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

Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη αιολικής ισχύος με χρονικό βήμα ενός τετάρτου της ώρας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δ. Πολίτης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

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

Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη αιολικής ισχύος με χρονικό βήμα ενός τετάρτου της ώρας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Δ. Πολίτης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την …….

…….	……	……
Ν.Χατζηαργυρίου	Σ.Παπαθανασίου	Π.Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Αν Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας ΕΜΠ

…….

Γεώργιος Δ. Πολίτης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Δ.Πολίτης, 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Η προσομοίωση του μοντέλου γίνεται σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων αριθμητικών προβλέψεων καιρού , η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου εκτίμησης ανεμολογικών χαρακτηριστικών στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Αυτός ο στόχος μας οδήγησε και στη μείωση του χρονικού βήματος πρόβλεψης στα 15 λεπτά, εφόσον λαμβάνει χώρα πρώτα μια εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών των ταχυτήτων του ανέμου που παρέχονται σε ωριαία βάση από το αριθμητικό μοντέλο SKIRON. Επίσης, για την απόκτηση μιας ολοκληρωμένης εικόνας αναφορικά με την πρόοδο που έχει σημειωθεί γύρω από την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, κρίθηκε αναγκαία η παρουσίαση όλων των συνιστωσών που συμβάλλουν στην πρόβλεψη. Έτσι σε κάθε κεφάλαιο της παρούσης εργασίας περιλαμβάνονται συνοπτικά τα εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια εισαγωγή στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, στις βασικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την περαίωση της καθώς και στην συμβολή της πρόβλεψης στο πεδίο του εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας.
Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το πρόγραμμα ANEMOS, ένα από τα μεγαλύτερα προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί για λογαριασμό της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.
Στο **Κεφάλαιο 3** καταγράφονται τα βασικά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και γίνεται μια ειδικότερη αναφορά στα μοντέλα μικρής κλίμακας.
Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αριθμητικά μοντέλα καιρού, τα οποία παρέχουν τα βασικά δεδομένα εισόδου στο μοντέλο μας.
Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια ιδιαίτερη αναφορά στους παράγοντες που καθιστούν αβέβαιη την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι αποτίμησης του σφάλματος των μοντέλων πρόβλεψης.
Στο **Κεφάλαιο 6** λαμβάνει χώρα μια εκτενής ανάλυση των νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιούνται στην εν λόγω εργασία και παρουσιάζεται η βασική μεθοδολογία που ακολουθείται κατά την ενσωμάτωση των νευρωνικών δικτύων στο αναπτυσσόμενο μοντέλο πρόβλεψης.
Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται αναλυτικά 3 εκδοχές του αλγορίθμου με τον οποίο μειώνουμε το χρονικό βήμα της πρόβλεψης στα 15 λεπτά.
Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται η παρουσίαση του τελικού μοντέλου που αναπτύξαμε, ενσωματώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο MATLAB και εξάγονται κάποια βασικά συμπεράσματα από την σύγκριση των διαφορετικών εκδοχών.

Λέξεις κλειδιά

Πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, αιολικά πάρκα, αριθμητικά μοντέλα καιρού, μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, αυτό-οργανωμένοι χάρτες, νευρωνικά δίκτυα συνάρτησης ακτινωτής βάσης, μέσο απόλυτο σφάλμα.

Abstract

The aim of the present diploma thesis is to develop an integrated short-term wind power forecasting model based on neural networks. The presented model is computed using the MATLAB program. In the framework of the developed model, particular emphasis is given on the improvement of the quality of the numerical weather prediction data, which is achieved through a wind feature propagation estimation algorithm in the area of interest. Since this algorithm provides an estimation of the velocity of wind in shorter time steps than the one provided by the NWP, i.e. 15 minutes, we chose to reduce the prediction time step to 15 minutes as well. In addition, the present thesis provides all the background concerning wind power forecasting, and in particular, the most common methods developed until today, the use of numerical weather prediction models and the factors of forecasting uncertainty. The structure of the thesis is given below:

Chapter 1 introduces the main procedures of wind power forecasting, as well as the contribution of forecasting to the power market.
Chapter 2 presents one of the biggest projects in wind power forecasting, the ANEMOS project.
Chapter 3 presents the basic wind power forecasting models and focuses particularly on the CFD models.
Chapter 4 summarizes the most commonly used numerical weather prediction models which provide the meteorological input to the wind power forecasting models.
Chapter 5 introduces the factors that cause uncertainty to wind forecasting and presents the main error evaluation methods and uncertainty measures used.
Chapter 6 analyses the neural networks used in the developed model and presents the main aspects of methodology with regard to the implementation of neural networks in the forecasting model.
Chapter 7 presents analytically three versions of the algorithm used in order to reduce the prediction time step to 15 minutes.
Chapter 8 analyses the fully developed wind power forecasting model, summarizes the results of the MATLAB simulation and compares the 3 versions used with regard to their prediction efficiency.

Key words

Wind power forecasting, wind farms, numerical weather prediction models, CFD models, self-organized maps, radial basis function networks, mean absolute error.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή κ. Νίκο Χατζηαργυρίου για την επιλογή του να μου αναθέσει την εν λόγω διπλωματική εργασία , καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και συνεργασία του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον διδάκτορα του ΕΜΠ κ. Γιώργο Σιδεράτο για την πολύτιμη καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εν λόγω εργασίας . Τέλος , ευχαριστώ πολύ το φίλο και συμφοιτητή μου Γιώργο Περάκη για την αμέριστη βοήθεια του στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας.

Γεώργιος Δ. Πολίτης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή: Η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής.....12
1.1.Γενικά.....12
1.2.Βασικές διαδικασίες κατά την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής.....13
1.3.Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.....13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Το πρόγραμμα ANEMOS.....15
2.1.Γενικά.....15
2.2. Στόχοι του προγράμματος ANEMOS.....15
2.3.Επιτυχίες του προγράμματος και νέες προοπτικές.....16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:Βασικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής.....18
3.1.Γενικά.....18
3.2.Τεχνικές φυσικής μοντελοποίησης.....18
3.2.1.Το μοντέλο Prediktor.....18
3.2.2.Το μοντέλο Previento.....19
3.2.3.Το μοντέλο eWind.....19
3.2.4.Το μοντέλο HIRPOM.....20
3.3: Ειδικά βραχυπρόθεσμα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος με χρήση τεχνικών φυσικής μοντελοποίησης.....20
3.3.1.Γενικά.....20
3.3.2.Μοντέλα μέσης κλίμακας(meso-scale models).....21
3.3.3.Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής(CFD).....21
3.3.3.1.Το λογισμικό Fluent.....21
3.3.3.2. Το λογισμικό MERCURE.....23
3.4.Τεχνικές στατιστικής μοντελοποίησης.....23
3.4.1.Το μοντέλο WPPT.....25
3.4.2.Το σύστημα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής ARMINES.....26
3.4.3.Το μοντέλο Sipreolico.....26
3.4.4.Το μοντέλο AWPPT.....27
3.4.5.Τα μοντέλα LocalPred και RegionPred.....28
3.4.6.Το μοντέλο του Ε.Μ.Π.....28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αριθμητικά μοντέλα καιρού.....30
4.1.Εισαγωγή……30
4.2. Σχεδιασμός του ατμοσφαιρικού μοντέλου……..31
4.3. Τα κυριότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού……32
4.3.1. Παγκόσμια μοντέλα……32
4.3.2. Περιοχικά μοντέλα……..34
4.4. Το μοντέλο SKIRON……35
4.4.1. Το SKIRON v6.0(υδροστατική προσέγγιση)……..35
4.4.2.Το μη υδροστατικό SKIRON v1.2……36
4.5.Αναγκαίες βελτιώσεις στα NWP και τα μοντέλα μέσης κλίμακας με στόχο την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος……..39
4.6.Το σύστημα προγνώσεων πολλαπλού δείγματος(ensemble forecasting)…….42
4.6.1.Γενικά……42
4.6.2. Εφαρμογές του συστήματος ensemble στην πρόγνωση του ανέμου..43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος……44
5.1.Εισαγωγή……44
5.2.Η στατιστική κατανομή του ανέμου και η αντιστοιχία της με την κατανομή της αιολικής ισχύος……44
5.2.1.Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου……..44
5.2.2.Μετατροπη του ανέμου σε αιολική ενέργεια……45
5.2.2.1.Η καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή……..46
5.3.Σφάλματα στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος……48
5.3.1.Εισαγωγή……48
5.3.2.Ορισμός του σφάλματος πρόβλεψης……48
5.3.3.Μεθοδολογίες αποτίμησης σφάλματος στα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος……49
5.3.3.1.Αποτίμηση του σφάλματος βασισμένη στα μέτρα του……..49
5.3.3.2.Αποτίμηση του σφάλματος βασισμένη στην κατανομή του…….50
5.3.3.3.Σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης….51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Η χρήση των νευρωνικών δικτύων στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος……52
6.1.Εισαγωγή……52
6.2.Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα……52
6.2.1.Αυτό-οργανωμένοι χάρτες Kohonen(Self-Organized Maps)……53
6.2.1.1.Αλγόριθμος εκπαίδευσης των Self-organized Maps……54
6.2.1.2.Εφαρμογή των αυτό-οργανωμένων χαρτών στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος……55
6.2.2.Τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης……..55
6.2.2.1.Η συμβολή των rbf δικτύων στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος……56

6.3.Μεθολογία νευρωνικού μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος……57
6.3.1. 1^{ο} στάδιο μοντέλου……57
6.3.2. 2^{ο} στάδιο μοντέλου……58
6.3.2.1. Κατασκευή των δικτύων rbf……59
6.3.2.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης των παραμέτρων εισόδου του δικτύου rbf……60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Η μείωση του χρονικού βήματος πρόβλεψης σε 15 λεπτά……64

7.1.Εισαγωγή……..64
7.2.Εκτίμηση της ταχύτητας και διεύθυνσης διάδοσης μετώπων αέρα….65
7.2.1.Γενικά……65
7.2.2.Ο αλγόριθμος εκτίμησης της ταχύτητας και διεύθυνσης διάδοσης μετώπων αέρα……66
7.3.Η μετατροπή των προγνωστικών δεδομένων από ωριαίες σε ανά τέταρτο τιμές…… 69
7.4.Παραλλαγές του αλγορίθμου στα πλαίσια της εφαρμογής μας……..70
7.4.1.Η συσχέτιση 2 μεταβλητών……..70
7.4.1.1.Γενικά……70
7.4.1.2.Εφαρμογή της συσχέτισης στον αλγόριθμο εκτίμησης μετώπων αέρα..71
7.4.2.Η αμοιβαία πληροφορία……..72
7.4.2.1.Θεωρία πληροφορίας και αμοιβαία πληροφορία……72
7.4.2.2.Εφαρμογή της αμοιβαίας πληροφορίας στον αλγόριθμο εκτίμησης μετώπων αέρα……74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Το τελικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής..
8.1.Γενικά……75
8.2.Αναλυτική περιγραφή του αναπτυσσόμενου μοντέλου……75
8.2.1. Αλγόριθμος μετατροπής των ωριαίων δεδομένων σε ανά τέταρτο……75
8.2.1.1.1^{η} εκδοχή……76
8.2.1.2. 2^{η} και 3^{η} εκδοχή……77
8.2.3.Κατηγοριοποίηση των ταχυτήτων ανέμου……77
8.2.4.Εκπαίδευση της κάθε κατηγορίας ανέμου με χρήση δικτύων rbf……..81
8.3.Προσομοίωση και αποτίμηση του αναπτυσσόμενου μοντέλου……82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή: η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής

1.1.Γενικά

Η σύνθετη λέξη “προβλέπω” συνίσταται σε 2 λέξεις, την πρόθεση “προ” και το ρήμα “βλέπω”, σημαίνει δηλαδή “βλέπω το μέλλον” ή “βλέπω την εξέλιξη ενός γεγονότος πριν αυτό συμβεί”. Η επιθυμία του ανθρώπου να προβλέπει το μέλλον είναι έμφυτη και προέρχεται από το αίσθημα αυτοσυντήρησης που διακατέχει την ανθρώπινη φύση και γενικά τα νοήμονα όντα. Από το ξεκίνημα σχεδόν της ιστορίας της ανθρωπότητας η πρόβλεψη χρησιμοποιείται για την πρόληψη καταστροφών και την διαχείριση της ιδιωτικής περιουσίας. Στη σημερινή εποχή η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών επέτρεψε την εφαρμογή της πρόβλεψης σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας και κυρίως στην οικονομία , τη βιομηχανία, τη μετεωρολογία και τη σεισμολογία, όπου αξιοποιείται με στόχο την ανάπτυξη ποικίλων στρατηγικών και μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων και την λήψη αποφάσεων. Η εξέλιξη της Πληροφορικής έδωσε επίσης την δυνατότητα πρόβλεψης πιο πολύπλοκων διαδικασιών , όπως είναι και η παραγωγή αιολικής ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί την πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και η ανάγκη πρόβλεψης της αναγνωρίζεται από την παγκόσμια βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενδεικτικά, η εγκατεστημένη χωρητικότητα αιολικής ισχύος ανά τον κόσμο αυξήθηκε από τα 2.5 GW το 1992 σε πάνω από 40 GW στο τέλος του 2003 με ετήσια αύξηση που πλησίασε το 40%. Μάλιστα, από το 2000 και μετά η συνολική εγκατεστημένη χωρητικότητα διπλασιάζεται κάθε περίπου 3 χρόνια. Χαρακτηριστικό είναι επίσης το γεγονός ότι ο στόχος που είχε θέσει η ευρωπαϊκή κοινότητα το 1997 για την συνολική εγκατεστημένη ισχύ κατά το έτος 2010, ήταν 40GW , ποσό το οποίο ξεπεράστηκε πολύ νωρίτερα και οι νέες εκτιμήσεις έκαναν λόγο για εγκατεστημένη ισχύ 75 GW έως το 2010 , με την ετήσια παραγωγή να προσεγγίζει τις 167 TWh. Μέχρι το 2020 υπολογίζεται αύξηση της αιολικής παραγωγής κατά 12% σε σχέση με την τρέχουσα εγκατεστημένη ισχύ.

Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος στοχεύει στο να παρέχει στους τελικούς χρήστες εκτιμήσεις της πιθανής διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, σε μια δεδομένη στιγμή στο μέλλον. Η μεταβλητότητα όμως που παρουσιάζει ο άνεμος αποτελεί εμπόδιο για την εξέλιξη της και την ενσωμάτωση της στο δίκτυο ισχύος. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας είναι αναγκαία η εκτίμηση της αιολικής παραγωγής για τις επόμενες 24-72 ώρες, όταν πρόκειται για τον προγραμματισμό της χρήσης της αιολικής παραγωγής στην κάλυψη του φορτίου της επόμενης μέρας. Η περίπτωση που μας απασχολεί εδώ είναι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η οποία αντιστοιχεί σε προβλέψεις 48 ωρών με ωριαία χρονική ανάλυση. Οι βραχυχρόνιες αυτές προβλέψεις στο επίπεδο της αιολικής παραγωγής αποσκοπούν σε μια πιο ασφαλή και οικονομική διαχείριση του εκάστοτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2. Βασικές διαδικασίες κατά την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής

Στη σημερινή εποχή έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά υπολογίσιμο πλήθος μεθόδων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής , τα οποία εντάσσονται σε ένα κοινό πλαίσιο περιγραφής. Συνοπτικά, η πρόβλεψη του αιολικού φορτίου συνίσταται σε 2 κυρίαρχες διαδικασίες . Η πρώτη αφορά τις μετεωρολογικές προβλέψεις καιρού και συγκεκριμένα την πρόβλεψη του ανέμου στο επιθυμητό σημείο για τις επόμενες ώρες ή μέρες και βασίζεται στην βελτίωση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, οι οποίες παρέχονται για το χώρο γύρω από το αιολικό πάρκο σε διαφορετικά ύψη. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή και ως downscaling. Η δεύτερη διαδικασία είναι η μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε ενέργεια ώστε να μπορούμε να εκφράσουμε την προβλεπόμενη αιολική ισχύ. Ως γνωστόν, η αιολική ενέργεια είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, ωστόσο, όπως θα δούμε και σε επόμενα κεφάλαια, αυτή η απλή μαθηματική σχέση δεν αρκεί για να υπολογίσει την προβλεπόμενη αιολική ενέργεια από διαθέσιμα δεδομένα ανέμου. Έτσι, κατά το δεύτερο αυτό στάδιο λαμβάνει χώρα μια σειρά διαδικασιών που στοχεύουν στην εύρεση μιας εναλλακτικής σχέσης μεταξύ ταχύτητας ανέμου και αιολικής ισχύος και που περιλαμβάνουν την αξιοποίηση και προσομοίωση της καμπύλης ισχύος του Α/Π, των χαρακτηριστικών του εδάφους , των φαινομένων σκίασης εντός του Α/Π και της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων στην παραγωγή. Βέβαια, καθένας από αυτούς τους παράγοντες δημιουργεί ένα σφάλμα στην πρόβλεψη , το οποίο επηρεάζει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος.

Η στοχαστική φύση του καιρού και ειδικότερα του ανέμου καθιστά πιο σημαντικό απ' όλα το σφάλμα που εισάγεται από τα μετεωρολογικά μοντέλα, το οποίο είναι ιδιαίτερα μεταβλητό . Συνεπώς, η έρευνα γύρω από τα διάφορα μοντέλα πρόβλεψης του αιολικού φορτίου εστιάζεται ειδικά στον περιορισμό αυτού του σφάλματος , καθώς όσο καλύτερα εκτιμηθεί η συμπεριφορά του ανέμου βραχυπρόθεσμα τόσο καλύτερα θα είναι δυνατόν να εκτιμηθεί και η ενέργεια του , που αντιστοιχεί στην αιολική παραγωγή.

1.3.Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Η διείσδυση της αιολικής ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα διάφορων κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει παρουσιάσει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια. Τα επίπεδα διείσδυσης στη Δανία προσεγγίζουν το 20%, ενώ στη Γερμανία και την Ισπανία κυμαίνονται στο 5%. Σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης η διείσδυση είναι ήδη αρκετά υπολογίσιμη. Λόγου χάρη, στην Βόρεια Γερμανική Πολιτεία του Schleswig-Holstein η εγκατεστημένη αιολική ισχύς φτάνει στο 30% της ζήτησης ενέργειας της περιοχής, ενώ στην περιοχή Navarra της Ισπανίας το 50% της κατανάλωσης καλύπτεται από την αιολική παραγωγή. Στο νησί της Κρήτης, η ετήσια διείσδυση αιολικής ενέργειας ξεπερνά το 10% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας , ενώ, σε ωριαία βάση, έχουν παρατηρηθεί ποσοστά διείσδυσης που προσέγγιζαν το 40% . Πρόσφατα, μια σειρά ερευνών ανέδειξε το γεγονός ότι σε αγορές με σημαντική διείσδυση αιολικής ενέργειας, η τιμή αγοράς του μεγαλύτερου μέρους του ηλεκτρισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη της αιολικής διείσδυσης και συνάμα της ταχύτητας του ανέμου.

Το 1999, η τιμή της αιολικής ενέργειας της Δανίας στο εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας , η οποία υπολογίστηκε στα 2.4€/KWh , θα μειώνονταν κατά 0.13-0.27€/KWh λόγω κακών προβλέψεων . Οι Pinson και Madsen έδειξαν ότι οι μεταβολές των τιμών στις αγορές της επόμενης μέρας στο NordPool της Δανίας εξηγούνται καλύτερα από τα προβλεπόμενα δεδομένα αιολικής ισχύος παρά από τα πραγματικά δεδομένα. Αυτό είναι λογικό αν σκεφτεί κανείς πως διαμορφώνονται οι τιμές στις αγορές, δηλαδή , εν προκειμένω, με βάση την αιολική(και γενικά την ηλεκτρική) ισχύ και τις προβλέψεις ισχύος της προηγούμενης μέρας. Στο νησί της Κρήτης η αξιολόγηση των μεθόδων πρόβλεψης αιολικής ισχύος έδειξε ότι μπορούσε να επιτευχθεί μηνιαία αποταμίευση της τάξεως του 2.5-5.5% σε σχέση με τα πραγματικά λειτουργικά κόστη με το να μειωθεί η on-line εφεδρεία στο 20% της αιολικής παραγωγής.

Είναι σαφές ότι αυτά τα επίπεδα διείσδυσης της αιολικής ισχύος δημιουργούν αξιοσημείωτες επιπλοκές στη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της στοχαστικής φύσης του ανέμου. Συνεπώς, η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος για χρονικούς ορίζοντες 0-48 ώρες μπροστά καθίσταται απαραίτητη για την αξιολόγηση των λειτουργικών μονάδων της παραγωγής, την οικονομική ανταπόκριση, τον προγραμματισμό των δια-ανταλλαγών ενέργειας καθώς και την αξιολόγηση της ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Αξίζει πάντως να τονιστεί ότι η αξία της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι διαφορετική για κάθε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα δίκτυο που περιέχει πολλές μονάδες με εκκίνηση , είναι λιγότερο ευαίσθητο στις απρόβλεπτες μεταβολές της παραγόμενης αιολικής ενέργειας , σε αντίθεση με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στις πιο αργές μονάδες παραγωγής. Ένα άλλο ζητούμενο αποτελεί η κατανομή των αιολικών πάρκων μέσα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας , στο οποίο τα αιολικά πάρκα είναι διάσπαρτα σε μια ευρεία περιοχή, τα σφάλματα των προβλέψεων των επιμέρους αιολικών πάρκων αλληλοαναιρούνται. Αντίθετα, σ’ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή όλων των αιολικών πάρκων συσχετίζεται αξιόλογα. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας , που επηρεάζει την αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, είναι ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς στις οποίες ρέει το φορτίο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα καλά διασυνδεμένο δίκτυο μπορεί να διαχειριστεί σχετικά εύκολα τις μεγάλες ποσότητες της αιολικής ενέργειας , που δεν έχουν προβλεφθεί σωστά. Τα απομονωμένα ή ελαφρώς διασυνδεμένα συστήματα, όπως αυτά που υπάρχουν στην Ιρλανδία, είναι ευαίσθητα στα σφάλματα της πρόβλεψης. Κατά συνέπεια, περιορίζεται το ποσό της αιολικής ενέργειας που μπορεί να ενσωματωθεί στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Το πρόγραμμα ANEMOS

2.1.Εισαγωγή

Η αβεβαιότητα που υπάρχει στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους και ένα ευρύ πεδίο μελέτης. Για το λόγο αυτό και με στόχο την αξιολόγηση των υπαρχόντων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και την ανάπτυξη νέων, που θα είναι πιο ακριβή , αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή ένωση το πρόγραμμα ANEMOS(ANEMOS-project).

Στόχος του Ευρωπαϊκού project ANEMOS είναι η ανάπτυξη βιώσιμων μοντέλων μεγάλης ακρίβειας για την καλύτερη δυνατή απόδοση στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής τόσο σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης όσο και σε διεθνές επίπεδο. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκαν εξελιγμένα μοντέλα στατιστικού , φυσικού ή και συνδυασμένου περιεχομένου. Προτεραιότητα δόθηκε στις μεθόδους αξιολόγησης της on-line αβεβαιότητας και της εκτίμησης κινδύνων. Τα επιμέρους μοντέλα αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια ενός ολοκληρωμένου λογισμικού , του ANEMOS, το οποίο εγκαταστάθηκε από ένα σύνολο χρηστών για την on-line λειτουργία και αξιολόγηση σε τοπική , περιοχική και εθνική κλίμακα. Το πρόγραμμα αναδεικνύει επίσης την αξία της πρόβλεψης του

ανέμου για την διαχείριση του ηλεκτρικού φορτίου και την ανάπτυξη των αγορών στον τομέα της αιολικής παραγωγής.

Στα πλαίσια λοιπόν της αύξησης της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και της ιδιόμορφης συμπεριφοράς του ανέμου , σύμφωνα με τους στόχους που έχει θέσει η Ε.Ε., το τετραετές πρόγραμμα ANEMOS τέθηκε σε ισχύ τον Οκτώβριο του 2002 από πρωτοπόρα κέντρα ερευνών με στόχο την διερεύνηση προχωρημένων λύσεων στην on-shore και off-shore βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη πρόβλεψη του αιολικού φορτίου. Τα προγνωστικά εργαλεία που αναπτύχθηκαν υπό την αιγίδα του προγράμματος αναμένεται να συμβάλλουν στην βελτίωση της αιολικής ισχύος σε διασυνδεδεμένα και νησιωτικά συστήματα τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας του ανέμου, όπως έλαβε χώρα στο εν λόγω πρόγραμμα, οδήγησε στην διεκπεραίωση κατάλληλων συστημάτων αποθήκευσης και συντήρησης σε παράλληλη λειτουργία με τα αιολικά πάρκα , καθώς και στην ανάπτυξη νέων στρατηγικών διαχείρισης για την εξισορρόπηση της μεγάλης μεταβλητότητας της αιολικής παραγωγής.

2.2.Στόχοι του προγράμματος ANEMOS

Στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγνωστικά εργαλεία για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, πολλά από τα οποία προέρχονται από αυτό το πρόγραμμα. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται είτε στη φυσική μοντελοποίηση(λεπτομερής αντιπροσώπευση των χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως τραχύτητα κλπ) είτε στη στατιστική μοντελοποίηση(μοντέλα μαύρο κουτί βασιζόμενα σε υπάρχοντα δεδομένα). Το πρόγραμμα ANEMOS έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τόσο στατιστικές όσο και φυσικές μέθοδοι αλλά και να εξεταστεί ο πιθανός συνδυασμός των δύο μεθόδων, με στόχο την αύξηση της αξιοπιστίας των προβλέψεων. Αυτό αποτελεί πρωταρχική απαίτηση σε περιπτώσεις μεγάλης γεωγραφικής συγκέντρωσης του αιολικού φορτίου όπως συμβαίνει στην περίπτωση των offshore αιολικών πάρκων.

Οι τεχνικοί στόχοι του προγράμματος ANEMOS συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία :

- Συλλογή των δεδομένων και αξιολόγηση των αναγκών
- Αξιολόγηση των προγνωστικών τεχνικών σε συνθήκες εκτός σύνδεσης
- Ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων
- Ανάπτυξη φυσικών μοντέλων
- Πρόβλεψη σε offshore αιολικά πάρκα
- Ανάπτυξη της πλατφόρμας ANEMOS
- Εγκατάσταση της πλατφόρμας για λειτουργία εντός σύνδεσης
- Εκτίμηση της λειτουργίας εντός σύνδεσης
- Συνολική αξιολόγηση

2.3.Επιτεύξεις του προγράμματος και προοπτικές για το μέλλον

Το πρόγραμμα ANEMOS , ως ένα προγνωστικό λογισμικό νέας γενιάς, αναπτύχθηκε με στόχο την ολοκλήρωση μιας ευρείας σειράς λειτουργικών διαδικασιών οι οποίες καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο μέρος των απαιτήσεων στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής και στην εκτίμηση της αβεβαιότητας της. Το λογισμικό του προγράμματος εγκαταστάθηκε για εντός σύνδεσης λειτουργία σε έναν μεγάλο αριθμό onshore και offshore αιολικών πάρκων και είναι δυνατόν να λειτουργεί τόσο σε αυτόνομο όσο και σε απομακρυσμένο μοτίβο.

Μετά από 3μισι χρόνια λειτουργίας του προγράμματος, διαπιστώθηκε ότι το μεγάλο μέγεθος της κοινοπραξίας του έχει αποφέρει σημαντικά οφέλη στην πρόβλεψη του αιολικού φορτίου. Το πρόγραμμα οδήγησε σε επιτυχίες που δε θα ήταν δυνατόν να επιτευχθούν αν συμμετείχαν μεμονωμένα μέλη ή μικρότερες ομάδες επιστημόνων. Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα του ANEMOS project είναι ότι επέτυχε ακριβή χαρτογράφηση της τεχνολογίας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος , γεγονός το οποίο αποδείχθηκε χρήσιμο για την ανάπτυξη κανονισμών αγοράς. Επιπλέον , έδωσε μια ξεκάθαρη εικόνα των απαιτήσεων και των προτεραιοτήτων, απόρροια του γεγονότος ότι συμμετείχε ένας μεγάλος αριθμός τελικών χρηστών με πολύ διαφορετικές προτεραιότητες αναφορικά με την πρόβλεψη. Ακόμα ,το πρόγραμμα ANEMOS συνέβαλε καταλυτικά στην δημιουργία μιας βάσης δεδομένων με πολύτιμες πληροφορίες(π.χ. μετρήσεις) σχετικά με την αξιολόγηση των αναπτυσσόμενων μοντέλων πρόβλεψης .

Τελικά, το project ANEMOS συνέβαλε σε παγκόσμιο επίπεδο στην επέκταση της τεχνολογίας της πρόβλεψης του αιολικού φορτίου. Οι συμβολές του προγράμματος συνοψίζονται στα παρακάτω :

- Ανάπτυξη της πιθανοτικής πρόβλεψης που μέχρι πρότινος δεν χρησιμοποιούνταν
- Αναβάθμιση της κλασικής αλυσίδας των μοντέλων με την ενσωμάτωση νέων καινοτομιών(συνδυασμένα μοντέλα, πολλαπλά NWPs και προγνώσεις πολλαπλού δείγματος
- Ανάπτυξη μοντέλων προσανατολισμένων στην εκτίμηση της αξίας

Καθώς όμως η τεχνολογία της αιολικής παραγωγής επεκτείνεται και τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης συνεχώς αυξάνονται, οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών διαφοροποιούνται και γίνονται όλο και πιο σύνθετες. Ακόμα και μέσα από το τρέχον πρόγραμμα, αναδύθηκαν νέες προτεραιότητες (π.χ. εκτίμηση της αβεβαιότητας, upscaling) αποκαλύπτοντας την ανάγκη για περισσότερη έρευνα. Στο άμεσο μέλλον κρίνεται αναγκαία η εύρεση τρόπων για την επίτευξη μεγαλύτερης εγγύτητας των μοντέλων πρόβλεψης με την μετεωρολογία και την περαιτέρω ενίσχυση της αξίας της πρόβλεψης. Η αξία , όπως προείπαμε, σχετίζεται με την τελειοποίηση των προβλέψεων και τον περιορισμό της αβεβαιότητας στις διαδικασίες διαχείρισης της αιολικής παραγωγής και της λήψης αποφάσεων σχετικά με αυτήν. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας εκτιμάται ότι θα συμβάλει με δύο τρόπους στην τεχνολογία της αιολικής ισχύος. Πρώτον, σε λειτουργικό επίπεδο, θα βοηθήσει στην καλύτερη διαχείριση των αιολικών πάρκων και στην αποτελεσματικότερη συμμετοχή της αιολικής παραγωγής στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Δεύτερον, πιθανόν να συμβάλει στην περαιτέρω αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών πάρκων, καθώς ακριβέστερες προβλέψεις μειώνουν το ρίσκο στην αιολική παραγωγή αυξάνοντας συνάμα την πιθανότητα δημιουργίας νέων εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βασικά μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

3.1.Γενικά

Κατά την πρώτη φάση του προγράμματος ANEMOS έλαβε χώρα η αξιολόγηση μιας σειράς προγνωστικών συστημάτων συμπεριλαμβανομένων των AWPPS(Ecole de Mines/Armines),LocalPred(CENEL,CIEMAT), Prediktor(RISOE),Previento(U.Oldenburg,EMSYS),Sipreolico(UC3M/REE) , WPPT(DTU/IMM),Prediction model of NTUA, RAL, ARIA κλπ.

Τα παραπάνω μοντέλα μπορούν να ενταχθούν σε 2 μεγάλες κατηγορίες μοντελοποίησης , όπως αυτές αναφέρθηκαν και παραπάνω. Πρόκειται για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη με τεχνικές φυσικής μοντελοποίησης και με τεχνικές στατιστικής μοντελοποίησης.

3.2.Τεχνικές φυσικής μοντελοποίησης

Στο πρόγραμμα ANEMOS δόθηκε προσοχή σε δύσκολες περιπτώσεις πρόβλεψης της αιολικής ισχύος όπως είναι η πρόβλεψη της παραγωγής των αιολικών πάρκων σε περιοχές με περίπλοκο έδαφος. Για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκαν αριθμητικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης τα οποία επιχειρούν να λύσουν

τα σφάλματα που προέρχονται από τα αριθμητικά μοντέλα καιρού. Τέτοια μοντέλα μπορεί να είναι τα μοντέλα γραμμικής ροής όπως το WAsP του Riso ή το AriaWind, μοντέλα μέσης κλίμακας[κεφ. 3.3] όπως το μοντέλο της κοινότητας του MM5 ή CFD μοντέλα[κεφ. 3.3] όπως το Fluent ή το Mercure. Σε όλα αυτά τα μοντέλα η βασική ιδέα είναι η χρήση υψηλότερης ανάλυσης τόσο στους υπολογισμούς όσο και στα δεδομένα εισόδου σε συνδυασμό με μια πιο ολοκληρωμένη φυσική περιγραφή σε σχέση με αυτή που παρέχουν τα μοντέλα NWP[κεφ. 4.1] , σε μια προσπάθεια να προσομοιωθούν τα τοπικά συστήματα ανέμων .

3.2.1. Το μοντέλο Prediktor

Ένα από τα πρώτα μοντέλα που αναπτύχθηκαν με χρήση φυσικών τεχνικών ήταν το Prediktor. Η κεντρική ιδέα ήταν η χρήση δεδομένων ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου στα ανώτερα επίπεδα της ατμόσφαιρας από ένα αριθμητικό μοντέλο καιρού[κεφ.4.1] , η εφαρμογή των τιμών σε μια τοπική περιοχή , δηλαδή ένα αιολικό πάρκο (με χρήση μεθόδων downscaling) καθώς και η παράλληλη χρήση της καμπύλης ισχύος[κεφ. 5.2.2.1] και η τροποποίηση της προς όφελος του αιολικού πάρκου. Για όλα αυτά τα βήματα αξιοποιήθηκε η Δανέζικη εκδοχή : Συγκεκριμένα, το μοντέλο HIRLAM του DMI χρησιμοποιήθηκε ως αριθμητικό μοντέλο καιρού για τα δεδομένα εισόδου , το WaSP μοντέλο για την μετατροπή του ανέμου στις τοπικές συνθήκες και το μοντέλο Riso PARK για την χαμηλότερη έξοδο σε ένα αιολικό πάρκο . Για την μετατροπή του ανέμου στο ύψος της πλήμνης χρησιμοποιήθηκε ο γεωστροφικός νόμος της τριβής και το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου. Εάν ο παρεχόμενος από το HIRLAM άνεμος αντιστοιχεί ήδη σε ύψος 10 μ , τότε το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα. Στην έξοδο του μοντέλου χρησιμοποιούνται 2 MOS(Model Output Statistics) μοντέλα για να λάβουν υπόψη τους παράγοντες που δεν έχουν μοντελοποιηθεί από τα φυσικά μοντέλα και τα γενικά σφάλματα της μεθόδου.

Το μοντέλο εφαρμόζεται ήδη στην Ισπανία, τη Δανία, την Ιρλανδία , τη Γερμανία και την Αμερική και χρησιμοποιείται επίσης για προγραμματισμό συντήρησης στο σύστημα SCADA[κεφ. 5.2.2.1] CleverFarm. Τρέχει 2 φορές την ημέρα κάνοντας προβλέψεις 36 ωρών για κάποια Α/Π στην χρησιμοποιούμενη περιοχή.

3.2.2.Το μοντέλο Previento

Αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Oldenburg και χρησιμοποιείται στη Γερμανία. Για τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού χρησιμοποιείται το Lokalmodell (LM) της Γερμανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Το Previento χρησιμοποιεί πολλά υπό-μοντέλα το πιο σημαντικό από τα οποία είναι το μοντέλο για την ατμοσφαιρική ευστάθεια σύμφωνα με τον Monnich[194]. Ο Monnich διαπίστωσε επίσης ότι τα υπό-μοντέλα για την ορογραφία και την τραχύτητα του εδάφους δεν ήταν πάντα δυνατόν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα, με αποτέλεσμα να καθίσταται απαραίτητη η χρήση ενός στατιστικού μοντέλου MOS,το οποίο προβαίνει σε στατιστική διόρθωση του λάθους πρόβλεψης συναρτήσει των καιρικών συνθηκών. Επιπλέον, το μοντέλο παρέχει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας της συγκεκριμένης προβλεπόμενης τιμής. Μεγάλη επιρροή στο σφάλμα του μοντέλου ασκούν τόσο τα αριθμητικά μοντέλα του καιρού όσο και η καμπύλη ισχύος. Για τα σφάλματα που εισάγουν τα αριθμητικά μοντέλα καιρού θα αναφερθούμε εκτενέστατα στα επόμενα κεφάλαια. Όσον αφορά στην επιρροή της καμπύλης ισχύος, συνήθως αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θεωρητική καμπύλη ισχύος που παρέχεται από τον κατασκευαστή είναι διαφορετική από αυτήν που υπολογίζεται με βάση τα πραγματικά δεδομένα. Το μοντέλο Previento παρέχει προβλέψεις για χρονικό ορίζοντα έως και 96 ώρες , με χρονικό βήμα πρόβλεψης[κεφ. 7.1] από 1 ώρα έως 15 λεπτά. Η λογική του ως προς

τη βελτίωση της πρόβλεψης της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου είναι παρόμοια με αυτή του Prediktor.

