπικά από μια «τοπικοποιημένη» περιοχή ή σημείο δραστηριότητας πάνω σε «ήσυχο» υπόβαθρο. Η θέση και η φύση ενός τέτοιου σημείου συνήθως μεταβάλλεται από το ένα στιγμιότυπο του προτύπου εισόδου στο επόμενο. Συνεπώς, όλοι οι νευρώνες του δικτύου θα πρέπει να εκτίθενται σε επαρκή αριθμό διαφορετικών στιγμιότυπων του προτύπου εισόδου για να διασφαλιστεί ότι η διαδικασία αυτό-οργάνωσης θα έχει την ευκαιρία να αναπτυχθεί σωστά^[54].

Ο αλγόριθμος που είναι υπεύθυνος για το σχηματισμό του αυτό-οργανούμενου χάρτη ξεκινά χρησιμοποιώντας τα συναπτικά βάρη στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να γίνει αναθέτοντάς του μικρές τιμές, επιλεγμένες από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Με αυτόν τον τρόπο, δεν επιβάλλεται κάποια αρχική σειρά στο χάρτη των χαρακτηριστικών. Αφού το δίκτυο αρχικοποιηθεί σωστά, υπάρχουν τρεις σημαντικές διαδικασίες που εμπλέκονται στο σχηματισμό του αυτό-οργανούμενου χάρτη:

1. *Ανταγωνισμός:* Για κάθε πρότυπο εισόδου, οι νευρώνες του δικτύου υπολογίζουν τις αντίστοιχες τιμές μιας συνάρτησης διάκρισης. Αυτή η συνάρτηση διάκρισης παρέχει τη βάση για τον ανταγωνισμό μεταξύ των νευρώνων. Ο συγκεκριμένος νευρώνας με τη μεγαλύτερη τιμή στη συνάρτηση διάκρισης δηλώνεται νικητής του ανταγωνισμού.
2. *Συνεργασία:* Ο νικητής νευρώνας καθορίζει τη χωρική θέση μια τοπολογικής γειτονιάς διεγερμένων νευρώνων, παρέχοντας έτσι τη βάση για τη συνεργασία μεταξύ τέτοιων γειτονικών νευρώνων.

3. *Προσαρμογή συναπτικών βαρών:* Αυτός ο τελευταίος μηχανισμός επιτρέπει στους διεγερμένους νευρώνες να αυξάνουν τις τιμές της συνάρτησης διάκρισης σε σχέση με το πρότυπο εισόδου μέσω κατάλληλων προσαρμογών που εφαρμόζονται στα συναπτικά βάρη τους. Οι προσαρμογές που γίνονται είναι τέτοιες ώστε η απόκριση του νικητή νευρώνα στην επόμενη εφαρμογή ενός παρόμοιου προτύπου εισόδου να είναι βελτιωμένη.

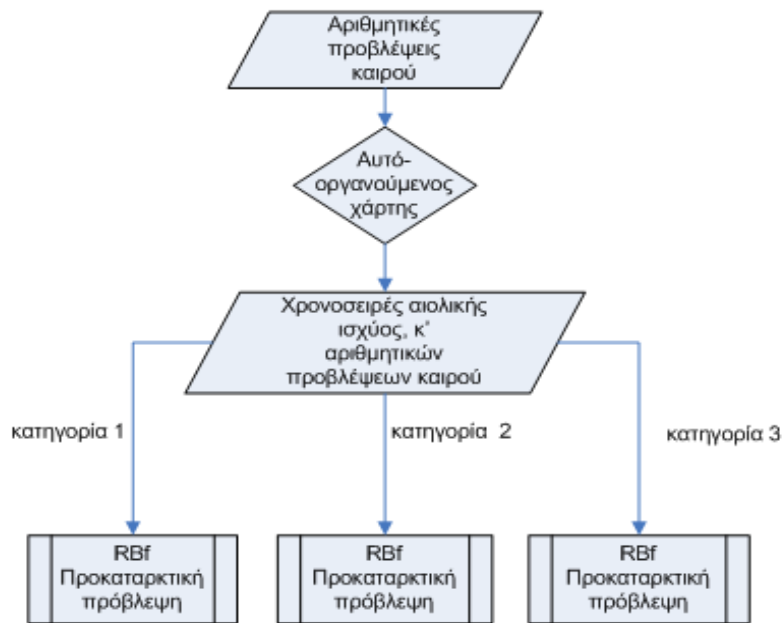
5.5.2 Το μοντέλο NTUA

Το μοντέλο NTUA είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης αιολικής ισχύος, το οποίο αναπτύχθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια του διεθνούς ερευνητικού προγράμματος ANEMOS. Το μοντέλο επιχειρεί την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος με τη χρήση τεχνικών ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης (Radial Basis Function - RBF), αλλά και νευρωνικών δικτύων Kohonen και αυτό-οργανούμενων χαρτών, που χρησιμοποιούν δεδομένα από την χρονοσειρά της αιολικής ισχύος και από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το μοντέλο NTUA χρησιμοποιήθηκε για την αρχική επεξεργασία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και την εκτίμηση της αιολικής παραγωγής με βάση αυτές. Από την έξοδο του μοντέλου NTUA δημιουργήθηκε το διάγραμμα εισόδου που δόθηκε στη συνέχεια στο δίκτυο HS-ARTMAP για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης.

Η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου που προέρχεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού αποτελεί τη σημαντικότερη πληροφορία για την εκτίμηση της παραγωγής της αιολικής ισχύος. Γι' αυτό, για να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος απαιτείται από τη μια, όσο το δυνατόν ακριβείς προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου και από την άλλη, ευφυής χειρισμός των αριθμητικών προβλέψεων καιρού για να ανακτηθεί όλη η πληροφορία που περιέχουν. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού αποκλίνουν σε πολλές περιπτώσεις από τις πραγματικές τιμές που μετρούνται. Τέτοια σφάλματα ανήκουν στις κατηγορίες των χωρικών σφαλμάτων, ή των σφαλμάτων φάσης και ράμπας και συνήθως δεν είναι εύκολο να αναγνωριστούν απ' ευθείας. Ένας λόγος που το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι τόσο δύσκολο, είναι και το γεγονός ότι πρέπει να γίνει η βέλτιστη διαχείριση της αβεβαιότητας που περιέχουν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Στην προσέγγιση του μοντέλου NTUA, το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος χωρίστηκε σε τρία μέρη για την πιο εύκολη αντιμετώπισή του. Στην ουσία, δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες της ατμοσφαιρικής κατάστασης που βασίζονται στις τιμές της προβλεπόμενης ταχύτητας, που αντιστοιχούν στις ώρες κοντά στην χρονική στιγμή για την οποία γίνεται η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, τα τρία μέρη της καμπύλης ισχύος που όπως έχει ήδη αναφερθεί έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, προσεγγίστηκαν ξεχωριστά και παράλληλα, ενώ οι μεγάλες αποκλίσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού επιμερίστηκαν με σκοπό τον ευκολότερο εντοπισμό τους.

Το μοντέλο της προκαταρκτικής πρόβλεψης του μοντέλου NTUA, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, έχει στη είσοδό του έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη. Ο αυτό-οργανούμενος χάρτης χρησιμοποιήθηκε για να χωρίσει τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε τρεις κατηγορίες με βάση το μέγεθός τους. Τελικά, την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος παρέχουν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μία κατηγορία της αιολικής ταχύτητας.



Σχήμα 5.8: Δομή της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Αναλυτικά, ο αυτό-οργανούμενος χάρτης της προκαταρκτικής μονάδας του μοντέλου NTUA δέχεται στην είσοδο του τρεις τιμές της ταχύτητας που προέρχονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και αντιστοιχούν η μία στην ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη και οι άλλες δύο στην προηγούμενη και στην επόμενη ώρα από την ώρα της πρόβλεψης αντίστοιχα. Αυτό το νευρωνικό δίκτυο 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. Δηλαδή η χρονοσειρά της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου διαιρείται σε τρεις κατηγορίες.

Αφού ταξινομήθηκαν οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου με βάση το μέγεθος τους σε τρεις κατηγορίες, τότε ενσωματώθηκαν και οι υπόλοιπες μεταβλητές που εφαρμόζονται για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Αυτές είναι η πιο πρόσφατη μέτρηση της αιολικής ισχύος, η διεύθυνση του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και η ώρα πρόβλεψης. Έτσι, διαμορφώθηκαν τρία υποσύνολα εκμάθησης. Με κάθε υποσύνολο εκμάθησης εκπαιδεύτηκε ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης με σκοπό να δώσει την πρώτη εκτίμηση της αιολικής ισχύος του μοντέλου NTUA.

Με τον τρόπο αυτό τα δίκτυα ακτινωτής βάσης εκπαιδεύτηκαν καλύτερα στο να χειρίζονται περισσότερες δύσκολες περιπτώσεις πρόβλεψης που οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι ανακριβείς. Επίσης για να γίνει ευκολότερη η εκμάθηση των νευρωνικών δικτύων του μοντέλου NTUA, οι τιμές της ταχύτητας προσαρμόστηκαν με ένα ασαφές μοντέλο που εφαρμόστηκε για την προεπεξεργασία των δεδομένων. Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης λάμβαναν έτσι στην είσοδο τους την τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος όταν πρόκειται για πρόβλεψη της πρώτης ώρας, ενώ για πρόβλεψη πάνω από δύο ώρες χρησιμοποιήθηκε η προηγούμενη πρόβλεψη ισχύος του μοντέλου. Τέλος, οι τιμές της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην προηγούμενη και στην επόμενη ώρα από αυτή που γίνεται η πρόβλεψη, χρησιμοποιήθηκαν για να αναγνωριστεί η μελλοντική πρόθεση του ανέμου να αυξηθεί ή να μειωθεί και να περιγραφεί καλύτερα η κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Συνοψίζοντας, στη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του μοντέλου NTUA το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος χωρίστηκε σε τρία επιμέρους, με την βοήθεια ενός αυτό-οργανούμενου χάρτη ο οποίος λαμβάνοντας τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου κοντά στην ώρα της πρόβλεψης όρισε τρεις κατηγορίες της ατμοσφαιρικής κατάστασης. Για κάθε επιμέρους πρόβλημα που σχηματίστηκε εφαρμόστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης που δίνει την πρώτη εκτίμηση για την ωριαία αιολική παραγωγή.

Κεφάλαιο 6

Πιθανοτική Πρόβλεψη στην Αιολική παραγωγή με χρήση του νευρωνικού δικτύου HS-ARTMAP

6.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναπτύχθηκε η θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με ιδιαίτερη αναφορά στα δίκτυα ARTMAP και πιο συγκεκριμένα το HS-ARTMAP. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά σειρά για την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης σε αιολικό πάρκο της Κρήτης και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση Matlab. Παρουσιάζεται ακόμη η εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO και η χρησιμοποίησή του για τη βελτιστοποίηση της πιθανοτικής πρόβλεψης.

6.2 Πρόβλεψη χωρίς βελτιστοποίηση

Αρχικά, το πρόβλημα της πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής προσεγγίστηκε θεωρώντας ίσα βάρη για το διάνυσμα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο HS-ARTMAP. Το γεγονός αυτό δεν εγγυάται τη βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων εισόδου για τους σκοπούς της πρόβλεψης.

Το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε στο αιολικό πάρκο στην «Πλατοκερατιά Δ. Ιτάνου Λασιθίου» στην Κρήτη. Το αιολικό αυτό πάρκο βρίσκεται στο ανατολικό μέρος της Κρήτης και σε συντεταγμένες $26,2^\circ$ γεωγραφικό μήκος και $35,16^\circ$ γεωγραφικό πλάτος. Αποτελείται από 30 ανεμογεννήτριες τύπου BONUS 600 MK4 και η εγκατεστημένη του ισχύς είναι τα 18 MW. Η περιοχή του αιολικού πάρκου είναι ημι-ορεινή με χαμηλό βαθμό προβλεψιμότητας, καθώς οι επικρατούντες άνεμοι επηρεάζονται από ένα συνδυασμό θαλάσσιας αύρας και ορεινών ανέμων. Οι χρονοσειρές της αιολικής ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική καλύπτουν την περίοδο από 1^η Ιανουαρίου 2008 μέχρι την 31^η Δεκεμβρίου 2008. Οι πρώτοι 6 μήνες του 2008 χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, ενώ η αποτίμηση της επίδοσής του πραγματοποιήθηκε για τους υπόλοιπους 6 μήνες.

Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού NWP που παρέχονται από ένα υψηλής ανάλυσης μετεωρολογικό μοντέλο, έχουν τη μορφή πολλαπλών οριζοντίων πλεγμάτων με ανάλυση 15 km και καλύπτουν μια εκτεταμένη περιοχή, όπως τη Μεσόγειο. Κάθε οριζόντιο πλέγμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό ύψος από την επιφάνεια της γης. Συνήθως οι μετεωρολογικές υπηρεσίες παρέχουν τις NWP που αντιστοιχούν στο κοντινότερο με το αιολικό πάρκο πλέγμα. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκαν 6 NWP πλέγματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικά ύψη και καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή γύρω από το αιολικό πάρκο. Οι προβλέψεις των μετεωρολογικών μεταβλητών υπολογίζονται για κάθε σημείο των οριζοντίων πλεγμάτων. Αυτές οι προβλέψεις ανανεώνονται δύο φορές την ημέρα και έχουν χρονικό ορίζοντα τριών ημερών. Η χρονική ανάλυση του NWP μοντέλου είναι 3 ώρες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχουν 24 τιμές για κάθε μετεωρολογική μεταβλητή και για κάθε σημείο του οριζοντίου NWP πλέγματος σε κάθε ανανέωση. Αντίθετα, το

πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης που χρησιμοποιούμε τρέχει κάθε μία ώρα, δηλαδή όταν μια νέα τιμή αιολικής ισχύος είναι διαθέσιμη, με χρονική ανάλυση μιας ώρας.