3.2.3.Το μοντέλο eWind

Το eWind είναι ένα αμερικάνικο μοντέλο που αναπτύχθηκε από την TrueWind και το οποίο χρησιμοποιεί εξελιγμένα, αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα βασισμένα στη φυσική, και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν με γνώμονα την ακριβή πρόβλεψη. Ως αριθμητικό μοντέλο καιρού χρησιμοποιείται ένα μοντέλο μέσης κλίμακας το οποίο λαμβάνει οριακές συνθήκες από ένα περιφερειακό [κεφ. 4.3.2] μοντέλο καιρού. Με αυτό τον τρόπο , είναι δυνατή η αντιπροσώπευση περισσότερων φυσικών διαδικασιών και η πρόβλεψη μπορεί να μεταφερθεί καλύτερα σε μια τοπική περιοχή. Το σύστημα του eWind προβλέπει την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου και στη συνέχεια μετατρέπει τις προβλέψεις σε παραγόμενη ισχύ. Το σύστημα έχει δυνατότητα παγκόσμιας πρόβλεψης, σε αντίθεση με τα περισσότερα μοντέλα. Η αρχική διαμόρφωση του eWind χρησιμοποιεί ένα μοντέλο μέσης κλίμακας (MASS) για να κάνει προβλέψεις ,ενώ χρησιμοποιούνται και επιπρόσθετα μοντέλα μέσης κλίμακας όπως το ForeWind, το MM5 , το WRF, το COAMPS , το work-station ETA και το OMEGA . Για τον περιορισμό του συστηματικού σφάλματος εξόδου χρησιμοποιούνται προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, όπως η πολυμεταβλητή γραμμική αναδρομή αλλά και τα νευρωνικά δίκτυα που βασίζονται στο κριτήριο Μπαεσιανής πληροφορίας. Ο ακριβής ρόλος των στατιστικών μοντέλων συνίσταται στην εναρμόνιση της εξόδου των βασισμένων στη φυσική αριθμητικών μοντέλου καιρού, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν σε κλίμακα υπό-δικτύου και σε άλλες διαδικασίες που δε μπορούν να επιλυθούν διαφορετικά ή να προσομοιωθούν επαρκώς σε δίκτυα που χρησιμοποιούν φυσικά μοντέλα.

Το eWind έχει να επιδείξει 50% βελτίωση στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα [κεφ. 5.3.3.1] σε σχέση με το persistence[κεφ. 5.3.3.3] για προγνωστικό ορίζοντα 12-36 ωρών όπως προέκυψε από τα δεδομένα 5 αιολικών πύργων στην Πενσυλβάνια. Το μοντέλο χρησιμοποιείται επίσης από την SecondWind για ενσωμάτωση μέσα στο σύστημα SCADA. Η τωρινή έκδοση του eWind χρησιμοποιεί τα μοντέλα ARPS, MASS και WRF, τροφοδοτούμενα από τα παγκόσμια μοντέλα [κεφ. 4.3.1] GFS, GEM και ECMWF με αποτέλεσμα την διαμόρφωση ενός συστήματος ensemble από 9 διαφορετικά τρεξίματα μοντέλων. Μετά την εφαρμογή του συστήματος αυτού στην πρόβλεψη αιολικής ισχύος σε 6 αιολικά πάρκα στην Ευρώπη, αποδείχθηκε ότι η πρόβλεψη πολλαπλού δείγματος έχει καλύτερη απόδοση από την εφαρμογή της μεθόδου MOS σε ένα μοντέλο NWP, επιτυγχάνοντας βελτίωση που αγγίζει το 20-30% κατά τη διάρκεια των τριών πρώτων ημερών της πρόβλεψης.

3.2.4 Το μοντέλο HIRPOM

Στο μοντέλο αυτό , το οποίο αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου από το HIRLAM, η μονάδα πρόβλεψης της ισχύος είναι ενσωματωμένη στο ίδιο το αριθμητικό σύστημα πρόβλεψης καιρού. Οι εφευρέτες του μοντέλου εφήρμοσαν αυτή τη διαμόρφωση ύστερα από μελέτες που έδειξαν ότι το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος οφείλεται κατά πρώτο λόγο στα αριθμητικά μοντέλα καιρού. Κάνοντας την πρόβλεψη μέσα στο ίδιο το μοντέλο , απαιτείται μικρότερο χρονικό βήμα. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι η χρήση συνολικών προβλέψεων δίνει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας τους.

3.3.Ειδικά βραχυπρόθεσμα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος με χρήση τεχνικών φυσικής μοντελοποίησης

3.3.1.Γενικά

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη του αιολικού φορτίου είναι αδιανόητη για χρονικό ορίζοντα λίγο μεγαλύτερο από μερικές ώρες χωρίς την είσοδο από τα μετεωρολογικά μοντέλα. Πέρα όμως από τους κλασικούς λόγους χρήσης των αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού(παροχή εισόδου στο σύστημα πρόβλεψης – ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου σε διάφορες χρονικές στιγμές στην περιοχή ενδιαφέροντος) , χρειάζεται να εφαρμοστούν και μοντέλα τα οποία θα συμβάλουν στην ομαλοποίηση μεγάλων εδαφικών ανωμαλιών. Τα μοντέλα που περιγράφουν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την ατμοσφαιρική κατάσταση σε κάθε χρονική στιγμή ονομάζονται CFD μοντέλα(Computational Fluid Dynamics Models) ή αλλιώς μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και λύνουν τις περίπλοκες εξισώσεις των Navier-Stoke που διέπουν την ατμοσφαιρική ροή. Επειδή τα CFD μοντέλα χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλο βαθμό ακρίβειας, η αποτελεσματικότητα τους εξαρτάται καταλυτικά από την ακρίβεια στην περιγραφή του εδάφους, η οποία θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη σε πολύ χειρότερη ανάλυση από το υπολογιστικό περιβάλλον του CFD. Αυτό σημαίνει ότι η διαθέσιμη από τα υπολογιστικά πακέτα ενέργεια είναι κατάλληλη μόνο για μια περιορισμένη περιοχή ή ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα , για παράδειγμα ένα μόνο αιολικό πάρκο για μερικές ώρες. Επίσης , σημαίνει ότι οι οριακές συνθήκες των μοντέλων θα πρέπει να προέρχονται από κάποιο εξωτερικό σύστημα (π.χ. ένα μεγαλύτερης κλίμακας μοντέλο).

Από την άλλη μεριά, τα μεγάλης κλίμακας μετεωρολογικά μοντέλα επιχειρούν να δώσουν μια συνεπή εικόνα της ατμόσφαιρας για τις επόμενες 36-168 ώρες. Επειδή είναι σημαντικό να καλύπτεται η εξέλιξη του καιρού για την περιοχή ενδιαφέροντος και επειδή αυτό απαιτεί την κάλυψη και μακρινών περιοχών , αφού ο καιρός είναι ένα γρήγορα μεταβαλλόμενο σύστημα στο χώρο και στο χρόνο, τα μακροπρόθεσμα μοντέλα σχεδιάζονται ώστε να καλύπτουν όλη την υδρόγειο. Αυτό φυσικά απαιτεί ένα σύνολο περικοπών , μεταξύ των οποίων είναι το πολύ μεγάλο πλέγμα σε σχέση με αυτό των CFD μοντέλων(τυπικές τιμές οριζόντιας ανάλυσης είναι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα) καθώς και η χρήση περιορισμών στην φυσική μοντελοποίηση. Ένας από τους πιο γνωστούς περιορισμούς των παγκόσμιων μοντέλων είναι η εφαρμογή της υδροστατικής προσέγγισης, γεγονός που οδηγεί σε απλούστερη φυσική και συνάμα σε μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, όσες διαδικασίες λαμβάνουν χώρα σε κλίμακα μικρότερη από αυτή που καλύπτει το πλέγμα του μοντέλου πρέπει να παραμετροποιηθούν αντί να υπολογιστούν κανονικά.

Μια πολύ αποτελεσματική ιδέα για να καλύπτεται η εξέλιξη του καιρού από μακρινές περιοχές και παράλληλα να υπάρχει καλή ανάλυση στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι η χρησιμοποίηση φωλιασμένων μοντέλων. Το φωλιασμένο μοντέλο εμπεριέχεται με υψηλότερη ανάλυση μέσα στο κύριο μοντέλο και συνήθως έχει σχεδιαστεί με διαφορετικές παραμετροποιήσεις. Τα περισσότερα επιχειρησιακά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού είναι σχεδιασμένα με αυτό τον τρόπο. Παρόλα αυτά , ακόμα και τα τοπικά φωλιασμένα μοντέλα υψηλότερης ανάλυσης δεν επαρκούν πολλές φορές στο να περιγράψουν κινήσεις μικρής κλίμακας σε περίπλοκο έδαφος (π.χ. μικρά βουνά, κοιλάδες ή ακτογραμμές) . Για να κατέβουν τα μοντέλα σε αυτές τις κλίμακες χρησιμοποιούνται μοντέλα μέσης ή μικρής κλίμακας. Τα τελευταία δεν αξιοποιούν όλες τις ιδιότητες των CFD μοντέλων , αλλά κάποιες φορές είναι σχεδιασμένα για να δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με τις ταχύτητες του ανέμου με σχετικά μικρή υπολογιστική ισχύ. Τα περισσότερα μοντέλα μέσης κλίμακας διέπονται από μη υδροστατική φυσική.

3.3.2.Μοντέλα μέσης κλίμακας(Meso-scale models)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω , τα μοντέλα μέσης κλίμακας χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις αδυναμίες των NWP μοντέλων αναφορικά με την ανάλυση τους. Η μέση κλίμακα στη Μετεωρολογία αφορά τροποσφαιρικά φαινόμενα με οριζόντιες διαστάσεις μεταξύ μερικών και μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Είναι μικρότερη από τη συνοπτική κλίμακα που αφορά μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα και περιγράφει τα μεγάλα συστήματα πίεσης και μεγαλύτερη από την μίκρο-κλίμακα που κατεβαίνει σε επίπεδα μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων. Τα μέσης κλίμακας μοντέλα σχεδιάζονται ώστε να είναι φωλιασμένα μέσα σε ένα κύριο μοντέλο και να παίρνουν οριακές ή/και αρχικές συνθήκες από αυτό. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το κύριο μοντέλο πρέπει να είναι ίδιο με το φωλιασμένο, για λόγους συμβατότητας των φυσικών υπολογισμών που εμπλέκονται κατά τη λειτουργία τους. Επί του παρόντος, η μείωση της ανάλυσης των NWP μοντέλων , δηλαδή η μείωση των αποστάσεων του πλέγματος πάνω στο οποίο δίνει προγνωστικές τιμές το μοντέλο, σε μερικά μόνο χιλιόμετρα , προσδίδει στα παγκόσμια μοντέλα χαρακτηριστικά μέσης κλίμακας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται σύγχυση μεταξύ των NWP και των meso-scale μοντέλων.

3.3.3.Μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD)

Μιας και τα μοντέλα μέσης κλίμακας τείνουν να αντικατασταθούν από τα ίδια τα αριθμητικά μοντέλα καιρού , είναι χρησιμότερο να προχωρήσουμε σε μια εκτενέστερη ανάλυση πάνω στα CFD μοντέλα, τα οποία καλύπτουν φαινόμενα μικρής κλίμακας. Τα CFD μοντέλα είναι τα υπολογιστικά ακριβότερα από όλα τα αριθμητικά μοντέλα της ανεμολογικής ροής, βασισμένα στις εξισώσεις που χαρακτηρίζουν την ατμοσφαιρική ροή και χωρίς να τίθενται πολλοί περιορισμοί κατά τους υπολογισμούς. Ως κατάλληλο εργαλείο για την μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής ροής πάνω από πολύπλοκα εδάφη λαμβάνονται οι μη γραμμικές εξισώσεις των Navier-Stoke , οι οποίες προέρχονται από τη θεωρία της Ρευστομηχανικής.

Αμέσως παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες εξισώσεις ροής, η προσομοίωση του μοντέλου τύρβης και οι οριακές συνθήκες:

Όλες οι κινήσεις ρευστών περιγράφονται από δυναμικές εξισώσεις, τις λεγόμενες εξισώσεις Navier-Stoke . Σε αυτή τη μελέτη , ο άνεμος θεωρείται ως ένα τρισδιάστατο ασυμπίεστο και σταθερό ρευστό. Παραλείπεται η δύναμη Coriolis που σχετίζεται με την περιστροφή της γης ενώ δε λαμβάνονται υπόψιν και τα φαινόμενα θερμότητας. Η πυκνότητα θεωρείται σταθερή και ίση με 1.18 kg/m^3 και η αεροδυναμική viscosity είναι 1,7894 e^(-5) (N.s/m^2).

Επειδή η ροή κοντά στο έδαφος είναι τυρβώδης, οι εξισώσεις κανονικοποιούνται αποσυνθέτοντας την στιγμιαία ταχύτητα σε μια μέση τιμή και μια διακυμαινόμενη τιμή . Την ίδια επεξεργασία υφίσταται και ο παράγων πίεσης όπως φαίνεται στις παρακάτω δύο εξισώσεις:

$$U_i = \overline{u}_i + u_i'$$

$$P_i = \overline{p}_i + p_i' \qquad (5.1)$$

Οι εξισώσεις Navier-Stoke γράφονται μετά την επεξεργασία:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho \bar{g} \quad (5.2)$$

Ένα σημαντικό σημείο που χρήζει προσοχής είναι η εισαγωγή των οριακών συνθηκών στις εξισώσεις. Οι οριακές συνθήκες πρέπει να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του Οριακού Ατμοσφαιρικού Στρώματος. Σε ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση, η απαιτούμενη δομή των μεταβλητών είναι σχετικά απλή δεδομένου του γεγονότος ότι η συνολική τριβή μπορεί να θεωρηθεί σταθερή καθ'ύψος. Το χρησιμοποιούμενο προφίλ της ταχύτητας είναι λογαριθμικό , σύμφωνα με την εξίσωση :

u(z)=– —) (5.3)

3.3.3.1 Το λογισμικό Fluent

Στο ANEMOS project οι μελέτες διεξήχθησαν με τη βοήθεια ενός εμπορικού λογισμικού , του Fluent. Τα CFD μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για την κατανόηση, τη μοντελοποίηση και τη βελτίωση της εκτίμησης των ανεμολογικών χαρακτηριστικών σε ένα πραγματικά περίπλοκο έδαφος. Για την μοντελοποίηση της τραχύτητας του εδάφους εφαρμόστηκε μια κλίμακα μήκους καλούμενη «μήκος τραχύτητας» (z_o), η οποία είναι χαρακτηριστική του τύπου βλάστησης και της κατανομής της. Οι παράμετροι προς τροποποίηση είναι το ύψος τραχύτητας(Ks) και η διασπορά της τραχύτητας (Cks). Φαίνεται πως είναι αδύνατον να βρεθεί μια αλγεβρική σχέση μεταξύ των τριών αυτών μεγεθών και έτσι είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί κάποια επαναληπτική μέθοδος για το ταίριασμα μεταξύ των σταθερών ροής (ύψος και διασπορά) και του ύψους τραχύτητας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το κανάλι υπολογιστικού ανέμου . Θεωρήθηκε ότι το προφίλ της ταχύτητας εντός του καναλιού είναι σταθερό και παραλείφθηκε η μεταφορά θερμότητας. Έτσι όλη η παραγόμενη κινητική ενέργεια προέκυπτε από μηχανικές αιτίες , όπως η τραχύτητα και η παραμόρφωση. Στο συγκεκριμένο εικονικό κανάλι , η επιφάνεια θεωρείται τελείως επίπεδη , ώστε η ροή να μην αντιμετωπίζει τον παράγοντα της παραμόρφωσης. Ως αποτέλεσμα, η τραχύτητα είναι το μόνο αίτιο που μπορεί να τροποποιήσει τη ροή του ανέμου.

Προσομοιώσεις των τεχνικών μοντελοποίησης έλαβαν χώρα τροποποιώντας τη διεύθυνση του ανέμου. Στην εν λόγω έρευνα έλαβαν χώρα 72 προσομοιώσεις (μία για κάθε 5°), τροποποιώντας τις αρχικές συνθήκες . Για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου έλαβαν χώρα συγκρίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πειραματικής αιολικής ισχύος. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν μεταβλητές συσχέτισης στα πειραματικά δεδομένα που μετρήθηκαν στο σημείο εισόδου, ώστε να βρεθεί το αποκρινόμενο σετ δεδομένων στο σημείο εξόδου. Στη συνέχεια, η προβλεπόμενη μέση ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου συγκρίθηκαν με τις πειραματικά μετρούμενες .

Για την σύγκριση των προβλεπόμενων με τις πειραματικές τιμές αξιοποιήθηκαν οι παρακάτω μεταβλητές:

- Οριζόντια ταχύτητα ανέμου
- Οριζόντιες συνιστώσες της ταχύτητας (U και V) για τον υπολογισμό της διεύθυνσης του ανέμου
- Κινητική ενέργεια της τυρβώδους ροής

Οι ταχύτητες ανέμου των πειραματικών μετρήσεων δεν περιλαμβάνουν την κατακόρυφη συνιστώσα, η οποία πρέπει να απορρίπτεται και από τον αριθμητικό υπολογισμό.

Οι παραπάνω τιμές των μεταβλητών αξιοποιήθηκαν για κάθε συγκεκριμένο ύψος και για όλους τους τομείς που έλαβαν μέρος στην προσομοίωση. Για κάθε ζευγάρι εισόδου-εξόδου σε συγκεκριμένο ύψος , ο κάθε τομέας διεύθυνσης χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη συσχέτιση. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για να εντοπιστούν οι σχέσεις μεταξύ ταχυτήτων και διευθύνσεων ανέμου ενός ζεύγους σημείων. Στα πειραματικά δεδομένα που μετρούνται για λογαριασμό του συνόλου εισόδου εφαρμόζονται συντελεστές συσχέτισης ώστε να να εντοπιστεί το αντστοίχο σετ δεδομένων στο σύνολο εξόδου. Στη συνέχεια , οι προβλεπόμενες μέσες τιμές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου συγκρίνονται με τις πειραματικά μετρούμενες με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.

Το σύνολο δεδομένων που προκύπτει από την πρόβλεψη χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η κατανομή Weibull [βλέπε κεφάλαιο 5.2.1] της πυκνότητας ισχύος . Στο ίδιο σημείο υπολογίζεται και η κατανομή Weibull των πειραματικών δεδομένων και οι δύο κατανομές πυκνότητας συγκρίνονται παράγοντας ένα συνολικό σφάλμα. Το σφάλμα αυτό είναι αντιπροσωπευτικό της απόδοσης του μοντέλου.

3.3.3.2. Το λογισμικό MERCURE

Άλλο χρησιμοποιούμενο λογισμικό ήταν το MERCURE , παραγόμενο από τις τεχνολογίες ARIA. Το MERCURE είναι μια εκδοχή του ESTET μοντέλου, το οποίο αναπτύχθηκε συγκεκριμένα για τη μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής ροής σε τοπική κλίμακα (<100km) και τη διασπορά των ρύπων με την παρουσία ιδιαίτερης τοπογραφίας (όπως λόφοι , κοιλάδες), εμπόδια , μεγάλα κτίρια και μεγάλα θερμικά δίπολα(ξηρά – θάλασσα, βουνό – πεδιάδα) κλπ. Ο κώδικας ESTET λύνει τις πλήρεις εξισώσεις Ρευστομηχανικής των Navier- Stoke με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων , σε δομημένο ορθογώνιο πλέγμα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του κώδικα είναι η ικανότητα του να αντιμετωπίζει σχετικά περίπλοκες 3-διάστατες γεωμετρίες με προχωρημένες τεχνικές φυσικής μοντελοποίησης .

Το MERCURE , όντας παραλλαγή του μοντέλου ESTET, περιλαμβάνει 3-διάστατες πολύπλοκες γεωμετρίες καθώς και μοντελοποίηση της τύρβης. Λύνει τις εξισώσεις των Navier-Stoke χρησιμοποιώντας τη βηματική μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένου όγκου, σε τρισδιάστατους τομείς , σε διαλλειμματικό ή συνεχές μοτίβο και υπό καθεστώς τόσο μη τυρβώδους όσο και τυρβώδους ροής. Επιπλέον, το MERCURE εφαρμόζεται σε πλέγματα τα οποία χρησιμοποιούν καρτεσιανές ή καμπυλόγραμμες συντεταγμένες που 'ακολουθούν' το έδαφος.

Το MERCURE χρησιμοποιήθηκε αρχικά για λογαριασμό της UNIX OS. Ο κώδικας αναπτύχθηκε με την γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77. Πλέον είναι διαθέσιμο και μέσω του λογισμικού Linux. Η διάρκεια του κάθε τρεξίματος του μοντέλου εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς. Όταν εφαρμόζεται για μετεωρολογικές μελέτες ή για τη διασπορά των ρύπων, χρησιμοποιείται ένας αριθμός κόμβων κοντά στους 400.000 , ωστόσο , γενικά,

δεν υπάρχουν περιορισμοί και κάποιες προσομοιώσεις έχουν χρησιμοποιήσει πάνω από 1 εκατομμύριο κόμβους.

3.4. Τεχνικές στατιστικής μοντελοποίησης

Αρχικά , στόχος της στατιστικής μοντελοποίησης ήταν η ανάπτυξη τεχνικών για την μετά-επεξεργασία των NWP με στόχο τη μείωση των συστηματικών σφαλμάτων. Διερευνήθηκε ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων για την πρόβλεψη της ισχύος ή τοπικών μετεωρολογικών μεταβλητών , μεταξύ των οποίων είναι τα νευρωνικά δίκτυα [κεφ. 6], τα δίκτυα ασαφούς λογικής , τα φίλτρα KALMAN, οι μηχανές βοηθητικών διανυσμάτων (support vector machines), οι συναρτήσεις ακτινωτής βάσης[κεφ. 6.2.2] καθώς και συνδυασμένες μέθοδοι πρόβλεψης. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τον συνδυασμό ποικίλων τύπων δεδομένων εισόδου όπως η διεύθυνση και το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου σε γειτονικά πάρκα, οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού , οι τιμές ισχύος των αιολικών πάρκων κλπ.

Σημαντικό ζήτημα συνιστά η μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος του κάθε αιολικού πάρκου για την οποία αξιολογήθηκαν τεχνικές που περιελάμβαναν την χρήση νευρωνικών δικτύων και ασαφούς λογικής. Στόχος αυτών των τεχνικών αποτελεί η περιγραφή της σχέσης μεταξύ της τοπικής παραγωγής ισχύος και των τοπικών μετεωρολογικών μετρήσεων ή προβλέψεων. Οι μελέτες έχουν δείξει ότι μία από τις βασικές πηγές σφάλματος στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σχετίζεται άμεσα με την έλλειψη διαθεσιμότητας των δεδομένων των καμπυλών ισχύος. Ωστόσο , η χρήση πιστοποιημένων καμπυλών ισχύος δεν εγγυάται ότι η σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και αιολικής ισχύος μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια.

Όσον αφορά στο downscaling[κεφ. 1.1], οι στατιστικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στόχευαν στην περιγραφή της εξάρτησης μεταξύ των μετεωρολογικών μοντέλων σε παγκόσμια κλίμακα και των τοπικών παρατηρήσεων . Οι αναπτυσσόμενες στατιστικές μέθοδοι είναι αντίστοιχες με εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στην φυσική μοντελοποίηση για την προσομοίωση των εδαφικών ανωμαλιών.

Επιπλέον, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη μεθόδων για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε περιοχικό ή εθνικό επίπεδο από δείγμα αιολικών πάρκων με διαθέσιμες προβλέψεις (upscaling).

3.4.1. Το μοντέλο WPPT (Wind Power Prediction Tool)

Αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Πληροφορικής και Μαθηματικής Μοντελοποίησης του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου της Δανίας. Το WPPT τρέχει επιχειρησιακά από το 1994 στη δυτική πλευρά της Δανίας και από το 1999 στην ανατολική. Το WPPT χρησιμοποιεί στατιστικά μοντέλα για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος σε αιολικά πάρκα ή ολόκληρες περιοχές αιολικών πάρκων. Επιπλέον , συνδυάζει παραδοσιακά γραμμικά μοντέλα με ένα συγκεκριμένο σετ από μη γραμμικά μοντέλα – τα γνωστά και ως υπό συνθήκη παραμετρικά μοντέλα . Ως ένδειξη της ευελιξίας του μοντέλου λειτουργεί το γεγονός ότι μπορεί να προβλέψει την παραγωγή σε μεγάλες εκτάσεις αξιοποιώντας έναν συνδυασμό εντός σύνδεσης μετρήσεων της παραγωγής ισχύος σε επιλεγμένα αιολικά πάρκα, μετρήσεων ισχύος για όλες τις ανεμογεννήτριες της περιοχής ενδιαφέροντος και αριθμητικών προβλέψεων καιρού για την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου.

Μια αρκετά σημαντική ιδιότητα του WPPT είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιεί μια μέθοδο εκτίμησης με κυρίαρχο στοιχείο την χρονική προσαρμοστικότητα. Η χρονική προσαρμοστικότητα καθίσταται απαραίτητη , διότι όλο το σύστημα – τόσο τα αιολικά πάρκα όσο και το αριθμητικό μοντέλο καιρού – υπόκεινται σε αλλαγές με την πάροδο του χρόνου. Οι αλλαγές αυτές σχετίζονται με την παλαιότητα των ανεμογεννητριών, τις μεταβολές της βλάστησης , τις μεταβολές στα αριθμητικά μοντέλα καιρού που επιβάλλονται από τις εκάστοτε μετεωρολογικές υπηρεσίες και τέλος τις μεταβολές στο πλήθος των ανεμογεννητριών μέσα σε ένα αιολικό πάρκο ή μια μεγαλύτερη περιοχή.

Οι προβλέψεις του μοντέλου παράγονται με δύο τρόπους :

1. Χρησιμοποιώντας τις on-line μετρήσεις της αιολικής παραγωγής και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σαν είσοδο για κάθε αιολικό πάρκο αναφοράς και στη συνέχεια εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο αναβάθμισης για την πρόγνωση της παραγωγής σε όλη την περιοχή ή
2. Χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που συνδυάζει offline μετρήσεις της αιολικής παραγωγής μιας υπό-περιοχής με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οι προβλέψεις των επιμέρους υπό-περιοχών αθροίζονται για να παράγουν μια πρόβλεψη για όλη την περιοχή .

Η τελική πρόβλεψη για την περιοχή ενδιαφέροντος υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των δύο παραπάνω τρόπων πρόβλεψης. Οι προβλέψεις καλύπτουν έναν χρονικό ορίζοντα που αντιστοιχεί στον προγνωστικό ορίζοντα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού . Τυπικά αυτός ο ορίζοντας είναι από 1 έως 48 ώρες μπροστά στο χρόνο. Η χρονική ανάλυση , δηλαδή το χρονικό βήμα της πρόβλεψης επιλέγεται ελεύθερα , ωστόσο για πιο μακροπρόθεσμους προγνωστικούς ορίζοντες προτιμάται να χρησιμοποιηθεί το ίδιο χρονικό βήμα με αυτό με το οποίο παρέχονται και οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

3.4.2. Το σύστημα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής ARMINES

Οι ARMINES και RAL ασχολούνται με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος από το 1993. Αρχικά αναπτύχθηκαν μοντέλα για τις επόμενες 6-10 ώρες βασισμένα σε αναλύσεις χρονοσειρών. Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος εξετάστηκαν διάφορες προσεγγίσεις όπως νευρωνικά δίκτυα διαφορετικών τύπων(οπισθοδρομικής διάδοσης, RHONN κλπ) , ασαφή νευρωνικά δίκτυα , κυματικά δίκτυα κλπ. Τα μοντέλα που στηρίχθηκαν στα ασαφή νευρωνικά δίκτυα αποδείχθηκε ότι είχαν καλύτερη απόδοση από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν με τις άλλες προσεγγίσεις.

Στη συνέχεια, στα πλαίσια του προγράμματος CARE αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένα μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης για Α/Π εγκατεστημένα στην Κρήτη. Στο πρόγραμμα MORECARE η ARMINES ανέπτυξε μοντέλα για την πρόβλεψη της ισχύος ενός Α/Π για τις επόμενες 48-72 ώρες βασιζόμενη τόσο σε on-line δεδομένα SCADA όσο και σε αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Στην είσοδο του προγνωστικού συστήματος εφαρμόστηκαν διάφοροι τύποι μετεωρολογικών προβλέψεων (HIRLAM, SKIRON,κλπ).

Το σύστημα προβλέψεων αιολικής ισχύος του ARMINES έχει ενσωματώσει τα εξής είδη μοντέλων :

- Βραχυπρόθεσμα μοντέλα βασισμένα σε στατιστικές χρονοσειρές , ικανά να προβλέπουν αποτελεσματικά την αιολική παραγωγή για χρονικούς ορίζοντες μεγαλύτερους των 10 ωρών μπροστά.

- Μακροπρόθεσμα μοντέλα βασισμένα σε ασαφή νευρωνικά δίκτυα με δυνατότητα πρόβλεψης της ισχύος ενός Α/Π για 72 ώρες και πάνω μπροστά στο χρόνο. Αυτά τα μοντέλα δέχονται ως είσοδο εντός σύνδεσης δεδομένα SCADA και αριθμητικές προβλέψεις καιρού.
- Συνδυασμένες προβλέψεις οι οποίες παράγονται από ευέλικτη στάθμιση βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προβλέψεων για βέλτιστη απόδοση σε ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης.

Την τρέχουσα περίοδο, το σύστημα MORECARE αξιοποιείται από την PPC στην Κρήτη και παρέχει προβλέψεις για όλα τα Α/Π για προγνωστικό ορίζοντα 48 ωρών. Οι προβλέψεις στηρίζονται στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που παρέχονται από το μοντέλο SKIRON[βλέπε κεφ. 3.4]. Τα εντός σύνδεσης δεδομένα εισόδου παρέχονται από το σύστημα SCADA του νησιού. Το σύστημα MORECARE εφαρμόζεται επίσης στην νήσο Μαδέϊρα παρέχοντας προβλέψεις της αιολικής παραγωγής για 8 ώρες μπροστά . Μια εφαρμογή του συστήματος αναπτύχθηκε και στην Ιρλανδία , δίνοντας μέσο απόλυτο σφάλμα[κεφ. 6.3.3.1] της τάξεως του 10% της εγκατεστημένης ισχύος. Κατά την εφαρμογή του προγράμματος στην Ιρλανδία διαπιστώθηκε επίσης ότι η χρήση μιας καμπύλης ισχύος εξαγόμενης από τα μετρούμενα από το HIRLAM δεδομένα ανέμου και ισχύος βελτίωνε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα[κεφ. 6.3.3.1] κατά περίπου 20% σε σχέση με τη χρήση της καμπύλης ισχύος του κατασκευαστή.

Γενικά, το σύστημα AWPPS υιοθετήθηκε για περισσότερα από 35 Α/Π στην Ευρώπη για διαφορετικούς τύπους εδάφους. Το μέσο σφάλμα για την πρόβλεψη μεμονωμένων Α/Π κυμαίνεται μεταξύ 2-5 % της εγκατεστημένης ισχύος για προβλέψεις μίας ώρας και μεταξύ 10-15% για πρόβλεψη 48 ωρών. Το μέσο σφάλμα για εθνική πρόβλεψη είναι 8-10% για 24 ώρες μπροστά.

3.4.3.Το μοντέλο SIPREOLICO

Πρόκειται για ένα μοντέλο πρόβλεψης του αιολικού φορτίου βασισμένο σε στατιστικές μεθόδους, το οποίο αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Carlos III(Μαδρίτη , Ισπανία) και τον διαχειριστή δικτύου της Ισπανίας, REE. Οι παρεχόμενες προβλέψεις προκύπτουν αξιοποιώντας μετεωρολογικές προβλέψεις και εντός σύνδεσης μετρήσεις ισχύος ως δεδομένα εισόδου σε αλγορίθμους ανάλυσης χρονοσειρών. Οι μετεωρολογικές προβλέψεις δίνονται από το Ισπανικό HIRLAM και τα δεδομένα ισχύος από το σύστημα SCADA. Υπάρχουν 9 διαφορετικά μοντέλα , η λειτουργία των οποίων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων εισόδου. Τα δεδομένα εισόδου μπορεί να αποτελούνται μόνο από μια δεδομένη καμπύλη ισχύος και τις μετεωρολογικές προβλέψεις(βασικά δεδομένα), από τα βασικά δεδομένα μαζί με την πραγματική καμπύλη ισχύος ή από τα βασικά δεδομένα μαζί με τις online μετρήσεις της παραγόμενης ενέργειας.

Η διαθεσιμότητα μόνο βασικών δεδομένων οδηγεί σε προβλέψεις μόνο της ταχύτητας του ανέμου με βάση την δεδομένη καμπύλη ισχύος. Εάν είναι διαθέσιμα και τα πραγματικά δεδομένα αιολικής ισχύος, τότε ενσωματώνονται τα ιστορικά δεδομένα του εισερχόμενου ανέμου(ταχύτητα και διεύθυνση) και της παραγόμενης ισχύος και μπορεί να υπολογιστεί μια πραγματική καμπύλη ισχύος με αποτέλεσμα ακριβέστερες προβλέψεις. Με την επιπρόσθετη διαθεσιμότητα on-line μετρήσεων εκτελείται μια στατιστική ανάλυση χρονοσειρών, η οποία είναι και η πιο ακριβής μέθοδος .

Έπειτα από τη χρήση μεθόδων γραμμικής παλινδρόμησης προέκυψε ότι το τετράγωνο του συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης(R^2) για όλη την Ισπανία ήταν λίγο μεγαλύτερο από 0.6 για προγνωστικό ορίζοντα 36 ωρών . Ο λόγος για την μέτρια αυτή τιμή συσχέτισης είναι η ανεπαρκής ανάλυση του ισπανικού HIRLAM για την κάλυψη της τοπικής ροής σε συνδυασμό με το περίπλοκο έδαφος. Διαπιστώθηκε επίσης ότι το μοντέλο λειτουργούσε καλύτερα με μετρούμενα δεδομένα

ταχύτητας ανέμου παρά με προβλεπόμενα, αποδίδωντας τετραγωνικό συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης μεγαλύτερο από 0.9.

3.4.4. Το μοντέλο AWPPT

Πρόκειται για δημιούργημα του ινστιτούτου ISET σε συνεργασία με την E.ON Netz.Τα αρχικά σημαίνουν "Advanced Wind Power Prediction Tool",δηλαδή εργαλείο προχωρημένων τεχνικών πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.Το μοντέλο αυτό παρέχει βραχυπρόθεσμες προβλέψεις αιολικής ισχύος χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το DWD της Γερμανικής υπηρεσίας καιρού καθώς και νευρωνικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, παρέχει την τρέχουσα αιολική παραγωγή καθώς και την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της από μία μέχρι 72 ώρες μπροστά. Η επιτυχία του AWPPT βασίζεται σε τέσσερις προσεγγίσεις:

- Ακριβής αριθμητική πρόβλεψη του καιρού από την Γερμανική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Παροχή των μετεωρολογικών δεδομένων εισόδου από το LokalModell του DWD
- Μετατροπή των προβλεπόμενων δεδομένων ανέμου από τη μεγάλη κλίμακα στην τοποθεσία του Α/Π με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου μέσης κλίμακας KLIMM
- Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος του Α/Π με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων
- Αναβάθμιση της προβλεπόμενης ισχύος στην συνολική ισχύ με την οποία τροφοδοτείται το δίκτυο με τη συμβολή on-line μοντέλου

Το LokalModell τρέχει 2 φορές την ημέρα με οριζόντια ανάλυση 7km , παρέχοντας προβλέψεις για 48 και πλέον ώρες μπροστά. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο υπολογίζει την καμπύλη ισχύος για κάθε περιοχή. Τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται με μετρούμενα στοιχεία της ταχύτητας του ανέμου και της αιολικής ισχύος από το παρελθόν, έτσι ώστε να γνωρίζουν την ιδανική σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και ισχύος. Αντίθετα με κοινούς αλγορίθμους υπολογισμούς , τα NN έχουν την ιδιότητα να μαθαίνουν από την εμπειρία και την ικανότητα να παράγουν αποτελέσματα ακόμα και με ανεπαρκή δεδομένα εισόδου. Έτσι , τα εκπαιδευόμενα δίκτυα υπολογίζουν την προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ αντιπροσωπευτικών Α/Π. Η προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύς εφαρμόζεται στη συνέχεια σαν είσοδος στον αλγόριθμο μετατροπής του online μοντέλου, το οποίο προβλέπει την παραγόμενη ισχύ σε μεγαλύτερες εκτάσεις γνωρίζοντας μόνο έναν περιορισμένο αριθμό τοποθεσιών στις οποίες η ταχύτητα του ανέμου έχει ήδη προβλεφθεί. Για την συνολική περιοχή του E.ON οι μέσες τιμές του τετραγωνικού σφάλματος για προγνωστικό ορίζοντα 1 , 3 , 4 και 7 ωρών υπολογίστηκαν στο 2.5% , 5.2% , 6% και 7.5% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, αντίστοιχα. Η συχνότερη αιτία σφαλμάτων πρόβλεψης εντοπίστηκε πως είναι οι σημαντικά απότομες αλλαγές των καιρικών συνθηκών , σφάλματα τα οποία δε μπορούν να διορθωθούν όταν τα αντίστοιχα μοντέλα πρόβλεψης(όπως αυτό) βασίζονται μόνο σε καταγεγραμμένες προβλέψεις ανέμου.

3.4.5. Τα μοντέλα LocalPred και RegioPred

Πρόκειται γα δύο εργαλεία πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε περίπλοκα εδάφη , που αναπτύχθηκαν από τον Marti Perez et al. Περιελάμβαναν προσαρμοστική βελτιστοποίηση της εισόδου των αριθμητικών προβλέψεων καιρού βασισμένη στην ανάλυση αρχικών συνιστωσών, μοντελοποίηση χρονοσειρών, μοντελοποίηση μέσης κλίμακας με τη βοήθεια του MM5 αλλά και CFD μοντέλων και μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος.

Όσον αφορά συγκεκριμένα στο LocalPred, το μοντέλο περιλαμβάνει μια εξελιγμένη μονάδα στατιστικού υποβιβασμού, που εμπεριέχει τεχνικές φυσικής παραμετροποίησης για την απομάκρυνση των συστηματικών σφαλμάτων των αριθμητικών μοντέλων καιρού, ενώ για τη

βελτίωση της επίδοσης των μετεωρολογικών προβλέψεων χρησιμοποιούνται μοντέλα μέσης ή και μίκρο-κλίμακας , τα οποία προσομοιώνουν κατάλληλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή του πάρκου. Το LocalPred είναι σχεδιασμένο να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε NWP και να παρέχει προβλέψεις ισχύος βασισμένες μόνο σε εντός σύνδεσης μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος του Α/Π, ενώ είναι κατάλληλο συγκεκριμένα για περίπλοκες εδαφικές επιφάνειες. Η πρόβλεψη του ανέμου μετατρέπεται σε πρόβλεψη ισχύος , μέσω της μονάδας καμπύλης ισχύος, η οποία έχει διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα παραγωγής ισχύος και NWP. Για τη περαιτέρω μείωση των σφαλμάτων αξιοποιείται μια στατιστική μονάδα MOS, η οποία παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις.

Αναφορικά με το RegionPred, το εν λόγω μοντέλο είναι μια μεγαλογραφία του LocalPred, καθώς προβλέπει την παραγόμενη ισχύ σε εθνικό επίπεδο. Λειτουργεί συνδετικά με το LocalPred μέσω μιας μονάδας αναβάθμισης.

3.4.6 Το μοντέλο του ΕΜΠ

Ο Σιδεράτος και ο Χατζηαργυρίου ανέπτυξαν ένα μοντέλο πρόγνωσης της αιολικής παραγωγής χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα και εστιάζοντας την προσοχή τους στην σημασία της εφαρμογής διαφορετικών μοντέλων για κάθε τμήμα της καμπύλης ισχύος. Επιπλέον , συνδύασαν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης με δίκτυα ασαφούς λογικής για να βελτιώσουν τη χρήση των προβλέψεων των αριθμητικών μοντέλων καιρού προς όφελος ενός τελικού μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές της αιολικής ισχύος και αριθμητικές προβλέψεις καιρού με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής αιολικής ενέργειας. Τα δεδομένα προέρχονται τόσο από τα NWP , τα οποία καλύπτουν έναν ορίζοντα 48 ή 72 ωρών, όσο και από το σύστημα SCADA το οποίο δίνει κάθε λεπτό τιμές της αιολικής ισχύος. Τα NWP είναι τα μοντέλα που δίνουν στο μοντέλο τη σημαντικότερη πληροφορία, συνεπώς, σφάλματα στις προβλέψεις των αριθμητικών μοντέλων καιρού παράγουν προβλέψεις ισχύος με περιορισμένη ακρίβεια. Αυτός είναι και ο λόγος της χρήσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων σε συνδυασμό με μοντέλα ασαφούς λογικής. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από 3 μοντέλα, καθένα από τα οποία έχει ιδιαίτερη σημασία στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος :

1. Το μοντέλο προκαταρκτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, το οποίο δίνει μια αρχική εκτίμηση της προβλεπόμενης παραγωγής. Χρησιμοποιώντας έναν αυτό-οργανώμενο χάρτη[βλέπε κεφ. 6.2.1] κατηγοριοποιεί τις χρονοσειρές της προβλεπόμενης ταχύτητας ανέμου ανάλογα με το μέγεθος τους (χαμηλή, μεσαία, υψηλή) και καθεμία από αυτές εκπαιδεύεται με ένα ξεχωριστό δίκτυο συνάρτησης ακτινωτής βάσης[κεφ. 7.3.1] . Για την εκπαίδευση ενσωματώνονται στο σύστημα οι παρεχόμενες από το σύστημα SCADA τιμές της αιολικής ισχύος με στόχο να γίνει μια σύγκριση μεταξύ της προβλεπόμενης τιμής της ταχύτητας και της αντίστοιχης αιολικής ισχύος.

2. Το μοντέλο εκτιμητής της ποιότητας των NWP , το οποίο αποτελείται από ένα μοντέλο ασαφούς λογικής και δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης[κεφ. 7.3.1]. Το ένα δίκτυο ακτινικής βάσης δέχεται στην είσοδο του 2 τιμές της ταχύτητας του ανέμου από τα αριθμητικά μοντέλα καιρού, ενώ το άλλο δέχεται σαν είσοδο την προβλεπόμενη κατεύθυνση του ανέμου και την ώρα πρόβλεψης . Στη συνέχεια το μοντέλο ασαφούς

λογικής δέχεται αυτά ως δεδομένα εισόδου και την προκαταρκτική εκτίμηση της ισχύος και κρίνει την ποιότητα των NWPs.

3. Το μοντέλο τελικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος δίνει την πρόβλεψη χρησιμοποιώντας τρία δίκτυα RBF που έχουν εκπαιδευτεί με τα δεδομένα που εκπαιδεύτηκαν και τα RBF του προκαταρκτικού μοντέλου και τα δεδομένα εξόδου του δεύτερου μοντέλου.

Έπειτα από πειράματα, αποδείχθηκε ότι το μοντέλο του ΕΜΠ δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από πολλά άλλα μοντέλα και βελτιώνει την ποιότητα της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης σε επίπεδα καλύτερα και από αυτή του Persistence. Με μια παραλλαγή του συγκεκριμένου μοντέλου θα ασχοληθούμε πειραματικά και στην εν λόγω διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αριθμητικά μοντέλα καιρού

4.1.Εισαγωγή

Τα αριθμητικά μοντέλα καιρού χρησιμοποιούνται με δύο διαφορετικούς τρόπους στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Ο ένας είναι για να εισάγουμε τα τοπικά δεδομένα ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου από το πλέγμα των μοντέλων στο αιολικό πάρκο(και συνεπώς στο ύψος έλικας της κάθε ανεμογεννήτριας)για τις επόμενες 48 ώρες ή και παραπάνω(συνήθως έως 5 μέρες μπροστά). Ο άλλος λόγος είναι για να αξιοποιήσουμε όλο το πλέγμα του μοντέλου στην βραχυπρόθεσμη

πρόβλεψη για να εμφωλιαστεί το δικό της μέσης κλίμακας μοντέλο μέσα σε αυτό. Αυτό το φώλιασμα είναι μιας κατεύθυνσης, αφού οι πληροφορίες που περιέχονται στο μοντέλο μέσης κλίμακας δε χρησιμοποιούνται από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού.

Το κύριο σφάλμα στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος προέρχεται από τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου. Συγκεκριμένα , σημαντικούς περιορισμούς στην ακρίβεια της πρόβλεψης επιβάλει η ταχύτητα του ανέμου όπως δίνεται από τα αριθμητικά μοντέλα καιρού. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η βελτίωση της εισόδου των NWP, ώστε να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στην προγνωστική ακρίβεια.

Ας δούμε όμως πως αναπτύχθηκε η ιδέα των αριθμητικών μοντέλων καιρού. Το 1922 ο Lewis Fry Richardson ανέπτυξε το πρώτο σύστημα αριθμητικής πρόγνωσης του καιρού. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές υπολογισμού στηρίχθηκαν στον διαχωρισμό της ατμόσφαιρας σε κυψέλες , δηλαδή σε πλεγματικά κελιά, και στις πεπερασμένες λύσεις διαφοράς των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ατμοσφαιρική ροή. Η ιδέα του Richardson άρχισε να γίνεται πραγματικότητα από τη δεκαετία του ’40 όταν και εμφανίστηκαν οι πρώτοι ψηφιακοί υπολογιστές , κάνοντας εφικτό τον αυτόματο υπολογισμό των εξισώσεων σε μια πρωτοφανή για την εποχή κλίμακα. Την ιδέα του Richardson αξιοποίησε ο Von Neumann , ο οποίος όντας πρωτοπόρος στον τομέα των υπολογιστών κατάφερε να βρει κοινά σημεία μεταξύ των προσομοιώσεων εκρήξεων πυρηνικών όπλων και της πρόγνωσης του καιρού , καθώς και τα δύο προβλήματα είναι μη γραμμικά προβλήματα της ρευστοδυναμικής. Ήταν το 1946 όταν ο von Neumann άρχισε να υποστηρίζει την εφαρμογή των Η/Υ με στόχο την πρόβλεψη του καιρού και το 1950 όταν έτρεξε την πρώτη αυτοματοποιημένη πρόγνωση καιρού με τη βοήθεια μιας ομάδας διακεκριμένων μετεωρολόγων. Το τελευταίο επίτευγμα από τα τέλη της δεκαετίας του ’60 έως και σήμερα είναι η αξιοποίηση των πιο σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών στην αριθμητική πρόβλεψη του καιρού με τη συμβολή των αριθμητικών μοντέλων που μπορούν να προσομοιώνουν τις καιρικές διεργασίες που συντελούνται στην ατμόσφαιρα.

Για την σαφή απεικόνιση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιείται ένα πλήθος μαθηματικών εξισώσεων που προκύπτουν από τις αρχές της ατμοσφαιρικής Φυσικής, μερικές από τις οποίες περιγράφουν τις αρχές διατήρησης της μάζας, διατήρησης της θερμότητας, διατήρησης του νερού , διατήρησης της κίνησης, τις αρχές κίνησης στην ατμόσφαιρα με βάση τους νόμους του Νεύτωνα , την υδροστατική αρχή και τις αρχές συνέχειας που αφορούν τις οριακές συνθήκες του προβλήματος.

4.2.Σχεδιασμός του ατμοσφαιρικού μοντέλου

Οι διαδικασίες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού περιλαμβάνουν τον καθορισμό της χωρικής και χρονικής κλίμακας και της διάστασης του μοντέλου, την επιλογή των φυσικών, χημικών και δυναμικών διαδικασιών για την προσομοίωση , την επιλογή των μεταβλητών, τον καθορισμό των αρχικών και των οριακών συνθηκών , τη λήψη δεδομένων εισόδου από μετεωρολογικούς σταθμούς ή ραδιοβολήσεις καθώς και τεστ ευαισθησίας για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Κρίσιμος για την ανάπτυξη του μοντέλου είναι ο καθορισμός του επιστημονικού προβλήματος που επιθυμείται να μελετηθεί για μια περιοχή ενδιαφέροντος . Μερικά από τα βασικά επιστημονικά ζητήματα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι τα εξής :

- Συγκεντρώσεις αερολυμάτων

- Πεδία υγρασίας και θερμοκρασίας
- Υγρασία εδάφους
- Καιρικά φαινόμενα
- Συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα και όζοντος
- Εκπομπές και συγκεντρώσεις ρύπων

Οι χωρικές κλίμακες χωρίζονται κατά αύξουσα σειρά μεγέθους σε **μοριακή** (<<2mm) **, μίκρο – κλίμακα** (2mm-2km) , **μέση κλίμακα** (2-2.000km) , **συνοπτική κλίμακα**(500-10.000km) και **πλανητική κλίμακα**(>10.000km). Στην εργασία μας για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος μελετώνται κυρίως τα φαινόμενα μέσης κλίμακας μέσα στα οποία συμπεριλαμβάνονται τα τοπικά συστήματα ανέμων , ενώ μας ενδιαφέρει και η συνοπτική κλίμακα (συστήματα χαμηλής ή υψηλής πίεσης, μέτωπα καιρού , τροπικές καταιγίδες κλπ) για την κατανόηση της εξέλιξης του καιρού. Η μίκρο – κλίμακα μελετάται κυρίως από τα CFD μοντέλα[βλέπε κεφ. 4.3].

Όσον αφορά στον **καθορισμό των διαστάσεων**, προτιμάται το τρισδιάστατο μοντέλο , το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο οριζόντιων δισδιάστατων μοντέλων , διατεταγμένων σε επίπεδα το ένα πάνω από το άλλο. Έτσι , αποκτάται μια αρκετά ρεαλιστική απεικόνιση των δυναμικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και πρωτίστως στην τροπόσφαιρα όπου εξελίσσονται τα καιρικά φαινόμενα.

Η επιλογή των διαδικασιών για την προσομοίωση του μοντέλου περιλαμβάνει την επιλογή των μεταβλητών , των χρονικών βημάτων και διαστημάτων και της δομής του πλέγματος πάνω στο οποίο λαμβάνονται τα μετεωρολογικά δεδομένα την κάθε χρονική στιγμή. Σημαντικό ρόλο παίζει και το μέγεθος του πλέγματος το οποίο εξαρτάται από την περιοχή ενδιαφέροντος στην οποία παρατηρούνται φαινόμενα μέσης κλίμακας.

Σχετικά με την **επιλογή των αρχικών συνθηκών**, αυτές εξαρτώνται από τα διαθέσιμα στοιχεία. Εάν η περίοδος προσομοίωσης χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαθεσιμότητα παρατηρήσεων , οι αρχικές συνθήκες τίθενται με την παρεμβολή στο χώρο την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην αρχή της προσομοίωσης. Αντίθετα , σε περίπτωση χαμηλής διαθεσιμότητας , οι αρχικές συνθήκες πρέπει να τεθούν προσεκτικά με τη βοήθεια δοκιμών ευαισθησίας που χρησιμοποιούνται για την δοκιμή των αποτελεσμάτων διαφορετικών αρχικών συνθηκών. Ελλιπή στοιχεία στην αρχή δίνουν σχεδόν πάντα λανθασμένες προβλέψεις.

Όσον αφορά στις **οριακές συνθήκες**, αυτές χωρίζονται σε πλευρικές , άνω και κάτω οριακές συνθήκες. Οι πλευρικές αφορούν την περιοχή του κόσμου που εσωκλείει το μοντέλο , οι κάτω οριακές συνθήκες αφορούν το οριακό στρώμα που έχει φυσική σημασία και εν προκειμένω είναι η επιφάνεια της γης (είτε του εδάφους είτε της θάλασσας) ενώ οι άνω οριακές συνθήκες αφορούν το ανώτερο επίπεδο της ατμόσφαιρας, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο καιρού.

Τέλος, η **διαδικασία αφομοίωσης των στοιχείων** που περιλαμβάνει την τροποποίηση των παρατηρήσεων εισόδου με στόχο την παραγωγή κατάλληλης για το κάθε μοντέλο εισόδου καθώς και τα τεστ ευαισθησίας για τον υπολογισμό των διαφορετικών υποθέσεων στην απόδοση του μοντέλου , κρίνονται αναγκαία για την σωστή ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης καιρού. Φυσικά , η ικανότητα πρόγνωσης εξαρτάται καταλυτικά και από τον χρονικό ορίζοντα που θέτουμε . Ιδανικά , το σφάλμα πρόβλεψης διπλασιάζεται κάθε 2-3 μέρες και έτσι το θεωρητικό όριο για την ικανότητα πρόγνωσης σε συνοπτική κλίμακα υπολογίζεται περίπου στις 2 βδομάδες. Στην πραγματικότητα, η μέση ικανότητα πρόβλεψης είναι περίπου 5-6 ημέρες όπως

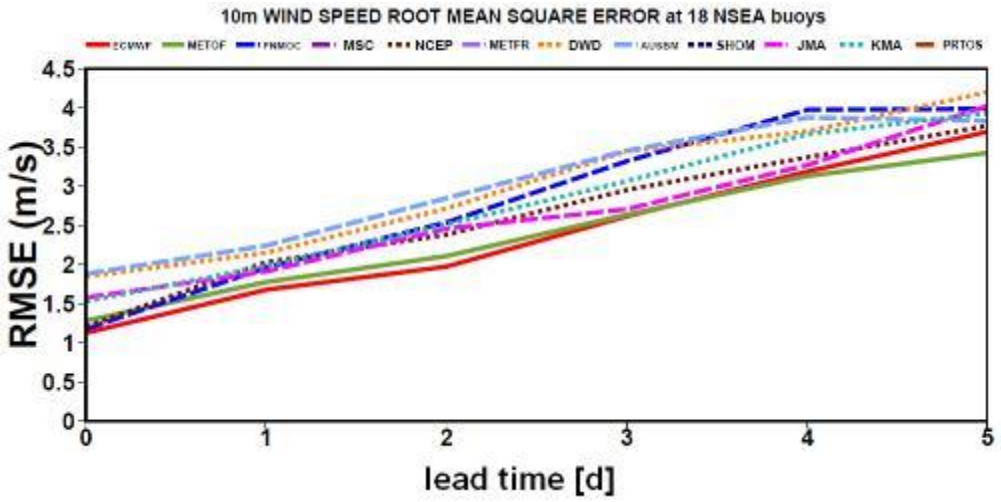
προκύπτει από τα αποτελέσματα του ECMWF. Σήμερα , το ποσό αυτό έχει αυξηθεί στις 10 μέρες , όπου μια πρόγνωση μπορεί να θεωρηθεί όσο το δυνατόν ικανοποιητική.

4.3. Τα κυριότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τα κυριότερα επιχειρησιακά αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που σχετίζονται με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος στην Ευρώπη. Υπάρχουν διάφορα παγκόσμια προγνωστικά συστήματα που προβλέπουν συνοπτικής κλίμακας καιρικά μοτίβα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνεχής ανάπτυξη των υπολογιστών κατά την διάρκεια των επόμενων ετών θα επιτρέψει στα παγκόσμια μοντέλα να αναλάβουν το ρόλο των περιοχικών μοντέλων (limited area models or LAM) [κεφ. 4.3.2] σε οριζόντιες κλίμακες κοντά στα 10 km. Τα LAMs , τα οποία παίρνουν οριακές συνθήκες από τα παγκόσμια μοντέλα και λειτουργούν αυτή τη στιγμή επιχειρησιακά σε οριζόντιες αναλύσεις της τάξης των 7 – 12 km, αναμένεται να αντικατασταθούν από LAMs υψηλής ανάλυσης με οριζόντια ανάλυση μικρότερη και από 4 km.

4.3.1. Παγκόσμια μοντέλα

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών παγκόσμιων μοντέλων σε σχέση με τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος(RMSE)[κεφ. 6.3.3.3] των προγνωστικών ταχυτήτων ανέμου στα 10 μ από την επιφάνεια της γης πάνω από τη Βόρεια Θάλασσα για 18 ανακλαστήρες για τις επόμενες 5 ημέρες.



Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τη λίστα των ιδιοτήτων των πιο κοινά διαδεδομένων παγκόσμιων προγνωστικών μοντέλων. Γίνεται φανερό ότι η ανάλυση των παγκόσμιων μοντέλων θα αυξηθεί περαιτέρω και ότι τα πρώτα μοντέλα θα έχουν οριζόντια ανάλυση πλέγματος μικρότερη από τα 20 km μέχρι το 2010 , όπερ και εγένετο. Μάλιστα αποτελεί πεποίθηση της ευρωπαϊκής κοινότητας αριθμητικών μοντέλων πρόγνωσης καιρού ότι παγκόσμια μοντέλα όπως το IFS του ECMWF θα αντικαταστήσουν το ρόλο των περιφερειακών μοντέλων στην τωρινή τους μορφή. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης φωλιασμένων περιφερειακών μοντέλων μέσα στα παγκόσμια(π.χ. ICON στο DWD) με οριζόντιες αναλύσεις κοντά στα 5 km για συγκεκριμένες περιοχές.

Πίνακας 1: Παγκόσμια αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης καιρού που τρέχουν επιχειρησιακά από εθνικές μετεωρολογικές υπηρεσίες

Symbol Figure 29	Institution	model name	resolution/ model levels	approx. horiz. res.	Grid	Planned
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast	IFS	TL799/L91	~25km	Spectral	TL1279/L150 in 2009/10
METOF	Meteorological Office, UK	UM	0.375°x0.5625°/L 50	~40km	Gaussian grid	25km/L70 2009/10
MSC	Meterological Service of Canada	GEM	0.3°x0.45°/L58	~30km	Gaussian grid	Global 20-25 km uniform resolution, 90 levels, <2015
NCEP	National Center for Environmental Prediction, USA	GFS	TL382/L64	~50km	Spectral	
METFR	Meteo France	ARPEGE	TL538/L60	~ 15km over France	Spectral + gaussian grid with stretching factor	TL798/L70 2009/10
DWD	Deutscher Wetterdienst, Germany	GME	40km/L40	40km	Icosaeder	new model ICON (>2010)
AUSBM	Bureau of Meteorology, Australia	GASP	TL239/L29	~80km	Spectral	
JMA	Japan Meteorological Agency	JMA-GSM	TL319/L40	~60km	Spectral	
KMA	Korea Meteorological Agency	GDAPS	TL426/L40	~45km	Spectral	

Τα πιο γνωστά παγκόσμια μετεωρολογικά μοντέλα είναι το IFS/ECMWF, το GEM/MSC, το GFS/NCEP, το GME/DWD, JMA-GSM/JMA κλπ..

4.3.2.Περιφερειακά μοντέλα

Πρόκειται για μοντέλα μικρότερης οριζόντιας ανάλυσης από αυτή των παγκόσμιων που καλύπτουν επίσης μικρότερες περιοχές. Συνήθως αναπτύσσονται από κάθε χώρα ξεχωριστά. Τη δεδομένη χρονική στιγμή στις περισσότερες χώρες τα μοντέλα τρέχουν για επικαλυπτόμενες Ευρωπαϊκές περιοχές με ανάλυση πλέγματος 12-7 km. Στο άμεσο μέλλον η ανάλυση αναμένεται να πέσει στα 4-1 km . Επιπλέον, υπάρχει σχέδιο εμφωλιάσματος των υψηλής ανάλυσης μοντέλων που καλύπτουν την κάθε χώρα σε ένα παγκόσμιο μοντέλο ανάλυσης 25 km ή λιγότερο.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούμε το περιφερειακό μοντέλο SKIRON για τη μετεωρολογική είσοδο, το οποίο και θα αναλυθεί ακριβώς παρακάτω. Άλλα γνωστά περιφερειακά μοντέλα από διάφορες περιοχές της Ευρώπης είναι το HIRLAM , το οποίο έχει αναπτυχθεί σε πολλές ευρωπαικές χώρες μεταξύ των οποίων η Δανία, η Ιρλανδία , η Ολλανδία , η Νορβηγία και η Ισπανία, το ALADIN που έχει αναπτυχθεί στην Αυστρία , το Βέλγιο , την Βουλγαρία, την Κροατία , την Τσεχία και άλλες , και το WRF και το Cosmo τα οποία διαθέτουν και τα δύο πυρήνες στην Ελλάδα.

4.4.Το μοντέλο SKIRON

Το μοντέλο SKIRON/Eta αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο των Αθηνών από την Ομάδα Ατμοσφαιρικής μοντελοποίησης και πρόγνωσης καιρού μέσα στο πλαίσιο εργασίας των SKIRON και MEDUSE που χρηματοδοτήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελληνική Κυβέρνηση. Το σύστημα ΣΚΙΡΩΝ τρέχει για μια περίοδο 3-7 ημερών. Η βασική του συνιστώσα είναι το προγνωστικό μοντέλο περιορισμένης περιοχής ETA. Το ETA αρχικά αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου και στην Μετεωρολογική Υπηρεσία της Γιουγκοσλαβίας. Βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι εφαρμόζεται σε περιοχές με έντονο μορφολογικό χαρακτήρα. Η περαιτέρω ανάπτυξη του έγινε στο Εθνικό Κέντρο Περιβαλλοντικών Προγνώσεων (N.C.E.P. [National Center Environmental Predictions]) στην Ουάσινγκτον. Τα τελευταία τρία χρόνια, το μοντέλο εξελίχθηκε παραπάνω στο Πανεπιστήμιο Αθηνών στα πλαίσια ενός προγράμματος τριών ετών που αφορά την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόγνωσης καιρού.

Το Skiron /Eta έχει μερικά μοναδικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για περιοχικές/μέσης –κλίμακας προσομοιώσεις σε περιοχές με ποικίλα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά. Η εκδοχή του Eta/NCEP μοντέλου θεωρείται ως η πιο εξελιγμένη εκδοχή του μοντέλου Eta. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του μοντέλου Eta παρουσιάζονται παρακάτω :

- Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων λαμβάνει χώρα σε ένα πλέγμα σημείων που χρησιμοποιεί ένα πεπερασμένο σχήμα διαφορών.
- Η τωρινή έκδοση του μοντέλου περιλαμβάνει μη υδροστατική δυναμική , ενώ η παλαιότερη εκδοχή χρησιμοποιούσε την υδροστατική προσέγγιση.
- Εφαρμόζεται μια ιδιαίτερη τεχνική για την προστασία από το διαχωρισμό πλέγματος.
- Για την οριζόντια μεταφορά, η διαδικασία μεταφοράς μη γραμμικής ενέργειας σε μικρότερες κλίμακες είναι υπό έλεγχο
- Χρησιμοποιείται ένα ιδιαίτερο σχήμα χρονικών διαφορών
- Χρησιμοποιείται ένα 2.5 τάξεως σχήμα παραμετροποίησης των οριακών συνθηκών.
- Χρησιμοποιείται ένα $2^{ης}$ τάξης σχήμα παραμετροποίησης του επιφανειακού στρώματος.
- Χρήση ιδιαίτερου σχήματος υποστρώματος.
- Παραμετροποίηση των επιφανειακών διαδικασιών με τη χρήση προχωρημένων σχημάτων
- Παραμετροποίηση της κατακόρυφης μεταφοράς
- Εκμετάλλευση μιας σειράς διαδικασιών για την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Το μοντέλο πάνω στο οποίο βασίστηκε ο ΣΚΙΡΩΝ είναι ένα περιοχικό ατμοσφαιρικό μοντέλο μέσης κλίμακας με έναν αριθμό ιδανικών λύσεων που εφαρμόζονται στα τμήματα παραμετροποίησης των δυναμικών και φυσικών διαδικασιών του. Οι περισσότερες από τις συνιστώσες του έχουν σχεδιαστεί για να περιγράψουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις ατμοσφαιρικές διαδικασίες μέσης κλίμακας και συνεπώς τα έντονα καιρικά φαινόμενα όπως οι έντονες βροχοπτώσεις, οι καταιγίδες , οι κυκλοφορίες αέρα ανάμεσα στα όρη και τα μέτωπα.

4.4.1. Το SKIRON v6.0(υδροστατική προσέγγιση)

Χρησιμοποιήθηκε από το 2000 έως το 2002 καλύπτοντας μια περιοχή που περιλαμβάνει όλη τη Μεσόγειο και μέρος της Βόρειας Ευρώπης. Περιλαμβάνει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Οριζόντιο πλέγμα ανάλυσης 0.25^{o} (25 km)
- Έκταση κυψελίδας πλέγματος 0.25*0.25 $degree^2$
- 32 κατακόρυφα επίπεδα εκτεινόμενα από την επιφάνεια έως τα 100 mb (αντιστοιχεί σε περίπου 16 km ύψος)
- Χρήση τοπογραφίας και βλάστησης υψηλής ανάλυσης με δεδομένα ανάλυσης περί τα 750 m
- Αξιοποίηση των αρχικών συνθηκών από το παγκόσμιο μοντέλο NCEP/AVN. Το AVN έχει οριζόντια ανάλυση 1 μοίρα , ενώ τα δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας θάλασσας παρέχονται στη 0.5 μοίρα.
- Το ECMWF χρησιμοποιείται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις με ανάλυση 0.5 μοίρες. ***Σημείωση*** : Η παγκόσμια ανάλυση του Ευρωπαϊκού μοντέλου έπεσε το 2009 στα 0.25 της μοίρας και από το 2011 στα 0.16 της μοίρας
- Ο προγνωστικός ορίζοντας είναι 72 ώρες (3 ημέρες) , ενώ ο κάθε προγνωστικός κύκλος είναι διαθέσιμος από τις 12 UTC.
- Οι προγνώσεις είναι διαθέσιμες κάθε ώρα (χρονική ανάλυση)
- Τα μετεωρολογικά δεδομένα που διατέθηκαν στα πλαίσια του ANEMOS project είναι τα εξής :

    - Οριζόντια ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου στα 10μ όπως υπολογίζεται από το σχήμα παραμετροποίησης επιφανειακού στρώματος
    - Οριζόντια ταχύτητα ανέμου στα 55,40 και 30 μ και διεύθυνση στα 55μ , όλες υπολογισμένες με βέλτιστη παρεμβολή μεταξύ του επιπέδου των 10μ πάνω από το έδαφος και των πρώτων 2 επιπέδων του μοντέλου πάνω από την τοπογραφία
    - Θερμοκρασία στα 2μ από το έδαφος
    - Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας.

4.4.2. Το μη υδροστατικό SKIRON v1.2

Κατά τη διάρκεια του 2002 το μοντέλο Skiron /Eta αναβαθμίστηκε έτσι ώστε να περιλάβει βελτιωμένες παραμετροποιήσεις των φυσικών διαδικασιών και καλύτερη διαχείριση των δεδομένων εισόδου υψηλής ανάλυσης , με στόχο την παροχή υψηλής ανάλυσης προγνώσεων καιρού. Η νέα εκδοχή του μοντέλου άρχισε να τρέχει επιχειρησιακά από τον Ιανουάριο του 2003.

Η φυσική του μοντέλου βελτιώθηκε, καθώς συμπεριλήφθηκε μη υδροστατική δυναμική. Αυτό αποτελεί μια εξαιρετική καινοτομία για τις προσομοιώσεις υψηλής ανάλυσης , για τις οποίες οι μη υδροστατικές διαδικασίες έχουν σημαντική επιρροή στα μετεωρολογικά πεδία. Η μη υδροστατική μοντελοποίηση αποδείχθηκε υπολογιστικά εύρωστη σε όλες τις αναλύσεις και αποτελεσματική σε όλες τις εφαρμογές των NWP. Στις υψηλές αναλύσεις, η μη υδροστατική προσέγγιση παράγει γενικά ομαλότερες λύσεις από την υδροστατική ,συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη πρόβλεψη τόσο του ορογραφικού υετού όσο και των βαθμίδων πίεσης (από τις οποίες εξαρτάται και η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου) σε μια περιοχή.

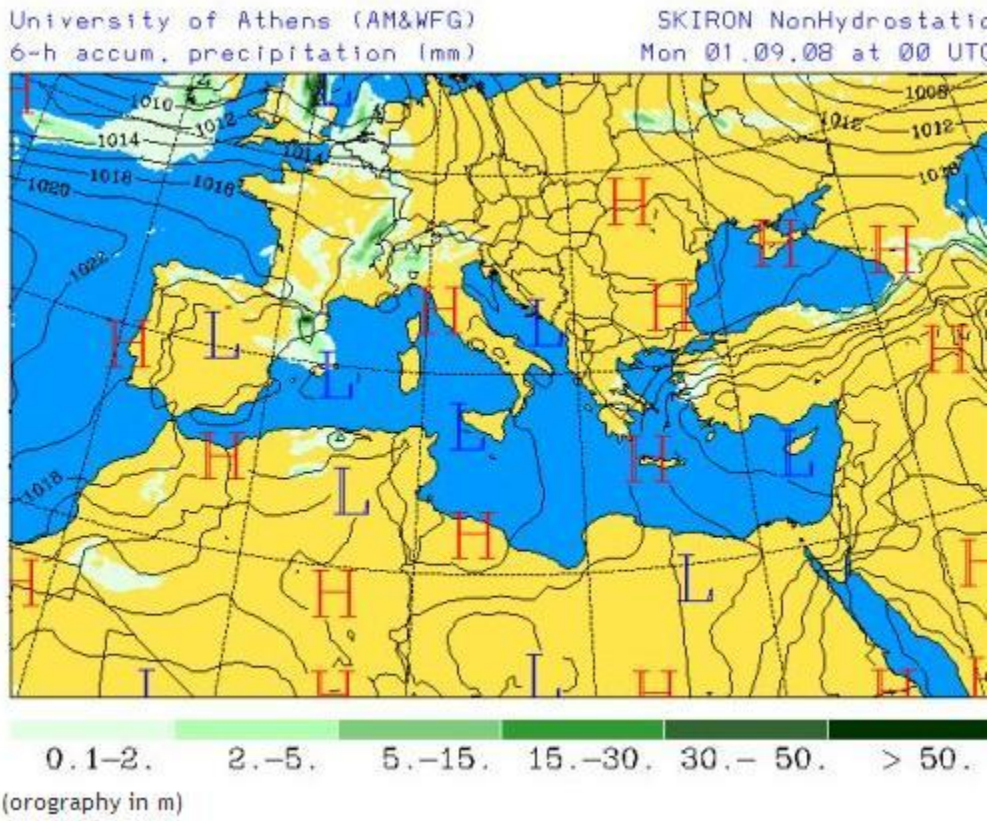
Το αναβαθμισμένο SKIRON καλύπτει όλη την περιοχή της Μεσογείου(από τον ανατολικό Ατλαντικό μέχρι την Κασπία Θάλασσα και από τη Βόρεια Αφρική μέχρι τη Γερμανία).