Με βάση τις NWP προβλέψεις από το μετεωρολογικό μοντέλο για τις καιρικές μεταβλητές δημιουργήθηκε το διάνυσμα εισόδου που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στο νευρωνικό δίκτυο HS-ARTMAP, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την παραγωγή των προβλέψεων. Το διάνυσμα εισόδου είχε συνολικά 16 παραμέτρους. Από αυτές οι 3 είναι η προηγούμενη, η τρέχουσα και η πρόβλεψη για την επόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου, αντίστοιχα 3 τιμές για τις διευθύνσεις του ανέμου, η προηγούμενη παρατηρηθείσα τιμή της αιολικής ισχύος, η σημειακή πρόβλεψη για την επόμενη τιμή ισχύος από το μοντέλο NTUA, η ώρα και ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης. Επίσης, χρησιμοποιούνται 2 δείκτες αβεβαιότητας για την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι δείκτες έχουν σχέση με τους νευρώνες ενεργοποίησης του μοντέλου NTUA.

Οι 16 παράμετροι εισόδου (inputs) πολλαπλασιάστηκαν με κάποιους συντελεστές που προέκυψαν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Το επιθυμητό διάνυσμα στόχου (targets) προέκυψε από τις διαθέσιμες τιμές της αιολικής ισχύος για την υπό μελέτη περιοχή. Με την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου προέκυψε ένας αριθμός κλάσεων της αιολικής ισχύος και κατά τη φάση της αποτίμησης, σε κάθε κλάση αντιστοιχίζόταν μια πιθανότητα εμφάνισής της για όλες τις τιμές των παρατηρήσεων. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, η έξοδος του μοντέλου πρόβλεψης προέκυψε με χρήση της συνάρτησης ακτινωτής βάσης (RBF) και συγκεκριμένα εξήχθησαν πιθανότητες για την εμφάνιση της κάθε κλάσεως ισχύος σύμφωνα με τη μελέτη^[74].

Η πιθανότητα $\xi_{k,t+h}$ εμφάνισης της ισχύος της κλάσης k εξαρτάται από την προβλεπόμενη τιμή ισχύος για την αμέσως προηγούμενη ώρα \hat{y}_{t+h-1} , καθώς και από το διάνυσμα εισόδου $X_{t|t+h}$. Κατά συνέπεια οι δεσμευμένες πιθανότητες (conditional probabilities) κάθε κλάσης k υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\xi_{k,t+h} = \Pr(\hat{y}_{t+h-1} = k | X_{t|t+h}) \quad (6.1)$$

Η προβλεπόμενη τιμή αιολικής ισχύος \hat{y}_{t+h} για τη χρονική στιγμή $t+h$ δίνεται από τον τύπο:

$$\hat{y}_{t+h} = \arg \max \{ \Pr(\hat{y}_{t+h-1} = k | X_{t|t+h}) \} \quad (6.2)$$

Για τον υπολογισμό των δεσμευμένων πιθανοτήτων $\xi_{k,t+h}$ εμφάνισης κάθε κλάσης k κάνουμε χρήση του κανόνα του Bayes και έχουμε:

$$\xi_{k,t+h} = \frac{\Pr(\hat{y}_{t+h}=k) \Pr(X_{t|t+h} | \hat{y}_{t+h}=k)}{\Pr(X_{t|t+h})} \quad (6.3)$$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω πιθανοτήτων χρησιμοποιείται η μονάδα εκτίμησης πιθανότητας (Probability estimation module), η οποία αντικατέστησε την αθροιστική μονάδα στο HS-ARTMAP του κεφαλαίου 5. Η μονάδα εκτίμησης πιθανότητας, ενεργοποιήθηκε κατά το στάδιο της αποτίμησης και αφού είχε προηγηθεί η εκπαίδευση του δικτύου με στόχο την εξαγωγή των πιθανοτήτων εμφάνισης της κάθε κλάσης.

Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων. Πρώτα υπολογίζονται οι έξοδοι $\varphi_j(x_n)$ των συναρτήσεων βάσης (basis functions) στην RBF-like μονάδα του δικτύου, όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια, οι έξοδοι $\varphi_j(x_n)$ που ικανοποιούν τη συνθήκη $\varphi_j(x_n) > \theta_{rec}$ και μόνο αυτές, λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία υπολογισμού των δεσμευμένων πιθανοτήτων $\xi_{k,t+h}$. Η παράμετρος θ_{rec} έχει μια προκαθορισμένη τιμή και για αυτήν την πρώτη προσομοίωση τέθηκε ίση με 0.2. Με j' δηλώνουμε τους δείκτες των κρυμμένων μονάδων (hidden units) που η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται ενώ με j'' τους δείκτες κρυμμένων μονάδων που αφορούν την κλάση k . Με βάση τους συμβολισμούς που αναφέρθηκαν, οι προηγούμενες πιθανότητες μπορούν να υπολογιστούν από τους τύπους:

$$\Pr(\hat{y}_{t+h} = k) = \frac{N_k}{\sum_{k=1}^K N_k} \quad (6.4)$$

$$\Pr(X_{t|t+h} | \hat{y}_{t+h} = k) = \frac{\sum_{j''} N_{c,j''}}{N_k} = 1 \quad (6.5)$$

$$\Pr(X_{t|t+h}) = \frac{\sum_{j'} N_{c,j'}}{\sum_{j} N_{c,j}} \quad (6.6)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, η ζητούμενη δεσμευμένη πιθανότητα που δίνεται από τη σχέση (6.3) υπολογίζεται ως εξής:

$$\xi_{k,t+h} = \frac{N_k}{\sum_{j'} N_{c,j'}} \quad (6.7)$$

Κατά το στάδιο της αποτίμησης υπολογίστηκαν οι δείκτες *crps*, *αξιοπιστίας (reliability)* και *αιχμηρότητας (sharpness)*, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4. Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι τύποι υπολογισμού των δεικτών αυτών για διευκόλυνση.

Continuous ranked probability score (CRPS)

Το CRPS χρησιμοποιείται ευρύτατα ως μέσο αποτίμησης πιθανοτικών προβλέψεων. Το CRPS για μια CDF πρόβλεψη, $\hat{F}_{t+k|t}(y)$ και αντίστοιχη επιβεβαίωση y_{t+k} ορίζονται ως εξής:

$$crps(\hat{F}_{t+k|t}(y), y_{t+k}) = \int_{-\infty}^{+\infty} (F_{t+k|t}(y) - I(y \geq y_{t+k}))^2 dy \quad (6.8)$$

, όπου $I(\cdot)$ είναι μια ενδεικτική συνάρτηση, που ισούται με 1 αν το γεγονός εντός της παρενθέσεως είναι αληθές και με 0 αλλιώς. Ο μέσος όρος αυτών των CRPS τιμών πάνω σε κάθε ζευγάρι πρόβλεψης/επιβεβαίωσης παρέχει ένα αποτέλεσμα για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης:

$$CRPS(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N crps(\hat{F}_{t+k|t}(y), y_{t+k}) \quad (6.9)$$

Αξιοπιστία (Reliability)

Η αξιοπιστία αναφέρεται στην ικανότητα του μοντέλου να παρέχει προβλέψεις εκατοστημορίων $\hat{q}_{t|t+h}^{(\alpha)}$ που να ικανοποιούν τη σχέση $P(y_t < q_t^\alpha)$, όπου με P συμβολίζεται η πιθανότητα της αιολικής ισχύος y_t να είναι μικρότερη από το εκατοστημόριο q_t^α .

Για μια συγκεκριμένη πρόβλεψη εκατοστημορίων, $\hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}$, εκδοθείσα σε χρόνο t, με χρονικό ορίζοντα t+k και επαλήθευση y_{t+k} , ορίζουμε τη μεταβλητή ένδειξης:

$$\xi_{t,k}^{(\alpha)} = I(y_{t+k} < \hat{q}_{t+k|t}^{(\alpha)}) \quad (6.10)$$

Η χρονοσειρά που αποτελείται από τα $\xi_{t,k}^{(\alpha)}$, αποτελεί μια δυαδική ακολουθία που αντιστοιχεί στα “hits” αν η επαλήθευση είναι κάτω από την πρόβλεψη εκατοστημορίων, αλλιώς καταγράφεται ως “miss”. Για κάθε ορίζοντα k υπολογίζεται η πραγματική κάλυψη της πρόβλεψης εκατοστημορίων θεωρώντας ένα μέσο όρο του συνόλου αποτίμησης:

$$\hat{a}_k^{(\alpha)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi_{t,k}^{(\alpha)} \quad (6.11)$$

Για την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας υπολογίζεται η πόλωση (bias) του συστήματος πρόβλεψης:

$$b_k^{(\alpha)} = \alpha - \hat{a}_k^{(\alpha)} \quad (6.12)$$

Αιχμηρότητα (Sharpness)

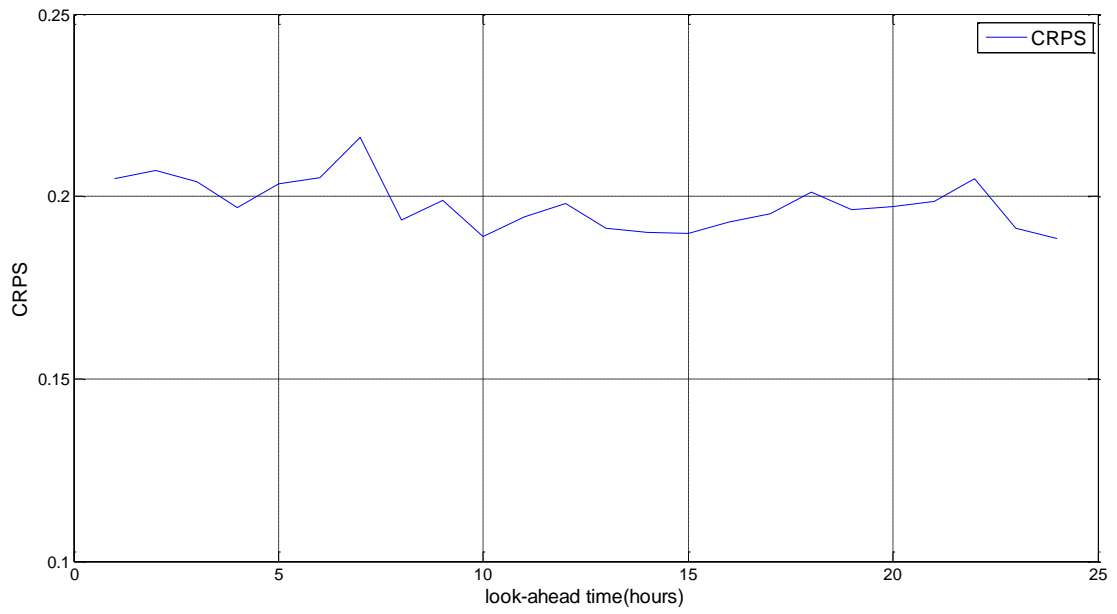
Η αιχμηρότητα εκφράζει την ικανότητα του μοντέλου να συγκεντρώνει την πληροφορία αβεβαιότητας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και ορίζεται ως ο μέσος όρος της απόστασης που καλύπτουν τα διαστήματα πρόβλεψης. Για τον έλεγχο της αιχμηρότητας της πρόβλεψης διαστημάτων γίνεται εστίαση στο πλάτος τους. Για διαστήματα πρόβλεψης κεντραρισμένα στη διάμεσο με τιμή κάλυψης $(1-\beta)$, το πλάτος δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_{t,k}^{(\beta)} = \hat{q}_{t+k|t}^{(1-\frac{\beta}{2})} - \hat{q}_{t+k|t}^{(\frac{\beta}{2})} \quad (6.13)$$

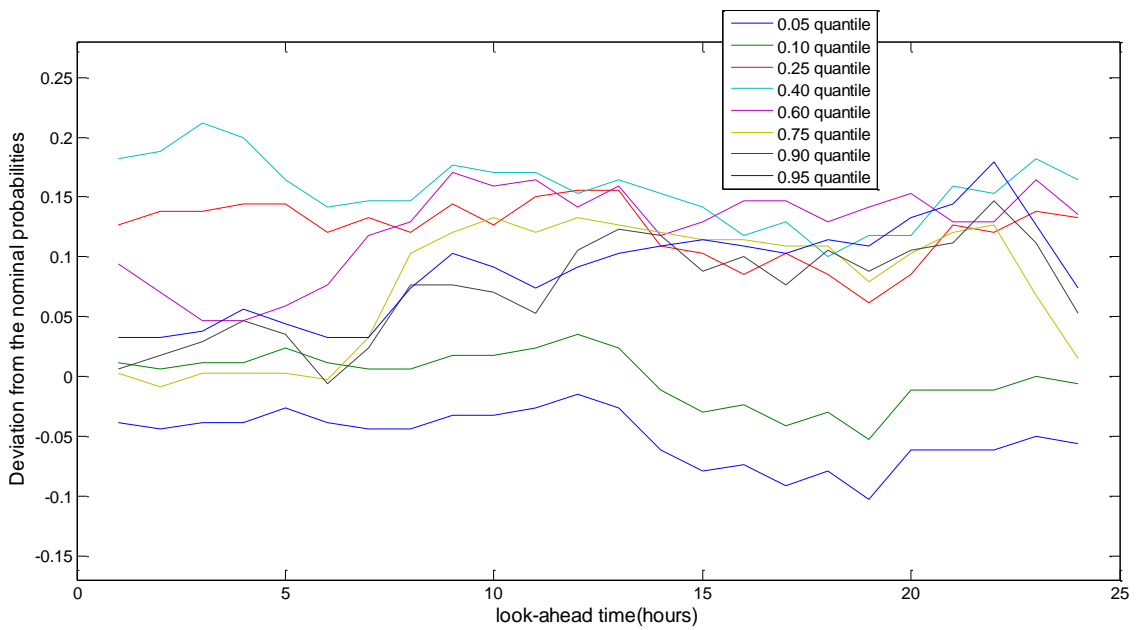
και το μέτρο της αιχμηρότητας των διαστημάτων αυτών δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\delta}_k^{(\beta)} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \delta_{t,k}^{(\beta)} \quad (6.14)$$