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του μη-υδροστατικού SKIRON είναι τα ακόλουθα :

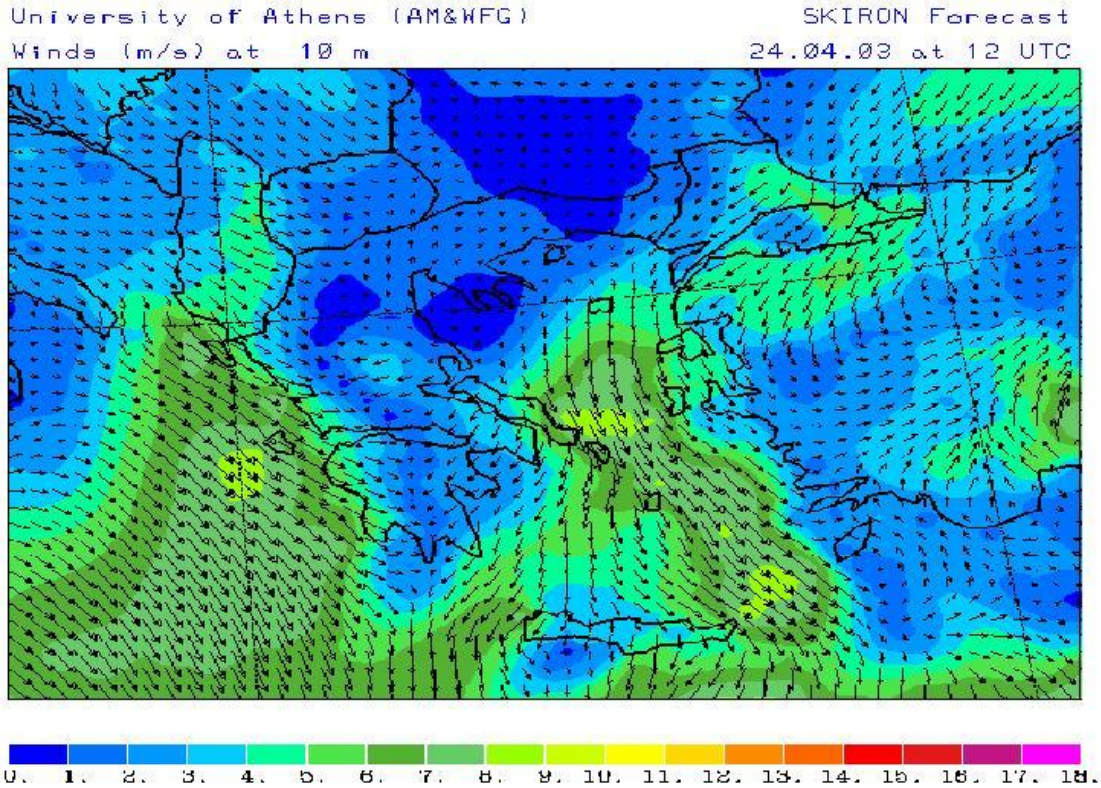
- Οριζόντια ανάλυση 0.1*0.1 μοίρες
- Αριθμός πλεγματικών σημείων 247x231
- 38 κατακόρυφα επίπεδα με το ανώτερο να βρίσκεται στα 50 mb (~25 km) με δυνατότητα επέκτασης έως και τα 25 mb(~25 km). Η αύξηση του αριθμού των κατακόρυφων επιπέδων συμβάλει στη βελτίωση της κατακόρυφης αντιπροσώπευσης των φυσικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα ειδικά εντός του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος
- Ατμοσφαιρικά δεδομένα και συγκεκριμένα αρχικές και οριακές συνθήκες από το παγκόσμιο μοντέλο NCEP/GFS (οριζόντια ανάλυση 1x1 μοίρες,26 κατακόρυφα επίπεδα πίεσης)
- Δεδομένα τοπογραφίας και βλάστησης (30x30 sec) και καθημερινές τιμές επιφανειακής θερμοκρασίας θάλασσας (0.5 x 0.5 μοίρες)
- Αρχική χρονική στιγμή εισαγωγής των δεδομένων πρόβλεψης η 1200 UTC καθημερινά
- Διάρκεια παροχής προγνωστικών δεδομένων 5 ημέρες ή 120 ώρες
- Τομέας τόσο Ευρώπη όσο και Ελλάδα
- Οριζόντια ανάλυση 0.1 x 0.1 μοίρες
- Προγνωστικά πεδία στην έξοδο του μοντέλου:

- Πίεση στη μέση στάθμη της θάλασσας
- Συνιστώσες u και v του ανέμου στα 10μ όπως υπολογίζονται από το σχήμα παραμετροποίησης επιφανειακού στρώματος
- Θερμοκρασία αέρα στα 2 μ
- Συνολικός αθροιστικός υετός,
- Υετός λόγω κατακόρυφης άνω-μεταφοράς
- Αθροιστική χιονόπτωση
- Νέφο-κάλυψη
- Γεωδυναμικά ύψη
- Άνεμοι και θερμοκρασίες στην ανώτερη ατμόσφαιρα
- Επιφανειακή θερμοκρασία θάλασσας και μετεωγράμματα σε επιλεγμένα σημεία

Εικόνα της περιοχής που καλύπτει το μοντέλο Σκίρων . Ο συγκεκριμένος προγνωστικός χάρτης δίνει τον αθροιστικό υετό :



Προγνωστικός χάρτης ανέμων για τον τομέα της Ελλάδος :



Για την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος αξιοποιούμε τα προγνωστικά δεδομένα ανέμου στα 10 μ (συνιστώσες u και v) , τα οποία παρέχονται σε ωριαία βάση και τα οποία χρησιμοποιούμε ως είσοδο στη μονάδα πρόβλεψης . Η διαδικασία επεξεργασίας των μετεωρολογικών δεδομένων για την βέλτιστη αξιοποίηση τους θα αναλυθεί σε άλλο κεφάλαιο.

4.5.Αναγκαίες βελτιώσεις στα NWP και τα μοντέλα μέσης κλίμακας με στόχο την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος

Τα αριθμητικά μοντέλα καιρού εμφανίζουν περιορισμένη ακρίβεια στην πρόβλεψη των επιφανειακών ταχυτήτων ανέμων. Ο βασικός λόγος για αυτό το μειονέκτημα των μοντέλων είναι η έλλειψη αναγκαιότητας της ακρίβειας πρόβλεψης. Επιπλέον, η ανάλυση της τοπογραφίας δεν είναι τόσο καλή όσο απαιτείται για να καλύψει φαινόμενα μίκρο-κλίμακας όπως είναι αυτό του καναλισμού στις κοιλάδες. Οι ακριβείς προβλέψεις απαιτούν την ανάπτυξη μοντέλων υψηλής ανάλυσης που θα καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή[κεφ. 5].

Για την διερεύνηση της ακρίβειας των αριθμητικών μοντέλων καιρού, το 2001 μια ομάδα επιστημόνων διεξήγαγε μια μελέτη χρησιμοποιώντας το Δανέζικο μοντέλο HIRLAM σε ένα αιολικό πάρκο στην Ιρλανδία. Εφαρμόζοντας διαφορετικά τρεξίματα με ποικίλες αναλύσεις διαπιστώθηκε ότι οι δείκτες στατιστικής ακρίβειας βελτιώθηκαν ελάχιστα με τη χρήση υψηλής ανάλυσης. Βέβαια, τα μέγιστα των ταχυτήτων των ανέμων ήταν πιο κοντά στις μετρούμενες τιμές για τις προβλέψεις

υψηλής ανάλυσης. Σχετικά με τα σφάλματα, διαπιστώθηκε ότι τα σφάλματα φάσης , τα σχετιζόμενα με την κίνηση των μετωπικών συστημάτων, είχαν πολύ μεγαλύτερη επιρροή στο συνολικό σφάλμα σε σχέση με τα σφάλματα πλάτους. Μια προτεινόμενη λύση για τον περιορισμό του σφάλματος ήταν η χρήση δεδομένων εισόδου από μια ελεύθερη ανεμογεννήτρια, γεγονός το οποίο θα αύξανε το δίκτυο μετεωρολογικών παρατηρήσεων.

Στην ίδια έρευνα αναδείχθηκε η διαφορά μεταξύ των ωριαίων μέσων ταχυτήτων ανέμου και των στιγμιαίων ταχυτήτων. Ένα σημαντικό συμπέρασμα ήταν ότι είναι σημαντικό να υπολογίζεται η αιολική ισχύς εντός του μοντέλου, έτσι ώστε να αξιοποιείται το σημαντικά μικρότερο χρονικό βήμα του. Αυτή η διαφορά μεταξύ ταχυτήτων προκύπτει από το γεγονός ότι η αιολική ενέργεια είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου και δεν εξαρτάται γραμμικά από αυτήν.

Παρόμοια συμπεράσματα εξήχθησαν και από άλλες έρευνες που έλαβαν χώρα . Μάλιστα, σχετικά με τους τυφώνες, διαπιστώθηκε ότι ένα πλέγμα οριζόντιας ανάλυσης 1.33 km βελτιώνει την πρόβλεψη της έντασης αλλά και της ραγδαίας ενίσχυσης της ταχύτητας του ανέμου .

Σε αξιόλογες διαπιστώσεις προχώρησε και ο Jorgensen et al σχετικά με την καιρική εξάρτηση του σφάλματος . Πρώτον, διαπίστωσε ότι όσο πιο σταθερή είναι η ροή και όσο μακρύτερη η ελεγχόμενη χαμηλή πίεση προς τα βόρεια , τόσο καλύτερη η ποιότητα των προβλέψεων. Δεύτερον , συμπέρανε πως οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είναι σε τέτοια θέση ώστε οι τοπικές τριβές να είναι μικρότερες από τη μέση τριβή στο αντίστοιχο πλεγματικό κουτί του NWP μοντέλου. Έτσι ένα NWP μοντέλο θα έχει κατά μέσο όρο μια αρνητική απόκλιση του ανέμου στο σημείο που τοποθετούνται οι Α/Γ εκτός αν χρησιμοποιείται τριβή εξαρτώμενη από την διεύθυνση.

Ο Jorgensen et al μας περιγράφει μια νέα προσέγγιση για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της νέας προσέγγισης ονομάστηκε HIRPOM(Hirlam Power prediction model) . Χρησιμοποιήθηκε μια απλή μέθοδος μετατροπής της ισχύος με την αξιοποίηση των καμπυλών ισχύος των ανεμογεννητριών όπως προέκυψαν από τους κατασκευαστές και οι οποίες ενσωματώθηκαν μέσα στο NWP μοντέλο. Βρέθηκε επίσης ότι η αύξηση της οριζόντιας ανάλυσης δε μείωνε το προγνωστικό σφάλμα. Έτσι οι Jorgensen και Mohrlen αποφάσισαν να αναπτύξουν ένα σύστημα προγνώσεων πολλαπλού δείγματος (ensemble forecasting system)[βλέπε κεφ. 4.6] αποτελούμενο από 50 μέλη , το MSEPS.

Στο συνέδριο για την παρουσίαση της πρόβλεψης αιολικής ισχύος με τη χρήση του Hirlam, η Mohrlen et al περιγράφει την «Ιρλανδική μελέτη» , όπου το HIRPOM εισήχθη στο HIRLAM για να τρέξει σε προγνωστικό και διαγνωστικό μοτίβο με στόχο την εύρεση της πιο αποτελεσματικής ανάλυσης στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος υπό καθεστώς πολύπλοκης επιφάνειας. Η Ιρλανδική μελέτη ήταν ένα από τα μεγαλύτερα αριθμητικά πειράματα που έλαβαν χώρα στον τομέα της αιολικής ενέργειας εκείνη την περίοδο (2001-2002). Για την πραγματική πρόβλεψη , διαπιστώθηκε ότι η πρόβλεψη υψηλής ανάλυσης (<1.4 km) απαιτεί επίσης και δεδομένα εισόδου υψηλής ανάλυσης για την ορογραφία και την τραχύτητα του εδάφους και ότι λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων στη μεταφορά των δεδομένων οι υπολογισμοί της αιολικής ισχύος θα έπρεπε να λαμβάνουν χώρα εντός του μοντέλου καιρού. Επιπλέον, βρέθηκε ότι η σύζευξη του HIRLAM με ένα μοντέλο πρόγνωσης κύματος και το HIRPOM βελτιώνει τις προβλέψεις πάνω από τη θάλασσα αλλά και πάνω από την ξηρά και συγκεκριμένα διαπιστώθηκε βελτίωση 2,5 % στην ακτογραμμή της Βόρειας Θάλασσας και 5% πάνω από τη θάλασσα.

Σε μια άλλη προσπάθεια , ο Barstad χρησιμοποιήσει μια βιβλιοθήκη προ-υπολογισμένων αποτελεσμάτων μοντέλων μέσης- κλίμακας για να κατεβάσει την κλίμακα πρόβλεψης από την

καιρική δραστηριότητα μεγάλης κλίμακας στο επίπεδο ενός αιολικού πάρκου στη Νορβηγία. Τα δεδομένα καιρού ελήφθησαν από το αρχείο του NCEP/NCAR. Για την μετατροπή της ροής μεγάλης κλίμακας σε ανεμολογικά χαρακτηριστικά του ίδιου του αιολικού πάρκου χρησιμοποιήθηκε το MM5. Σε μια μεγαλύτερη έρευνα, συγκρίθηκε η απόδοση του MM5 με το CFD μοντέλο 3DWind. Συγκεκριμένα, έτρεξε το HIRLAM με οριζόντια ανάλυση 10 km, το MM5 με ανάλυση 1 km και το 3DWind με διαφορετικές αναλύσεις μέσα στο διάστημα 30 -500 m. Για την σύγκριση των μοντέλων αναπτύχθηκε ένα στατιστικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν ότι παρότι τα μοντέλα υψηλότερης ανάλυσης έδωσαν περισσότερες λεπτομέρειες για την πρόβλεψη, τροφοδοτούνταν με τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες του HIRLAM με αποτέλεσμα να έχουν την ίδια διαχρονική εξέλιξη με το μεγαλύτερο μοντέλο δηλαδή με το ίδιο το HIRLAM. Επιπλέον, οι βελτιώσεις στις λεπτομέρειες που προστέθηκαν από το μοντέλο μέσης κλίμακας και το CFD μοντέλο δεν διακρίνονταν στα ποσοστά σφάλματος για χρονικό ορίζοντα μεγαλύτερο των 20 ωρών.

Ο Enomoto et al χρησιμοποίησε το μοντέλο LOCALS για να προβλέψει την αιολική παραγωγή του αιολικού πάρκου TAPPI στην Ιαπωνία. Παρότι χρησιμοποίησε πλέγμα ανάλυσης μόλις 500 m , τα αποτέλεσματα έδωσαν ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα(RMSE) της τάξης του 15% της εγκατεστημένης χωρητικότητας. Αυτό το αποτέλεσμα δείχνει ότι οι αξιοσημείωτες διαφορές στην ένταση της τυρβώδους ροής μεταξύ των ανεμογεννητριών δεν απεικονίζονται ορθώς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Yamaguchi et al κατάφερε να φτάσει την ίδια απόδοση με ένα μέσης κλίμακας μοντέλο ανάλυσης 1 km χρησιμοποιώντας την 20 km ανάλυση του μοντέλου JMA(Japan Meteorological Agency met model) ενσωματώνοντας μια απλή μέθοδο μεταφοράς συντελεστών.

Μεγάλη προσπάθεια στην ανάπτυξη των μετεωρολογικών προγνώσεων προς όφελος της αιολικής ενέργειας συντελέστηκε και από το ίδιο το ANEMOS project. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο μέσης-κλίμακας μοντέλα όσο και μίκρο-κλίμακας αλλά και CFD μοντέλα. Κατά την εφαρμογή εξελιγμένων στατιστικών μοντέλων για την εκτίμηση του σφάλματος διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρξε καμία βελτίωση στην πρόβλεψη με την μείωση των διαστημάτων του πλέγματος από τα 9 στα 3 km. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι οι προβλεπόμενες χρονοσειρές γίνονται πιο ρεαλιστικές με την αύξηση της οριζόντιας ανάλυσης με την έννοια ότι οι κορυφές και οι κοιλάδες των χρονοσειρών έχουν παρόμοια πλάτη με τις πραγματικές χρονοσειρές στις υψηλές συχνότητες. Αυτό όμως συνεπάγεται μεγαλύτερη πιθανότητα για σφάλματα φάσης , με αποτέλεσμα το RMS σφάλμα συνήθως να αυξάνεται. Συνεπώς , η αύξηση της οριζόντιας ανάλυσης ουσιαστικά αποδεικνύεται μη χρήσιμη , αντίθετα σημαντικές βελτιώσεις παρατηρήθηκαν με την αύξηση της κατακόρυφης ανάλυσης στα χαμηλότερα 200 m της ατμόσφαιρας.

Όπως διαπιστώνεται από τις περισσότερες έρευνες μεγαλύτερη σημασία από την οριζόντια ανάλυση έχουν οι οριακές και αρχικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται σε κάθε προγνωστικό μοντέλο , τα δεδομένα εισόδου ,η κατακόρυφη ανάλυση και φυσικά όλες οι διαδικασίες που σχετίζονται με την φυσική παραμετροποίηση των αριθμητικών μοντέλων καιρού. Τέλος, μεγάλο ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος που γίνεται το downscaling, για την υλοποίηση του οποίου εφαρμόζονται ποικίλες μαθηματικές μέθοδοι.

4.6.Το σύστημα προγνώσεων πολλαπλού δείγματος (ensemble forecasting)

4.6.1.Εισαγωγή

Το σύστημα προγνώσεων πολλαπλού δείγματος στηρίζεται στην ιδέα της διαφοροποίησης των αρχικών συνθηκών που επηρεάζουν τις υπερβολικά ευαίσθητες μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις ατμοσφαιρικές κινήσεις. Είναι φανερό πως οι περιορισμοί στο δίκτυο μετεωρολογικών παρατηρήσεων και η ακρίβεια της μέτρησης δημιουργούν ένα άνω όριο στην ποιότητα της πρόγνωσης του καιρού , γεγονός το οποίο επιβάλει την εισαγωγή στοχαστικών στοιχείων στην αριθμητική πρόγνωση, όπως είναι το σύστημα πολλαπλού δείγματος. Επιπλέον , μικρά σφάλματα στην ανάλυση σε ευαίσθητα τμήματα της ατμόσφαιρας μπορεί να επηρεάσουν την ροή της μεγάλης κλίμακας κατά τη διάρκεια μιας πρόγνωσης πολλών ημερών. Με τον ίδιο τρόπο , μια αντίστοιχη ανάλυση με μια ελαφρώς διαφορετική γεωγραφική κατανομή των αρχικών σφαλμάτων μπορεί να δημιουργήσει μια διαφορετική πρόγνωση. Ομοίως, μια πιθανή τροποποίηση των αρχικών συνθηκών μπορεί να προκαλέσει διαφορετικό αποτέλεσμα στην πρόγνωση. Η επιτυχία του συστήματος ensemble εξαρτάται από την ικανότητα του να αναγνωρίσει περιοχές όπου μικρές ασάφειες στην ανάλυση μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην πρόγνωση και να δημιουργεί δομές που θα προσομοιώσουν αυτές τις ασάφειες.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα παγκόσμια συστήματα ensemble που έχουν αναπτυχθεί και που συμβάλλουν στη βάση δεδομένων του TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) :

Centre	Initial pert method (area)	Model error simul	Horizon res	Vert res	Fcst length (days)	# pert mem	#runs per day (UTC)	# mem per day	operation from*
BMRC(Australia)	SVs(NH,SH)	NO	TL119	19	10	32	2(00/12)	66	3 Sep 07
CMA (China)	BVs (globe)	NO	T213	31	10	14	2(00/12)	30	15 May 07
CPTEC(Brazil)	EOF-based (40S:30N)	NO	T126	28	15	14	2(00/12)	30	1 Feb 08
ECMWF	SVs (globe)	YES	TL399	62	0-10	50	2(00/12)	102	1 Oct 06
			TL255	62	10-15				
JMA (Japan)	BVs (NH+TR)†	NO	TL159	40†	9	50	1(12)	51	1 Oct 06
KMA(Korea)	BVs (NH)	NO	T213	40	10	16	2(00/12)	34	28 Dec 07
Meteo France	BVs(local)	NO	TL358	41	2.5	10	1(18)	11	26 Oct 07
MSC(Canada)	EnKF (globe)	YES	TL149	28	16	20	2(00/12)	42	3 Oct 07
NCEP(USA)	ET/BVs(globe)	NO	T126	28	16	20***	4(00/06/12/18)	84	5 Mar 07
UKMO(UK)	ETKF (globe)	YES	1.25x0.83deg	38	15	23	2(00/12)	48	1 Oct 06

Στην Ευρώπη ,στα μεγάλα μετεωρολογικά κέντρα τρέχουν επτά επιχειρησιακά περιοχικά συστήματα ensemble . Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα μοντέλα αυτά :

Country	Model	Mesh size (km)	Number of gridpoints	Number of levels	Initial times & Forecast ranges (h)	Type of data assimilation	Model providing LBC data
Italy (for COSMO)	COSMO-LEPS	10	306 x 258	32	12 +120h	ECMWF EPS	ECMWF EPS
Austria (for ALADIN/LACE)	ALADIN-LAEF	18	324 x 225	37	00/12 +60h	Downscaling of ECMWF SV	ECMWF EPS
Norway	LAMEPS	12	232 x 371	60	06/18 +60h	SV initial perturbation	ECMWF TEPS
United Kingdom	MOGREPS-G	90	288x217	38	00/12 +72h	Local ETKF	-
	MOGREPS-R	24	300x180	38	06/18 +54h	Regional ETKF	MOGREPS-G
France	PEARP (ARPEGE EPS)	23 -France 133 -Antipode	global	55	18 +60h	SV initial perturbation	-
Hungary (for ALADIN)	ALADIN	12	229 x 205	46	18 +60h	SV initial perturbation in PEARP	PEARP

Ευρέως διαδεδομένο είναι το προγνωστικό σύστημα ensemble του Ευρωπαϊκού μοντέλου πρόγνωσης καιρού (ECMWF) . Στο σύστημα αυτό προσομοιώνονται πιθανές αρχικές αβεβαιότητες οι οποίες προστίθενται στην ανάλυση χωρίς διαταραχές. Μέχρι και το Φεβρουάριο του 2002 50 διαταραχές υπολογίζονταν ανεξάρτητα για το Βόρειο και το Νότιο Ημισφαίριο. Ο συνδυασμός όλων των διαταραχών αποτελεί τη βάση για 50 διαφορετικές προγνώσεις οι οποίες τρέχουν με τη μισή περίπου ανάλυση από την κύρια (ντετερμινιστική) πρόγνωση.

4.6.2. Εφαρμογές του συστήματος ensemble στην πρόγνωση του ανέμου

Το project EU FP 6 PREVIEW Windstorms έχει προσφέρει μια καινούρια υπηρεσία προγνώσεων και προειδοποιήσεων για το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, ειδικά στα βόρεια και τα δυτικά. Προειδοποιήσεις αναπαράγονται για 205 συγκεκριμένες τοποθεσίες συνολικά. Τα αιολικά πάρκα επιλέχτηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι παρατηρήσεις να είναι σε καθημερινή βάση διαθέσιμες και σωστά κατανεμημένες σε περιοχές της Ευρώπης με μεγαλύτερη ευαισθησία (π.χ. κοντά σε μεγάλες πόλεις).

Ένας από τους κύριους στόχους της εργασίας ήταν να αναπτύξει ένα προ-λειτουργικό πολύ-επίπεδο μοντέλο προγνώσεων πολλαπλού δείγματος και να εκτιμήσει την απόδοση του. Χρησιμοποιήθηκαν βραχυπρόθεσμες προβλέψεις από ένα συνδυασμό περιφερειακών μοντέλων και μεσοπρόθεσμες από μια σειρά παγκόσμιων μοντέλων όπως το ECMWF, το EPS και το COSMO-LEPS. Για τη δημιουργία ενός συνδυασμένου συστήματος ensemble προγνώσεων για τις μέρες 1-2 και 3-5 , τα δεδομένα από κάθε ensemble εισήχθησαν σε ένα μεγαλύτερο υπέρ-ensemble με το κάθε ξεχωριστό ensemble να έχει τα ίδια βάρη.

Το σύστημα του Windstorm παράγει προγνώσεις τόσο μέσης ταχύτητας ανέμου όσο και ριπών ταχύτητας. Οι εκτιμήσεις των ριπών ταχύτητας παράγονταν χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο από το Meteo-France που βασίζεται στην θεωρία της τυρβώδους ροής του οριακού στρώματος. Η μέθοδος λειτουργεί καλά σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων αλλά δεν είναι κατάλληλη για την πρόβλεψη ισχυρών ανέμων λόγω μεγάλων καταιγίδων. Αυτός ο αλγόριθμος εισήχθη σε καθένα από τα ατομικά συστήματα ensemble και οι προβλέψεις των ριπών παρέχονται στη βάση δεδομένων με τον ίδιο τρόπο με τις προβλέψεις μέσης ταχύτητας του ανέμου.

Άλλες εφαρμογές του συστήματος ensemble στην πρόβλεψη του ανέμου είναι το φίλτρο Kalman το οποίο αφορά την δυναμική διάδοση σφαλμάτων των μοντέλων. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να λειτουργεί καλά μόνο σε περιπτώσεις συστημάτων χαμηλής τάξης γεγονός διόλου αποτρεπτικό για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής εν συγκρίσει με το μετεωρολογικό περιεχόμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

5.1.Εισαγωγή

Η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος οφείλεται κατά πρώτο λόγο στην στοχαστική φύση του ίδιου του ανέμου. Η μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε μια περιοχή κατά τη διέλευση μετώπων καιρού είναι συχνά ακαθόριστη, γεγονός που αναδεικνύει τη δυσκολία στην εκτίμηση των ανεμολογικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής. Επιπλέον, η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι εξίσου ακαθόριστη, καθώς η ανάλυση της ατμόσφαιρας είναι πεπερασμένη και βρίσκεται στο επίπεδο του αιολικού πάρκου και όχι στο επίπεδο της έλικας μιας ανεμογεννήτριας. Όπως είδαμε, χαρακτηριστικά του ανέμου που βασίζονται στη μεταβολή της θερμοκρασίας του κατώτερου ατμοσφαιρικού στρώματος μεταβάλλονται σε πολύ μικρότερη κλίμακα από αυτή που μπορεί να περιγράψει η τυπική μετεωρολογία και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί αριθμητικά μοντέλα καιρού υψηλής ανάλυσης (κεφ. 3.3)

Πέρα όμως από το σφάλμα στα μετεωρολογικά δεδομένα υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Μερικοί από αυτούς είναι ο ορίζοντας πρόβλεψης, η τραχύτητα του εδάφους, το επίπεδο της προβλεπόμενης ισχύος, η έκταση κλπ. Συνεπώς, η χρήση στατιστικών μεθόδων στην επίλυση της πρόβλεψης της ενέργειας του ανέμου μαζί με την συμβολή της μετεωρολογίας κρίνονται αναπόφευκτες.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τόσο τα εγγενή χαρακτηριστικά του ανέμου και η σχέση του με την αιολική ισχύ , όσο και τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος καθώς και η ανάλυση των κύριων παραγόντων που δημιουργούν αυτά τα σφάλματα.

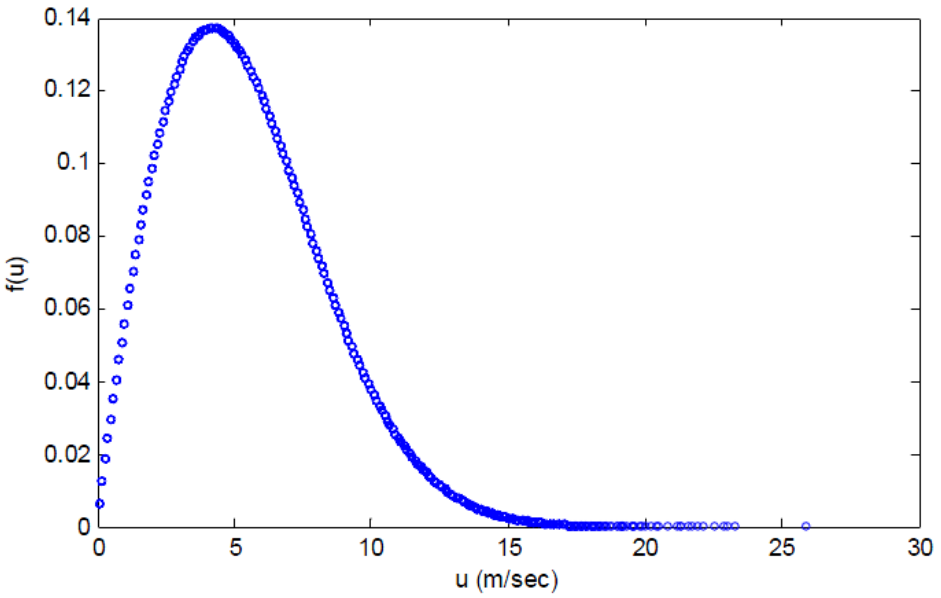
5.2.Η στατιστική κατανομή του ανέμου και η αντιστοιχία της με την κατανομή της αιολικής ισχύος

5.2.1. Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου

Άνεμος είναι το αποτέλεσμα της κίνησης αερίων μαζών οι οποίες οφείλονται στις διαφορές της πίεσης μεταξύ δύο περιοχών σε απόσταση μεταξύ τους. Οι διαφορές στην πίεση προκαλούνται από τη διαφορετική θέρμανση των περιοχών αυτών. Η συνεχής μεταβολή της φυσικής κατάστασης των διάφορων ατμοσφαιρικών στρωμάτων έχει ως συνέπεια την έντονα μεταβαλλόμενη και διακοπτόμενη φύση του ανέμου. Η εμφάνιση διαστημάτων στα οποία μεταβάλλεται απότομα τόσο η ταχύτητα όσο και η διεύθυνση του ανέμου καθιστά πολύ δύσκολη την υπολογιστική μοντελοποίηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των χρονοσειρών του ανέμου. Από διάφορες μελέτες βρέθηκε ότι η κατανομή που προσεγγίζει καλύτερα την ταχύτητα του ανέμου είναι η κατανομή Weibull:

$$f(u)= \frac{}{}\Big)^{kw-1}\exp\Big(-\Big(\frac{}{}\Big)^{kw}\Big) \qquad (5.1)$$

Η παράμετρος c_w καθορίζει το βαθμό της κατανομής και η παράμετρος k_w το σχήμα της κατανομής. Για την εκτίμηση των δύο αυτών παραμέτρων απαιτούνται δεδομένα που να καλύπτουν περίοδο αρκετών χρόνων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια εικόνα της κατανομής Weibull της ταχύτητας του ανέμου για ένα τυπικό Α/Π.



Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι ασύμμετρη προς τα δεξιά ,γεγονός που δείχνει ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι σπανιότεροι από τους ασθενείς και τους μέτριους.

Η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου σχετίζεται αποκλειστικά με τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής του Α/Π. Με βάση την κατανομή της διεύθυνσης μπορούμε να εκτιμήσουμε ποιοι άνεμοι μας δίνουν μεγάλη αιολική παραγωγή , αφού οι ισχυροί άνεμοι προέρχονται από συγκεκριμένες διευθύνσεις.

5.2.2.Μετατροπή του ανέμου σε αιολική ενέργεια

Ουσιαστικά, η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου εκφρασμένη ως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες . Οι Α/Γ δέχονται την ενέργεια του ανέμου μέσω της έλικας , η οποία αναγκάζει σε περιστροφική κίνηση τον δρομέα της γεννήτριας , ο οποίος με τη σειρά του μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η σχέση που εκφράζει την ηλεκτρική ισχύ του δρομέα , δηλαδή αντιστοιχεί την έξοδο μιας Α/Γ στην ενέργεια του ανέμου είναι:

$$P(u)=-\rho A_r C_p u^3 \qquad (5.2)$$

Όπου:

u: ταχύτητα ανέμου

ρ: πυκνότητα αέρα

A_r: επιφάνεια δρομέα

C_p: αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος καθορίζει την απόδοση της Α/Γ . Εξαρτάται από τη γωνία της έλικας και από τον λόγο της ταχύτητας του ακροπτερυγίου της έλικας προς την ταχύτητα του ανέμου. Η μέγιστη τιμή του καθορίζεται από το όριο Betz (=0.59) , το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από τον άνεμο όταν πέφτει κάθετα στο επίπεδο της έλικας. Ωστόσο , ο τυπικός αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει περίπου την τιμή 0.35, που είναι πολύ μικρότερη του ορίου, γεγονός το οποίο οφείλεται στις αεροδυναμικές απώλειες της έλικας και τις μηχανικές απώλειες της Α/Γ.

Υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός στην εξίσωση (6.2) , ο οποίος αφορά την ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα στην εξίσωση αντιστοιχεί στην ταχύτητα στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ. Ωστόσο , η ταχύτητα μεταβάλλεται με το ύψος λόγω τριβών και εμποδίων που συναντά ο άνεμος κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Από δω και πέρα το συνολικό <αποτέλεσμα>> της επιφάνειας του εδάφους που επιβραδύνει τον άνεμο, θα ονομάζεται τραχύτητα . Η εκτίμηση της τραχύτητας μιας περιοχής γίνεται με το μήκος τραχύτητας. Αν θεωρήσουμε ως z_o το μήκος τραχύτητας και z το ύψος από την επιφάνεια της γης, τότε η σχέση που δείχνει τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος είναι:

— —)$^{\alpha}$ (5.3)

όπου α σταθερά που παίρνει τιμές στο διάστημα [0.15,0.20].

Αντί της σχέσης (6.3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εναλλακτική λογαριθμική σχέση της μορφής:

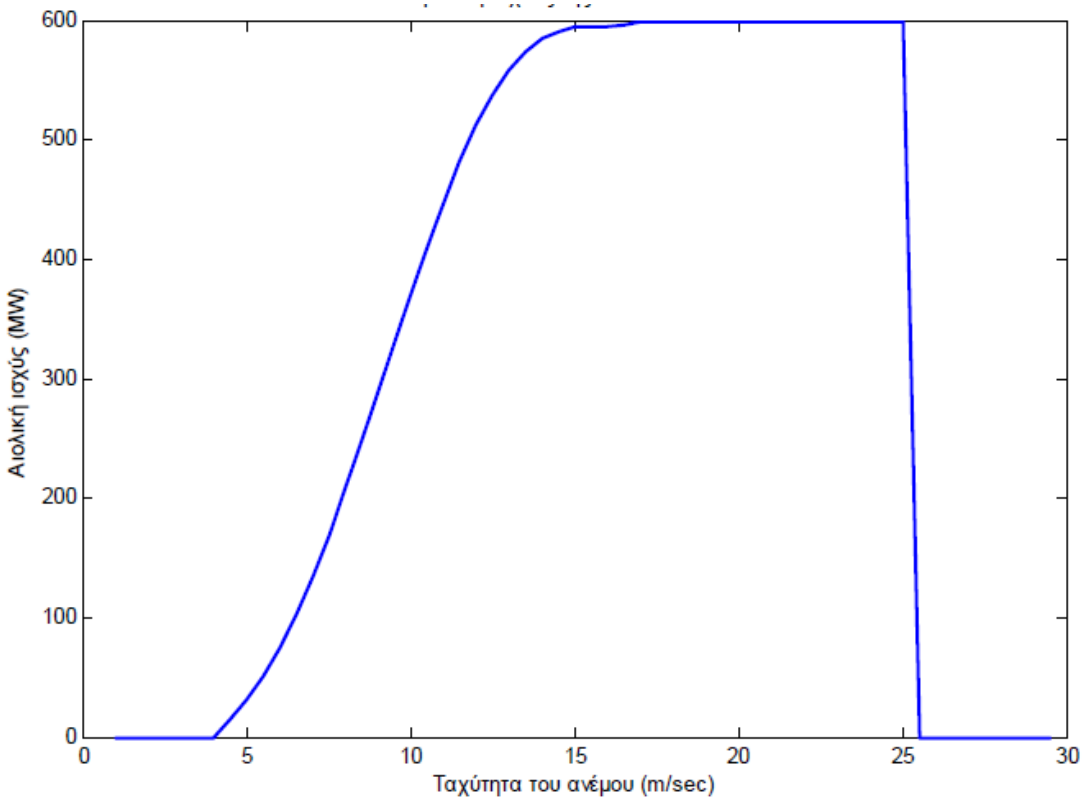
U(z)=—ln(— (5.4)

όπου κ η σταθερά von Karman που ισούται με 0.41 και u_+ η ταχύτητα τριβής , που περιγράφει το μέγεθος του στροβιλισμού της ροής του αέρα.

Η σχέση (5.4) μπορεί με μικρές μετατροπές να εφαρμοστεί ευρέως στην εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε ύψος, ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση της ˙ συγκεκριμένα χρησιμοποιείται για επίπεδες περιοχές και σταθερούς ανέμους. Για περιοχές με πιο πολύπλοκο έδαφος ή κοντά σε θαλάσσιες περιοχές όπου λαμβάνουν χώρα διάφορα θερμικά φαινόμενα, πιο επαρκής μοντελοποίηση επιτυγχάνεται με την υπολογιστική ρευστοδυναμική[κεφ. 3.3].

5.2.2.1.Η καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή

Η έξοδος μιας Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου έχει την μορφή του παρακάτω σχήματος, ονομάζεται καμπύλη ισχύος και είναι χαρακτηριστική της κάθε Α/Γ. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της Vestas V42/600:



Η καμπύλη ισχύος παρέχεται από τον κατασκευαστή είτε σε μορφή εξίσωσης είτε πίνακα , όπου για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας δίνεται η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ. Από την καμπύλη συνάγεται ότι η παραγωγή ισχύος συμβαίνει μέσα σε ορισμένα όρια ταχύτητας . Το όριο στο οποίο μια Α/Γ αρχίζει να παράγει ισχύ ονομάζεται όριο διασύνδεσης (cut-in wind speed) και αντιστοιχεί σε τιμές ταχύτητας περί τα 3-5 m/sec. Αντίστοιχα, το όριο ταχύτητας στο οποίο διακόπτεται η παραγωγή αιολικής ισχύος λόγω μηχανικών καταπονήσεων της Α/Γ ονομάζεται όριο αποκοπής (cut-off wind speed) και αντιστοιχεί σε ταχύτητες μεταξύ 25-30 m/sec. Επιπλέον, η Α/Γ παράγει την ονομαστική της ισχύ σε μια τιμή ταχύτητας μεταξύ των ορίων αυτών, συνηθέστερα μεταξύ 12-16 m/s , η οποία καλείται και ονομαστική ταχύτητα. Όπως φαίνεται από την καμπύλη , η Α/Γ παράγει την ονομαστική της ισχύ στο εύρος ταχυτήτων από την ονομαστική έως και την cut-off.

Μια ζωτικής σημασίας παρατήρηση αφορούσα την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι ότι η μεγάλη συχνότητα των ασθενών και μέτριων ανέμων όπως προκύπτει από την κατανομή Weibull ταυτίζεται με τα απότομα σημεία της καμπύλης ισχύος γεγονός το οποίο καθιστά ιδιαίτερα πολύπλοκο το ζήτημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

Η καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή είναι μια καθαρά θεωρητική προσέγγιση της μεταβολής της αιολικής ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας, καθώς έχουν γίνει σημαντικές παραδοχές για τον υπολογισμό της. Συνεπώς , η άθροιση των τιμών της ισχύος από τις καμπύλες ισχύος των Α/Γ για την εκτίμηση της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μόνο θεωρητική εκτίμηση η οποία δε συνίσταται για πειραματικούς σκοπούς. Στην πραγματικότητα, η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής μπορεί να υλοποιηθεί μόνο με προχωρημένα στατιστικά μοντέλα , τα οποία μπορούν να προσομοιώνουν καλύτερα τους παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη ισχύος του πάρκου.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι εκτίμησης της καμπύλης ισχύος είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, η μέθοδος παλινδρόμησης με διαστήματα υποστήριξης ή άλλες μέθοδοι ασαφούς

λογικής. Συμπληρωματικά στις μεθόδους αυτές χρησιμοποιούνται οι ιστορικές χρονοσειρές της παραγωγής ισχύος των υπό μελέτη πάρκων και μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου. Οι μετρήσεις της ταχύτητας προέρχονται είτε από μετεωρολογικό ιστό που είναι τοποθετημένος κοντά στο πάρκο είτε από ανεμόμετρα . Οι μετρήσεις της ισχύος λαμβάνονται από το σύστημα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ξεχωριστά για κάθε Α/Γ και στη συνέχεια αθροίζονται. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι η παραμετροποίηση της καμπύλης ισχύος δεν βασίζεται μόνο στις χρονοσειρές της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου, αλλά και σε άλλους παράγοντες όπως η διεύθυνση του ανέμου και η εποχή του έτους, έτσι ώστε να καλύπτονται και άλλα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε ένα Α/Π όπως το **φαινόμενο της σκίασης πύργου**. Η επίδραση σκίασης αναπτύσσεται σε ένα πάρκο με πολλές Α/Γ και οφείλεται στο γεγονός ότι μέρος της ενέργειας του ανέμου απορροφάται κατά την πρόσπτωση του ανέμου σε κάθε Α/Γ με αποτέλεσμα πίσω από την κάθε Α/Γ να υπάρχει μια ζώνη στροβιλισμού του ανέμου και χαμηλότερης ταχύτητάς του. Για την αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου ,οι Α/Γ πρέπει να τοποθετούνται σε ομάδες , σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους.

5.3.Σφάλματα στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος

5.3.1.Εισαγωγή

Όπως σε όλα τα συστήματα έτσι και στις προβλέψεις υπάρχει πάντα ένα ποσοστό αβεβαιότητας , το οποίο εκφράζεται με την έννοια του σφάλματος. Στον τομέα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής τα σφάλματα πρόβλεψης προκαλούν οικονομικές απώλειες στους τελικούς χρήστες και αστάθεια στους εκάστοτε διαχειριστές του δικτύου. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων είναι ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία στην πρόβλεψη , καθώς όχι μόνο καθορίζει τον βαθμό εμπιστοσύνης αλλά και παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τον χειρισμό της εκάστοτε πρόβλεψης.

Η επίδοση των μοντέλων πρόβλεψης εξαρτάται από τον τρόπο μοντελοποίησης τους αλλά και από τα χαρακτηριστικά του πεδίου εφαρμογής τους. Η οικονομική επιβάρυνση των συστημάτων πρόβλεψης επιβάλει στους τελικούς χρήστες τον καθορισμό μιας τυπικής μεθοδολογίας που θα παρουσιάζει την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης με τέτοιο τρόπο ώστε να αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα του. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ANEMOS αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία αποτίμησης αποτελούμενη από δύο προσεγγίσεις, τη μία βασισμένη σε μέτρα σφάλματος και την άλλη βασισμένη στην κατανομή του.

5.3.2.Ορισμός του σφάλματος πρόβλεψης

Σφάλμα πρόβλεψης ενός μεγέθους είναι η διαφορά της πειραματικής τιμής του όπως προκύπτει από όργανα μέτρησης και της προβλεπόμενης τιμής του όπως υπολογίζεται από το εκάστοτε μοντέλο πρόβλεψης. Η αντίστοιχη σχέση που περιγράφει το σφάλμα και η οποία αντιστοιχεί σε πρόβλεψη στις επόμενες k ώρες είναι η εξής:

$$e_{t+k/t} = \quad {}_{t+k/t} - p_{t+k/t} \qquad (5.5)$$

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων και την απόκτηση της δυνατότητας σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών Α/Π ορίζουμε το κανονικοποιημένο σφάλμα πρόβλεψης, ως το τυπικό σφάλμα διαιρεμένο με την εγκατεστημένη ισχύ του αιολικού πάρκου ενδιαφέροντος:

$$e_{t+k/t} = —(\quad {}_{t+k/t} - p_{t+k/t}) \qquad (5.6)$$

Το σφάλμα πρόβλεψης μπορεί να διαχωριστεί στο συστηματικό και στο τυχαίο σφάλμα:

$e_{t+k/t} = \mu^{\varepsilon}_{t+k/t} + \xi^{\varepsilon}_{t+k/t}$ (5.7)

όπου ο πρώτος παράγοντας είναι ο σταθερός και ο δεύτερος αντιπροσωπεύοντας το τυχαίο σφάλμα είναι μια τυχαία μεταβλητή μηδενικής μέσης τιμής. Σε ιδανικές συνθήκες το συστηματικό σφάλμα είναι μηδέν και το τυχαίο είναι λευκός θόρυβος , δηλαδή μια μεταβλητή που αντιστοιχεί σε κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής. Βέβαια , στην πραγματικότητα αυτή η προσέγγιση δεν ισχύει.

5.3.3.Μεθοδολογίες αποτίμησης σφάλματος στα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Κατά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, αβεβαιότητες στις τιμές τους παρουσιάζουν τόσο τα προβλεπόμενα όσο και τα μετρούμενα μεγέθη. Για την άμβλυνση αυτών των αβεβαιοτήτων και την εκτίμηση της ποιότητας της πρόβλεψης ως προς τη στατιστική της συμπεριφορά , κρίνεται επιβεβλημένη η θεώρηση μιας ολόκληρης περιόδου εκτίμησης που θα περιλαμβάνει πολλές σειρές προβλέψεων οι οποίες θα περιγράφουν όλα τα πιθανά εμφανιζόμενα καιρικά φαινόμενα. Όπως προείπαμε, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις κατά την εκτίμηση της ποιότητας των μεθόδων πρόβλεψης: αυτή που βασίζεται στα μέτρα του σφάλματος και αυτή που βασίζεται στην κατανομή του .

5.3.3.1.Αποτίμηση του σφάλματος βασισμένη στα μέτρα του

Η μέση τιμή μιας μεθόδου αντιστοιχεί στο συστηματικό σφάλμα και προκύπτει από όλη τη χρονική περίοδο αποτίμησης. Υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα k της πρόβλεψης από την παρακάτω σχέση:

bias(k)=— $_{t+k/t}$ (5.8)

όπου Nτ ο αριθμός των παραγόμενων προβλέψεων. Το bias ονομάζεται και κλίση του σφάλματος και αποτελεί τον πρώτο παράγοντα για την εκτίμηση της απόδοσης ενός μοντέλου πρόβλεψης. Η κλίση του σφάλματος δίνει μια αίσθηση για το αν η εφαρμοζόμενη μέθοδος υπερεκτιμά ή υποεκτιμά την προβλεπόμενη μεταβλητή. Όμως, η συνηθέστερη περίπτωση στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι η μέση τιμή του σφάλματος να είναι πολύ μικρή χάρη στη χρήση στατιστικών διαδικασιών οι οποίες το μειώνουν σχεδόν στο μηδέν. Είναι όμως απίθανο μια μέθοδος με μηδενική κλίση να δίνει τέλειες προβλέψεις. Απλούστατα όταν το bias είναι μηδενικό , οι θετικές και αρνητικές τιμές του σφάλματος αλληλοαναιρούνται.

Τα πιο διαδεδομένα μεγέθη στην αποτίμηση της ποιότητας είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα(MSE) και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος(RMSE). Οι σχέσεις που τα περιγράφουν είναι οι ακόλουθες:

MSE(k)=— $_{t+k/t})^2$ (5.9)

RMSE(k) — $_{t+k/t})^2]^{1/2}$ (5.10)

Άλλο μέτρο εκτίμησης σφάλματος είναι το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE), το οποίο είναι η μέση τιμή της απόλυτης τιμής των σφαλμάτων:

MAE(k)= — $_{t+k/t}|$ (5.11)

Τα μεγέθη MSE και RMSE φανερώνουν την συνεισφορά των θετικών και αρνητικών σφαλμάτων στην έλλειψη ακρίβειας. Η τιμή του MAE σχετίζεται με την ροπή πρώτης τάξης της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης και έτσι ως μέγεθος συνδέεται άμεσα με την παραγόμενη ισχύ. Η τιμή του RMSE σχετίζεται με τη ροπή δεύτερης τάξης και συνάμα με την μεταβλητότητα του σφάλματος πρόβλεψης. Η χρήση του RMSE ή MAE για την εκτίμηση της ποιότητας του μοντέλου εξαρτάται από την ευαισθησία των τελικών χρηστών στο σφάλμα. Αντί για τη χρησιμοποίηση του RMSE μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει την τυπική απόκλιση SDE . Η τυπική απόκλιση σχετίζεται με το τυχαίο τμήμα του σφάλματος και δίνεται από τη σχέση:

$$SDE(k)= [\text{——} \quad {}_{t+k/t}-\mu_k)^2]^{1/2} \qquad (5.12)$$

Σε αντίθεση με την τυπική απόκλιση , τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα συμβάλλουν στην τιμή τόσο του MAE όσο και του RMSE.

Τα παραπάνω μεγέθη σφάλματος είναι δυνατόν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας το σφάλμα $e_{t+k/t}$ ή το κανονικοποιημένο σφάλμα. Έτσι προκύπτουν το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα και η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος(NMAE,NRMSE).

Αξίζει προσοχής το γεγονός ότι τα σφάλματα πρόβλεψης είναι διαρκώς μεταβαλλόμενα. Δηλαδή , με δεδομένο τη μη γραμμικότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, υπάρχουν περίοδοι ή συγκεκριμένες συνθήκες ευκολότερης προβλεψιμότητας σε σχέση με άλλες. Συνεπώς, κρίνεται ορθότερο να εκτιμώνται τα μεγέθη του σφάλματος σε περιόδους που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες συνθήκες, π.χ. συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου ή συγκεκριμένη διεύθυνση.

5.3.3.2.Αποτίμηση του σφάλματος βασισμένη στην κατανομή του

Η εκτίμηση σφάλματος με βάση τα μέτρα του δε μπορεί να αποδώσει πλήρως τη συμπεριφορά του εκάστοτε μοντέλου πρόβλεψης. Για αυτό το λόγο , χρησιμοποιείται η κατανομή του σφάλματος. Η εν λόγω προσέγγιση δημιουργήθηκε για να αναδείξει τα χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Με την εφαρμογή της μεθόδου μελετάται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά των κατανομών των σφαλμάτων πρόβλεψης από συγκεκριμένες παραμέτρους(λ.χ. ταχύτητα ανέμου). Η ροπή κάθε τάξης αντιστοιχεί σε διαφορετικό χαρακτηριστικό του σφάλματος πρόβλεψης. Συνεπώς :

- Το μέσο ή κλίση $bias_k^{\ e}$ αντιστοιχεί στην κεντρική τιμή της κατανομής και δίνει πληροφορίες για το συστηματικό σφάλμα πρόβλεψης. Δίνεται από τη σχέση (5.8).
- Η τυπική απόκλιση αναδεικνύει τη διασπορά της κατανομής , οπότε καθορίζει το βαθμό αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Δίνεται από τη σχέση (5.12) όπου στη θέση του μ τοποθετείται η μεταβλητή bias.
- ${}_{\kappa}^{\ e}$ περιγράφει την έλλειψη συμμετρίας της κατανομής. Δίνει την πιο πιθανή κατεύθυνση των σφαλμάτων και μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

  $${}_{\kappa}^{\ e} = \text{————} \quad {}_{t+k/t}-bias_k)/\sigma_{\kappa}^{\ e})^3 \qquad (6.13)$$

- Η κύρτωση μας πληροφορεί για το σχήμα της δοσμένης κατανομής σε σύγκριση με την κανονική(Gaussian). Η Γκαουσιανή έχει μηδενική κύρτωση , οπότε οποιαδήποτε διαφορετική τιμή δίνει και διαφορετικό σχήμα:

  $${}_{k}^{e}=\text{————} \quad {}_{t+k/t}-bias_k)/\sigma_{\kappa}^{\ e})^4 - \text{————} \qquad (6.14)$$

5.3.3.3.Σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης

Κατά την εκτίμηση των διάφορων μοντέλων πρόβλεψης δεν είναι πάντα σαφές ποια μέθοδος είναι η καλύτερη. Η κάθε μέθοδος είναι καλύτερη από την άλλη με διαφορετικά κριτήρια σύγκρισης. Επομένως, κρίνεται επιβεβλημένο η εκτίμηση της ποιότητας να βασίζεται σε συνολική ανάλυση αποτελούμενη από ένα σύνολο μέτρων σφάλματος. Ένας τρόπος σύγκρισης των διάφορων μεθόδων είναι η χρήση του μεγέθους που ορίζεται ως βελτίωση ως προς το μοντέλο αναφοράς. Η βελτίωση αντιστοιχεί στη μείωση του σφάλματος που επιτυγχάνεται με την προηγμένη μέθοδο, για ένα δεδομένο μέτρο σφάλματος. Ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Im\ p_Y^{ref} = \qquad (5.15)$$

Στην παραπάνω σχέση k είναι το χρονικό βήμα της πρόβλεψης και Y το θεωρούμενο κριτήριο(μέτρο) σφάλματος, το οποίο αναφέρεται τόσο στην παραμένουσα τιμή του μοντέλου αναφοράς όσο και του αναπτυσσόμενου μοντέλου. Αυτό το μέτρο μπορεί να είναι το MAE,το RMSE ή το SDE. Το επιλεγμένο μοντέλο αναφοράς ονομάζεται persistence. Το persistence είναι η χρήση της πιο πρόσφατης τιμής της ταχύτητας του ανέμου ή της ισχύος ως πρόβλεψης για όλο τον επιλεγμένο χρονικό ορίζοντα. Το κριτήριο μπορεί να πάρει θετικές ή αρνητικές τιμές ανάλογα με το αν έχουμε βελτίωση ή χειροτέρευση της απόδοσης σε σχέση με το persistence. Τέλος, η σχέση (15) μπορεί να δώσει και την ποσοστιαία μεταβολή της βελτίωσης, πολλ/ζοντας το δεξί μέλος της σχέσης με το 100.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Η χρήση των νευρωνικών δικτύων στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος

6.1.Εισαγωγή

Η εκτίμηση της αιολικής παραγωγής απαιτεί διαδικασίες παραμετροποίησης του ανέμου οι οποίες υλοποιούνται ευκολότερα με τη χρήση εξελιγμένων στατιστικών μεθόδων. Όμως, ο άνεμος είναι ένα πολύπλοκο μη γραμμικό σύστημα με έντονη μεταβλητότητα , ενώ και η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος του εκάστοτε αιολικού πάρκου είναι επίσης μη γραμμική. Συνεπώς, το πρόβλημα της εκτίμησης της αιολικής ισχύος συνίσταται πρωτίστως στην εκτίμηση της ιδιαίτερης συμπεριφοράς του ανέμου σε κλίμακα που να αντιστοιχεί στην περιοχή ενδιαφέροντος και δευτερευόντως στη συσχέτιση της συμπεριφοράς αυτής με την αντίστοιχη παραγωγή του. Σε σύγκριση με άλλες μη γραμμικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό, όπως τα υπό συνθήκη αυτό-παλινδρομικά μοντέλα , τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να συλλάβουν πιο γενικευμένα τη γνώση.

Τα νευρωνικά δίκτυα αποθηκεύουν τις διάφορες μορφές στις οποίες μπορεί να εξελιχθεί μια διαδικασία και στηρίζονται αποκλειστικά στις ιστορικές χρονοσειρές του προβλήματος. Ουσιαστικά έχουν τη δυνατότητα να περιγράψουν τις σχέσεις μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου ακόμα και για άγνωστες περιπτώσεις, ωστόσο για να έχουν τη βέλτιστη δυνατή απόδοση απαιτείται μεγάλος όγκος δεδομένων για την εκπαίδευσή τους.

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν εφαρμοστεί ευρέως στην πρόβλεψη, π.χ. κατ'επανάληψη έχουν αναπτυχθεί μοντέλα με χρήση νευρωνικών δικτύων με σκοπό την πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήσαμε τους αυτό-οργανωμένους χάρτες Kohonen και τα νευρωνικά δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης ως εργαλεία για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος σε 2 αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου. Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν ως πληροφορία εισόδου για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων είναι οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και η χρονοσειρά της αιολικής παραγωγής για τα μελετούμενα πάρκα. Πριν προχωρήσουμε στη μεθοδολογία την οποία αναπτύξαμε στο μοντέλο μας είναι σκόπιμο να αναφερθούμε εκτενέστερα στη θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και των συγκεκριμένων δικτύων που εφαρμόστηκαν .

6.2.Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Νευρωνικό δίκτυο είναι ένα σύνολο νευρώνων διασυνδεδεμένων μεταξύ τους που λειτουργούν παράλληλα . Η προέλευση της κατασκευής τους είναι η ίδια η λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και κατ'επέκταση των βιολογικών νευρικών συστημάτων. Οι νευρώνες του δικτύου είναι κατηγοριοποιημένοι σε επίπεδα και αυτό γιατί το κάθε επίπεδο εκτελεί διαφορετική εργασία. Κάθε

νευρώνας επεξεργάζεται με τη βοήθεια μιας συνάρτησης μεταφοράς ένα σήμα εισόδου που μπορεί να προέρχεται , είτε από άλλους νευρώνες , είτε από την είσοδο του νευρωνικού δικτύου. Το επεξεργασμένο σήμα μεταφέρεται στη συνέχεια είτε στους νευρώνες του επόμενου επιπέδου είτε στην έξοδο του νευρωνικού δικτύου , την οποία και περιγράφει. Σε έναν απλό νευρώνα το όρισμα της συνάρτησης μεταφοράς είναι η είσοδος του πολλαπλασιασμένη με ένα διάνυσμα βάρους , το οποίο αντιπροσωπεύει τη σύνδεση του κάθε νευρώνα με τον επόμενο του. Το επεξεργασμένο σήμα που προκύπτει από την συνάρτηση μεταφοράς είναι η έξοδος του νευρώνα. Πολλές φορές , στο γινόμενο του βάρους με την είσοδο προστίθεται και ένας παράγοντας σφάλματος που ονομάζεται "bias" και αντιπροσωπεύει τυχόν αποκλίσεις στη λειτουργία του αντίστοιχου δικτύου. Τότε το όρισμα της συνάρτησης μεταφοράς είναι το άθροισμα του προηγούμενου γινομένου και του bias. Αν συμβολίσουμε με α την έξοδο του νευρώνα , με w το βάρος, με p την είσοδο , με b το σφάλμα και με f τη συνάρτηση μεταφοράς , τότε η έξοδος του απλού νευρώνα θα είναι :

$$\alpha=f(w*p+b) \qquad (6.1)$$

Η κεντρική ιδέα των νευρωνικών δικτύων είναι ότι οι παράμετροι του και συγκεκριμένα τα βάρη μεταξύ των νευρώνων του μπορούν να προσαρμόζονται έτσι ώστε το δίκτυο να παρουσιάζει κάποια επιθυμητή συμπεριφορά. Συνεπώς, μπορούμε να εκπαιδεύσουμε το νευρωνικό δίκτυο ώστε να εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία ρυθμίζοντας τα βάρη ή το bias , ή σε ορισμένες περιπτώσεις το ίδιο το δίκτυο μπορεί να μεταβάλει αυτές τις παραμέτρους επιτυγχάνοντας κάποιο στόχο. Σε κάθε περίπτωση , τα νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύονται ώστε ένα συγκεκριμένο δεδομένο εισόδου να οδηγεί σε ένα δεδομένο επιθυμητό αποτέλεσμα- στόχο. Το δίκτυο εκπαιδεύεται με βάση της σύγκριση της εξόδου με τον στόχο , έως ότου η έξοδος να πλησιάζει τελικά με το στόχο. Για την ρύθμιση των παραμέτρων απαιτούνται συνήθως πολλά δεδομένα εισόδου αλλά και στόχου , έτσι ώστε να καλύπτονται όσο το δυνατόν περισσότερες πιθανές περιπτώσεις. Με αυτό τον τρόπο ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να περιγράψει εξ ολοκλήρου ένα μη γραμμικό σύστημα. Πέρα από την ικανότητα εκμάθησης του συνόλου των περιπτώσεων που έχουν συμβεί στο παρελθόν, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν επιπλέον τη δυνατότητα γενίκευσης της πληροφορίας που περιέχουν, ώστε να μπορούν να καλύπτουν μελλοντικές περιπτώσεις για τις οποίες δεν υπάρχει προγενέστερη πληροφορία.

Ένα νευρωνικό δίκτυο, ανάλογα με τη χρησιμότητα του , μπορεί να έχει μονόμετρα ή διανυσματικά μεγέθη εισόδου, να συνίσταται σε έναν ή περισσότερους νευρώνες , οι οποίοι να οργανώνονται σε ένα η περισσότερα επίπεδα και τέλος να χρησιμοποιεί διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς κατά περίπτωση. Οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις μεταφοράς είναι η βηματική και η σιγμοειδής. Τα πιο γνωστά είδη νευρωνικών δικτύων που έχουν αναπτυχθεί είναι τα γραμμικά φίλτρα, τα δίκτυα αλγορίθμου οπισθοδρομικής διάδοσης, τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης, οι αυτό-οργανωμένοι χάρτες Kohonen , τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα, τα δίκτυα ARTMAP κλπ. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία , για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, χρησιμοποιήθηκαν ο αυτό-οργανωμένος χάρτης Kohonen και τα νευρωνικά δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης (rbf networks) και έτσι θα περιοριστούμε στην θεωρητική παρουσίαση μόνο αυτών των δύο ειδών νευρωνικών δικτύων.

7.2.1 Αυτό-οργανωμένοι χάρτες Kohonen(Self-organized Maps)

Η αυτό-οργάνωση είναι μία από τις πιο ιδιαίτερες ιδιότητες των νευρωνικών δικτύων. Τα δίκτυα αυτό-οργανωμένων χαρτών μαθαίνουν να αναγνωρίζουν ιδιαίτερες σχέσεις μεταξύ των εισόδων τους και να προσαρμόζουν μελλοντικές αποκρίσεις σε αυτές τις εισόδους. Πιο συγκεκριμένα, οι

νευρώνες του δικτύου εκπαιδεύονται έτσι ώστε να αναγνωρίζουν και να διαχωρίζουν ομάδες παρόμοιων διανυσμάτων εισόδου. Έτσι , τα δίκτυα τοποθετούν τα βάρη των νευρώνων τους με τέτοιο τρόπο στο επίπεδο ώστε οι νευρώνες να αποκρίνονται σε όμοια διανύσματα εισόδου.

Οι αυτό-οργανωμένοι χάρτες «μαθαίνουν» να ταξινομούν διανύσματα εισόδου ανάλογα με τον τρόπο που ομαδοποιούνται στο χώρο εισόδου. Οι γειτονικοί νευρώνες στον χάρτη εκπαιδεύονται ώστε να αναγνωρίζουν γειτονικά τμήματα του χώρου εισόδου. Συνεπώς, οι αυτό-οργανωμένοι χάρτες μαθαίνουν τόσο την κατανομή όσο και την τοπολογία των διανυσμάτων εισόδων στα οποία εκπαιδεύονται.

Κατά την εκπαίδευση τους, τα αυτό-οργανωμένα δίκτυα βασίζονται στον κανόνα ανταγωνιστικής μάθησης. Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, οι νευρώνες του δικτύου συναγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιος από αυτούς που θα ενεργοποιηθούν θα δώσει το αποτέλεσμα της ταξινόμησης. Δηλαδή κάθε φορά που εκτελείται ένας αυτό-οργανωμένος χάρτης μόνο ένας νευρώνας καθορίζει την έξοδο του , ο νικητής νευρώνας.

Ένας αυτό-οργανωμένος χάρτης αποτελείται από ένα επίπεδο νευρώνων οι οποίοι διατάσσονται σε ένα πλέγμα μίας ή δύο διαστάσεων ανάλογα με μια συνάρτηση τοπολογίας. Οι πιθανές τοπολογίες μπορεί να είναι η τυχαία, η εξαγωνική ή η τετραγωνική. Ο στόχος της εκπαίδευσης του δικτύου είναι να επεκτείνει το πλέγμα σε όλο το χώρο που καλύπτει το σύνολο εκπαίδευσης . Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου εκπαίδευσης η έξοδος του χάρτη είναι οι συντεταγμένες του νικητή νευρώνα πάνω στο πλέγμα.

6.2.1.1. Αλγόριθμος εκπαίδευσης των Self-organized Maps

Κάθε δείγμα εισόδου που εισέρχεται σε έναν χάρτη ενεργοποιεί μια περιοχή του πλέγματος. Οι νευρώνες ενεργοποιούνται κατά την είσοδο ενός δείγματος με τη βοήθεια της ευκλείδιας απόστασης και μιας διακριτής συνάρτησης μεταφοράς. Η διακριτή αυτή συνάρτηση εκφράζει την ανταγωνιστικότητα μεταξύ των νευρώνων. Η ευκλείδια απόσταση υπολογίζεται μεταξύ του δείγματος x και κάθε νευρώνα w_j και ο δείκτης i(x) του νικητή νευρώνα (που αποτελεί και την έξοδο του χάρτη) δίνεται από τη σχέση :

$$i(x)=\arg\min_j ||x-w_j|| \qquad \text{για κάθε } j=1,2,,\ldots m \qquad (6.2)$$

όπου m ο αριθμός των νευρώνων του χάρτη.

Κατά τη διαδικασία βέλτιστης τοποθέτησης των νευρώνων στο χώρο του συνόλου εκπαίδευσης, πρώτα γίνεται αρχικοποίηση των νευρώνων και έπειτα εκτελείται επαναληπτικά ο αλγόριθμος εκμάθησης. Η αρχικοποίηση γίνεται επιλέγοντας τυχαία δείγματα εισόδου από το σύνολο εκπαίδευσης. Μετά την αρχικοποίηση , ο αλγόριθμος εκτελείται σε 2 βήματα :

1. Φάση διάταξης : Καθορίζεται η θέση των νευρώνων στο χώρο των δεδομένων.
2. Φάση προσαρμογής: Οι νευρώνες ρυθμίζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

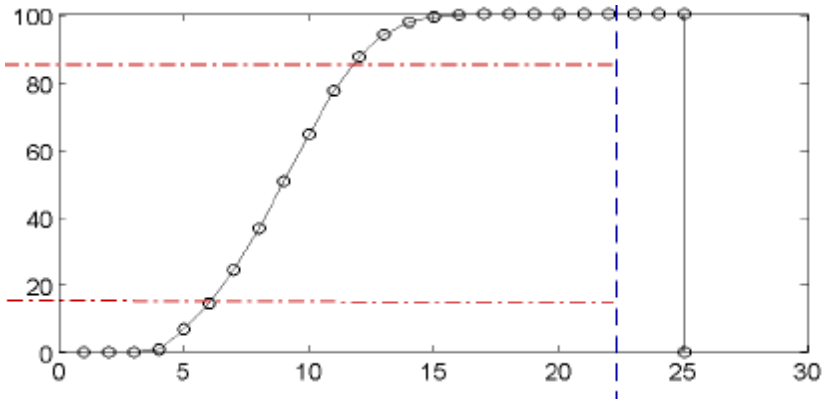
Η διαφορά των αυτό-οργανωμένων χαρτών από τα συμβατικά ανταγωνιστικά δίκτυα είναι ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες ανανεώνουν τα βάρη τους. Ενώ στα ανταγωνιστικά δίκτυα ανανεώνονται τα βάρη μόνο του νικητή νευρώνα, στα self-organized maps ανανεώνονται τα βάρη τόσο του νικητή νευρώνα όσο και των γειτόνων του. Η ακτίνα ενεργοποίησης ή γειτονιά ενεργοποίησης καθορίζεται από μια συνάρτηση που ονομάζεται συνάρτηση γειτονιάς και η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή. Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας μάθησης, επιλέγεται ένα τυχαίο δείγμα εισόδου από

το σύνολο εκπαίδευσης και ενεργοποιούνται όλοι οι νευρώνες πλησίον του τυχαίου δείγματος και εντός της γειτονιάς ενεργοποίησης. Η διαδικασία μάθησης επαναλαμβάνεται πολλές φορές σε κάθε εποχή εκπαίδευσης και ένας εμπειρικός κανόνας για τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας μάθησης είναι να είναι τουλάχιστον 500 φορές ο αριθμός των νευρώνων ώστε να πετύχουμε μια καλή στατιστική ακρίβεια.

6.2.1.2. Εφαρμογή των αυτό-οργανωμένων χαρτών στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος

Η εκπληκτική ιδιότητα των αυτό-οργανωμένων δικτύων να ταξινομούν τα διανύσματα εισόδου ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους δημιουργεί πρόσφορο έδαφος για την αξιοποίηση τους στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Έρευνες έχουν δείξει ότι η καλύτερη χρήση των δεδομένων των NWPs μπορεί να γίνει όταν οι προγνωστικές τιμές ταχύτητας ανέμου προσπελάζονται χωριστά, αφού κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το πλάτος τους. Επομένως, για τη μείωση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης κρίθηκε απαραίτητη η ταξινόμηση του συνόλου εκπαίδευσης σε διαφορετικές κατηγορίες και η εφαρμογή ενός δικτύου ακτινικής βάσης για την μοντελοποίηση της κάθε κατηγορίας. Με αυτόν τον τρόπο το κάθε δίκτυο rbf θα απαιτείται να συμπεριλάβει μικρότερο αριθμό περιπτώσεων κατά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος με βάση τα δεδομένα των NWP.

Στην εφαρμογή της εν λόγω διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε ο διαχωρισμός του συνόλου των ταχυτήτων ανέμου όπως δίνονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού , σε 3 κατηγορίες(χαμηλή , μέση , υψηλή) , αντιστοιχούσες στα τρία μέρη στα οποία μπορεί να χωριστεί η καμπύλη ισχύος ενός αιολικού πάρκου σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να «εκπαιδευθεί» το κάθε σύνολο ταχυτήτων ξεχωριστά με τη βοήθεια 3 διαφορετικών νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινικής βάσης.

6.2.2.Τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης

Ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης έχει R διανύσματα εισόδου και αποτελείται από 2 επίπεδα: ένα κρυμμένο μη γραμμικό επίπεδο αποτελούμενο από S^1 νευρώνες και ένα γραμμικό επίπεδο εξόδου αποτελούμενο από S^2 νευρώνες. Στο πρώτο επίπεδο πραγματοποιείται ταξινόμηση του συνόλου εκμάθησης σύμφωνα με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, ενώ στο δεύτερο επίπεδο γραμμικοποιείται η έξοδος του πρώτου επιπέδου με το διάνυσμα- στόχο. Το όρισμα της

ακτινικής συνάρτησης μεταφοράς του δικτύου είναι η ευκλείδια απόσταση ανάμεσα στο διάνυσμα βάρους w και το διάνυσμα εισόδου p , πολλαπλασιασμένο με το bias b.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των ακτινικών συναρτήσεων μεταφοράς είναι ότι η απόκριση τους αυξάνεται ή μειώνεται μονότονα με την απόσταση από ένα κεντρικό σημείο. Στα συγκεκριμένα δίκτυα, το κεντρικό σημείο επιλέγεται με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων , ενώ το σχήμα τους καθορίζεται από τα κριτήρια γενίκευσης. Η ακτινική συνάρτηση μεταφοράς περιγράφεται από τη σχέση :

$$randbas(n)=e^{-n^2} \quad (6.3)$$

Η συνάρτηση αυτή έχει μέγιστο 1, όταν η είσοδος είναι 0. Όσο η απόσταση μεταξύ των w και p μειώνεται, η έξοδος αυξάνεται. Έτσι ο κάθε νευρώνας του δικτύου λειτουργεί ως ανιχνευτής ο οποίος παράγει στην έξοδο την τιμή 1 όποτε η είσοδος p είναι ίδια με το διάνυσμα βάρους της.

Εναλλακτική τυπική μορφή της συνάρτησης είναι η :

$$randbas(x)=\exp(-||x-c||^2 / r^2) \quad (6.4)$$

όπου c το κεντρικό σημείο , δηλαδή η βάση της συνάρτησης με της οποίας την απόσταση μειώνεται μονοτονικά, r η ακτίνα ή το φάσμα της ακτινωτής συνάρτησης που καθορίζει το σχήμα της , ενώ το σύμβολο ||.|| συμβολίζει την ευκλείδια απόσταση. Η βάση c αντιστοιχεί σε αυτήν την περίπτωση στο διάνυσμα βάρους w.

Η απόκλιση (bias) b επιτρέπει την προσαρμογή της ευαισθησίας του κάθε νευρώνα του δικτύου rb. Για παράδειγμα, ένας νευρώνας με bias 0.1 θα παράγει έξοδο 0.5 για κάθε διάνυσμα εισόδου p με διανυσματική απόσταση 8.326 από το διάνυσμα βαρών του , w.

Το δεύτερο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου είναι, όπως προαναφέρθηκε, γραμμικό και έχει ως δεδομένα εισόδου, τα δεδομένα εξόδου του κρυφού επιπέδου πολλαπλασιασμένα με τον πίνακα βαρών των δεδομένων εξόδου και προσαυξημένα κατά την απόκλιση b. Νευρώνες του κρυφού επιπέδου με διανύσματα βαρών διαφορετικά από τα διανύσματα εισόδου παράγουν εξόδους κοντά στο 0 οι οποίες έχουν αμελητέα επίδραση στους νευρώνες του γραμμικού επιπέδου εξόδου. Αντίθετα, νευρώνες του πρώτου επιπέδου με διανύσματα βαρών πολύ κοντά στα διανύσματα εισόδου παράγουν εξόδους κοντά στο 1 και έτσι οι αντίστοιχοι νευρώνες του γραμμικού επιπέδου παίρνουν τις τιμές εξόδου των νευρώνων του πρώτου. Αυτές όμως είναι θεωρητικές περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα οι τιμές εξόδου του γραμμικού επιπέδου κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1 (ανάλογα και με το bias) και ενεργοποιούνται περισσότεροι του ενός νευρώνες σε διαφορετικό βαθμό μεταξύ τους.

6.2.2.1 Η συμβολή των δικτύων rbf στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος

Η επιλογή των rbf δικτύων ως νευρωνικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής στηρίζεται στο γεγονός ότι τα δίκτυα αυτά είναι ικανά να παράγουν μια ικανοποιητική λύση για ένα τόσο περίπλοκο μη γραμμικό πρόβλημα όπως είναι η πρόβλεψη του αιολικού φορτίου. Η ικανότητα τους αυτή οφείλεται στη δομή τους, η οποία χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμό μη επιβλεπόμενης(στο κρυφό επίπεδο) και επιβλεπόμενης(στο γραμμικό επίπεδο εξόδου) μάθησης. Στο κρυφό επίπεδο, επιτυγχάνεται η ταξινόμηση των δειγμάτων σε διαστήματα και οι πυρήνες αυτών των διαστημάτων , δηλαδή τα πιο αντιπροσωπευτικά δείγματα του συνόλου εκπαίδευσης, παράγουν τον πίνακα βαρών του κρυφού επιπέδου. Στο δεύτερο , γραμμικό, επίπεδο, το δίκτυο εκπαιδεύεται από τις πραγματικές

τιμές της αιολικής ισχύος(διάνυσμα- στόχος) . Ο συνδυασμός των δύο επιπέδων μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά την επίδραση του προβλεπόμενου ανέμου σε κάθε αιολικό πάρκο και να παράγει την έξοδο αιολικής ισχύος με μεγάλη ακρίβεια. Η ευελιξία του δικτύου RBF βασίζεται στο πρώτο του επίπεδο , οι νευρώνες του οποίου καθορίζονται από τις ευκλείδιες αποστάσεις μεταξύ των διανυσμάτων και των αντίστοιχων δειγμάτων του συνόλου εκπαίδευσης.