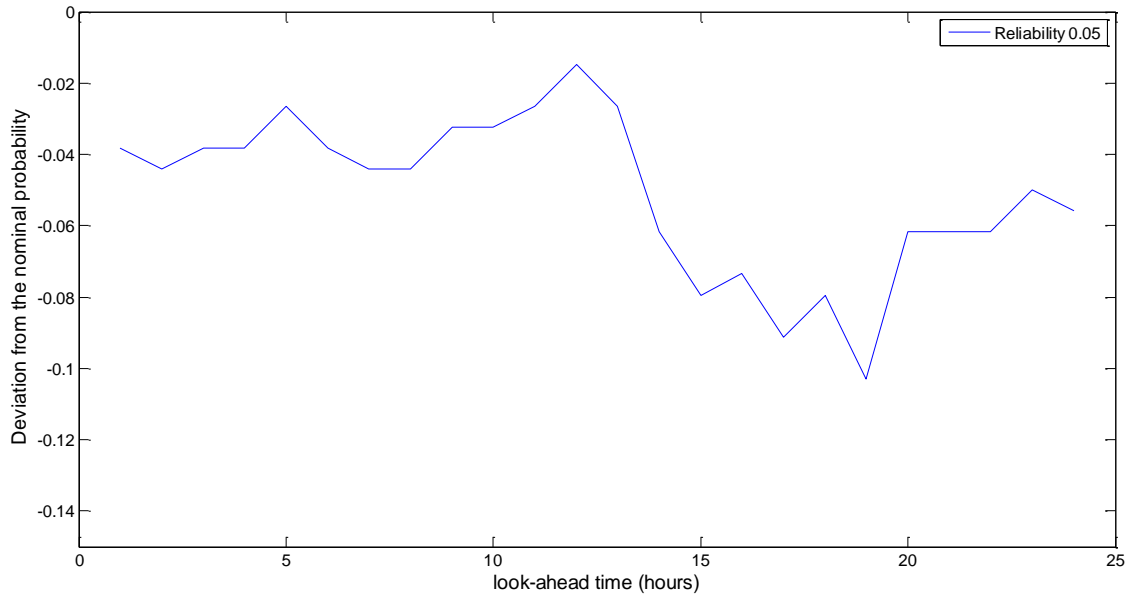
Σύμφωνα με τα παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε Matlab, όπου κάθε ημέρα παράγονταν προβλέψεις για το επόμενο 24ωρο (day-ahead forecasts). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δείκτες σφάλματος crps, αξιοπιστία (reliability) και αιχμηρότητα (sharpness) που προέκυψαν από την προσομοίωση για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας.



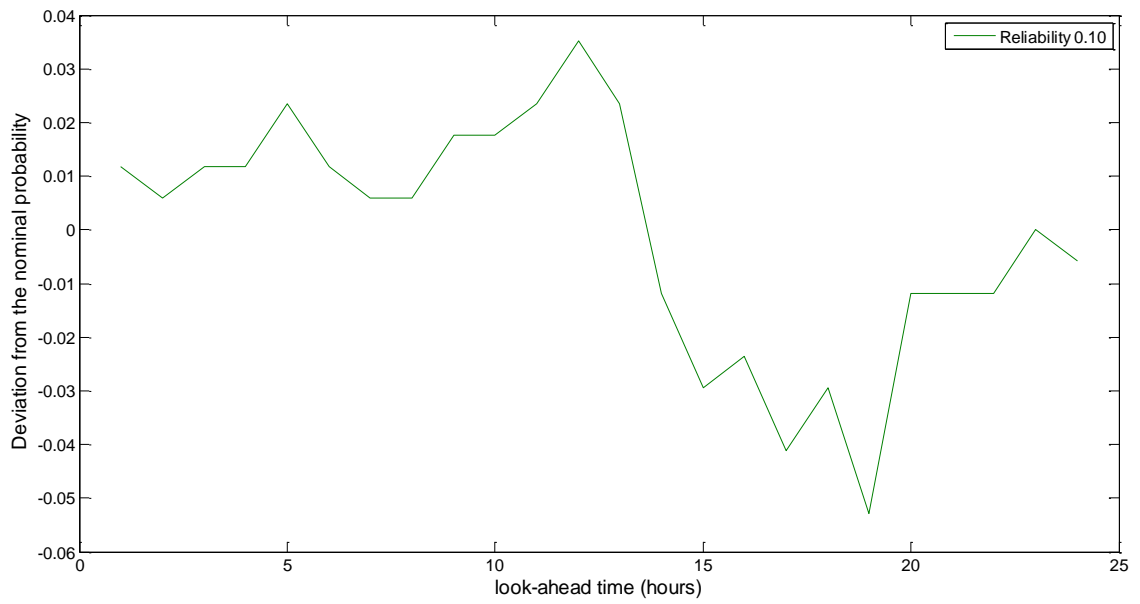
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα CRPS για την αρχική πρόβλεψη



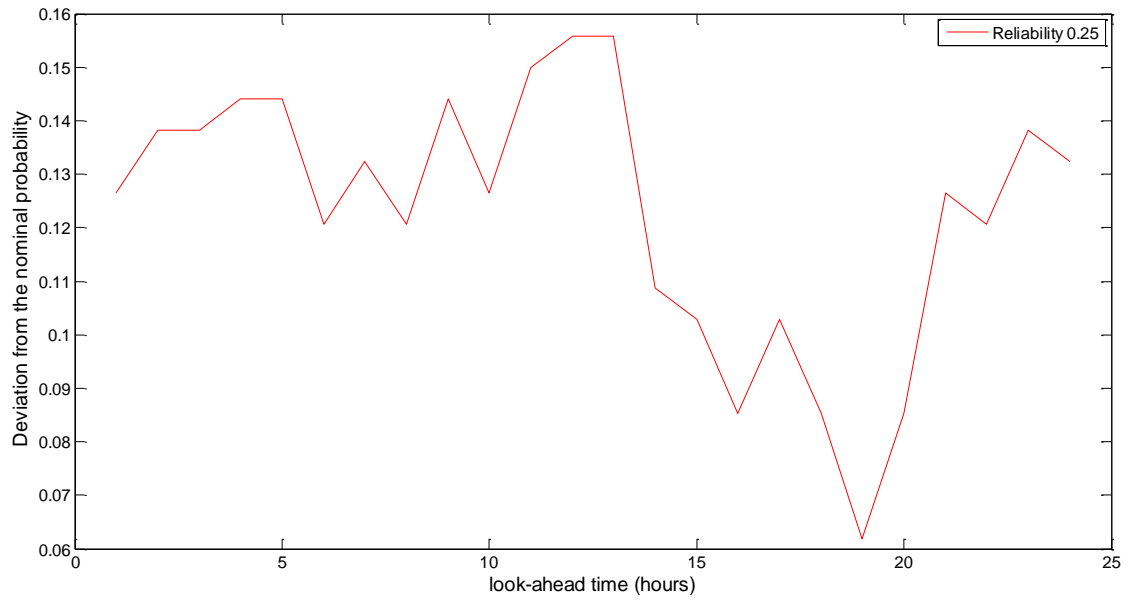
Σχήμα 6.2: Συγκεντρωτικά διαγράμματα αξιοπιστίας για την αρχική πρόβλεψη



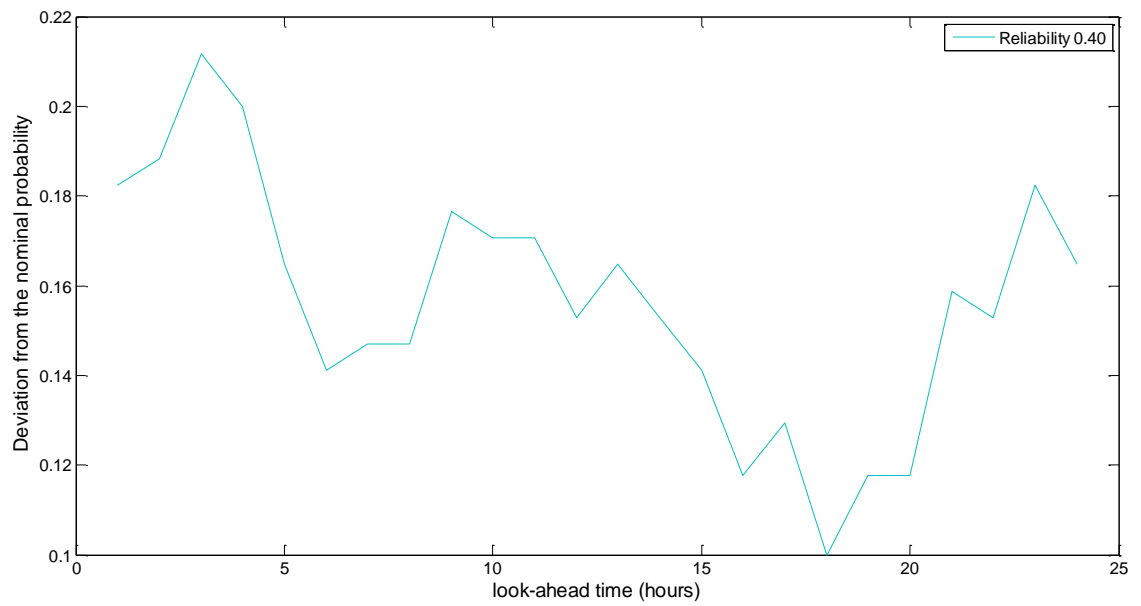
Σχήμα 6.3: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.05



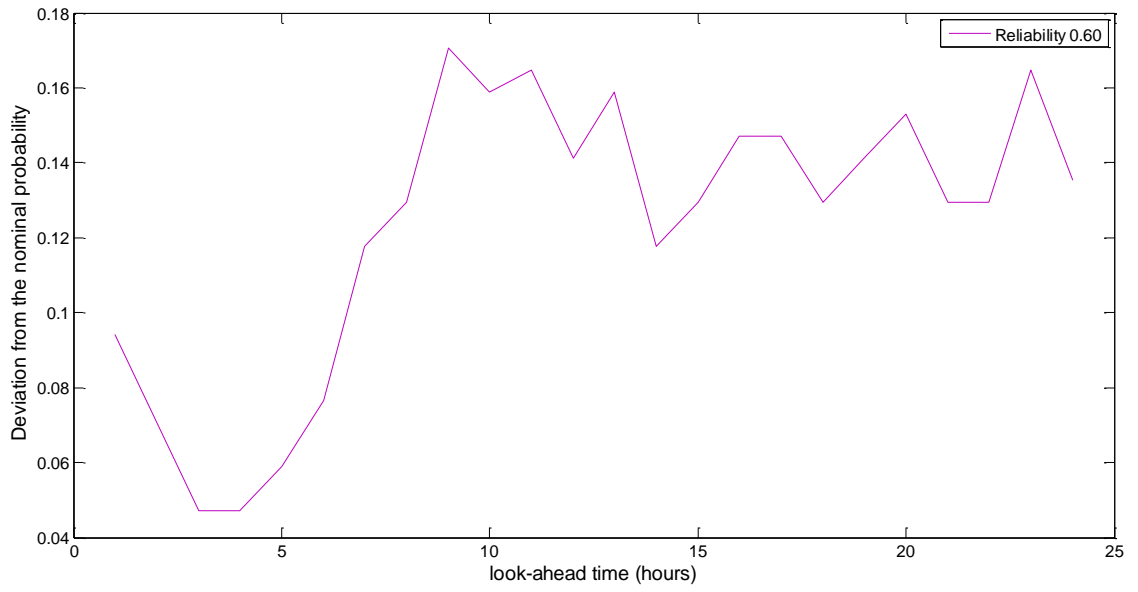
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.10



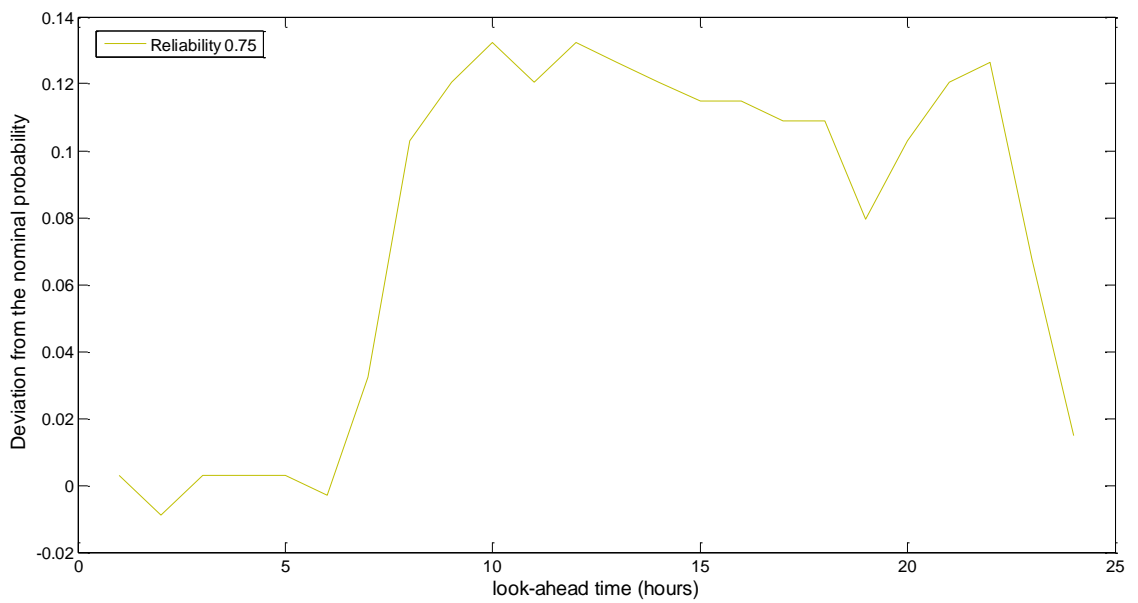
Σχήμα 6.5: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.25