6.3.Μεθοδολογία νευρωνικού μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Πρώτα θα παρουσιάσουμε τη γενική περίπτωση που αφορά στην παροχή ωριαίων προβλέψεων της αιολικής ισχύος και σε άλλο κεφάλαιο θα προσαρμόσουμε τα δεδομένα για την ανά τέταρτο πρόβλεψη.

Ως δεδομένα εισόδου στο σύστημα πρόβλεψης χρησιμοποιούμε τις προγνωστικές τιμές των συνιστωσών U και V της ταχύτητας του ανέμου όπως δίνονται από το περιοχικό μοντέλο SKIRON για ένα χρονικό διάστημα 1.5 έτους (12336 ώρες). Για την καλύτερη αξιοποίηση των δεδομένων αυτών μετατρέπουμε τις συνιστώσες σε μέτρο και διεύθυνση με τη βοήθεια των τύπων :

Για το μέτρο,

$|W| = \sqrt{(V^2+U^2)}$ (6.5)

και για τη διεύθυνση ,

$<W=\arctan(-V/U)$ (6.6)

Το μέτρο δίνεται σε m/s και η διεύθυνση σε μοίρες.

Παράλληλα, ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούμε τις ιστορικές χρονοσειρές της αιολικής ισχύος για τα αιολικά πάρκα ενδιαφέροντος , όπως παρέχονται από το σύστημα SCADA , την ώρα της πρόβλεψης της ισχύος και διαμορφώνουμε επίσης ένα διάνυσμα- στόχο για την εκπαίδευση των δικτύων rbf , ο οποίος αποτελείται από τις τιμές ισχύος μια ώρα μετά τη χρονική στιγμή στην οποία γίνεται η πρόβλεψη . Σκοπός μας είναι το νευρωνικό δίκτυο να μπορεί να παρέχει μια εκτίμηση της αιολικής ισχύος μια ώρα μετά την εκάστοτε χρονική στιγμή .

Το νευρωνικό μας μοντέλο υλοποιείται σε δύο στάδια:

6.3.1. 1ο στάδιο μοντέλου

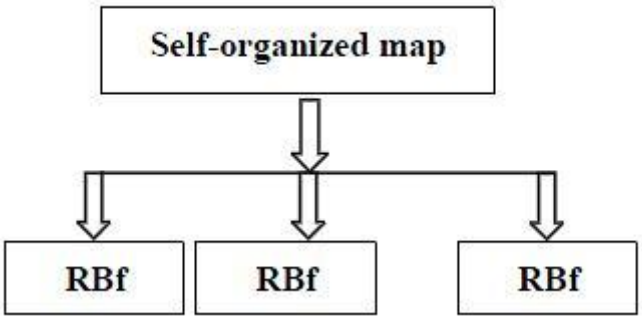
Επιλέγουμε από το σύνολο των ιστορικών ωριαίων προγνωστικών δεδομένων του ανέμου ένα σύνολο εκπαίδευσης που αποτελείται από τις πρώτες 8760 τιμές του μέτρου της ταχύτητας ανέμου (1 έτος) για καθ'ένα από τα δύο επιλεγμένα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου. Αυτό το σύνολο εκπαίδευσης είναι η είσοδος σε έναν αυτό-οργανωμένο χάρτη Kohonen , ο οποίος αποτελείται από 3 νευρώνες ταξινομημένους σε 1 επίπεδο με αρχικά τυχαία τοπολογία. Το νευρωνικό δίκτυο που κατασκευάζουμε εκπαιδεύεται με αυτό το σύνολο και παρέχει στην έξοδο τις χρονοσειρές της ταχύτητας ταξινομημένες σε 3 κατηγορίες – χαμηλές, μεσαίες, υψηλές- ανάλογα με την πρότυπη καμπύλη ισχύος του Α/Π. Για να μπορεί το δίκτυο μας να παρέχει τις σωστές τιμές ταχύτητας στις αντίστοιχες κατηγορίες , προβαίνουμε σε κανονικοποίηση του μέτρου της ταχύτητας ώστε να περιλαμβάνει μόνο το διάστημα τιμών της καμπύλης (ταχύτητες 0 και cut-off) . Η τυπική τιμή cut-off είναι 25 m/s. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ωριαία τιμή και για κάθε αιολικό πάρκο το νευρωνικό μας

δίκτυο παράγει στην έξοδο την τιμή 1 στην αντίστοιχη κατηγορία που δημιουργεί. Αυτή η έξοδος αντιστοιχεί στον νικητή – νευρώνα, ο οποίος προκύπτει από τον κανόνα ανταγωνιστικής μάθησης.

Με την ομαδοποίηση των δεδομένων είναι πλέον δυνατός ο διαχωρισμός του συνόλου εκπαίδευσης όλου του νευρωνικού συστήματος σε 3 υποσύνολα και η παροχή προβλέψεων με βάση το κάθε υποσύνολο.

6.3.2. 2^{ο} στάδιο μοντέλου

Στο μοντέλο μας, τα δίκτυα RBF δέχονται ως είσοδο την προηγούμενη τιμή της αιολικής ισχύος, τα επεξεργασμένα προγνωστικά δεδομένα του ανέμου , δηλαδή ταχύτητα και διεύθυνση , καθώς και την ώρα της πρόβλεψης. Για τη διαμόρφωση της εισόδου διαμορφώθηκαν 2 εκδοχές. Στη μία εκδοχή ενσωματώσαμε τις τιμές ταχύτητας για την ώρα που πρόκειται να γίνει η πρόβλεψη . Στην άλλη ενσωματώσαμε στην είσοδο μας 2 τιμές προβλεπόμενης ταχύτητας ανέμου , οι οποίες αντιστοιχούν στην ώρα που προβλέπεται η αιολική ισχύς και στην επόμενη της. Αυτό επιλέχθηκε διότι, λόγω της αρκετά διαλλειμματικής φύσης του ανέμου , οι προηγούμενες τιμές της αιολικής ισχύος περιέχουν λίγες σχετικές πληροφορίες και η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος εξαρτάται κυρίως από την πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος. Η δεύτερη τιμή της ταχύτητας εφαρμόζεται ώστε να καθοριστεί η μελλοντική διάθεση του ανέμου να αυξηθεί ή να μειωθεί.



Σχήμα 7.1: Απεικόνιση της δομής του νευρωνικού μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Η έξοδος του νευρωνικού μας μοντέλου δίνεται από τις παρακάτω 2 σχέσεις που αντιπροσωπεύουν τις αντίστοιχες εκδοχές :

$$P(t+1)=f(P(t),W(t+1),D(t+1),H(t+1)) \quad (6.7)$$

ή

$$P(t+1)=f(P(t),W(t+1),W(t+2),D(t+1),H(t+1)) \quad (6.8)$$

όπου P(t+1) είναι η προβλεπόμενη αιολική ισχύ, P(t) είναι η χρονοσειρά της αιολικής παραγωγής σε MW για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και σε GW για τις μακροπρόθεσμες, W είναι το προβλεπόμενο μέτρο της ταχύτητας ανέμου και D η προβλεπόμενη διεύθυνση του ανέμου , όπως δίνονται από το μοντέλο SKIRON και H είναι η ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη.

Για προβλέψεις μακρύτερες από μια ώρα μπροστά, το μοντέλο τρέχει επαναληπτικά. Πρώτα βρίσκει την κλάση της επόμενης τιμής της ταχύτητας από το SKIRON και στη συνέχεια χρησιμοποιεί την

προηγούμενη πρόβλεψη(την προηγούμενη έξοδο του μοντέλου) ως την πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος.

Παράλληλα με το διάνυσμα εισόδου διαμορφώνουμε και ένα διάνυσμα στόχο , με βάση το οποίο εκπαιδεύεται το κάθε ένα από τα 3 νευρωνικά δίκτυα Rbf . Το διάνυσμα αυτό αποτελείται από τις τιμές της ισχύος που αντιστοιχούν σε μια ώρα μετά από την ώρα της πρόβλεψης. Αυτό γίνεται για να μπορέσει να τρέξει επαναληπτικά ο αλγόριθμος εκπαίδευσης για όλες τις ώρες του δείγματος τιμών που έχουμε επιλέξει. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνονται 3 υποσύνολα εκμάθησης, με κάθε ένα από τα οποία εκπαιδεύεται ένα ξεχωριστό δίκτυο rbf. Έτσι , τα δίκτυα rbf μαθαίνουν να διαχειρίζονται περισσότερες δύσκολες περιπτώσεις πρόβλεψης για τις οποίες οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι ανακριβείς.

Εφόσον το μοντέλο μας απευθύνεται σε βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, τα δεδομένα ισχύος της μεταβλητής- στόχου διαιρούνται με το 1000. Με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου εκπαίδευσης, χρησιμοποιήσαμε κάθε φορά ένα μικρό μόνο δείγμα από το συνολικό των 12336 ωρών. Μετά από αρκετές δοκιμές βρέθηκε ότι βέλτιστη απόδοση κατά την εκτέλεση μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση 2000 ωριαίων δειγμάτων.

6.3.2.1.Κατασκευή των δικτύων rbf

Όπως είναι γνωστό ,τα δίκτυα rbf αποτελούνται από δύο επίπεδα, το πρώτο κρυμμένο μη γραμμικό και το δεύτερο , το γραμμικό επίπεδο εξόδου. Η επιλογή των διανυσμάτων που λογίζονται ως νευρώνες στηρίζεται στην μέγιστη απόσταση τους από άλλα διανύσματα που περιέχονται στο σύνολο εκπαίδευσης. Στην αρχή της φάσης εκπαίδευσης, το πιο απομονωμένο διάνυσμα θεωρείται ως ο πρώτος νευρώνας του κάθε δικτύου , ενώ το πιο απομακρυσμένο διάνυσμα από τον πρώτο νευρώνα λαμβάνει τον ρόλο του δεύτερου νευρώνα. Ο τρίτος νευρώνας είναι το πιο απομακρυσμένο διάνυσμα του συνόλου εκπαίδευσης από τους άλλους δύο νευρώνες και αυτή η διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά για την διαμόρφωση των νευρώνων του δικτύου. Κατά τη φάση της επικύρωσης, υπολογίζεται η απόσταση του διανύσματος εισόδου από τον σταθμισμένο πίνακα εισόδου , το αποτέλεσμα περνάει στην Gaussian συνάρτηση μεταφοράς του δικτύου και στη συνέχεια διαμορφώνεται η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου. Η συνάρτηση μεταφοράς έχει την ακόλουθη μορφή:

f(x)= (6.9)

και η έξοδος του κρυφού επιπέδου είναι :

$\alpha=f(\quad -P_j)^2 * b)$ (6.10)

όπου $IW_{i,j}$ ο σταθμισμένος πίνακας , b το bias , P το διάνυσμα εισόδου , n το μέγεθος του διανύσματος εισόδου και i ο αριθμός των νευρώνων. Το bias συνδέεται άμεσα με την παράμετρο διασποράς ‘spread’ . Συγκεκριμένα ,ισχύει η σχέση :

b=0.8326/spread (6.11)

όπου η τιμή του spread καθορίζεται πριν από την εκπαίδευση του δικτύου συνάρτησης ακτινικής βάσης και συσχετίζεται αλγεβρικά με τη μέση τιμή του συνόλου εκπαίδευσης.

Από την εξίσωση (6.10) γίνεται φανερό ότι οι μεταβλητές εισόδου με τιμές πλάτους ανώτερης τάξης επηρεάζουν περισσότερο την έξοδο του δικτύου. Αυτή η διαπίστωση εξηγείται από το γεγονός ότι

όταν το εύρος τιμών μιας μεταβλητής μέσα στο διάνυσμα εισόδου είναι μεγάλη, εξίσου μεγάλες θα είναι και οι αποστάσεις της τιμής της από άλλες μεταβλητές. Συνεπώς, μια τέτοια μεταβλητή θα παράγει μεγαλύτερες διακυμάνσεις στον υπολογισμό της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του διανύσματος εισόδου και του πίνακα βαρών. Μέσω αυτής της ιδιότητας των rbf δικτύων παρέχεται η δυνατότητα να επηρεάσουμε το αποτέλεσμα ορισμένων μεταβλητών εισόδου. Στην εφαρμογή μας , αυτή η ιδιότητα αξιοποιείται ως ακολούθως :

Σε επίπεδο βραχυπρόθεσμων προβλέψεων , οι ιστορικές τιμές της αιολικής ισχύος δεν επηρεάζουν στον ίδιο βαθμό την πρόβλεψη σε σχέση με τις προβλεπόμενες τιμές της ταχύτητας του ανέμου όπως δίνονται από τα NWP. Ωστόσο , υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες τα αριθμητικά μοντέλα καιρού αποδεικνύονται ανεπαρκή και η αιολική ισχύς (εκφρασμένη σε MW) έχει την ίδια επιρροή με τις ταχύτητες του ανέμου. Στο προτεινόμενο μοντέλο το διάνυσμα εισόδου περιέχει δύο τιμές της ταχύτητας ανέμου , μία που αντιστοιχεί στην ώρα που γίνεται η πρόβλεψη και μία άλλη που αντιστοιχεί σε μία ώρα μετά από αυτήν. Η πρώτη τιμή της ταχύτητας έχει μεγαλύτερη μαθηματική σημασία στην πρόβλεψη και συνεπώς εφαρμόζεται στο διάνυσμα εισόδου της εκπαίδευσης του δικτύου με μια τάξη μεγέθους παραπάνω σε σχέση με την άλλη τιμή της ταχύτητας και την αιολική ισχύ. Οι άλλες είσοδοι του δικτύου τίθενται στην ίδια τάξη μεγέθους με τις τιμές της αιολικής ισχύος. Παράλληλα , η μεταβλητή που αντιστοιχεί στις ώρες της πρόβλεψης τίθεται σε μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Συνεπώς, το διάνυσμα εισόδου του δικτύου rbf κανονικοποιείται με βάση αυτά τα δεδομένα και η σχέση (6.10) αναδιαμορφώνεται ως εξής :

$$P(t+1)=f(P(t),W(t+1)*20,W(t+2)*10,D(t+1),H(t+1)/480) \qquad (6.12)$$

όπου τα σύμβολα αντιστοιχούν στις μεταβλητές όπως και στη σχέση (6.7).

Για μακροπρόθεσμους ορίζοντες, τα αριθμητικά μοντέλα καιρού είναι η κύρια πηγή προγνωστικής πληροφορίας και έτσι λογίζονται ως το βασικό δεδομένο για να προκύψει μια αποδοτική πρόβλεψη. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές της αιολικής ισχύος εκφράζονται σε GW και η επίδραση της αιολικής ισχύος μειώνεται στο ελάχιστο.

6.3.2.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης των παραμέτρων εισόδου του δικτύου rbf

Για την καλύτερη εκτίμηση των παραμέτρων που εισάγουμε στην είσοδο του δικτύου rbf(ταχύτητα ανέμου και αιολική ισχύς) και του βαθμού που επηρεάζει η κάθε μια την πρόβλεψη, κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης . Με αυτόν τον τρόπο δε χρειάστηκε να προβούμε σε κανονικοποιήσεις των διάφορων διανυσμάτων εισόδου ,όπως στη σχέση (6.12) , ώστε να αναδείξουμε το ποσό επιρροής της κάθε παραμέτρου , καθώς αυτή η διαδικασία εκτελέστηκε από τον ίδιο τον αλγόριθμο.

Η μέθοδος PSO

Στην εφαρμογή μας, ο επιλεγόμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι η **μέθοδος PSO.** Η μέθοδος PSO είναι μια υπολογιστική μέθοδος η οποία βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα μέσω της επαναληπτικής βελτίωσης ενός μεγέθους, το οποίο καλείται «υποψήφια λύση» και αναφέρεται σε ένα δοσμένο μέτρο ποιότητας. Για την βελτιστοποίηση του κάθε προβλήματος, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός αρκετά μεγάλου πληθυσμού από υποψήφιες λύσεις, οι οποίες μετακινούνται στο χώρο αναζήτησης σύμφωνα με μια απλή μαθηματική εξίσωση , που συνδέει τις θέσεις και την ταχύτητα των υποψηφίων λύσεων. Η μετακίνηση του κάθε υποψηφίου επηρεάζεται από την πιο γνωστή θέση του καθώς και από την πιο γνωστή θέση ολόκληρου του πληθυσμού και τελικά ο κάθε υποψήφιος

οδηγείται σε μια καλύτερη θέση εντός του πλαισίου αναζήτησης. Αφού εντοπιστούν καλύτερες θέσεις για όλους τους υποψηφίους, αυτές οι θέσεις καθοδηγούν στη συνέχεια τις κινήσεις του πληθυσμού. Η μέθοδος PSO εφαρμόστηκε για πρώτη φορά με στόχο την προσομοίωση της κίνησης μίκρο-οργανισμών σε ομάδες.

Ο αλγόριθμος PSO ελαχιστοποιεί μια δοσμένη συνάρτηση κόστους, έστω f. Η συνάρτηση αυτή παίρνει ως όρισμα μία υποψήφια λύση με τη μορφή ενός διανύσματος πραγματικών αριθμών και παράγει στην έξοδο έναν πραγματικό αριθμό , ο οποίος αντιστοιχεί στην τιμή της συνάρτησης κάθε δοσμένης υποψήφιας λύσης. Στόχος του αλγορίθμου σε κάθε επανάληψη είναι η εύρεση ενός υποψηφίου a για τον οποίο ισχύει $f(a) \leq f(b)$ για όλους τους υποψηφίους b στο χώρο αναζήτησης, δηλαδή το a είναι ολικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.

Έστω ότι S είναι ο αριθμός των υποψήφιων λύσεων του επιλεγμένου πληθυσμού , όπου κάθε υποψήφιος κατέχει μια θέση x_i μέσα στο χώρο αναζήτησης και έχει μια ταχύτητα v_i. Έστω ότι p_i είναι η πιο γνωστή θέση του υποψηφίου i και ότι g είναι η πιο γνωστή θέση όλου του πληθυσμού. Τότε ο βασικός τρόπος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι ο εξής:

- Για κάθε υποψήφιο i=1….S :
    1. Αρχικοποιείται η θέση του υποψηφίου με ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο διάνυσμα: $x_i \sim U(lower,upper)$ όπου lower και upper, είναι το άνω και κάτω όριο του χώρου αναζήτησης.
    2. Αρχικοποιείται η πιο γνωστή θέση του υποψηφίου στην αρχική του θέση: $p_i \leftarrow x_i$
    3. Αν $f(p_i)<f(g)$ τότε η πιο γνωστή θέση όλου του πληθυσμού είναι πλέον η p_i
    4. Αρχικοποιείται η ταχύτητα του κάθε υποψηφίου: $v_i \sim U(-|upper-lower|,|upper-lower|)$.
- Μέχρι να ικανοποιηθεί ένα συγκεκριμένο κριτήριο τερματισμού(π.χ. να βρεθεί μια λύση με επαρκή τιμή συνάρτησης κόστους) επαναλαμβάνονται τα εξής για κάθε υποψήφιο i:
    5. Επιλέγονται τυχαίοι αριθμοί: $r_p,r_g \sim U(0,1)$
       Για κάθε διάσταση d=1,….,n:
    6. Ανανεώνεται η ταχύτητα του υποψηφίου: $v_{i,d} \leftarrow \omega v_{i,d} + \phi_p r_p(\phi_{i,d}-x_{i,d})+\phi_g r_g(g_d-x_{i,d})$
    7. Ανανεώνεται η θέση του υποψηφίου: $x_i \leftarrow x_i+v_i$
    8. Αν $f(x_i)<f(p_i)$ τότε:
    9. Τότε η πιο γνωστή θέση του υποψηφίου είναι πλέον η x_i
    10. Αν $f(p_i)<f(g)$ τότε η πιο γνωστή θέση του πληθυσμού είναι η p_i .

Η p_i είναι η βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Οι παράμετροι ω, ϕ_p και ϕ_g επιλέγονται από τον χρήστη και ελέγχουν την συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου PSO.

Εφαρμογή της μεθόδου PSO στο νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης

Τα δίκτυα rbf είναι μη παραμετρικά μοντέλα και έτσι τα βάρη τους δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη σημασία στο πρόβλημα στο οποίο εφαρμόζονται. Η εκτίμηση των τιμών των βαρών ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής συνάρτησης βάσης δεν είναι ποτέ ο πρωταρχικός στόχος στην επιβλεπόμενη μάθηση. Αντίθετα, πρωταρχικός στόχος είναι η εκτίμηση της συνάρτησης εξόδου του μοντέλου με βάση συγκεκριμένες επιθυμητές τιμές της εισόδου. Στη προκειμένη περίπτωση, στόχος μας είναι η εκτίμηση της αιολικής ισχύος μια ώρα μετά(και στο τελικό μοντέλο ένα τέταρτο μετά) κάθε φορά από την χρονική στιγμή για την οποία διαθέτουμε δεδομένα αιολικής ισχύος. Όμως εκτός από την

εκτίμηση της προβλεπόμενης αιολικής ισχύος είναι απαραίτητη η παραμετροποίηση των διάφορων μεταβλητών εισόδου με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί το νευρωνικό μας δίκτυο να αναγνωρίζει ποια μεταβλητή εισόδου επηρεάζει περισσότερο το αποτέλεσμα. Στην προκειμένη περίπτωση , ενσωματώνουμε εκτός από την ώρα της πρόβλεψης, 3 μεταβλητές εισόδου , οι οποίες είναι το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου , η διεύθυνση του ανέμου και η πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος. Από αυτές, μεγαλύτερη επιρροή στο σφάλμα της πρόβλεψης φαίνεται να έχει το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου , καθώς τα αριθμητικά μοντέλα καιρού παρέχουν συχνά ανακριβείς προβλέψεις.

Στη συνέχεια, χωρίζουμε το σύνολο εκμάθησης καθενός εκ των 3 δικτύων rbf που εκπαιδεύουν τις διάφορες κατηγορίες του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου σε 3 διαφορετικά υποσύνολα, το υποσύνολο εκπαίδευσης, το υποσύνολο επικύρωσης και το υποσύνολο αποτίμησης. Από αυτά, το υποσύνολο εκπαίδευσης είναι κατά περίπτωση το 50 ή το 70% του συνόλου εκμάθησης και τα άλλα δύο υποσύνολα μοιράζονται το υπόλοιπο ποσοστό. Ουσιαστικά , το υποσύνολο επικύρωσης και το υποσύνολο αποτίμησης συνιστούν το σύνολο αξιολόγησης. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται για να μπορεί το κάθε δίκτυο rbf να αναγνωρίζει περιπτώσεις καιρικών συνθηκών για τις οποίες δεν έχει εκπαιδευτεί, ώστε να μπορεί να παράγει πρόβλεψη με βάση πραγματικά on-line δεδομένα ταχύτητας ανέμου.

Εφόσον χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που περιγράψαμε μόλις παραπάνω, η παραμετροποίηση των μεταβλητών εισόδου σύμφωνα με τη σχέση (6.12) δεν είναι απαραίτητη και η είσοδος στο κάθε ένα από τα 3 δίκτυα rbf αναδιαμορφώνεται ως εξής:

$$I=[W(t+1),D(t+1),P(t+1),H(t+1)*100] \qquad (6.13)$$

Ως κατώτερο όριο του χώρου αναζήτησης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης τίθεται μια πολύ μικρή τιμή της τάξεως του 10^{-15} και ως ανώτερο όριο τίθεται η μέση τιμή του υποσυνόλου εκπαίδευσης πολλαπλασιασμένη με το 10^{4}. Ο αρχικός πληθυσμός του αλγορίθμου τίθεται ίσος με την παράμετρο 'spread'(ενότητα 6.3.2.1) η οποία εξαρτάται και αυτή αλγεβρικά από τη μέση τιμή του υποσυνόλου εκπαίδευσης. Ο αριθμός των υποψηφίων λύσεων επιλέγεται να είναι ίσος με 32 και ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της διαδικασίας βελτιστοποίησης 356. Οι αριθμοί που επιλέχθηκαν εξαρτώνται από το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης , το οποίο αποτελείται από 2000 δείγματα.

Ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί 3 βασικά κριτήρια , τα οποία είναι γνωστά και ως κριτήρια επιλογής μοντέλου(model selection criteria) και είναι το κριτήριο αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων(SSE), το κριτήριο Bayesian πληροφορίας(BIC) και το κριτήριο της γενικευμένης σταυρωτής επικύρωσης(GCV). Αν η περιγραφή του νευρωνικού δικτύου rbf δίδεται από τη σχέση :

$$f(x)= \quad w_j\, h_j(x) \qquad (6.14)$$

όπου h η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ακτινωτής βάσης και w τα βάρη του δικτύου , και αν $\{(\mathbf{x}_i, \ _i)\}^{p}_{i+1}$ το σύνολο εκπαίδευσης τότε το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων ορίζεται ως:

$$S= \qquad ^{2} \qquad (6.15)$$

Μετασχηματίζοντας την εξίσωση (6.14) ώστε να έχει την μορφή πινάκων έχουμε:

$$A \quad =H^{T} \qquad (6.16)$$

όπου A μηδενικός πίνακας εκτός από τα στοιχεία της διαγωνίου που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους κανονικοποίησης , το διάνυσμα του υποσυνόλου εκπαίδευσης και το διάνυσμα βαρών που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους. Ορίζουμε τον πίνακα προβολής P ως ακολούθως:

$$P=I_p-H\,A^{-1}\,H^T \qquad (6.17)$$

όπου p το πλήθος των διαστάσεων του χώρου αναζήτησης. Τότε το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος εκφράζεται ως:

$$= {}^{T}P^{2} \qquad (6.18)$$

Η συνάρτηση της γενικευμένης σταυρωτής επικύρωσης ορίζεται τότε ως εξής:

$$\sigma^2_{GCV} = \frac{\quad}{\quad} \qquad (6.19)$$

Το GCV εντάσσεται σε μια μεγαλύτερη κατηγορία κριτηρίων των οποίων η διαμόρφωση προκύπτει από μια προσαρμογή του μέσου τετραγωνικού σφάλματος στο σύνολο εκπαίδευσης. Τέλος , το κριτήριο Bayesian πληροφορίας(BIC) ορίζεται με ανάλογο τρόπο ως :

$$^{2}_{BIC} = \frac{\quad}{\quad}\,\frac{\quad}{\quad} \qquad (6.20)$$

όπου γ=p-trace(P) .

Τα κριτήρια επιλογής μοντέλου είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, διότι είναι ικανά να διαλέγουν το νευρωνικό μοντέλο με τον καλύτερο δυνατό αριθμό νευρώνων και με την καλύτερη δυνατή αποτελεσματικότητα, δηλαδή υποδεικνύουν το νευρωνικό μοντέλο που περιέχει την απαιτούμενη γνώση ώστε να συλλάβει όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις γίνεται. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι το μέσο απόλυτο σφάλμα(NMAE) που ορίσαμε για κάθε ένα από τα δίκτυα rbf ελαχιστοποιείται με διαφορετικό αριθμό νευρώνων από αυτόν στον οποίο ελαχιστοποιούνται τα κριτήρια GCV και BIC και φυσικά επιλέγουμε κάθε φορά τον αριθμό νευρώνων που υποδεικνύει η ελαχιστοποίηση αυτών των κριτηρίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Η μείωση του χρονικού βήματος πρόβλεψης σε 15 λεπτά

7.1.Εισαγωγή

Η ασφαλής χρήση της αιολικής ενέργειας για την τροφοδοσία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επιτάσσει την επίλυση ορισμένων τεχνικών προβλημάτων που είναι συνδεδεμένα με την μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με την επιτρεπόμενη διείσδυση αιολικής ισχύος στο δίκτυο, τις δεσμεύσεις μονάδων συμβατικής παραγωγής, την εφεδρεία, την αξιοπιστία και φυσικά το κόστος. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί , όσο ακριβέστερες είναι οι προβλέψεις των ταχυτήτων ανέμου , τόσο πιο μεγάλο μπορεί να είναι το ποσοστό διείσδυσης της αιολικής ενέργειας και τόσο χαμηλότερο το κόστος. Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι δυνατόν να επιτευχθεί με χρονικό ορίζοντα 1 λεπτού, 10 λεπτών, 15 λεπτών ή μίας ή μερικών ωρών μπροστά. Γενικά. η επιλογή του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης εξαρτάται από 2 βασικούς παράγοντες :

1. Από την απαίτηση για την ενημέρωση ή τον προγραμματισμό ενός αιολικού πάρκου
2. Από την απαίτηση για συνεργασία με τα άλλα συμβατικά μέσα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επί της ουσίας, ο χρονικός ορίζοντας που καλύπτει η εκάστοτε πρόβλεψη αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εκτέλεση των δύο παραπάνω διαδικασιών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, εκτελείται βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος έτσι ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης περιορίζεται στις 48 ώρες.

Όσον αφορά στο χρονικό βήμα της πρόβλεψης, αυτό καθορίζεται πάντοτε από τον χρήστη. Στα πλαίσια της εφαρμογής μας, κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή του χρονικού βήματος πρόβλεψης στα 15 λεπτά. Αυτή η επιλογή έγινε για 2 λόγους. Ο ένας λόγος , ο οποίος δεν είναι τόσο σημαντικός , είναι ότι τα δεδομένα SCADA των μετρήσεων αιολικής ισχύος δίνονται σε ανά τέταρτο τιμές. Βέβαια, σε

περίπτωση ωριαίας πρόβλεψης, είναι σχετικά απλό να μετατρέψουμε τα δεδομένα σε τιμές ανά ώρα. Ο δεύτερος λόγος , που είναι και ο σημαντικότερος , αφορά στην όσο το δυνατόν ακριβέστερη απεικόνιση των καιρικών συνθηκών σε τοπική κλίμακα και συγκεκριμένα στην περιοχή των αιολικών πάρκων. Τα μετεωρολογικά δεδομένα ανέμου παρέχονται από το SKIRON σε ωριαία βάση, κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχει σαφής εικόνα της εξέλιξης του καιρού κατά τη χρονική περίοδο στην οποία απευθύνονται οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Πιθανές απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου λόγω μεταβολών της πίεσης και λόγω διέλευσης βίαιων μετώπων καιρού είναι πιθανό να μην απεικονίζονται στις ωριαίες τιμές της ταχύτητας. Συνεπώς, αναζητήθηκε ένας τρόπος εκτίμησης των ενδιάμεσων ταχυτήτων του ανέμου , ώστε να μπορούμε να συλλάβουμε περισσότερες καιρικές μεταβολές από αυτές που μπορεί να συλλάβει το SKIRON. Επειδή τα δεδομένα ισχύος δίδονται σε ανά τέταρτο τιμές, επιλέχθηκε λοιπόν η εκτίμηση των ανά τέταρτο ταχυτήτων του ανέμου με δεδομένες τις ωριαίες παρατηρήσεις και συνεπώς αυτό καθορίστηκε και ως το χρονικό βήμα της πρόβλεψης στην εφαρμογή μας.

Για την εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή των αιολικών πάρκων , αναπτύξαμε έναν αλγόριθμο ο οποίος αρχικά επιχειρεί να εκτιμήσει την διάδοση μετώπων καιρού εντός της περιοχής ενδιαφέροντος σε ωριαία βάση και στη συνέχεια υπολογίζει προσεγγιστικά τις ενδιάμεσες τιμές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου με τη χρήση μεθόδων γραμμικής παρεμβολής. Ο αλγόριθμος αυτός θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια.

7.2.Εκτίμηση της ταχύτητας και διεύθυνσης διάδοσης μετώπων αέρα

7.2.1. Γενικά

Το 2011 η UNSW ανέπτυξε ένα πρωτότυπο εργαλείο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με στόχο την εκτίμηση πιθανών μεγάλων και απότομων αλλαγών στην αιολική παραγωγή ενός ή περισσότερων αιολικών πάρκων , γεγονός το οποίο θα συνέβαλε στην διαχείριση της ασφάλειας του εκάστοτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στα πλαίσια της μεθοδολογίας του μοντέλου αποφασίστηκε η εκμετάλλευση των δυνατών σημείων των NWP σε συνδυασμό με την καλύτερη κατανόηση των αδυναμιών τους κατά την πρόβλεψη μεγάλων και απότομων αλλαγών του αιολικού φορτίου. Για την ανάπτυξη του πρωτότυπου εργαλείου χρησιμοποιήθηκαν προβλέψεις ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου σε πολλαπλά πλεγματικά σημεία του NWP, πάνω από μια περιοχή που περιβάλλει το αιολικό πάρκο ενδιαφέροντος. Το πλεονέκτημα αυτής της επιλογής έναντι πιο συμβατικών μεθόδων που χρησιμοποιούν προβλέψεις καιρού σε ένα μόνο πλεγματικό σημείο , είναι ότι μειώνεται το σφάλμα δειγματοληψίας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού καθώς και το σφάλμα μετατόπισης των μετώπων διαφορετικών ανεμολογικών χαρακτηριστικών. Το πρωτότυπο εργαλείο αναπαράγει τις παρακάτω προγνωστικές πληροφορίες:

- Προειδοποιήσεις για μεγάλες και απότομες αλλαγές στο αιολικό φορτίο σε ένα συγκεκριμένο αριθμό αιολικών πάρκων
- Πρόσθετες προγνωστικές πληροφορίες για πιθανή μελλοντική συμπεριφορά του αιολικού φορτίου για κάθε περίοδο προειδοποίησης.

Στα πλαίσια της ανάπτυξης του ερευνητικού προγράμματος αναπαράχθηκε ένα σύνολο λειτουργικών διαδικασιών , οι οποίες περιελάμβαναν την μοντελοποίηση των εδαφικών χαρακτηριστικών, την εκτίμηση της διάδοσης μετώπων αέρα στην περιοχή ενδιαφέροντος, την μετατροπή των προβλεπόμενων ταχυτήτων ανέμου σε αιολική ισχύ , την ανάπτυξη σεναρίων χρονοσειρών και

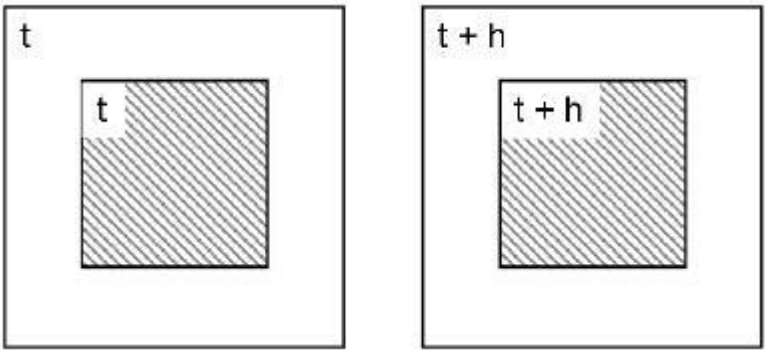
φυσικά την ανάπτυξη προειδοποιήσεων για πιθανές μελλοντικές απότομες μεταβολές του αιολικού φορτίου. Στην δική μας εργασία επικεντρωνόμαστε στον τρόπο εκτίμησης της διάδοσης ανεμολογικών χαρακτηριστικών , καθώς η εν λόγω μεθοδολογία αποτελεί μέρος του αναπτυσσόμενου αλγορίθμου για την μετατροπή των ωριαίων προβλέψεων σε ανά τέταρτο.

7.2.2.Ο αλγόριθμος εκτίμησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης διάδοσης μετώπων αέρα

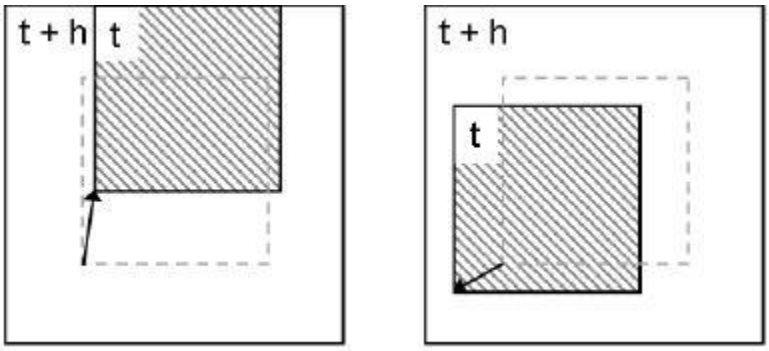
Η επιτυχής εκτίμηση της διάδοσης μεταβλητών χαρακτηριστικών του ανέμου μέσα στο πλεγματικό πεδίο των NWP μπορεί να συμβάλει στην αναπαραγωγή πολλαπλών σεναρίων χρονοσειρών για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Στη συνέχεια, αυτές οι χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προειδοποιήσεων για πιθανές απότομες μεταβολές στην αιολική παραγωγή. Πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας μεθόδου μοντελοποίησης των εδαφικών χαρακτηριστικών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προσεγγίζει τη μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου λόγω των χαρακτηριστικών του εδάφους και να την αποκλείει από δεδομένο εισόδου στον αλγόριθμο εκτίμησης της διάδοσης, ενώ παράλληλα διατηρεί τη μεταβλητότητα της ταχύτητας που οφείλεται σε καιρικά φαινόμενα. Με αυτή τη διαδικασία καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου ανίχνευσης , ο οποίος ανιχνεύει την κίνηση των πιο σημαντικών ανεμολογικών χαρακτηριστικών μεταξύ ενός πεδίου και του επόμενου του.

Ο αναπτυσσόμενος για το πρωτότυπο εργαλείο αλγόριθμος είναι σχεδιασμένος για να συγκρίνει 2 διαδοχικά πεδία προβλεπόμενων τιμών ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Ο στόχος του είναι η εκτίμηση της διάδοσης των χαρακτηριστικών του ανέμου και όχι της ίδιας της ταχύτητας και της διεύθυνσης, συνεπώς επί της ουσίας ο αλγόριθμος υπολογίζει τις μεταβολές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου μεταξύ των πεδίων.

Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου πρέπει να οριστούν 2 πεδία. Το ένα πεδίο , που είναι το μικρότερο ,αποτελείται από μια περιοχή που εμπεριέχει τα 2 αιολικά πάρκα ενδιαφέροντος[βλέπε κεφάλαιο 8] και η οποία καλύπτεται φυσικά από τα διαθέσιμα από το μοντέλο SKIRON δεδομένα της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Το άλλο πεδίο , που είναι το μεγαλύτερο , ορίζεται από μία μεγαλύτερη περιοχή και αυτό επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις οριακές συντεταγμένες του πλαισίου. Μια ενδεικτική εικόνα της θέσης των δύο πεδίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Ο αλγόριθμος μας μετατοπίζει το μικρό πεδίο σε σχέση με το μεγάλο σε ωριαία βάση , εκτελώντας μια διαδικασία αναζήτησης για να εντοπίσει την ελάχιστη τετραγωνική διαφορά μεταξύ των επικαλυπτόμενων(δεν είναι σίγουρο αν θα είναι τα επικαλυπτόμενα ή όλα)πλεγματικών σημείων μεταξύ του μικρού πεδίου τη χρονική στιγμή t και του ίδιου πεδίου, όπως έχει μετατοπιστεί τη χρονική στιγμή t+h (όπου h=1 ώρα). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται διάφορες χρονικές μετατοπίσεις του μικρού πεδίου μέσα στο μεγάλο:



Για κάθε μετατόπιση υπολογίζεται η μέση τετραγωνική διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων πλεγματικών σημείων και στη συνέχεια ο αλγόριθμος εντοπίζει το ελάχιστο των διαφορών. Η ελάχιστη μέση τετραγωνική διαφορά δίνει μια εκτίμηση της ταχύτητας και διεύθυνσης διάδοσης διάφορων μετώπων καιρού σε ωριαίο βήμα , η οποία αντιστοιχεί στα βέλη του δεύτερου σχήματος.

Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε με ένα σύνολο μεταβλητών οι οποίες θα μπορούσαν να εκτιμήσουν ανεμολογικά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένης της αιολικής ισχύος , των U,V συνιστωσών του διανύσματος του ανέμου και του μέτρου και της διεύθυνσης του ανέμου. Επειδή τα αρχικά δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου όπως δίνονται από το αριθμητικό μοντέλο ΣΚΙΡΩΝ παρέχονται με τη μορφή συνιστωσών βορρά-νότου και ανατολής –δύσης (συνιστώσες U και V) κρίθηκε σκόπιμη η χρήση αυτών των μεταβλητών για την κατασκευή του αλγορίθμου εκτίμησης της διάδοσης μετώπων. Με αυτό τον τρόπο κερδίζουμε σε ευελιξία στην κατασκευή του μοντέλου πρόβλεψης , καθώς στο νευρωνικό μοντέλο πρώτα μετατρέπουμε τις συνιστώσες U και V σε μέτρο και διεύθυνση και στη συνέχεια εξάγουμε τα δεδομένα που αντιστοιχούν στα αιολικά πάρκα ενδιαφέροντος. Για την ανάπτυξη του αλγορίθμου μας χρησιμοποιούμε την εξίσωση (1) , η οποία είναι η εξής:

$$CRMSD_d = \qquad (7.1)$$

όπου $U_{t,I}$ είναι η προγνωστική τιμή της συνιστώσας Δύσης-Ανατολής της ταχύτητας του ανέμου τη χρονική στιγμή t στο πλεγματικό σημείο I, $U_{t+h,j}$ η προγνωστική τιμή της συνιστώσας Δύσης – Ανατολής της ταχύτητας του ανέμου μία ώρα μετά στο πλεγματικό σημείο j , στο οποίο έχει μετατοπιστεί το κάθε σημείο του μικρού πεδίου και τα αντίστοιχα ισχύουν και για την κάθετη συνιστώσα V. CMSD είναι η συνδυασμένη μέση ριζα της τετραγωνικής διαφοράς (Combined Root Mean Square Difference). Ουσιαστικά , η υπόρριζη ποσότητα εκφράζει την ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των συνιστωσών U και V μεταξύ των συγκρινόμενων πλεγματικών σημείων. Η μέση τετραγωνική διαφορά εκφράζει την μέση τιμή της ευκλείδειας απόστασης του αρχικού σταθερού πλαισίου από το έκαστο συγκρινόμενο.

Διαπιστώθηκε ότι ο αλγόριθμος χρειαζόταν κάποιες μετατροπές ώστε να έχει τη μέγιστη λειτουργικότητα και να καλύπτονται οι αναδυόμενες αδυναμίες του . Οι αδυναμίες του συνοψίζονται στα παρακάτω 3 σημεία:

1. Ένα σημαντικό ποσοστό των εκτιμώμενων ταχυτήτων διάδοσης βρέθηκε να είναι μηδέν. Αυτό συνέβαινε κυρίως όταν δεν υπήρχε κάποιο αξιοσημείωτο μέτωπο αέρα μέσα στο πεδίο ή λόγω των εδαφικών επιδράσεων στην ταχύτητα και

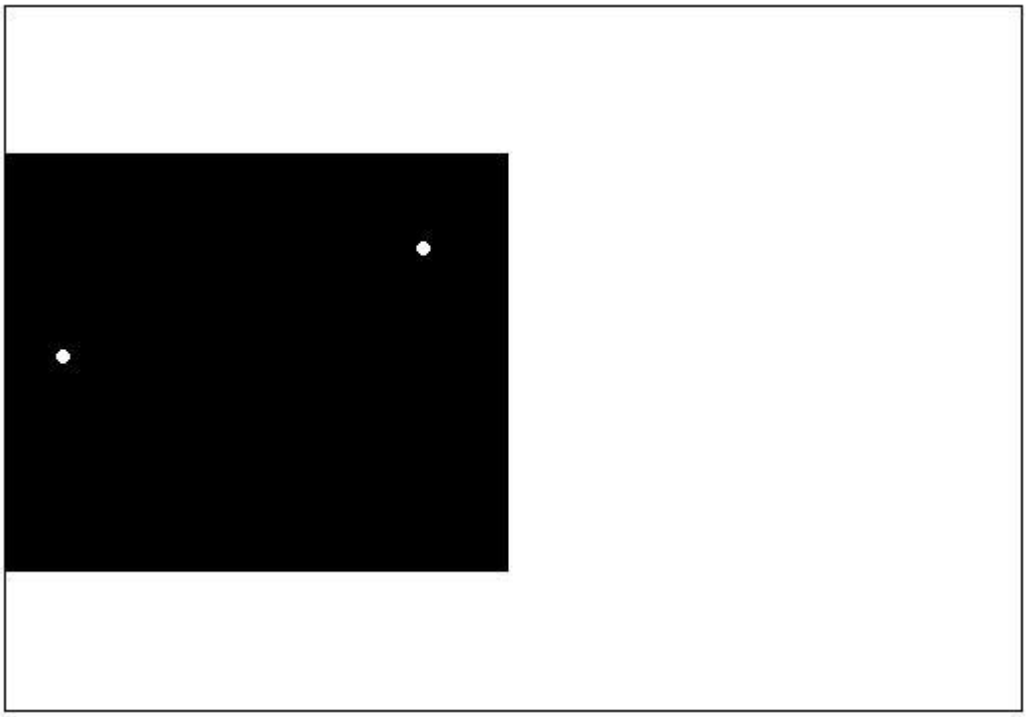
διεύθυνση του ανέμου η οποία ανάγκαζε την ελάχιστη μέση τετραγωνική τιμή να δείχνει μηδενική μετατόπιση.

2. Πολλές φορές ο αλγόριθμος αδυνατούσε να εντοπίσει κάποιο τοπικό ελάχιστο στις μετατοπίσεις των μικρών πεδίων. Αυτό συνέβαινε κυρίως όταν τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά είχαν γραμμική συμπεριφορά και οι μικρότερες τετραγωνικές διαφορές είχαν επίσης γραμμική συμπεριφορά, παράλληλη στην κίνηση του μετώπου αέρα.
3. Μερικές φορές ο αλγόριθμος προέβλεπε ισχυρή κίνηση μετώπων προς τα δυτικά. Αυτό όμως δεν έχει παρατηρηθεί σχεδόν ποτέ στην πράξη , καθώς όλα τα μέτωπα καιρού στην Ελλάδα διαδίδονται από τα δυτικά προς τα ανατολικά(είτε από βορειοδυτικά προς νοτιοανατολικά, είτε από δυτικά προς ανατολικά είτε από νοτιοδυτικά προς βορειοανατολικά).

Οι αδυναμίες αυτές επέβαλαν την εφαρμογή 2 σημαντικών ρυθμίσεων κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Η πρώτη ρύθμιση που έλαβε χώρα περιελάμβανε τον καθορισμό ενός κατώτατου ορίου της μέσης τιμής όλων των τετραγωνικών διαφορών. Το όριο αυτό τέθηκε στο 2% της τιμής του αθροίσματος όλων των τετραγωνικών διαφορών που σχηματίζονται με κάθε μετατόπιση του μικρού πλαισίου μέσα στο μεγάλο. Αν μία ή περισσότερες μέσες τετραγωνικές διαφορές υπολογίζονται κάτω από το όριο, τότε όλες γίνονται υποψήφιες και ο αλγόριθμος επιλέγει μόνο μία ακολουθώντας τα εξής βήματα:

1. Αν ένας από τους υποψηφίους αντιστοιχεί σε μηδενική μετατόπιση, τότε απομακρύνεται από την ομάδα των μέσων διαφορών. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται ο αριθμός των μηδενικών ταχυτήτων διάδοσης που εκτιμήθηκαν.
2. Από τους παραμένοντες υποψηφίους, επιλέγεται αυτός που εμφανίζει τη μικρότερη ταχύτητα διάδοσης. Έτσι , μειώνεται σημαντικά ο αριθμός των εκτιμήσεων διάδοσης στην άκρη του πεδίου και λύνει το γραμμικής φύσεως πρόβλημα που περιγράφηκε ανωτέρω, επιλέγοντας τον υποψήφιο με την μικρότερη μετατόπιση.

Η δεύτερη ρύθμιση που έλαβε χώρα αφορούσε στην εξάλειψη της πιθανότητας να εκτιμηθεί κάποιο μέτωπο καιρού , το οποίο θα είχε διεύθυνση κίνησης προς τα δυτικά. Συγκεκριμένα , το μεγάλο πλαίσιο ορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το δυτικό όριο του μικρού πλαισίου να ταυτίζεται με το δυτικό όριο του μεγάλου με κατάλληλη ρύθμιση του δυτικού ορίου του γεωγραφικού μήκους. Μια αντιπροσωπευτική απεικόνιση αυτής της ρύθμισης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



όπου η εικόνα έχει γεωγραφικό προσανατολισμό , με μαύρο διακρίνεται το μικρό πλαίσιο και τα λευκά σημεία είναι οι θέσεις των δύο Α/Π προσεγγιστικά. Με αυτόν τον τρόπο, οι διάφορες μετατοπίσεις του μικρού πλαισίου μέσα στο μεγάλο λαμβάνουν χώρα μόνο προς τα δεξιά , δηλαδή τα ανατολικά και αποκλείεται η πιθανότητα εντοπισμού κάποιου μετώπου με ισχυρή κίνηση προς τα δυτικά.

7.3.Η μετατροπή των προγνωστικών δεδομένων από ωριαίες σε ανά τέταρτο τιμές

Για την μετατροπή των συνιστωσών U και V των προγνωστικών δεδομένων του SKIRON από ωριαίες σε ανά τέταρτο τιμές, αρκεί η εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής. Κατά τη γραμμική παρεμβολή , για κάθε ομάδα ωριαίων συνιστωσών U και V , αν συμβολίσουμε με DU την ωριαία μεταβολή της U συνιστώσας και με DV την ωριαία μεταβολή της V συνιστώσας σε κάθε πλεγματικό σημείο , τότε η ανά τέταρτο μεταβολή της κάθε συνιστώσας θα ήταν :

$DU_{quarter}=[U(t)-U(t+1)]/4=DU/4$ (7.2)

Και

$DV_{quarter}=[V(t)-V(t+1)]/4=DV/4$ (7.3)

Στην δική μας εφαρμογή , θεωρούμε ότι για κάθε ώρα το ελάχιστο που προκύπτει από τον αλγόριθμο εκτίμησης μετώπων αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα μεταβολής της ταχύτητας από ώρα σε ώρα. Έτσι αν t μια συγκεκριμένη ώρα και t+1 η επόμενη ώρα, τότε για τη συνιστώσα U σε κάθε πλεγματικό σημείο θα ισχύουν:

$U(t+0.25)=U(t)+0.25*[DU_{quarter}+MIN]$

$U(t+0.5)=U(t)+0.5*[DU_{quarter}+MIN]$ (7.4)

$U(t+0.75)=U(t)+0.75*[DU_{quarter}+MIN)]$

$U(t+1)=U(t+1)$

Τα αντίστοιχα ισχύουν και για την συνιστώσα V.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εκτελείται επαναληπτικά για όλες τις διαθέσιμες από τα μετεωρολογικά δεδομένα ώρες. Με αυτόν τον τρόπο , δημιουργούμε 2 πίνακες αποτελούμενους από τις ανά τέταρτο τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου , τους οποίους μπορούμε πλέον να εισάγουμε στο νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης, με σκοπό την ανά τέταρτο πρόβλεψη της αιολικής ισχύος.

7.4. Παραλλαγές του αλγορίθμου στα πλαίσια της εφαρμογής μας

Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή 2 ακόμα παραλλαγών του αλγορίθμου εκτίμησης μετώπων ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 7.2.2.. Στις παραλλαγές αυτές, μεταβλήθηκε η μαθηματική σχέση που συνδέει τις συνιστώσες U και V μεταξύ των συγκρινόμενων πλεγματικών σημείων .Έτσι, ενώ στη βασική περίπτωση χρησιμοποιούμε την ευκλείδεια απόσταση , στη μία παραλλαγή αποφασίστηκε η χρησιμοποίηση του μεγέθους της συσχέτισης 2 μεταβλητών , ενώ στην άλλη το μέγεθος της αμοιβαίας πληροφορίας. Σε κάθε μία από τις παραλλαγμένες εκδοχές εφαρμόζεται και η μέση τετραγωνική διαφορά των U και V για τον υπολογισμό της μεταβολής της ταχύτητας. Σκοπός αυτών των δοκιμών που εφαρμόστηκαν είναι να αναδειχθεί ο βέλτιστος μαθηματικός τρόπος εκτίμησης μεταβολών του ανέμου που λαμβάνουν χώρα μέσα στο πεδίο ενδιαφέροντος , μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων από τις 3 παραλλαγές του αλγορίθμου, της βασικής περίπτωσης και των 2 ειδικών παραλλαγών.

7.4.1. Η συσχέτιση 2 μεταβλητών

7.4.1.1. Γενικά

Ας υποθέσουμε ότι θεωρούμε έναν πληθυσμό ατόμων και επιθυμούμε να μελετήσουμε τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων χαρακτηριστικών τους. Για το σκοπό μας αυτό , αναζητούμε μέτρα τα οποία μπορούν να εκφράσουν την πιθανή συμμεταβολή-συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, συσχετίζονται το ύψος και το βάρος των εργαζομένων μιας εταιρίας ή των μαθητών μιας τάξης; Και αν ναι , τότε πώς συμμεταβάλλονται; Όταν αυξάνει το ύψος , αυξάνει και το βάρος ; Και πόσο ισχυρή είναι η συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών;

Για να ποσοτικοποιήσουμε τη συσχέτιση χρησιμοποιούμε ορισμένα μέτρα, τρία από τα οποία είναι ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Spearman και ο δείκτης Kendall. Στην εργασία μας, χρησιμοποιούμε τον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης του Pearson. Έστω 2 τυχαίες μεταβλητές, X και Y , και ν ζεύγη παρατηρήσεων από τυχαίο δείγμα μεγέθους ν. Τα δεδομένα που λαμβάνουμε είναι μη πειραματικά, δηλαδή ο ερευνητής δεν προκαθορίζει τις τιμές καμίας εκ των δύο μεταβλητών.

Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson

Ο δειγματικός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson συμβολίζεται με **r** και ορίζεται από τον τύπο:

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi}) \cdot (y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\nu}(\chi_i - \overline{\chi})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{\nu}(y_i - \overline{y})^2}} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} x_i y_i - \nu \cdot \overline{\chi} \cdot \overline{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\nu} \chi_i^2 - \nu \cdot \overline{\chi}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{\nu} y_i^2 - \nu \cdot \overline{y}^2}}$$

(7.5)

Με αντίστοιχο τρόπο ορίζεται και ο πληθυσμιακός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης r δίνει ένα μέτρο του μεγέθους της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Παίρνει τιμές στο κλειστό διάστημα [-1,1]. Αν $r=^{+}_{-}1$ τότε υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση. Αν $-0.3<r<0.3$ τότε δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση , αυτό όμως δε σημαίνει πως δεν υπάρχει άλλου είδους συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Αν το r κυμαίνεται εντός κάποιου άλλου διαστήματος, μέσα στο πεδίο ορισμού του , τότε υπάρχει κάποια μορφή γραμμικής συσχέτισης, είτε ασθενής, είτε μέση είτε ισχυρή.

7.4.1.2. Εφαρμογή της συσχέτισης στον αλγόριθμο εκτίμησης μετώπων αέρα

Όπως ειπώθηκε και ανωτέρω, το μέγεθος της συσχέτισης αντικαθιστά την ευκλείδεια απόσταση ως τρόπο περιγραφής της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών που χρησιμοποιούμε στον αλγόριθμο μας. Συγκεκριμένα, θεωρούμε πως οι μεταβλητές των οποίων μελετάμε την συμμεταβολή είναι η συνιστώσα U της ταχύτητας του ανέμου μια συγκεκριμένη ώρα t σε κάθε πλεγματικό σημείο του αρχικού μικρού πλαισίου και η ίδια συνιστώσα την ώρα t+1 σε ένα από τα πλεγματικά σημεία του κάθε μετακινούμενου μικρού πλαισίου που συγκρίνεται με το αρχικό. Δηλαδή , στη σχέση (7.5) :

X= Uwind(i,j,t) , Y=Uwind(k,l,t+1) (7.6)

Την ίδια σχέση εφαρμόζουμε και για τη συνιστώσα V της ταχύτητας , σε αντίστοιχα πλεγματικά σημεία για τις αντίστοιχες ώρες. Από την εφαρμογή της σχέσης (7.6) προκύπτουν 32 τιμές συσχέτισης για τη συνιστώσα U και 32 τιμές συσχέτισης για τη συνιστώσα V για κάθε ωριαία μετατόπιση, όσες είναι δηλαδή και οι διαφορετικές χωρικές μετατοπίσεις του μικρού πλαισίου μέσα στο μεγάλο σε ωριαία βάση. Από τις τιμές που προέκυψαν κρατάμε μόνο τις θετικές συσχετίσεις και υπολογίζουμε το μέγιστο για κάθε συνιστώσα και για κάθε ώρα. Τα μέγιστα της συσχέτισης μας υποδεικνύουν για κάθε ωριαία μετακίνηση τα μετακινούμενα πλαίσιο που συσχετίζονται περισσότερο με το αρχικό αναφορικά με τη συνιστώσα U και τη συνιστώσα V της ταχύτητας του ανέμου, αντίστοιχα. Για την καλύτερη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων με στόχο τον υπολογισμό της μεταβολής της ταχύτητας επιλέχθηκε η χρήση του μεγέθους της μέσης ρίζας της τετραγωνικής διαφοράς ως εξής:

Mean= (7.7)

όπου ο δείκτης j αντιστοιχεί στο μετακινούμενο πλαίσιο με τη μεγαλύτερη συσχέτιση της συνιστώσας U με αυτήν του αρχικού πλαισίου ι και ο δείκτης k αντιστοιχεί στο μετακινούμενο πλαίσιο με τη μεγαλύτερη συσχέτιση της συνιστώσας V με την αντίστοιχη του αρχικού πλαισίου. Ο μέσος όρος που προκύπτει από τη σχέση (7.7) λαμβάνεται ως εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας λόγω της διέλευσης μετώπων αέρα από την περιοχή ενδιαφέροντος. Σε συμφωνία με τον βασικό αλγόριθμο , για την αποφυγή υπολογισμού μηδενικών μεταβολών, τέθηκε ένα κατώτερο όριο του μέσου όρου στο 2% του αθροίσματος όλων των τετραγωνικών διαφορών μεταξύ των σημείων των πλαισίων .

Η εκτίμηση των ενδιάμεσων τιμών των συνιστωσών της ταχύτητας γίνεται με χρήση της γραμμικής παρεμβολής, όπως και στον βασικό αλγόριθμο.

Συγκεκριμένα, αν DWest η εκτιμώμενη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου για κάθε ώρα (δηλαδή ο μέσος όρος της ρίζας της τετραγωνικής διαφοράς που υπολογίζεται στη σχέση (7.7)), τότε για κάθε ώρα και για κάθε πλεγματικό σημείο, θα ισχύει:

$$U(t+0.25)=U(t)+0.25*[U(t)-U(t+1)+DWest(t)]$$

$$U(t+0.5)=U(t)+0.5*[U(t)-U(t+1)+ DWest(t)] \quad (7.8)$$

$$U(t+0.75)=U(t)+0.75*[U(t)- U(t+1)+DWest(t)]$$

$$U(t+1)=U(t+1)$$

και αντίστοιχα:

$$V(t+0.25)=U(t)+0.25*[V(t)-V(t+1)+DWest(t)]$$

$$V(t+0.5)=U(t)+0.5*[V(t)- V(t+1)+DWest(t)] \quad (7.9)$$

$$V(t+0.75)=U(t)+0.75*[V(t)- V(t+1)+DWest(t)]$$

$$V(t+1)=V(t+1)$$

Ο αλγόριθμος εκτελείται επαναληπτικά για όλες τις ώρες, ώστε να προκύψουν οι ενδιάμεσες τιμές των συνιστωσών U και V για όλο το διαθέσιμο δείγμα των δεδομένων από το αριθμητικό μοντέλο SKIRON.

7.4.2. Η αμοιβαία πληροφορία

7.4.2.1.Πληροφορία και αμοιβαία πληροφορία

Από την σκοπιά του μηχανικού , η πληροφορία σε ένα μήνυμα είναι ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάδοσή του. Μηνύματα με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης μπορούν να μεταδοθούν σε συντομότερο χρονικό διάστημα από ότι πιο σπάνια μηνύματα. Οι πηγές της πληροφορίας μπορούν να μοντελοποιηθούν με τυχαίες διαδικασίες. Κοινή ιδιότητα όλων των πηγών πληροφορίας είναι ότι έχουν πεπερασμένο εύρος ζώνης, γεγονός που επιτρέπει τη δειγματοληψία τους. Φυσικά, η δειγματοληψία αφορά μόνο διακριτές ως προς το χρόνο διαδικασίες.

Για την ποσοτικοποίηση της έννοιας της πληροφορίας χρησιμοποιείται το **μέτρο πληροφορίας**, το οποίο αντιστοιχεί στην πιθανότητα εμφάνισης μιας εξόδου της πηγής πληροφορίας. Το μέτρο πληροφορίας πρέπει να είναι φθίνουσα συνάρτηση της πιθανότητας, ώστε όσο πιο απίθανό είναι ένα γεγονός, τόσο μεγαλύτερη πληροφορία να μεταφέρει. Επιπλέον, το μέτρο πληροφορίας πρέπει να είναι συνεχής συνάρτηση, ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση μικρές αλλαγές της πιθανότητας εμφάνισης της εξόδου να μη μεταβάλλουν σημαντικά την ποσότητα της πληροφορίας. Μια αξιοσημείωτη ιδιότητα του μέτρου της πληροφορίας είναι η αθροιστική ιδιότητα, σύμφωνα με την οποία η συνολική ποσότητα πληροφορίας δύο ανεξάρτητων γεγονότων είναι το άθροισμα των

επιμέρους μέτρων πληροφορίας των γεγονότων. Η μόνη συνάρτηση που ικανοποιεί τις προηγούμενες ιδιότητες είναι η :

$I(x) = -\log(p(x))$ (7.10)

όπου p(x) είναι η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της μεταβλητής x.

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που πρέπει να ορίσουμε είναι η **εντροπία.** Εντροπία στη θεωρία πληροφορίας είναι η μέση τιμή πληροφορίας της πηγής ανά σύμβολο:

$H(X) = E\{[I(X)]\} = -\quad {}_{i*}\log(p_i) = \quad {}_{i*}\log(—$ (7.11)

Η εντροπία αποτελεί ένα μέτρο της αβεβαιότητας για την μεταβλητή x , δηλαδή όσο πιο πολλές πληροφορίες είναι γνωστές για την x, τόσο μικρότερη είναι η εντροπία.

Αν έχουμε 2 ή περισσότερες τυχαίες μεταβλητές X,Y , ορίζουμε και την **από κοινού εντροπία** ως εξής:

$H(X,Y) = -$ (7.12)

όπου p είναι η κοινή συνάρτηση κατανομής πιθανότητας των x και y.

Αντίστοιχη σχέση προκύπτει και για n τυχαίες μεταβλητές. Ειδική περίπτωση της κοινής εντροπίας είναι η **υπό συνθήκη εντροπία**, η οποία προκύπτει όταν είναι γνωστή η τιμή μιας εκ των δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y. Πιο συγκεκριμένα, εάν η τιμή της Y = y είναι γνωστή, τότε η συνάρτηση μάζας πιθανότητας της X θα είναι p(x | y) και η αντίστοιχη εντροπία θα είναι:

$H(X|Y=y) = -$ (7.13)

Η δεξιά ποσότητα στην παραπάνω εξίσωση αντιστοιχεί στην αβεβαιότητα της X όταν γνωρίζουμε μια τιμή της Y , Y=y. Η μέση τιμή για όλα τα y είναι η υπό συνθήκη εντροπία και εκφράζει την αβεβαιότητα της X όταν η Y είναι γνωστή. Συνεπώς, η υπό συνθήκη εντροπία περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$H(X|Y) = - \qquad = -$ (7.14)

Επίσης, επειδή η Y μπορεί να παρέχει κάποια πληροφορία για την X , ισχύει η ανισότητα:

$H(X|Y) \leq H(X)$ (7.15)

Αμοιβαία πληροφορία

Η αμοιβαία πληροφορία δύο τυχαίων μεταβλητών X και Y ορίζεται ως η σχετική εντροπία μεταξύ της κοινής συνάρτησης κατανομής πιθανότητας των X και Y και του γινομένου των ατομικών συναρτήσεων πιθανότητας :

$I(X ; Y) = \frac{\qquad}{\qquad}$ (7.16)

Μετά από υπολογισμούς, η σχέση (8.15) γίνεται:

$I(X ; Y) = H(X) - H(X|Y)$ (7.17)

όπου H(X|Y) η υπό συνθήκη εντροπία της μεταβλητής X.

Η αμοιβαία πληροφορία των μεταβλητών X, Y εκφράζει την αβεβαιότητα για την X που εξαλείφεται με την εμφάνιση της Y. Ουσιαστικά, αμοιβαία πληροφορία είναι η πληροφορία που παρέχει η μία μεταβλητή για την άλλη.

7.4.2.2. Εφαρμογή της αμοιβαίας πληροφορίας στον αλγόριθμο εκτίμησης μετώπων αέρα

Με δεδομένη τη μη γραμμικότητα της αμοιβαίας πληροφορίας, κρίθηκε σκόπιμη η χρησιμοποίηση της με στόχο την εύρεση ενός εναλλακτικού τρόπου συσχέτισης μεταξύ των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου των συγκρινόμενων πλαισίων , όπως προκύπτουν από τον περιγραφόμενο στην ενότητα 7.2.2. αλγόριθμο. Στην εξίσωση (7.16) χρησιμοποιούνται αντί των X,Y οι μεταβλητές

Uwind(i,j,t) , Uwind(k,l,t+1) και Vwind(i,j,t) , Vwind(k,l,t+1) ώστε να προκύψουν τελικά 2 σύνολα , ένα για κάθε συνιστώσα του ανέμου , αποτελούμενα από τα μέγιστα των αμοιβαίων πληροφοριών για όλες τις διαθέσιμες ώρες του μετεωρολογικού δείγματος. Στόχος μας είναι και πάλι η εκτίμηση της συμμεταβολής της ταχύτητας του ανέμου κοντινών περιοχών μέσα στο πεδίο ενδιαφέροντος, όταν διέρχονται από αυτές αίτια που μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του ανέμου.

Τα μέγιστα που υπολογίζονται αντιστοιχούν στα μετακινούμενα πλαίσια με την περισσότερη αμοιβαία πληροφορία με το αρχικό όσον αφορά στις τιμές των συνιστωσών U και V, αντίστοιχα. Με όμοιο τρόπο με τον αλγόριθμο συσχέτισης(σχέση 7.7) , υπολογίζεται η μέση ρίζα της τετραγωνικής διαφοράς η οποία λαμβάνεται ως μία εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου στις περιπτώσεις διέλευσης μετώπων καιρού. Με τη χρήση του κατώτατου ορίου του 2% απορρίπτονται οι μηδενικές μεταβολές , ενώ για την εύρεση των ενδιάμεσων τιμών των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιούνται και πάλι οι σχέσεις (7.8) και (7.9) με τη διαφορά ότι στη θέση των πλαισίων με τη μέγιστη συσχέτιση ως προς U και ως προς V, τοποθετούνται τα πλαίσια με την μέγιστη αμοιβαία πληροφορία ως προς U και ως προς V, αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος εκτελείται επαναληπτικά για όλες τις διαθέσιμες ώρες(12336 ώρες) και για όλα τα πλεγματικά σημεία του αρχικού πλαισίου που εμπεριέχει τα δύο αιολικά πάρκα για τα οποία γίνεται η πρόβλεψη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Το τελικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

8.1. Γενικά

Στα πλαίσια της εν λόγω εργασίας αναπτύχθηκε ένα πλήρες μοντέλο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για 2 αιολικά πάρκα στην περιοχή της Πελοποννήσου, το ένα στην περιοχή του Ναυπλίου και το άλλο στην περιοχή της Τρίπολης. Ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης για κάθε αιολικό πάρκο είναι 24 ώρες και το χρονικό βήμα της πρόβλεψης τίθεται στα 15 λεπτά , για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτό σημαίνει ότι οι προβλεπόμενες τιμές της ισχύος παρέχονται κάθε 15 λεπτά. Για την ανάπτυξη του μοντέλου μας χρησιμοποιήθηκαν νευρωνικά δίκτυα τα οποία επιχειρούν να περιγράψουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μια σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης από το αιολικό πάρκο ηλεκτρικής ισχύος. Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν εντός σύνδεσης μετρούμενα δεδομένα SCADA αιολικής ισχύος καθώς και μετρούμενες τιμές πρόβλεψης των συνιστωσών U και V του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος από το περιφερειακό μοντέλο καιρού SKIRON. Τα μετρούμενα δεδομένα κάλυπταν μια αρκετά μεγάλη χρονική περίοδο μεγέθους 1 έτους και 5 μηνών (12336 ώρες). Από αυτή τη χρονική περίοδο επιλέχθηκε ένα δείγμα 1 έτους (8760 ωρών ή 35040 τετάρτων της ώρας) για την εκπαίδευση των χρησιμοποιούμενων νευρωνικών δικτύων. Για τη μετατροπή των ωριαίων δεδομένων ταχύτητας ανέμου σε ανά τέταρτο τιμές ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που μπορεί να περιγράψει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την εξέλιξη του καιρού σε τοπική κλίμακα και να συλλάβει διάφορες περιπτώσεις μεταβολών στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου οφειλόμενες στις καιρικές συνθήκες[κεφ.7]. Για την καλύτερη εποπτεία της λειτουργικότητας του αλγορίθμου εφαρμόστηκαν 3 παραλλαγές του , οι οποίες έδωσαν ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα, αναδεικνύοντας και την αβεβαιότητα που υπάρχει στην πρόβλεψη του ανέμου σε τοπικό επίπεδο. Σημαντικές αδυναμίες επέδειξε και η γραμμική παρεμβολή , που χρησιμοποιήθηκε ως μέθοδος υπολογισμού των ενδιάμεσων τιμών της ταχύτητας του ανέμου.

8.2.Αναλυτική περιγραφή του αναπτυσσόμενου μοντέλου

8.2.1. Αλγόριθμος μετατροπής των ωριαίων δεδομένων σε ανά τέταρτο

Αρχικά , από το σύνολο των αιολικών πάρκων επιλέγονται τα 2 αιολικά πάρκα ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, ενσωματώνεται ο αλγόριθμος εκτίμησης μετώπων αέρα , ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 7.2.2.. Η επιλογή των ορθογώνιων πλαισίων που είναι αναγκαία για την εύρεση της ελάχιστης μέσης τετραγωνικής διαφοράς των συνιστωσών U και V γίνεται με βάση την περιοχή που επιθυμούμε να καλύψουμε . Η περιοχή αυτή καθορίστηκε ώστε να συμπεριλαμβάνει τις περιοχές των 2 αιολικών πάρκων ενδιαφέροντος , του Ναυπλίου και της Πελοποννήσου , με κατάλληλη ρύθμιση των συντεταγμένων. Πιο συγκεκριμένα, το μικρό πλαίσιο στο οποίο εμπεριέχονται τα 2 αιολικά πάρκα , αποτελείται από ένα σύνολο 4 χ 4 σημείων , σε καθένα από τα οποία είναι διαθέσιμα σε συνιστώσες U και V της ταχύτητας του ανέμου τα δεδομένα που παρέχονται από το αριθμητικό μοντέλο SKIRON. Στη συνέχεια επιλέγεται ένα μεγαλύτερο πλαίσιο 12χ8 σημείων ,στο οποίο εμπεριέχεται το μικρό πλαίσιο και το δυτικό άκρο του οποίου ταυτίζεται με το δυτικό άκρο του μικρού πλαισίου για τους λόγους που εξηγήσαμε στην ενότητα 8.2.2.. Για την

κάλυψη όλου του καθορισμένου από το μεγάλο πλαίσιο χώρου απαιτούνται 32 μετακινήσεις του μικρού πλαισίου, η κάθε μία κατά μία ώρα μπροστά στο χρόνο. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, εφαρμόστηκαν 3 εκδοχές του αλγορίθμου , οι οποίες περιγράφηκαν αναλυτικά στα κεφάλαια 7.2., 7.3 και 7.4. αλλά κρίνεται χρήσιμο να επαναληφθεί συνοπτικά η περιγραφή τους για την απόκτηση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας του μοντέλου.