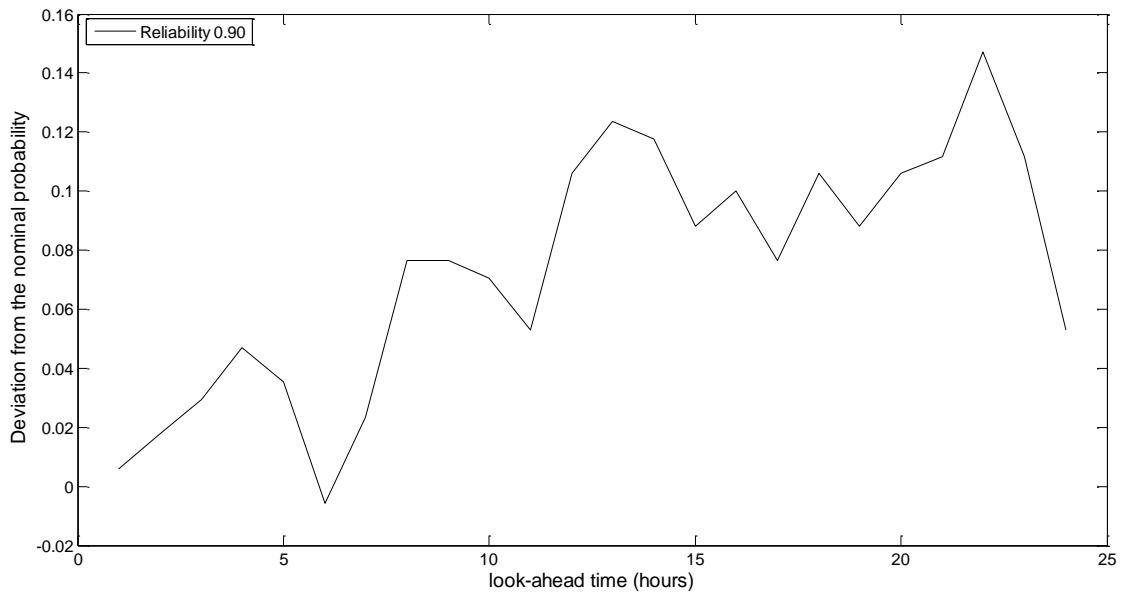
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.40



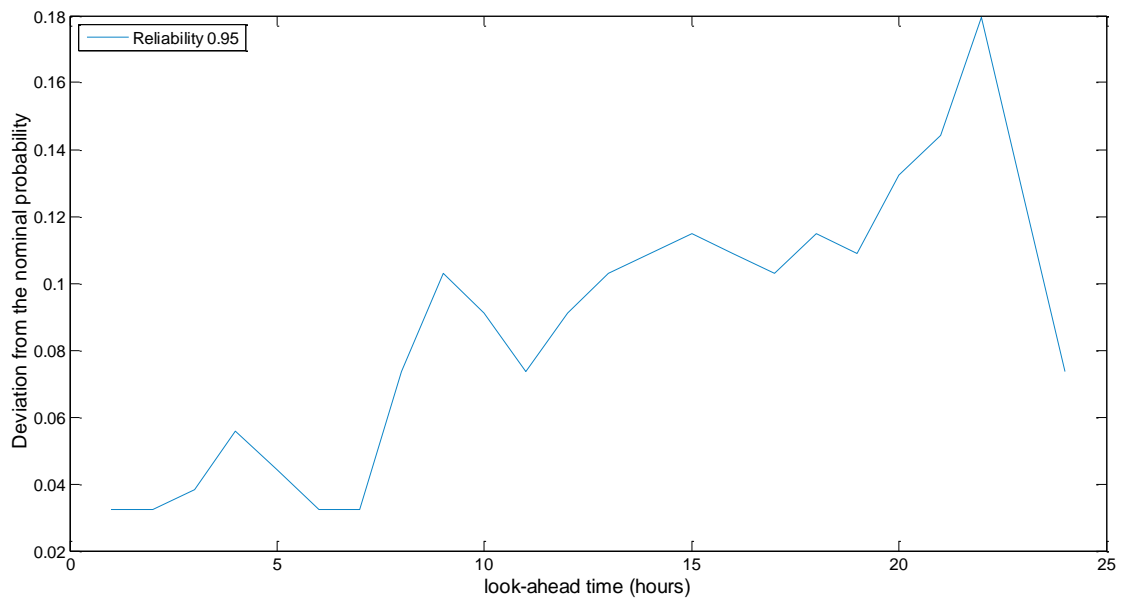
Σχήμα 6.7: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.60



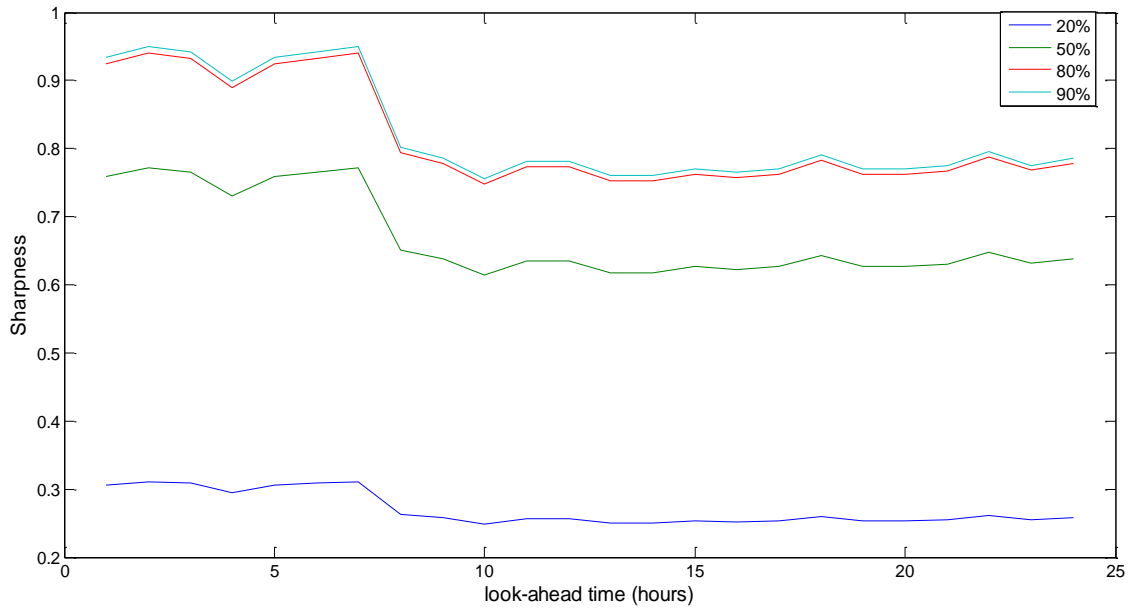
Σχήμα 6.8: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.75



Σχήμα 6.9: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.90



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.95



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα αιχμηρότητας της αρχικής πρόβλεψης

6.3 Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO)

6.3.1 Γενικά

Ο αλγόριθμος PSO είναι μια υπολογιστική μέθοδος που βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα, προσπαθώντας επαναληπτικά να βελτιώσει μια υποψήφια λύση με βάση ένα δεδομένο μέτρο ποιότητας. Ο PSO βελτιστοποιεί το πρόβλημα διαθέτοντας έναν πληθυσμό από υποψήφιες λύσεις, που καλούνται σωματίδια (particles), και μετακινώντας αυτά τα σωματίδια στο χώρο έρευνας (search-space) σύμφωνα με απλές μαθηματικές φόρμουλες που αφορούν τη θέση και την ταχύτητα των σωματιδίων. Η κίνηση κάθε σωματιδίου επηρεάζεται από την τοπική καλύτερη γνωστή του θέση και οδηγείται επίσης προς τις καλύτερες γνωστές θέσεις στο χώρο έρευνας, οι οποίες ανανεώνονται όσο καλύτερες θέσεις βρίσκονται από άλλα σωματίδια. Το γεγονός αυτό αναμένεται να μετακινήσει το σμήνος (swarm) προς τις καλύτερες λύσεις.

Η ιδέα της βελτιστοποίησης PSO αποδίδεται στους Kennedy και Eberhart^[73]. Αρχικά σκόπευε στην προσομοίωση της κοινωνικής συμπεριφοράς ως μια αναπαράσταση της κίνησης των οργανισμών σε ένα σμήνος πτηνών ή σε μια σχολή ψαρέματος. Ο αλγόριθμος απλοποιήθηκε και παρατηρήθηκε ότι εφαρμόζει βελτιστοποίηση. Το αντίστοιχο βιβλίο των Kennedy και Eberhart περιγράφει αρκετές φιλοσοφικές πτυχές του PSO και της οξυδέρκειας του σμήνους (swarm intelligence)^[73].

Ο αλγόριθμος PSO κάνει ελάχιστες ή καθόλου υποθέσεις σχετικά με το πρόβλημα της βελτιστοποίησης και μπορεί να ερευνήσει πολύ μεγάλους χώρους υποψηφίων λύσεων. Παρ' όλα αυτά, τεχνικές σαν τον PSO δεν εγγυώνται την εύρεση βέλτιστης λύσης. Πιο συγκεκριμένα, ο PSO δε χρησιμοποιεί την κλίση (gradient) του προβλήματος προς βελτιστοποίηση, που σημαίνει ότι ο PSO δεν απαιτεί το πρόβλημα να είναι παραγωγίσιμο, πράγμα που απαιτούν οι κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης όπως οι gradient descent και quasi-newton. Συνεπώς, ο PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα βελτιστοποίησης που είναι μερικώς ανώμαλα, θορυβώδη, χρονικά μεταβαλλόμενα κτλ.

Επιπλέον, ο αλγόριθμος περιλαμβάνει κάποιες παραμέτρους (tuning parameters) που επηρεάζουν δραστικά την απόδοση του αλγορίθμου και οι οποίες συνήθως αναφέρονται ως συναλλαγή εξερεύνησης-εκμετάλλευσης (exploration-exploitation tradeoff). Η εξερεύνηση είναι η ικανότητα δοκιμής ποικίλων περιοχών στο χώρο του προβλήματος ώστε να εντοπιστεί ένα καλό βέλτιστο (optimum), ιδανικά η γενική-καθολική (global) λύση. Εκμετάλλευση είναι η ικανότητα συγκέντρωσης της έρευνας γύρω από μια υποσχόμενη υποψήφια λύση ώστε να εντοπιστεί το βέλτιστο ακριβώς. Παρά τις πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες, η επιλογή των αλγοριθμικών παραμέτρων παραμένει εμπειρική σε μεγάλο βαθμό. Μια πλήρης θεωρητική ανάλυση του αλγορίθμου δίνεται στη μελέτη ^[71] από τους Clerck και Kennedy ^[72].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος PSO και δίνεται ένας ψευδοκώδικας που περιγράφει τα βασικά του βήματα. Οι εξισώσεις υπολογισμού της ανανέωσης της ταχύτητας και της θέσης κάθε σωματιδίου δίνονται αντίστοιχα από τους ακόλουθους τύπους:

$$\vec{v}_{t+1}^i = \vec{v}_t^i + c_1 r_1 (\vec{p}_t^i - \vec{x}_t^i) + c_2 r_2 (\vec{p}_t^g - \vec{x}_t^i) \quad (6.15)$$

$$\vec{x}_{t+1}^i = \vec{x}_t^i + \vec{v}_{t+1}^i \quad (6.16)$$

, όπου \vec{x}_t^i είναι η θέση του σωματιδίου, \vec{v}_t^i είναι η ταχύτητα του σωματιδίου, \vec{p}_t^i είναι η καλύτερη αποθηκευμένη ατομική θέση του σωματιδίου και \vec{p}_t^g η καλύτερη αποθηκευμένη θέση του σμήνους. Οι παράμετροι c_1 και c_2 αντιστοιχούν στη γνωστική και την κοινωνική παράμετρο αντίστοιχα, ενώ οι μεταβλητές r_1 και r_2 είναι τυχαίοι θετικοί αριθμοί μικρότεροι του 1.

Στον ψευδοκώδικα που ακολουθεί φαίνεται η βασική δομή του αλγορίθμου PSO:

```

Randomly generate an initial population
repeat
  for i=1 to population_size do
    if  $f(\vec{x}_i) < f(\vec{p}_i)$  then  $\vec{p}_i = \vec{x}_i$  ;
     $\vec{p}_g = \min(\vec{p}_{neighbours})$  ;
    for d=1 to dimensions do
      Velocity_update();
      Position_update();
    end
  end
end
until termination criterion is met

```

6.3.2 Χρήση του αλγορίθμου PSO για βελτιστοποίηση του CRPS

Ο αλγόριθμος PSO χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων που θα έπρεπε να πολλαπλασιάσουν το διάνυσμα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο HS-Artmap, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του crps και συνεπώς να βελτιωθεί το αποτέλεσμα της πρόβλεψης.

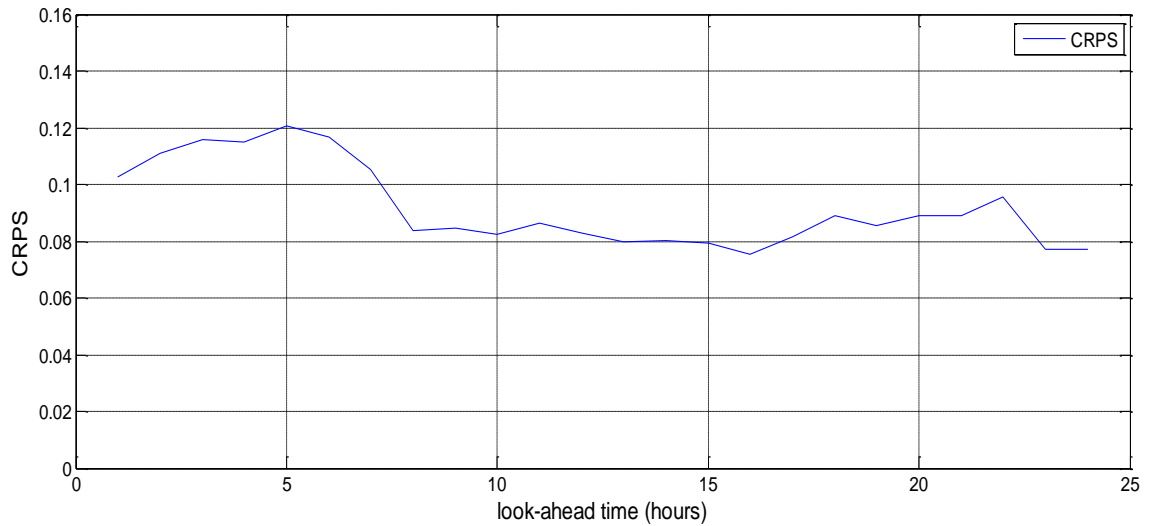
Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αρχικά εκπαιδεύτηκε το νευρωνικό δίκτυο HS-ARTMAP με μοναδιαίους συντελεστές παραμέτρων στην είσοδο, δηλαδή κάθε παράμετρος εισόδου είχε το ίδιο βάρος με τις υπόλοιπες και δε γινόταν διάκρισή τους. Στη συνέχεια, αποθηκεύτηκε ο πίνακας των εισόδων (inputs) και τα επιθυμητά διανύσματα-στόχοι (targets). Έπειτα, δημιουργήθηκε η συνάρτηση προς βελτιστοποίηση (artmap optimization), η οποία δεχόταν ως εισόδους το νευρωνικό δίκτυο που προέκυψε από την εκπαίδευση, τις εισόδους (inputs) που χρησιμοποιήθηκαν στην προαναφερθείσα εκπαίδευση του δικτύου, δηλαδή με τους συντελεστές παραμέτρων εισόδου της αρχικής πρόβλεψης, το επιθυμητό διάνυσμα-στόχου (targets) καθώς και τις παραμέτρους προς βελτιστοποίηση. Η συνάρτηση αυτή υπολόγιζε το δείκτη σφάλματος CRPS, έτσι ώστε να επιτευχθεί βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου. Ο υπολογισμός του CRPS έγινε σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 6.2 .Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, ανανεώνονταν οι συντελεστές των παραμέτρων εισόδου, με τους οποίους στη συνέχεια πολλαπλασιάζονταν το διάνυσμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου. Στη συνέχεια εξάγονταν οι πιθανότητες εμφάνισης της κάθε κλάσης και υπολογιζόταν ο δείκτης σφάλματος CRPS.

Η ελαχιστοποίηση του CRPS επιτεύχθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου PSO, ο οποίος στην είσοδό του έλαβε την προαναφερθείσα συνάρτηση (artmap_optimization), τις 16 παραμέτρους εισόδου προς βελτιστοποίηση, άνω και κάτω φράγματα για αυτές τις παραμέτρους, καθώς και ένα χρονικό όριο για την εξαγωγή των βέλτιστων παραμέτρων. Για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου, δόθηκαν ως αρχικοί παράμετροι εισόδου (initial population) τα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν ως συντελεστές στην πρόβλεψη πριν τη βελτιστοποίηση. Ορίστηκαν επίσης οι αρχικές ταχύτητες του πληθυσμού (initial velocities) και ο αριθμός γενεών του αλγορίθμου (Generations) .

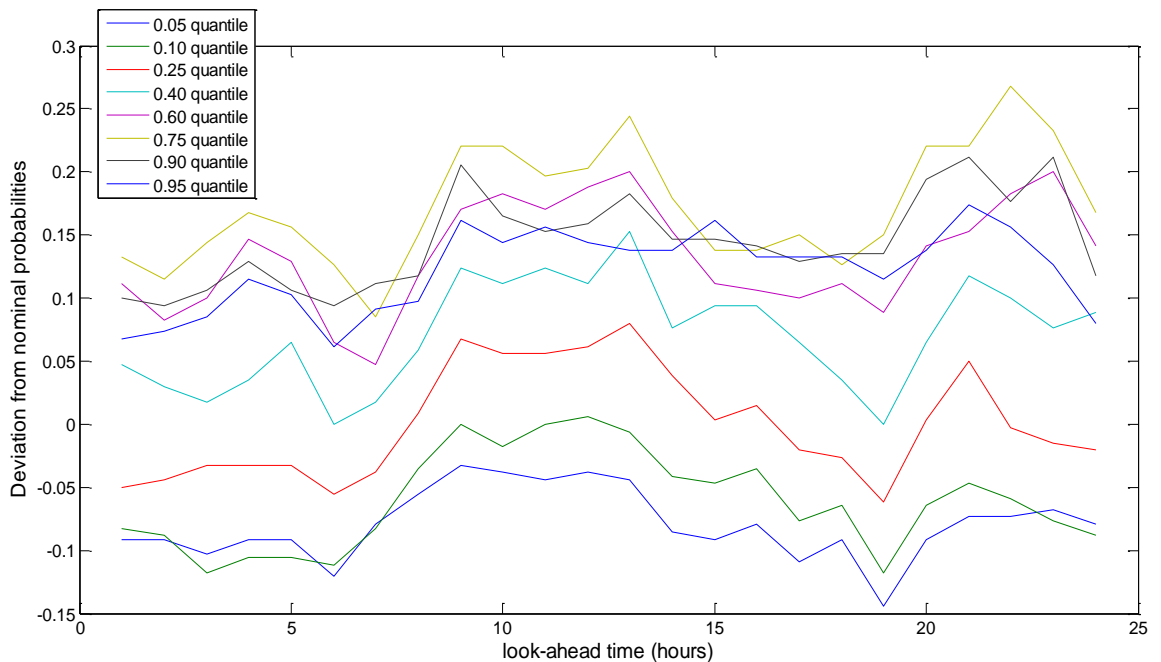
Από την εκτέλεση του αλγορίθμου PSO προέκυψαν οι βέλτιστοι συντελεστές του διανύσματος εισόδου. Με τους συντελεστές αυτούς πολλαπλασιάστηκε το διάνυσμα εισόδου και στη συνέχεια, με τις νέες εισόδους, εκπαιδεύτηκε εκ νέου το νευρωνικό δίκτυο και έγινε η αποτίμηση για όλες τις παρατηρήσεις της αιολικής ισχύος κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν όμοια με αυτή της πρόβλεψης πριν τη βελτιστοποίηση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη νέα προσέγγιση παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

6.4 Αποτίμηση της τελικής πρόβλεψης

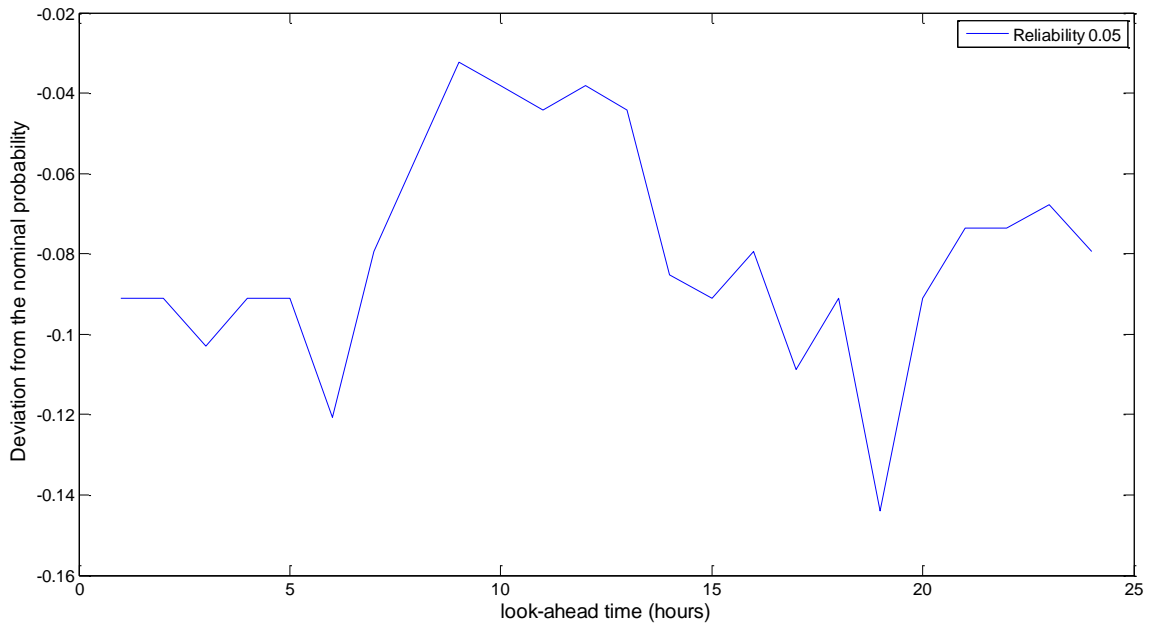
Με την εφαρμογή του αλγορίθμου PSO προέκυψε μια βελτιωμένη πρόβλεψη σε σχέση με την αρχική. Ακολουθούν οι δείκτες CRPS, αξιοπιστίας (reliability) και αιχμηρότητας (sharpness), οι οποίοι παρουσιάζονται σαφώς βελτιωμένοι σε σχέση με την αρχική πρόβλεψη.



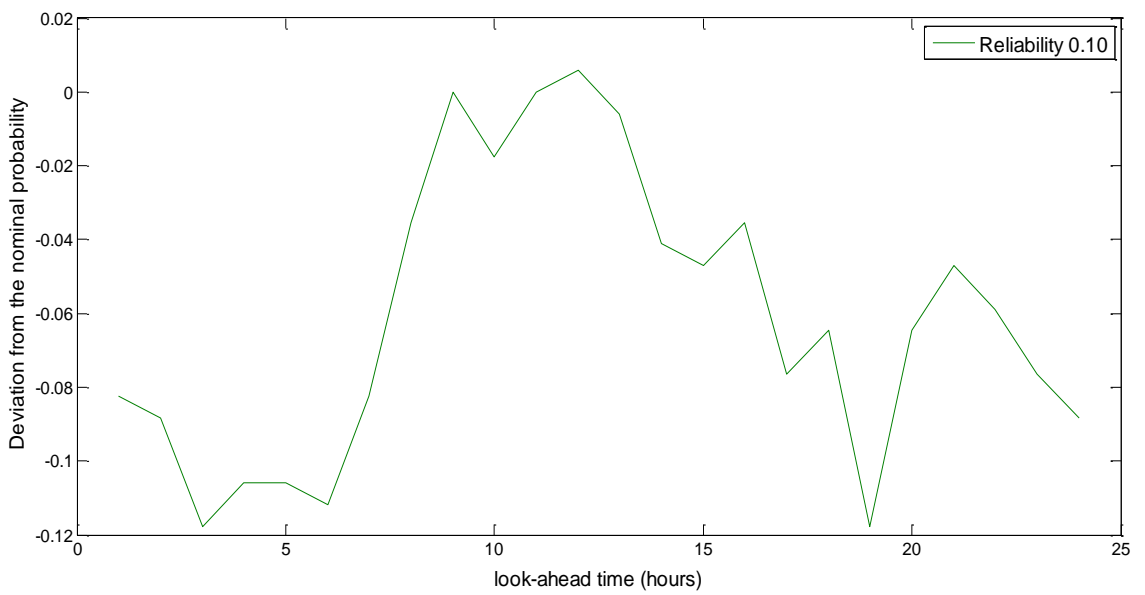
Σχήμα 6.12: Διάγραμμα CRPS της τελικής πρόβλεψης



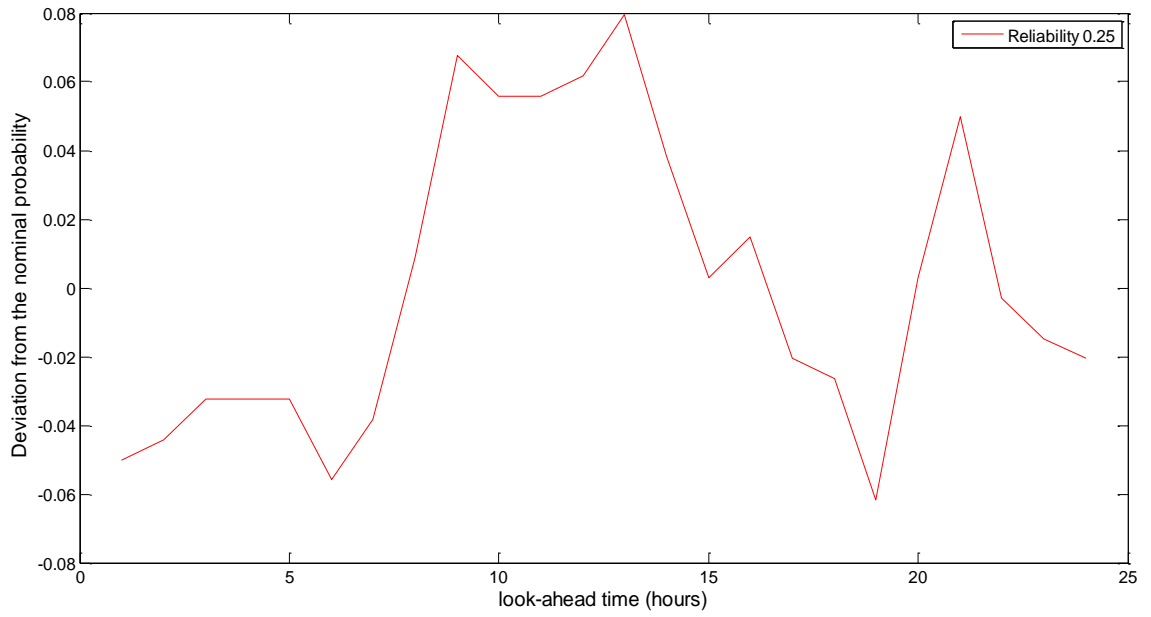
Σχήμα 6.13: Συγκεντρωτικά διαγράμματα αξιοπιστίας της τελικής πρόβλεψης



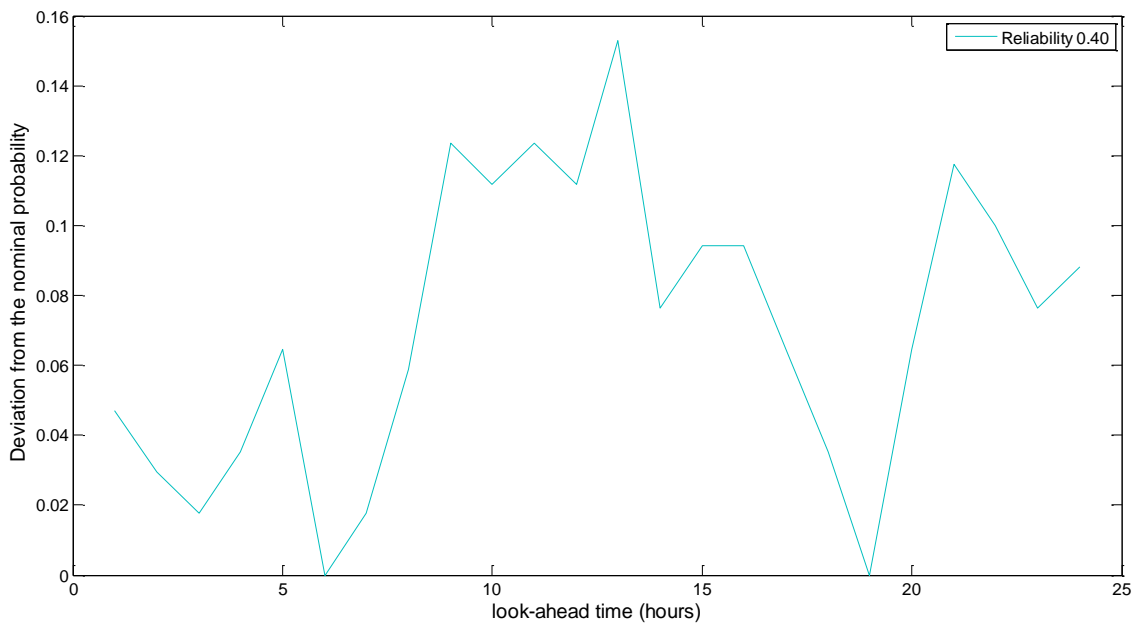
Σχήμα 6.14: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.05



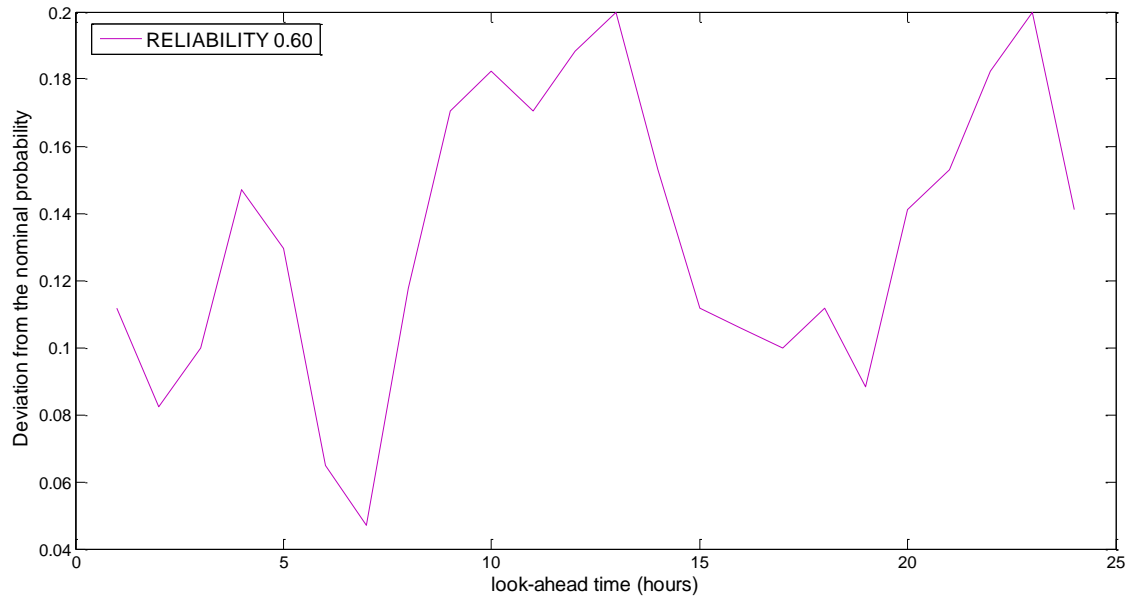
Σχήμα 6.15: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.10



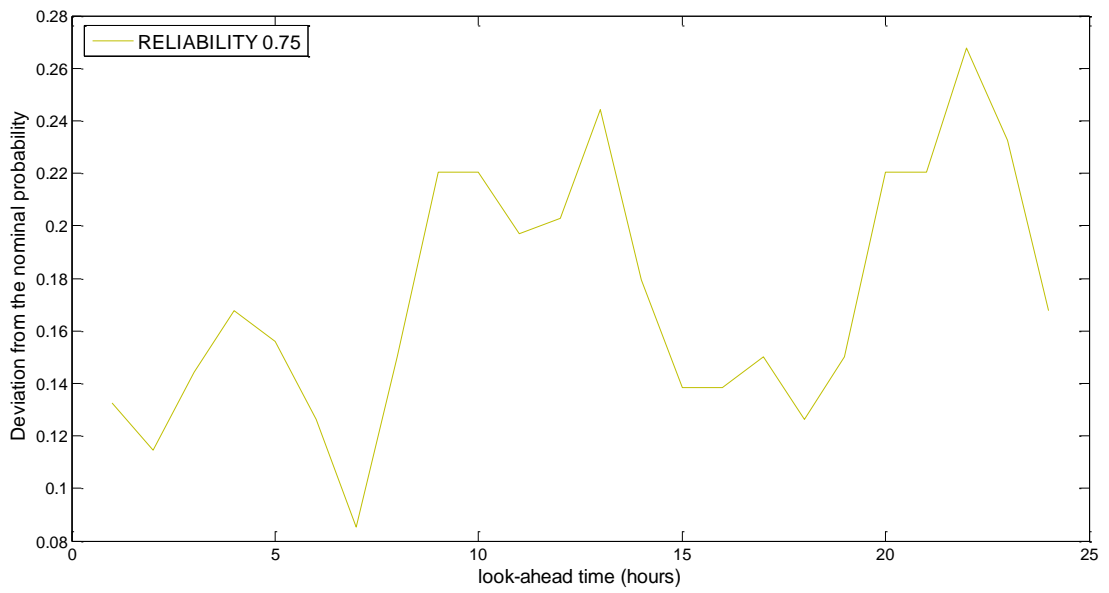
Σχήμα 6.16: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.25



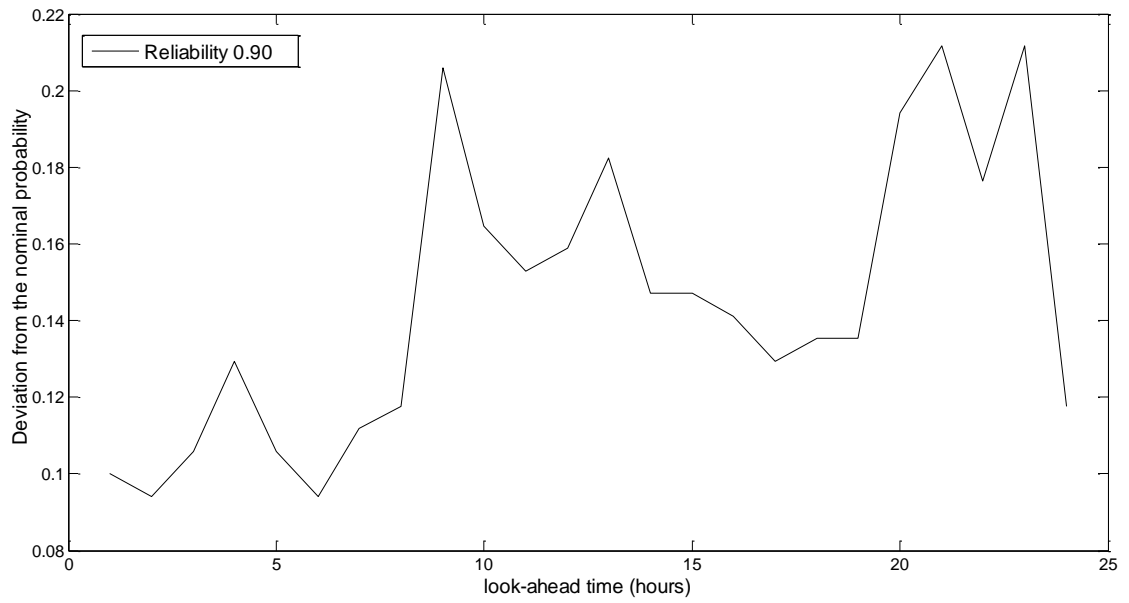
Σχήμα 6.17: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.40



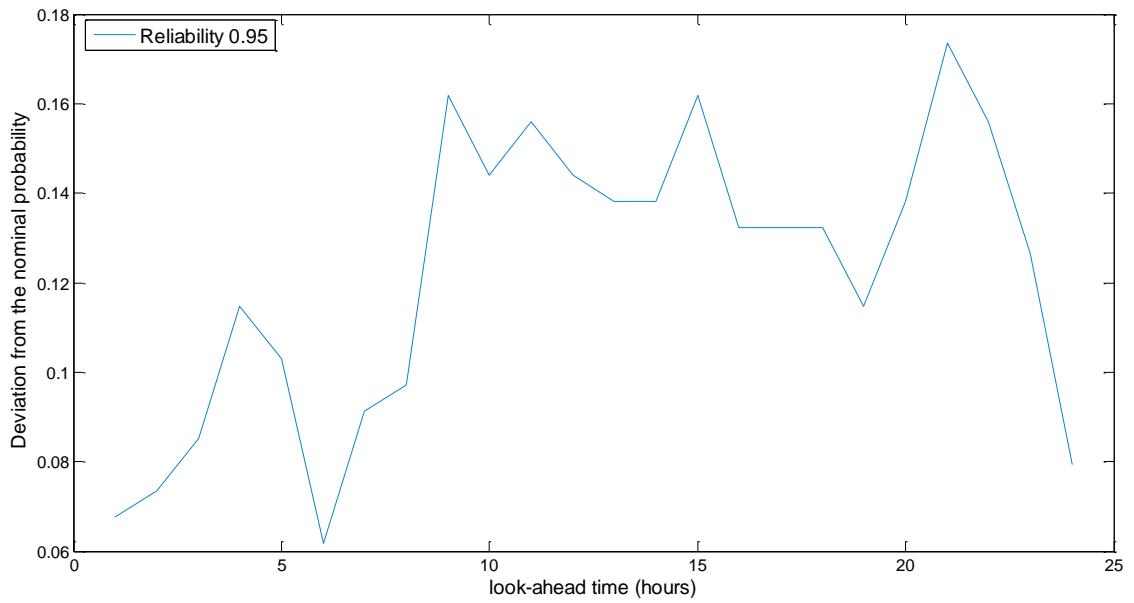
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.60



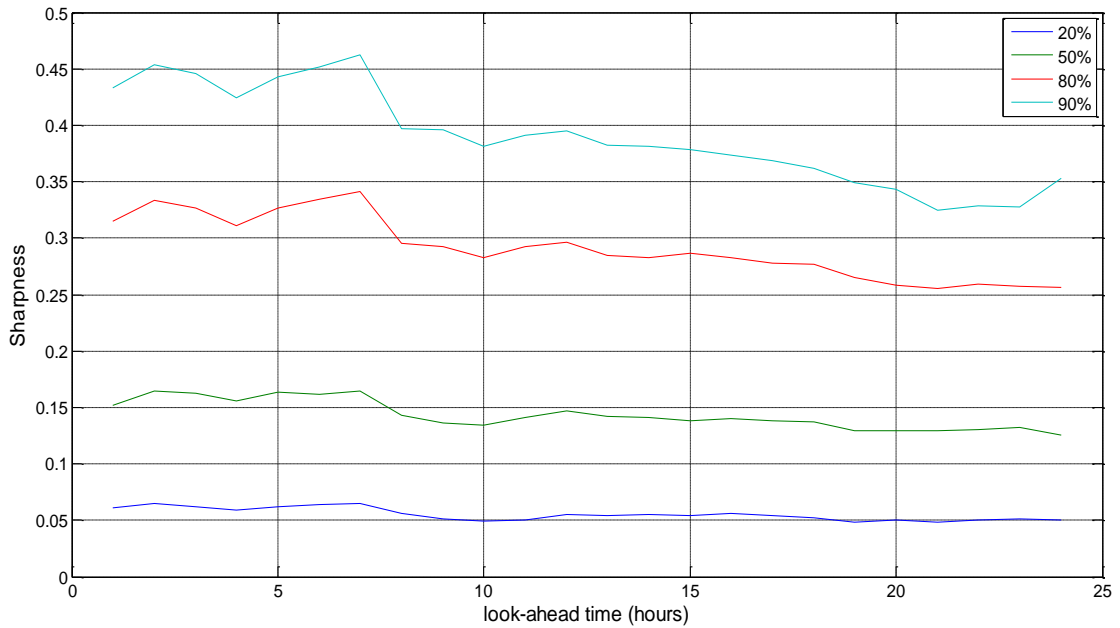
Σχήμα 6.19: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.75



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.90



Σχήμα 6.21: Διάγραμμα αξιοπιστίας εκατοστημορίου 0.95



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα αιχμηρότητας της αρχικής πρόβλεψης

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα επιτεύχθηκε σημαντική βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου. Συγκεκριμένα, ο δείκτης CRPS δεν ξεπερνάει σε καμία ώρα το 12%, ενώ με εξαίρεση τις βραδινές ώρες (00-06) βρίσκεται μόνιμα κάτω από το 10% και παρουσιάζεται σχετικά σταθερός στο 8%. Επίσης, οι δείκτες αξιοπιστίας και αιχμηρότητας παρουσιάζουν αισθητά καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τους αντίστοιχους της πρόβλεψης πριν τη βελτιστοποίηση.

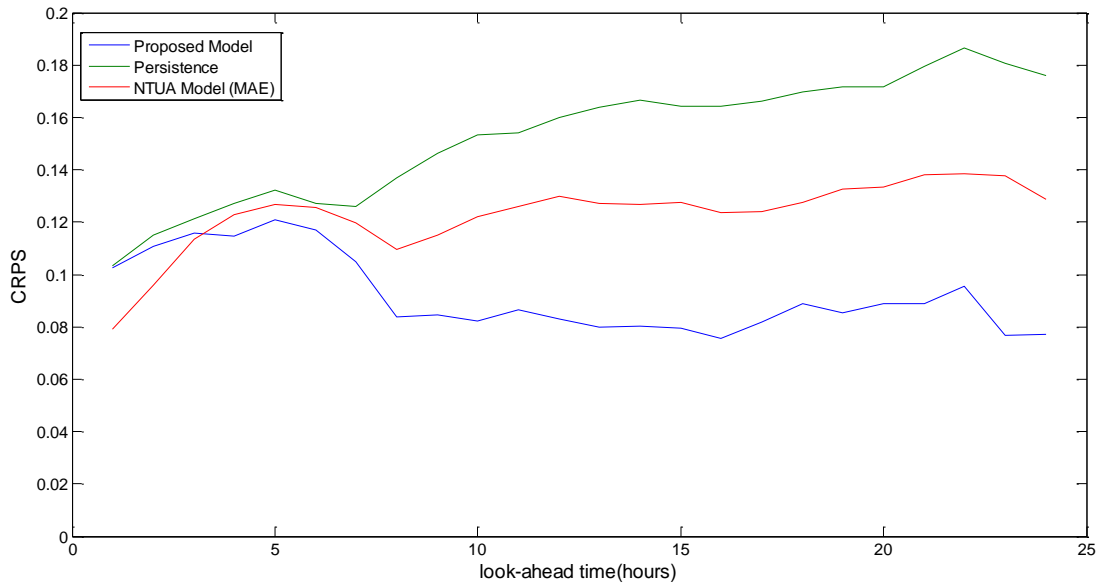
Αναλυτικότερα, για το δείκτη CRPS, που αποτελεί το κύριο κριτήριο για την αξιολόγηση της πρόβλεψης, παρατηρείται ότι έπειτα από τη βελτιστοποίηση, η τιμή του δεν ξεπερνάει το 12%, ενώ πριν τη βελτιστοποίηση κυμαινόταν περίπου στο 20% χωρίς ποτέ να πέσει κάτω από 18%. Η χειρότερη απόδοση του μοντέλου παρατηρείται κατά τις βραδινές ώρες (00-06), όπου ο δείκτης CRPS λαμβάνει τιμές μεταξύ 10% και 12% μετά τη βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια, το σφάλμα μειώνεται και για τις υπόλοιπες ώρες σταθεροποιείται κοντά στο 8%. Ο λόγος που η πρόβλεψη δεν είναι τόσο αποτελεσματική κατά τις βραδινές ώρες, αν και έχουν μικρότερο ορίζοντα πρόβλεψης και συνεπώς μικρότερη αβεβαιότητα, εξηγείται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

Σχετικά με το δείκτη της αξιοπιστίας, και στις 2 περιπτώσεις τα εκατοστημόρια παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά και κυμαίνονται μεταξύ -15% και +25%. Τέλος, η αιχμηρότητα στην αρχική πρόβλεψη λάμβανε πολύ μεγάλες τιμές, καθώς οι πιθανότητες εμφάνισης των κλάσεων ήταν πιο διεσπαρμένες σε σχέση με την πρόβλεψη μετά τη βελτιστοποίηση, όπου περιορίστηκε η αβεβαιότητα. Έτσι, στην πρόβλεψη μετά τη βελτιστοποίηση, οι δείκτες αιχμηρότητας λάμβαναν πολύ μικρότερες τιμές. Παρατηρείται και εδώ ότι κατά τις βραδινές ώρες η αιχμηρότητα λάμβανε υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση των δεικτών, το μοντέλο παρήγαγε συνολικά πολύ καλύτερες προβλέψεις έπειτα από την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO για ελαχιστοποίηση του crps.

Σε ό,τι αφορά την περιορισμένη απόδοση του συστήματος πρόβλεψης για τις βραδινές ώρες, τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς χειρότερα λόγω ενός εξωγενή παράγοντα που το μοντέλο δεν μπορεί να προβλέψει. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το αιολικό πάρκο βρίσκεται στην περιοχή της Κρήτης, η οποία στην ουσία αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για λόγους που έχουν να κάνουν με την ευστάθεια και εύρυθμη λειτουργία του συστήματος υπάρχει ένα όριο διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου (ζήτησης). Επομένως όταν η παραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνολικά, ξεπερνάει το συγκεκριμένο όριο, μέρος της παραγόμενης ισχύος απορρίπτεται. Συνεπώς, κατά τις βραδινές ώρες όπου το φορτίο είναι πολύ μικρό, το όριο της παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ είναι επίσης μικρό και επομένως, τα αιολικά πάρκα δεν παρέχουν στο δίκτυο την ισχύ που είναι ικανά να παράγουν εκείνες τις ώρες, αλλά μόνο την ισχύ που καθορίζεται από το όριο διείσδυσης των ΑΠΕ. Αυτός είναι ο λόγος, που το αιολικό πάρκο που μελετήθηκε, δίνει τις βραδινές ώρες μικρότερη παραγωγή αιολικής ισχύος από την αναμενόμενη, με συνέπεια μεγαλύτερα σφάλματα στην πρόβλεψη της παραγωγής του, γεγονός που αντανακλάται από τους δείκτες σφάλματος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική αδυνατούσε να λάβει υπόψη του αυτόν τον εξωγενή παράγοντα. Σκέψεις για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου παρατίθενται στο 7^ο κεφάλαιο για περαιτέρω έρευνα.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διάγραμμα που προέκυψαν από τη σύγκριση του μοντέλου πρόβλεψης, με μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία αναφοράς για την αξιολόγηση της τελικής πρόβλεψης του δικτύου. Συγκεκριμένα, ακολουθούν το CRPS για την παραμένουσα τιμή (persistence) και το μέσο απόλυτο σφάλμα MAE (Mean Absolute Error) για τη σημειακή πρόβλεψη παραγωγής αιολικής ισχύος που παράγει το μοντέλο NTUA. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι το CRPS της πιθανοτικής πρόβλεψης είναι ισοδύναμο με το MAE για σημειακές προβλέψεις. Παρατηρούμε ότι το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία και βασίζεται στο HS-ARTMAP, παρουσιάζει καλύτερη επίδοση τόσο από την παραμένουσα τιμή όσο και από το μοντέλο NTUA. Συγκεκριμένα, προβλέπει καλύτερα από την παραμένουσα τιμή για όλες τις ώρες του επόμενου 24ώρου. Για τις πρώτες 5 ώρες το μοντέλο πρόβλεψης με χρήση του δικτύου HS-ARTMAP προβλέπει ελαφρώς καλύτερα από την παραμένουσα τιμή, αλλά στη συνέχεια η διαφορά μεγαλώνει, καθώς το μοντέλο προβλέπει κοντά στο 8% ενώ το CRPS της παραμένουσας τιμής αυξάνει συνεχώς όσο περνούν οι ώρες. Το μοντέλο NTUA παρουσιάζει καλύτερη επίδοση από το προτεινόμενο μοντέλο μόνο για τις 2 πρώτες ώρες, ενώ στη συνέχεια το σφάλμα του είναι αισθητά μεγαλύτερο. Το MAE του μοντέλου NTUA μετά τις 12 πρώτες ώρες κυμαίνεται περίπου στο 13%, ενώ το CRPS του προτεινόμενου μοντέλου βρίσκεται κοντά στο 8%.



Σχήμα 6.23: Σύγκριση του δείκτη *CRPS* του προτεινόμενου μοντέλου με το *MAE* για τη σημειακή πρόβλεψη του μοντέλου *NTUA* και την παραμένουσα τιμή (*persistence*)

Επίλογος

7.1 Σύνοψη και Παρατηρήσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το ζήτημα της πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, που βασίστηκε στα νευρωνικά δίκτυα και εξετάστηκε η επίδοσή του στο αιολικό πάρκο «Λασιίθι» στην Κρήτη. Το νευρωνικό δίκτυο που εξετάστηκε είναι το HS-ARTMAP και αποτελεί ένα καινοτόμο δίκτυο σταδιακής επιβλεπόμενης εκμάθησης (incremental supervised learning). Το προτεινόμενο μοντέλο δέχεται ως δεδομένα εισόδου τις ταχύτητες και διευθύνσεις ανέμου, όπως αυτές προκύπτουν από μοντέλα NWP υψηλής κλίμακας, καθώς και δεδομένα από την προκαταρκτική μονάδα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και την ασαφή μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού του μοντέλου NTUA. Το επιθυμητό διάνυμα στόχου του νευρωνικού δικτύου προσδιορίζεται με επισκόπηση των παρατηρούμενων χρονοσειρών της ταχύτητας του ανέμου και της αντίστοιχης αιολικής ισχύος, δηλαδή από τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία για το αιολικό πάρκο. Η έξοδος του μοντέλου αποδίδει τις πιθανότητες εμφάνισης κάθε μιας από τις κλάσεις αιολικής ισχύος, που κατηγοριοποιήθηκαν από το νευρωνικό δίκτυο για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας (day-ahead forecasts). Για την αποτίμηση της επίδοσης του μοντέλου, υπολογίστηκαν τα εκατοστημόρια και στη συνέχεια βρέθηκαν οι δείκτες CRPS, αξιοπιστία και αιχμηρότητα.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης PSO για την εύρεση των κατάλληλων συντελεστών-βαρών που θα πολλαπλασιάσουν το διάνυμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου, έτσι ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του δείκτη crps. Η διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου επαναλήφθηκε για τους νέους συντελεστές και έτσι προέκυψαν οι βελτιωμένες προβλέψεις. Με την εφαρμογή της βελτιστοποίησης επιτεύχθηκε σημαντική βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης του δικτύου και προέκυψαν αισθητά καλύτερα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της τελικής πρόβλεψης συγκρίθηκαν με μεθόδους αναφοράς, όπως η παραμένουσα τιμή (persistence) και παρουσίαζαν σαφώς καλύτερη συμπεριφορά. Αναλυτικότερα, ο δείκτης CRPS δεν ξεπέρασε για καμία ώρα του 24ώρου το 12%, ενώ με εξαίρεση τις βραδινές ώρες κυμαινόταν περίπου στο 8%. Κατά τις βραδινές ώρες οι τιμές του δείκτη κυμαίνονταν μεταξύ 10%-12% κι αυτό γιατί, ως αυτόνομο σύστημα, η Κρήτη έχει ένα όριο διείσδυσης στην παραγόμενη αιολική ενέργεια από ΑΠΕ σε σχέση με το φορτίο. Επομένως, κατά τις βραδινές ώρες που το φορτίο είναι κατά κανόνα πολύ μικρό, προκύπτει αντίστοιχα μικρή δυνατότητα ένταξης της ισχύος από ΑΠΕ στο δίκτυο και κατά συνέπεια τα αιολικά πάρκα δεν αποδίδουν στο δίκτυο την ισχύ που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν εκείνες τις ώρες. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε δεν είχε ενσωματωμένη αυτήν την πληροφορία και για το λόγο αυτό παρατηρήθηκαν ελαφρώς μεγαλύτερα σφάλματα κατά τις βραδινές ώρες.

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία παρατίθενται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος ως αντικείμενο έρευνας, αναλύοντας λεπτομερώς ,μεταξύ άλλων, την αξία της σε τελικούς χρήστες, την έντονη εξάρτησή της από τις καιρικές μεταβλητές, τις διαφορετικές προσεγγίσεις των μοντέλων πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής, τα διάφορα κριτήρια αξιολόγησης των σημειακών, αλλά κυρίως των πιθανοτικών προβλέψεων και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης. Παράλληλα αποδίδεται μέσω των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, ένα κατευθυντήριο πλαίσιο εργασίας, που περιλαμβάνει τόσο σε θεωρητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο εφαρμογής, την μοντελοποίηση με χρήση νευρωνικών δικτύων. Η βελτίωση της απόδοσης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος συνιστά ένα ελκυστικό αλλά απαιτητικό πεδίο έρευνας με σημαντικές μελλοντικές προοπτικές.

Κρίνοντας από τη βελτίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO, γίνεται φανερό ότι πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η δυνατότητα εφαρμογής του για βελτίωση των προβλέψεων που δίνονται από τα νευρωνικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, μια πρόταση που αξίζει να εφαρμοστεί είναι η χρήση του αλγορίθμου για κάθε ξεχωριστή ώρα πρόβλεψης. Με αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιώντας το δείκτη crps, θα βρίσκονται οι βέλτιστοι συντελεστές του διανύσματος εισόδου για την επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος στη συγκεκριμένη ώρα και με το δεδομένο ορίζοντα πρόβλεψης. Στη συνέχεια, κατά το στάδιο εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, ανάλογα με την ώρα της ημέρας για την οποία γίνεται η πρόβλεψη, θα πολλαπλασιάζεται το διάνυσμα εισόδου με τους επιλεγμένους κάθε φορά συντελεστές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, βελτιστοποιήθηκε ο μέσος όρος του CRPS όλες τις ώρες της επόμενης ημέρας και οι συντελεστές που βρέθηκαν χρησιμοποιήθηκαν και για τις 24 ώρες, καθώς η εκτέλεση του αλγορίθμου PSO είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί αρκετές ώρες προσομοίωσης. Η εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε διαφορετική ώρα πρόβλεψης απαιτεί 24 εκτελέσεις του αλγορίθμου PSO. Οπωσδήποτε όμως μπορεί να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο θα αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα της μικρότερης απόδοσης του μοντέλου κατά τις βραδινές ώρες, όπου υπήρχε ο περιορισμός της ένταξης της παραχθείσας από ΑΠΕ ενέργειας στο δίκτυο. Συνεπώς, η παρούσα εργασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως βάση για μελλοντικές προεκτάσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Γεώργιος Ν. Σιδεράτος . «*Ανάπτυξη Μοντέλων Πρόβλεψης Παραγωγής Αιολικής Ισχύος με Χρήση Νευρωνικών Δικτύων και Τεχνικών Ασαφούς Λογικής*», Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2010.
- [2] <http://www.nesea.org/energy/info/wind.html>
- [3] Φώτιος Χ. Καράμερος. «*Πιθανοτική πρόβλεψη Ηλιακής παραγωγής με χρήση ARTMAP*», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2013
- [4] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος. «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*». ΕΜΠ. Αθήνα 1997.
- [5] Pierre Pinson. “*Estimation of the uncertainty in wind power forecasting*”. 23/3/2006. Paris.
- [6] Γκίκας Αντώνιος, «*Ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού*», πτυχιακή εργασία, Χανιά 2004
- [7] Σταύρος Παπαθανασίου. «*Εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης αιολικών πάρκων*». ΕΜΠ. Νοέμβριος 2005
- [8] Δημήτριος Ν. Τόλης. «*Πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κοντά στο όριο αποκοπής της ταχύτητας του ανέμου*», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011
- [9] <http://www.eunice-group.com>
- [10] 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.
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Lynch, Peter (March 2008). "The origins of computer weather prediction and climate modeling". *Journal of Computational Physics* (University of Miami) **227** (7): 3431–44.

- [15] Harper, Kristine (May 2007). "2007: 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction". *Bulletin of the American Meteorological Society* **88** (5): 639–650
- [16] Lynch, Peter (2006). The ENIAC Integrations. *The Emergence of Numerical Weather Prediction*. Cambridge University Press. σελ. 206–208
- [17] Toth, Zoltan (December 1997). "Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method". *Monthly Weather Review* **125** (12): 3297–3319
- [18] Pielke, Roger A. (2002). *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press. σελ. 65
- [19] Ahrens, C. Donald (2008). *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*. Cengage Learning. σελ. 244
- [20] <http://www.ecmwf.int>
- [21] R.A. Pielke, et al., "A comprehensive meteorological modeling system-RAMS," *Metrological Atmospheric Physics*, vol. 49, pp. 69–91, 1992.
- [22] Μπουτσικουόδη Χ. Σοφία, «Πιθανοτική πρόβλεψη Αιολικής ισχύος», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2009
- [23] www.library.tee.gr, Δ. Ραχιώτης «Αιολική Ενέργεια : Μια Σημαντική Συμβολή για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη και Απασχόληση στη Χώρα μας», Χαλκίδα 2009.
- [24] J.-P. Lafore, et al., "The Meso-NH atmospheric simulation system. Part 1: Adiabatic formulation and control simulations", *Annales Geophysicae*, vol. 16, pp. 90–109, 1998.
- [25] R. Rødm, 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.
- [26] 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.
- [27] C. Monteiro, R. Bessa, V. Miranda, A. Botterud, J. Wang, and G. Conzelmann Argonne National Laboratory "Wind Power Forecasting : State-of-the-art 2009".
- [28] Roberta Pirazzini, Timo Vihma, Jouko Launiainen, Priit Tisler. "Validation of HIRLAM boundary-layer structures over the Baltic Sea". *BOREAL environment research* 7:211-218, Helsinki 2 October 2002.
- [29] G. Cats, L. Wolters. "The HIRLAM project". *IEEE Computational Science & Engineering*, vol 3, no. 4, pp.4-7, 1996.
- [30] G. Kallos. "The Regional weather forecasting system SKIRON". *Proceedings, Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environmets*, , pp.9, 15-17 October 1997, Athens, Greece

- [31] J. - F. Geleyn. “Some details about ALADIN physics in cycle 28T1”. ALADIN Newsletter, 26, pp.71-74. 2004.
- [32] D.L. Rife, C.A. Davis, Y. Liu, and T.T. Warner, “Predictability of Low-Level Winds by Mesoscale Meteorological Models,” Monthly Weather. Review, vol. 132, pp. 2553–2569, 2004.
- [33] C.F. Mass, D. Ovens, K. Westrick, and B.A. Colle, “Does Increasing Horizontal Resolution Produce More Skillful Forecasts?,” Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 83, pp. 407–430, 2002.
- [34] E.P. Gritmit and C.F. Mass, “Initial Results of a Mesoscale Short-Range Ensemble Forecasting System over the Pacific Northwest,” Weather Forecasting, vol. 17, pp. 192–205, 2002.
- [35] J.L. Case, J. Manobianco, J.E. Lane, C.D. Immer, and F.J. Merceret, “An Objective Technique for Verifying Sea Breezes in High-Resolution Numerical Weather Prediction Models,” Weather Forecasting, vol. 19, pp. 690–705, 2004.
- [36] G. Sideratos and N. Hatzigryriou, „Probabilistic wind power forecasting using radial basis function neural networks“““
- [37] Lange, M., Focken, U.: Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction, Springer 2006.
- [38] 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.
- [39] www.prevento.de
- [40] Gregor Giebel, G. Kariniotakis, and R. Brownsword, “*State of the Art on Short-term Wind Power Prediction*” ANEMOS Deliverable Report D1.1, 2003.
- [41] 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
- [42] Zack, J.W., M.C. Brower, B.H. Bailey, ‘*Validating of the Forewind Model in Wind Forecasting Applications*’, Talk on the EWEC Special Topic Conference Wind Power for the 21st Century, Kassel, Germany, 2000
- [43] P. Pinson, G. Kariniotakis, H. Madsen, H.Aa. Nielsen Jan K. Moller “*Non-Parametric Probabilistic Forecasts of Wind Power: Required Properties and Evaluation*” Research Article 18 April 2007.
- [44] G. Kariniotakis et al. “Evaluation of Advanced Wind Power Forecasting Models – Results of the Anemos Project”, EWEC, Athens 2006

- [45] V. Guénard, G. Kariniotakis, I. Martí, , “ANEMOS Advanced Wind Power Forecasting. Operational Challenges and On-line Performance”. Proc. of EWEC'07, Milan, Italy, 7-10 May 2007
- [46] G. Kariniotakis and co authors. “What performance can be expected by short-term wind power prediction models depending on site characteristics?” *European Wind Energy Conference, EWEC'04, London, United Kingdom*, November 2004.
- [47] Vasilis V. Alafouzos, Anna n. Vougiouka, Yiannis G. Perivolaris, Dimitris G. Mourikis, Vaggelis P. Zagorakis, Andreas P. Theodorakakos. “A method for estimating wind speed profile in complex terrain based on Advanced CFD tool”. EWEC 2006.
- [48] G. Kallos. “The Regional weather forecasting system SKIRON”. Proceedings, Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environmets, , pp.9, 15-17 October 1997, Athens, Greece
- [49] Lynch, Peter (March 2008). "The origins of computer weather prediction and climate modeling". *Journal of Computational Physics* (University of Miami) **227** (7): 3431–44.
- [50] Β. Ασημακόπουλος, Φ. Πετρόπουλος, «Επιχειρησιακές προβλέψεις», Αθήνα 2011
- [51] G. Kariniotakis, P. McSharry, P. Pinson, R. Girard, “Methodology for the evaluation of probabilistic Forecasts”, SafeWind deliverable, October 2009
- [52] Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. ,Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας - www.desmie.gr – Γενικά Αγοράς.
- [53] Σπηλιώτης, Γ. Κοκκολάκης «Εισαγωγή στη θεωρία των πιθανοτήτων και Στατιστική, Έκδοση 3^η » Εκδόσεις Συμεών ,Αθήνα 1999.
- [54] S. Haykin, “*Neural Networks and Learning Machines*”, 3rd edition, November 2008
- [55] McCulloch, W.S. & W. Pitts,1943. “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, Bulletin of Mathematical Biophysics, issue 5, pp. 115-133
- [56] Churchland, P.S. & T.J. Sejnowski, 1992. “*The computational Brain*”, Cambridge, MA: MIT Press
- [57] Gail A. Carpenter, Stephen Grossberg “*Adaptive Resonance Theory*” Boston Massachusetts, MIT Press April 2002.
- [58] Mara Lucia M. Lopes, Carlos R. Minussi, Anna Diva P. Lotufo “ *Electric load forecasting using a fuzzy ART & ARTMAP neural network*” July 2004 Science Direct.
- [59] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
- [60] Razvan Andonie, Lucian Sasu “A Modified Fuzzy ARTMAP Architecture for Incremental Learning Function Approximation”

- [61] Mu-Chun Su, Jonathan Lee, Kuo Lung Hsieh “A new ARTMAP-based neural network for incremental learning”, 2006 Science Direct.
- [62] Kuan, C.-M. and H. White, ‘Artificial neural networks: An econometric perspective’, *Econometric Reviews*, 13, 1–91 and 139–143, 1994
- [63] G. Zhang, Patuwo B. E., and M. Y. Hu, ‘Forecasting with artificial neural networks: the state of the art’, *Int. J. Forecasting*, 14(1):35–62, 1998
- [64] L. Marquez, T. Hill, W. Remus and R. Worthley, ‘Neural Network Models as an Alternative to Regression’, In: E. Turban and R. Trippi, Editors, *Neural Network Applications in Investment and Finance Services*, Probus Publishing, New York, pp. 145-161(1991)
- [65] Chen, S., Cowan, C.F.N. and Grant, P.M., ‘Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks’, *IEEE Trans. Neural Networks*, pp. 302-309, 1995
- [66] M. J. Orr, ‘Regularisation in the selection of RBF centres’, *Neural Computation*, vol. 7, no. 3, pp. 606-623, 1995
- [67] Takagi T, Sugeno M., ‘Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control’, *IEEE Trans Systems Man Cybernet*, 15(1), 116–132, 1985
- [68] Billings, S. A., Jamaluddin, H. B. and Chen, S., ‘A Comparison of the Backpropagation and Recursive Prediction Error Algorithms for Training Neural Networks’, *Mechanical Systems and Signal Processing*. pp. 233 – 255, 1990
- [69] Bernd A. Berg. “Markov Chain Monte Carlo Simulations and Their Statistical Analysis.” Singapore, World Scientific 2004.
- [70] Guy Lebanon “Metropolis-Hastings and Gibbs Sampling” November 30, 2006.
- [71] M. Clerc, J. Kennedy, “The particle swarm explosion stability and convergence in a multi-dimensional complex space”, *IEEE Trans. Evolution. Comput.* 6 (1) (2002) pp. 58-73
- [72] Ioan Cristian Trelea, “The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection”, 2003
- [73] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle Swarm Optimization in: Proc. IEEE Conf. on Neural Networks, IV, Piscataway, NJ, 1995, pp. 1942-1948
- [74] G. Siderados and N.D. Hatziargyriou, “Wind power forecasting focused on extreme power system events”.
- [75] E.D. Castronuovo, J.A. Pecos Lopes, “On the optimization of the daily operation of a wind-hydro power plant”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, pp. 1599–1606, 2004.
- [76] G. N. Bathurst, J. Weatherhill, and G. Strbac, “Trading wind generation in short-term energy markets,” *IEEE Trans. Power System*, vol. 17, no. 3, pp. 782–789, Aug. 2002.

- [77] R. Doherty, M. O'Malley, "A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity", *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 20, pp. 587-595, 2005
- [78] T.S.Karakatsanis, N.D.Hatziargyriou, "Probabilistic Constrained Load Flow based on Sensitivity Analysis", *IEEE Trans on Power Systems*, Vol 9, No 4, November 1994, pp 1853-1860
- [79] G. Giebel, L. Landberg, J. Badger, K. Sattler, H. Feddersen, T.S. Nielsen, H.Aa. Nielsen, H. Madsen, "Using Ensemble Forecasting for Wind Power", EWEC'03, Madrid, 16-20 June, 2003
- [80] J.W. Taylor, P.E. McSharry, and R. Buizza, "Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 775-782, 2009
- [81] J. B. Bremnes, "Probabilistic wind power forecasts using local quantile regression", *Wind Energy*, vol. 7, no 1, pp. 47-54, 2004.
- [82] H. A. Nielsen, H. Madsen, and T. S. Nielsen, "Using quantile regression to extend an existing wind power forecasting system with probabilistic forecasts", *Wind Energy*, vol 9, no 1-2, pp. 95-108, 2006.
- [83] T. S. Nielsen and H. Madsen, 'Statistical methods for predicting wind power', in *Proceedings of the 1997 European Wind Energy Conference, EWEC'97, Dublin, Ireland*, pp. 755-758, 1997
- [84] J. Juban, L. Fugon, and G. N. Kariniotakis, "Probabilistic short-term wind power forecasting based on kernel density estimators," *Proc. of the EWEC'07, Milan, Italy*, May 2007.
- [85] R.J. Bessa, V. Miranda, A. Botterud, Z. Zhou, J. Wang, "Time-Adaptive Quantile-Copula for Wind Power Probabilistic Forecasting," *Renewable Energy*, Vol. 40, No. 1, pp. 29-39, 2012.
- [86] P. Pinson, G. Kariniotakis, "On-line assessment of prediction risk for wind power production forecasts" *Wind Energy*, vol 7, pp. 119-132, 2004.
- [87] M. Lange, "Analysis of the Uncertainty of Wind Power Predictions" PhD dissertation, Carl von Ossietzky Oldenburg University, 2003.
- [88] Giebel G., "The State of the Art in Short-Term Prediction of Wind Power - A Literature Overview, 2nd Edition" Deliverable 1.2b of the ANEMOS.plus project. Available: Anemos-plus.eu.
- [89] J. Usaola, O. Ravelo, G. Gonzalez, F. Soto, C. Davila, B. Diaz-Guerra, "Benefits for wind energy in electricity markets from using short term wind power prediction tools: a simulation study", *Wind Engineering*, vol. 28, no.1, pp. 119-128, 2004