8.2.1.1 1η εκδοχή του αλγορίθμου

Από δω και στο εξής η εκδοχή αυτή θα αναφέρεται ως 1η εκδοχή και συνίσταται στα εξής:

Το αρχικό πλαίσιο μετακινείται στο χώρο 32 φορές- όσο δηλαδή χρειάζεται για να καλυφθεί το μεγάλο πεδίο που έχουμε καθορίσει- και στο χρόνο μια ώρα και για κάθε μετακίνηση υπολογίζεται σημείο προς σημείο η ευκλείδια απόσταση μεταξύ τους ως προς τις συνιστώσες U και V που τα περιγράφουν ,σύμφωνα με τον τύπο 7.1. Για κάθε μετακίνηση υπολογίζεται η μέση τιμή της απόστασης και για κάθε ώρα επιλέγεται το μετακινούμενο πλαίσιο με την ελάχιστη εξ αυτών των μέσων τιμών. Η ελάχιστη αυτή τιμή νοείται ως η μεταβολή της ταχύτητας στα διάφορα σημεία του μικρού πλαισίου λόγω της διέλευσης μετώπων αέρα από την καθορισμένη περιοχή. Για την βέλτιστη αξιοποίηση του αλγορίθμου, απορρίπτονται από την διαδικασία εύρεσης ελαχίστου όσες μέσες τετραγωνικές διαφορές βρίσκονται κάτω από το τιθέμενο όριο στο 2% του αθροίσματος όλων των σημείο προς σημείο τετραγωνικών διαφορών κάθε μετακίνησης. Επίσης απορρίπτονται τυχόν μηδενικές μέσες τιμές και από τα πλαίσια που είναι κάτω από το όριο του 2% επιλέγεται αυτό με την ελάχιστη μη μηδενική μέση τιμή. Με αυτόν τον τρόπο εκμηδενίζεται η πιθανότητα ο αλγόριθμος να μη μπορέσει να εντοπίσει κάποιο τοπικό ελάχιστο στις μέσες τιμές των διαφορών , όπως και αποκλείεται το ενδεχόμενο να υπολογίσει κάποια μηδενική μέση τιμή(και συνεπώς μηδενικό ελάχιστο) κάτι που θα σήμαινε την πλήρη απουσία μεταβολών στις καιρικές συνθήκες , γεγονός το οποίο είναι αδύνατο να παρατηρηθεί στην πράξη.

Για να το εξηγήσουμε λίγο αναλυτικότερα αυτό , η μεταβλητότητα του καιρού σε τοπικό επίπεδο παρουσιάζει ποικίλες διακυμάνσεις. Κατά τους θερινούς μήνες , όπου επικρατούν καλές καιρικές συνθήκες, υπάρχουν τοπικά συστήματα κυκλοφορίας του αέρα όπως η θαλάσσια και η απόγειος αύρα , η οποία μπορεί να εισχωρήσει έως και μερικές δεκάδες χιλιόμετρα από την ακτή. Επίσης, αρκετά συχνά στις ηπειρωτικές περιοχές, αναπτύσσονται συστήματα καταιγίδων τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες οι οποίες προκαλούν μεταβολές στην πίεση σε επίπεδο μίκρο – κλίμακας(βλέπε κεφ.4). Όσον αφορά στις υπόλοιπες εποχές του έτους, κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες διέρχονται αρκετά ψυχρά μέτωπα και συστήματα χαμηλής πίεσης από τον ελλαδικό χώρο , τα οποία προκαλούν συχνά βίαιες καιρικές μεταβολές, ενώ υπάρχουν επίσης τοπικά συστήματα ανέμων όπως η αύρα κοιλάδας και η αύρα ορεών. Σε όλους αυτούς τους παράγοντες προστίθεται και ο παράγων της τριβής , που είναι αρκετά σημαντικός κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και προξενεί μεταβολές στην ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου. Πιο μεγάλη σταθερότητα παρουσιάζει ο άνεμος σε περιπτώσεις αντικυκλωνικών συνθηκών (συστήματα υψηλής πίεσης παραμένοντα για μέρες πάνω από τον ελλαδικό χώρο) αλλά ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις η δημιουργία τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας του αέρα είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Συνεπώς, ο αποκλεισμός των μηδενικών ελαχίστων από τον αλγόριθμο εκτίμησης της διάδοσης ανεμολογικών χαρακτηριστικών κρίνεται αναγκαίος.

Το ελάχιστο που εντοπίζει ο αλγόριθμος σε ωριαία βάση αξιοποιείται ως μια επιπλέον μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου από ώρα σε ώρα , πέραν των βασικών DU=U(t)-U(t+1) και DV=V(t)-V(t+1) που απορρέουν από το γεγονός ότι σε κάθε σημείο είναι διαθέσιμα ωριαία δεδομένα ανέμου από το μοντέλο SKIRON. Με τη χρήση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής υπολογίζονται στη συνέχεια

οι ενδιάμεσες τιμές των συνιστωσών του ανέμου , U και V, για κάθε σημείο του σταθερού πλαισίου 4χ4. Η διαδικασία υπολογισμού γίνεται για κάθε ώρα με τις σχέσεις (7.4). Έτσι προκύπτουν δεδομένα ταχύτητας ανά τέταρτο για όλες τις ώρες για τις οποίες υπάρχει διαθεσιμότητα από το μοντέλο SKIRON.

8.2.1.2. 2η και 3η εκδοχή του αλγορίθμου

Κατά την 2η παραλλαγή του αλγορίθμου, αντί για την εύρεση του μετακινούμενου πλαισίου με την ελάχιστη μέση τετραγωνική διαφορά ως προς U και V από το αρχικό πλαίσιο, επιλέγεται η εύρεση των μετακινούμενων πλαισίων με τη μέγιστη συσχέτιση με το αρχικό ως προς τη μεταβολή των συνιστωσών U και V , αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ώρα , υπολογίζονται 32 τιμές συσχέτισης με τον τύπο (7.5) . Στη συνέχεια απορρίπτονται οι αρνητικές τιμές συσχέτισης, διότι δεν έχουν καμία φυσική σημασία στην συγκεκριμένη περίπτωση, και από τις θετικές επιλέγεται η μέγιστη συσχέτιση τόσο ως προς το U όσο και ως προς το V, για κάθε ώρα. Τα δύο μέγιστα των συσχετίσεων αντιστοιχούν στα μετακινούμενα πλαίσια τα οποία θεωρούμε ότι είναι πιο αντιπροσωπευτικά της ωριαίας μεταβολής των χαρακτηριστικών του ανέμου εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Για τον υπολογισμό της μεταβολής υπολογίζεται η ρίζα της τετραγωνικής διαφοράς σημείο προς σημείο μεταξύ των συνιστωσών U και των συνιστωσών V σύμφωνα με τον τύπο 8.7. Αντί της χρήσης της ρίζας της τετραγωνικής διαφοράς, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος των αποστάσεων μεταξύ των διανυσμάτων U(i,t) , U(j,t+1) και V(i,t), V(k,t+1) . Όμως ,βρέθηκε ότι η χρήση της ρίζας της τετραγωνικής διαφοράς δίνει ίδιο εύρος τιμών με τη μεταβολή της ταχύτητας όπως υπολογίζεται και στο βασικό αλγόριθμο , συνεπώς είναι πιο πιθανό να έχει συλλάβει όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις μεταβολής των καιρικών συνθηκών. Έπειτα από τον σχηματισμό των υπόρριζων τετραγωνικών διαφορών, υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών για κάθε ωριαία μετακίνηση , ο οποίος λαμβάνεται ως εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας όπως και το ελάχιστο στον βασικό αλγόριθμο. Επίσης, ομοίως με τη βασική περίπτωση , τίθεται όριο για τη μέση τιμή στο 2% του αθροίσματος των σημείο προς σημείο ριζών των τετραγωνικών διαφορών και για τους μέσους όρους που βρίσκονται κάτω από το όριο, ο αλγόριθμος επιλέγει ως μεταβολή την ελάχιστη από τις σημείο προς σημείο ρίζες των τετραγωνικών διαφορών. Έτσι εξαλείφεται η πιθανότητα υπολογισμού μηδενικής μεταβολής , γεγονός χρήσιμο όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη ενότητα.

Οι ενδιάμεσες τιμές του ανέμου υπολογίζονται στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο όπως και στην 1η εκδοχή και συγκεκριμένα με τη χρήση των σχέσεων (7.8) και (7.9). Έτσι προκύπτουν ανά τέταρτο δεδομένα του ανέμου για όλες τις διαθέσιμες από το μοντέλο SKIRON ώρες.

Η 3η εκδοχή του αλγορίθμου μας χτίζεται με παρόμοιο τρόπο με τη δεύτερη εκδοχή , μόνο που η συσχέτιση αντικαθίσταται από την αμοιβαία πληροφορία. Η διαδικασία αναζήτησης αφορά στην εύρεση του /των μετακινούμενων πλαισίων με τη μεγαλύτερη αμοιβαία πληροφορία τόσο ως προς τη συνιστώσα βορρά – νότου όσο και ως προς τη συνιστώσα ανατολής –δύσης της ταχύτητας του ανέμου. `

8.2.2. Κατηγοριοποίηση των δεδομένων ταχύτητας του ανέμου

Όπως περιγράφεται στις ενότητες 6.2.1. και 6.3.1., στο ωριαίο νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου ομαδοποιούνται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης ισχύος του κατασκευαστή του Α/Π. Το ίδιο επιλέξαμε να κάνουμε και με τις ανά τέταρτο τιμές της ταχύτητας. Και στις 3 εκδοχές του αλγορίθμου μετατρέψαμε πρώτα τις τιμές U και V της ταχύτητας του ανέμου σε μέτρο και διεύθυνση με τη χρήση των σχέσεων :

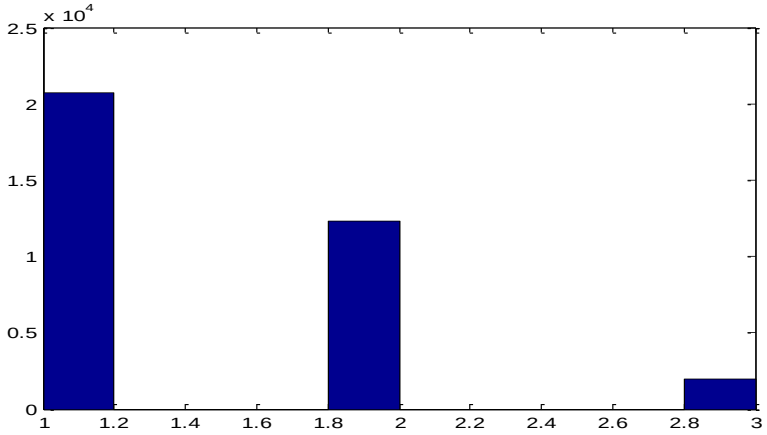
W= $^{2}+V^{2})$ (8.1)

D=arctan(- – (8.2)

Από το σύνολο των 4χ4 σημείων για τα οποία έχουμε υπολογίσει τις ενδιάμεσες(ανά τέταρτο) τιμές της ταχύτητας του ανέμου , τις οποίες μετατρέπουμε σε μέτρο και διεύθυνση, επιλέγουμε τις τιμές του μέτρου της ταχύτητας για 2 αντιπροσωπευτικά σημεία, τα οποία αντιστοιχούν το ένα στο αιολικό πάρκο της Τρίπολης και το άλλο στου Ναυπλίου και διαμορφώνουμε ένα σύνολο εκπαίδευσης αποτελούμενο από 35040 ανά τέταρτο δείγματα (8760 ώρες ή 1 έτος), το οποίο χρησιμοποιείται ως είσοδος στον κάθε αυτό-οργανούμενο χάρτη. Για την κατασκευή του αυτό-οργανωμένου χάρτη επιλέγονται 3 νευρώνες , καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύει μια κατηγορία ταχύτητας ανέμου (χαμηλή , μέση , υψηλή). Το δείγμα μας εκπαιδεύεται 1500 φορές και σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας εκπαίδευσης η έξοδος του αυτό-οργανωμένου χάρτη είναι οι συντεταγμένες ενός εκ των 3 νευρώνων.

Σε κάθε μία από τις εκδοχές του αλγορίθμου εκτίμησης της μεταβολής των καιρικών συνθηκών προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα κατά την κατηγοριοποίηση των ταχυτήτων, καθώς φαίνεται πως ο κάθε αλγόριθμος υπολογίζει διαφορετικό αριθμό ταχυτήτων σε έκαστη κατηγορία. Παρόλα αυτά , όπως ήταν φυσικό και στις 3 εκδοχές οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου προέκυψαν σημαντικά περισσότερες από τις μέσες και τις υψηλές ταχύτητες. Η κατηγοριοποίηση του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία από τις 3 εκδοχές που περιγράψαμε στην αμέσως προηγούμενη ενότητα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι έλαβε χώρα κανονικοποίηση του μέτρου της ταχύτητας με βάση την καμπύλη ισχύος. Συγκεκριμένα, τέθηκε ως ανώτερο όριο μέτρου της ταχύτητας του ανέμου , η συνήθης cut-off ταχύτητα της καμπύλης ισχύος του κάθε Α/Π , η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι στα 25 m/s. Όσα μέτρα ταχύτητας υπολογίζονταν να είναι πάνω από αυτό το όριο από τον αλγόριθμο εκτίμησης ενδιάμεσων τιμών , τέθηκαν ώστε να έχουν την τιμή αυτή των 25 m/s.

Σχήμα 8.1.: Κατηγοριοποίηση ταχυτήτων ανέμου για την πρώτη εκδοχή

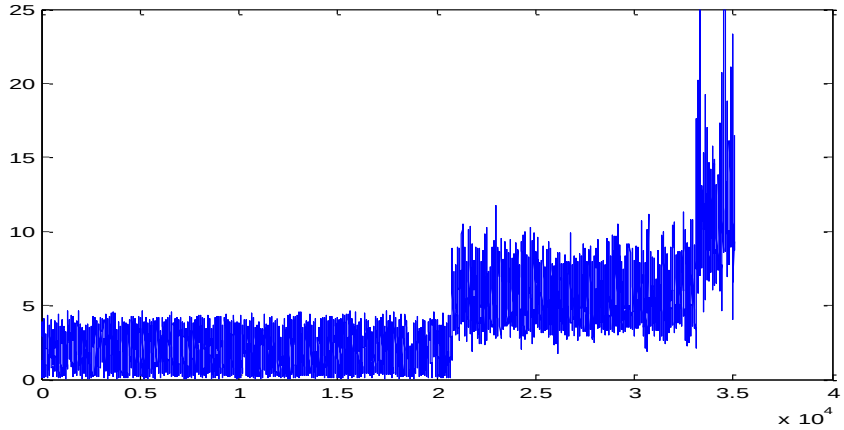


Στο σχήμα 8.1. διακρίνονται οι 3 κατηγορίες της ταχύτητας του ανέμου , που αντιστοιχούν στα 3 βασικά μέρη της καμπύλης ισχύος του κατασκευαστή(ενότητα 6.2.1.2). Η κατηγορία 1 αφορά τις χαμηλές ταχύτητες , που είναι και οι περισσότερες, η κατηγορία 2 τις μεσαίες ταχύτητες και η κατηγορία 3 τις υψηλές ταχύτητες. Το δίκτυο SOM, στο σύνολο των 35040 τετάρτων της ώρας που

χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του , εντόπισε 20700 δείγματα στις χαμηλές ταχύτητες,12300 δείγματα στις μεσαίες ταχύτητες και 1950 δείγματα στις υψηλές ταχύτητες.

Στο παρακάτω διάγραμμα των προβλεπόμενων ταχυτήτων ανέμου διακρίνονται οι 3 κατηγορίες της ταχύτητας καθώς και το μέγεθος του δείγματος το οποίο περιλαμβάνει η κάθε μία:

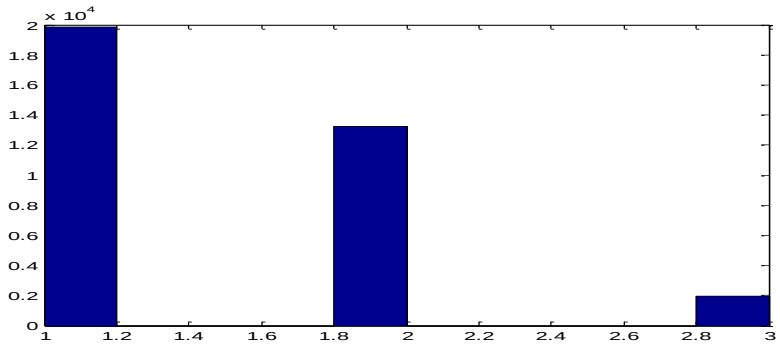
Σχήμα 8.2. Χρονοσειρά προβλεπόμενων ταχυτήτων ανέμου για την 1η εκδοχή:



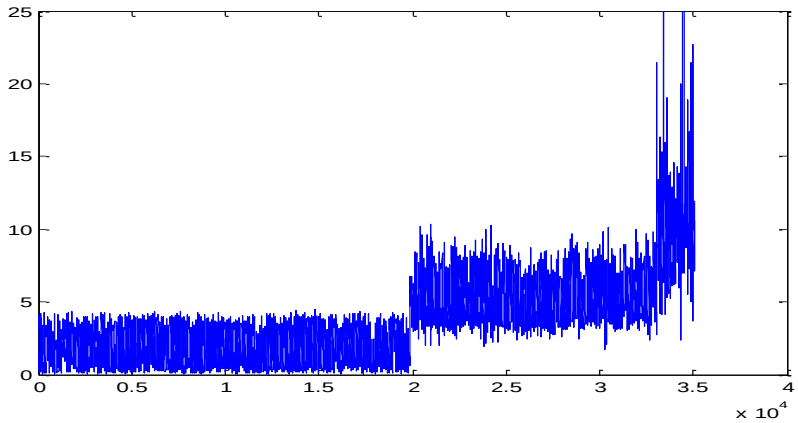
Παρατηρούμε πως έχουν ομαδοποιηθεί οι ταχύτητες σε χαμηλές , που αντιστοιχούν στο διάστημα 0-5 m/s, μεσαίες, που αντιστοιχούν στο διάστημα 5-10 m/s και σε υψηλές , που αφορούν ταχύτητες άνω των 10 m/s. Επίσης βλέπουμε ότι ένα μικρό ποσοστό των ταχυτήτων δεν έχουν ομαδοποιηθεί σωστά και υπάρχει επικάλυψη με τις άλλες κατηγορίες, γεγονός το οποίο μπορεί να επηρεάσει το σφάλμα της πρόβλεψης , εφόσον κάθε νευρωνικό δίκτυο rbf εκπαιδεύεται για ξεχωριστή κατηγορία ανέμων.

Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα ομαδοποίησης των ταχυτήτων για την 2η εκδοχή του αναπτυσσόμενου αλγορίθμου(εφαρμογή της συσχέτισης):

Σχήμα 8.3. Κατηγοριοποίηση των ταχυτήτων του ανέμου για τη δεύτερη εκδοχή

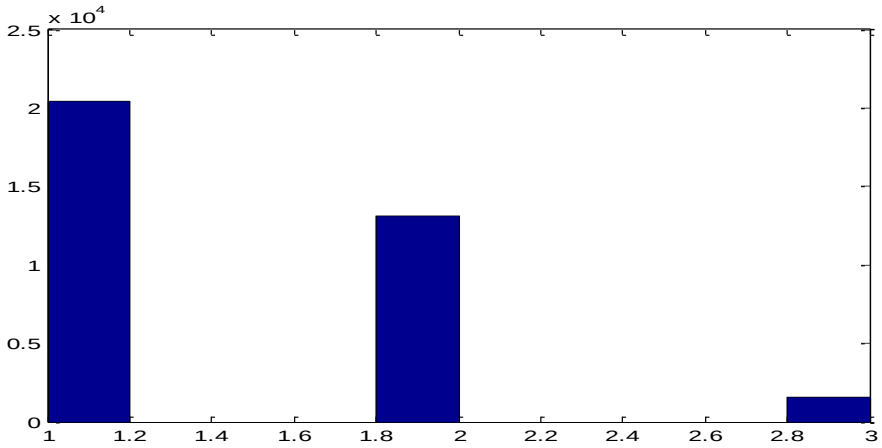


Σχήμα 8.4. Χρονοσειρά των ταχυτήτων ανέμου για τη 2η εκδοχή:

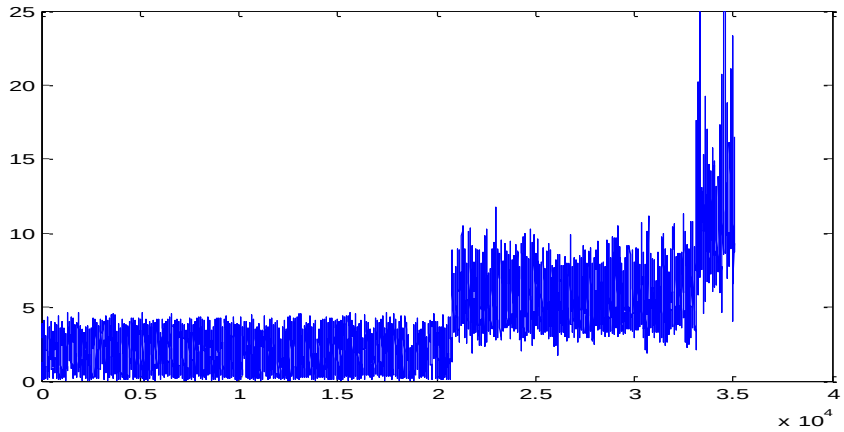


Κατά τη 2η εκδοχή του αναπτυσσόμενου αλγορίθμου , 19700 δείγματα εντάσσονται στις χαμηλές ταχύτητες, 13300 δείγματα στις μεσαίες και 2030 δείγματα στις υψηλές ταχύτητες. Παρατηρούμε ότι σε σχέση με την 1η εκδοχή , η 2η εκδοχή εντόπισε περισσότερες μεσαίες ταχύτητες και υψηλές ταχύτητες. Το ποσοστό αύξησης των μεσαίων ταχυτήτων σε σύγκριση με το βασικό αλγόριθμο ανέρχεται στο 2.85% και των υψηλών ταχυτήτων στο 0.23%. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι αυτές οι διαφοροποιήσεις αναδεικνύουν μια μικρή υπεροχή της δεύτερης εκδοχής του αλγορίθμου(σε σχέση με τη βασική εκδοχή) στην κάλυψη των απότομων μεταβολών των καιρικών συνθηκών.

Σχήμα 8.5. Κατηγοριοποίηση των ταχυτήτων του ανέμου για την 3η εκδοχή



Σχήμα 8.6: Χρονοσειρά των ταχυτήτων ανέμου για την 3η εκδοχή:



Κατά την 3η εκδοχή, 20400 δείγματα βρέθηκαν στις χαμηλές ταχύτητες,13100 στις μεσαίες και 1560 στις χαμηλές ταχύτητες. Ο αλγόριθμος εντόπισε λιγότερες χαμηλές ταχύτητες από την 1η εκδοχή και περισσότερες από τη 2η ,ενώ όσον αφορά τα μεσαία δείγματα εντόπισε παρόμοιο αριθμό μεσαίων ταχυτήτων με τη 2η εκδοχή. Αντίθετα εντόπισε σημαντικά λιγότερες υψηλές ταχύτητες και από τις δύο άλλες εκδοχές.

8.2.3. Εκπαίδευση της κάθε κατηγορίας ανέμου με τη χρήση δικτύων rbf

Έπειτα από την κατηγοριοποίηση 35040 δειγμάτων του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου σε 3 κατηγορίες (χαμηλή , μέση , υψηλή) λαμβάνει χώρα η εκπαίδευση της κάθε κατηγορίας με τη χρήση ενός δικτύου rbf. Αυτό γίνεται και για τις 3 εκδοχές του αλγορίθμου, οι οποίες περιγράφονται παραπάνω. Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης, σε κάθε ένα από τα 3 χρησιμοποιούμενα δίκτυα συνάρτησης ακτινωτής βάσης , εισάγονται 6000 τυχαία δείγματα εισόδου, δηλαδή 6000 ανά τέταρτο τιμές του μέτρου της ταχύτητας του ανέμου. Μαζί με το μέτρο της ταχύτητας , στο διάνυσμα εισόδου του κάθε δικτύου ακτινωτής βάσης ενσωματώνονται επίσης η διεύθυνση της ταχύτητας, η πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος καθώς και η χρονική στιγμή της πρόβλεψης. Έτσι , το διάνυσμα εισόδου του κάθε δικτύου έχει την παρακάτω μορφή:

I=[W(t+1),D(t+1),P(t),H(t+1)*100] (8.3)

Η ώρα της πρόβλεψης πολλαπλασιάζεται με το 100 έτσι ώστε να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το διάνυσμα των πιο πρόσφατων τιμών της ισχύος(από μερικά ως μερικές χιλιάδες KW) αλλά και με την διεύθυνση της ταχύτητας, η οποία δίδεται σε μοίρες. Παράλληλα με το διάνυσμα εισόδου, διαμορφώνεται ένα διάνυσμα – στόχος , ο οποίος αποτελείται από δεδομένα αιολικής ισχύος τη χρονική στιγμή για την οποία γίνεται η πρόβλεψη, δηλαδή ένα τέταρτο μετά από την πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος:

T=P(t+1) (8.4)

Τόσο το διάνυσμα εισόδου όσο και το διάνυσμα στόχος περιλαμβάνουν δεδομένα 6000 τετάρτων, τα οποία μοιράζονται στα 3 δίκτυα rbf ανάλογα με την έξοδο του αυτό-οργανωμένου χάρτη. Σε κάθε δίκτυο rbf, το σύνολο εκμάθησης που διαμορφώνεται από τη σχέση (8.3) χωρίζεται σε τρία

υποσύνολα, το υποσύνολο εκπαίδευσης, το υποσύνολο επικύρωσης και το υποσύνολο αποτίμησης. Το ίδιο συμβαίνει και με το διάνυσμα στόχο. Αυτό γίνεται για να μπορέσει το κάθε νευρωνικό δίκτυο να συλλάβει άγνωστες περιπτώσεις της εξέλιξης του καιρού στην περιοχή των Α/Π, για τις οποίες δεν έχει εκπαιδευτεί. Για την 1η κατηγορία ανέμου , που περιέχει και τα περισσότερα δεδομένα όπως είδαμε στην ενότητα 8.2.2. , το υποσύνολο εκπαίδευσης επιλέγεται να είναι το 50% του συνόλου εκμάθησης και το υπόλοιπο 50% μοιράζεται ισόποσα στο υποσύνολο επικύρωσης και το υποσύνολο αποτίμησης. Για την 2η και την 3η κατηγορία του ανέμου, οι οποίες έχουν παρόμοιο αριθμό δεδομένων και σίγουρα μικρότερο από την 1η κατηγορία, το υποσύνολο εκπαίδευσης επιλέγεται να είναι το 70% του συνόλου εκμάθησης και το υπόλοιπο 30% μοιράζεται επίσης ισόποσα στα άλλα δύο υποσύνολα.

Στη συνέχεια, η παράμετρος bias του κάθε νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης τίθεται σε μια τιμή ανάλογη του μέσου όρου των παρατηρήσεων του υποσυνόλου εκπαίδευσης. Για την παραμετροποίηση των μεταβλητών εισόδου και συγκεκριμένα για τον καθορισμό της συμβολής της κάθε μεταβλητής στο σφάλμα πρόβλεψης, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος στηρίζεται στη μέθοδο PSO. Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου και του τρόπου που εφαρμόζεται κατά την εκπαίδευση των δικτύων συνάρτησης ακτινωτής βάσης δίδεται στην ενότητα 6.3.2.2. .

Με σκοπό την εποπτεία των αποτελεσμάτων της εκπαίδευσης, μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης , προσομοιώνεται η χρήση του κάθε νευρωνικού δικτύου στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία ανέμου και υπολογίζεται το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα της πρόβλεψης(NMAE). Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εκπαίδευση των δικτύων rbf με ένα δείγμα 2000 στοιχείων ,για κάθε μία από τις 3 εκδοχές του αλγορίθμου εκτίμησης ανεμολογικών χαρακτηριστικών. Αυτό το δείγμα επιλέχθηκε τυχαία μέσα από το σύνολο εκπαίδευσης του αυτό-οργανωμένου χάρτη.

	1η εκδοχή	2η εκδοχή(συσχέτιση)	3η εκδοχή(αμοιβαία πληροφορία)
NMAE 1ης κατηγορίας(%)	1.89	1.91	2.37
NMAE 2ης κατηγορίας(%)	3.04	3.17	2.57
NMAE 3ης κατηγορίας(%)	4.89	6.29	3.04
bias 1ης κατηγορίας	3	4	3
bias 2ης κατηγορίας	4	3	3
bias 3ης κατηγορίας	7	1	4
Αριθμός νευρώνων 1ης κατηγορίας	5	7	6
Αριθμός νευρώνων 2ης κατηγορίας	7	5	3
Αριθμός νευρώνων 3ης κατηγορίας	7	19	8

Παρατηρώντας τα προκύπτοντα σφάλματα, η πρώτη εντύπωση που μας δίνεται από την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων rbf με κάθε μία από τις 3 μεθόδους είναι ότι η 1η μέθοδος φαίνεται να προβλέπει καλύτερα από την 2η μέθοδο την ισχύ του επόμενου τετάρτου με βάση τα δεδομένα από τα αριθμητικά μοντέλα καιρού κατά το τρέχον τέταρτο και για τις 3 κατηγορίες της ταχύτητας του ανέμου. Η 3η εκδοχή φαίνεται χειρότερη από τις άλλες δύο όσον αφορά την πρώτη κατηγορία των

ταχυτήτων αλλά είναι πιο αποτελεσματική και από τις άλλες 2 εκδοχές, στις επόμενες δύο κατηγορίες.

8.3. Προσομοίωση και αποτίμηση του αναπτυσσόμενου μοντέλου

Για την αποτίμηση του μοντέλου μας επιλέχθηκαν 2 αιολικά πάρκα στην περιοχή της Πελοποννήσου, το ένα στην περιοχή του Ναυπλίου και το άλλο στην περιοχή της Τρίπολης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αφορούν και τα 2 αιολικά πάρκα ταυτόχρονα. Ως χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης καθορίστηκαν οι 24 ώρες (96 τέταρτα της ώρας), ως χρονικό βήμα το ένα τέταρτο και η κάθε μία από τις 3 μεθόδους προσομοιώθηκε για 500 ωριαία δείγματα. Δηλαδή, παρήχθησαν συνολικά 500 24ώρες προβλέψεις της αιολικής ισχύος με χρονικό βήμα ένα τέταρτο της ώρας. Κατά την προσομοίωση μας , για κάθε μία από τις 3 εκδοχές του αλγορίθμου που περιγράφεται στην ενότητα 8.2. ,για κάθε ένα από τα 500 δείγματα έναρξης της πρόβλεψης και για κάθε ένα από τα 96 τέταρτα του καθοριζόμενου χρονικού ορίζοντα , σχηματίζουμε ένα διάνυσμα το οποίο αποτελείται από το μέτρο και τη διεύθυνση της προβλεπόμενης από το αριθμητικό μοντέλο SKIRON ταχύτητας του ανέμου για την περιοχή ενδιαφέροντος και για την ώρα της πρόβλεψης, από την πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος και από την ώρα της πρόβλεψης. Στη συνέχεια, για κάθε μία μέθοδο, εκτελούμε τον αντίστοιχο αυτό-οργανωμένο χάρτη που κατασκευάσαμε και ανάλογα με την έξοδο του , εκτελούμε ένα από τα 3 δίκτυα rbf. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλο το χρονικό ορίζοντα και για τα 500 σημεία έναρξης της πρόβλεψης που καθορίσαμε.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα του κανονικοποιημένου μέσου απόλυτου σφάλματος (NMAE) και της κανονικοποιημένης ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος για την πρώτη ώρα της 24^{ης} πρόβλεψης για την 1^{η} εκδοχή(βασικός αλγόριθμος):

Τέταρτα	NMAE(%)	NRMSE(%)	NMAE(%) persistence	NRMSE(%) persistence
1	3.188	5.151	3.165	5.286
2	5.095	11.341	4.919	11.577
3	7.206	14.419	7.002	14.718
4	9.288	16.095	9.115	16.416

Και για τη 2^{η} εκδοχή(συσχέτιση)

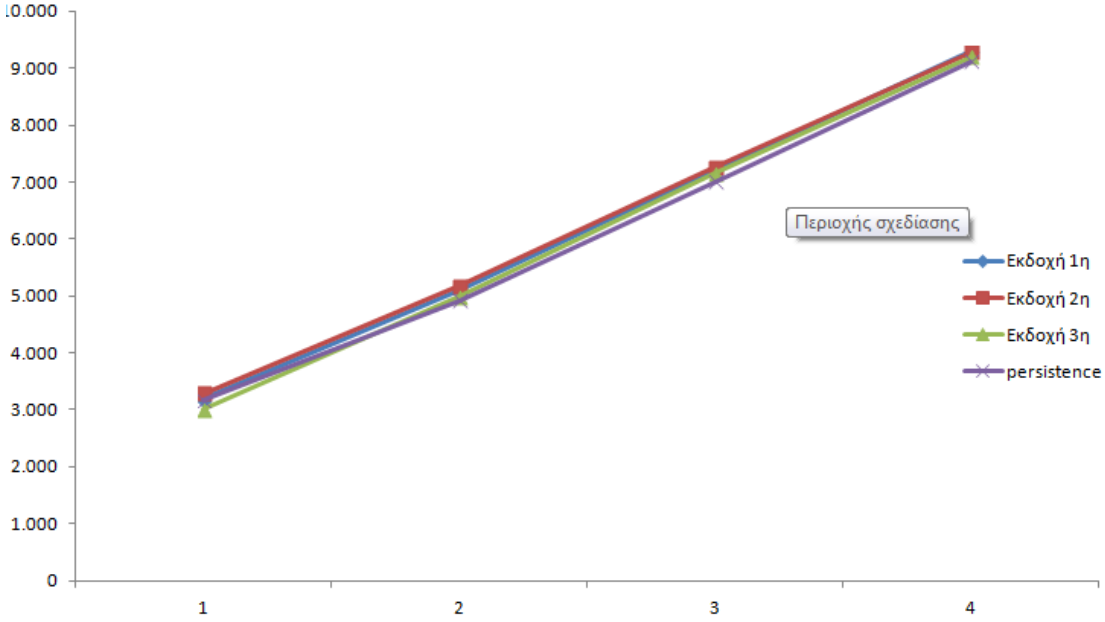
Τέταρτα	NMAE(%)	NRMSE(%)	NMAE(%) persistence	NRMSE(%) persistence
1	3.289	5.388	3.165	5.286
2	5.168	11.515	4.919	11.577
3	7.268	14.48	7.002	14.718
4	9.276	16.038	9.115	16.416

Και για την 3^{η} εκδοχή:

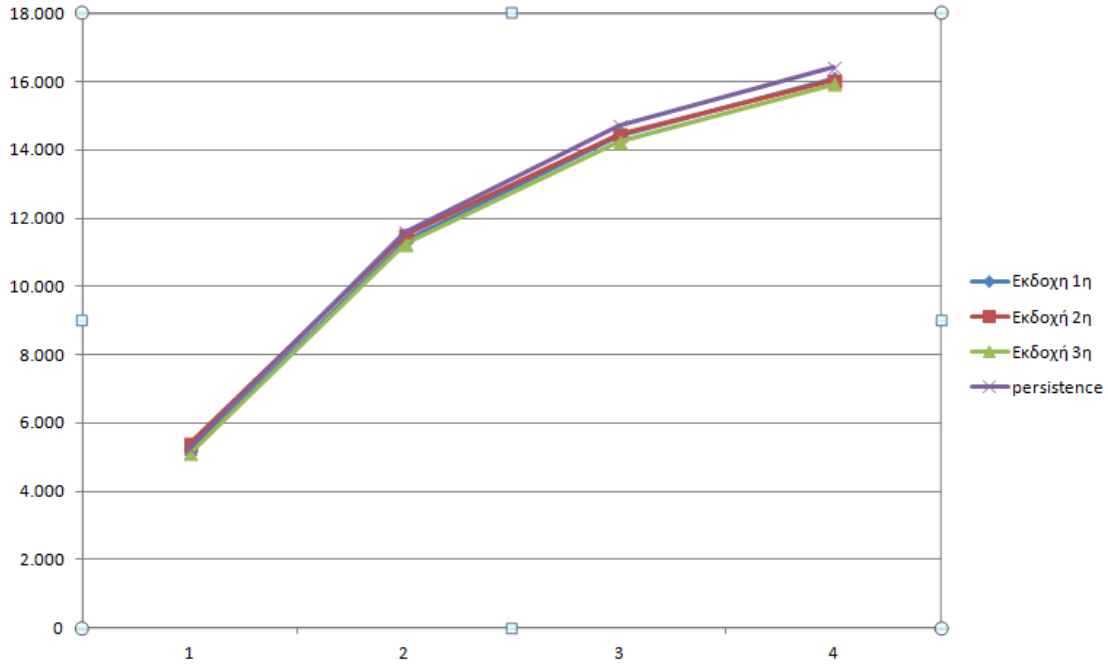
Τέταρτα	NMAE(%)	NRMSE(%)	NMAE(%) persistence	NRMSE(%) persistence
1	3.168	5.101	3.165	5.286
2	4.987	11.256	4.919	11.577
3	7.150	14.248	7.002	14.718

4	9.198	15.923	9.115	16.416

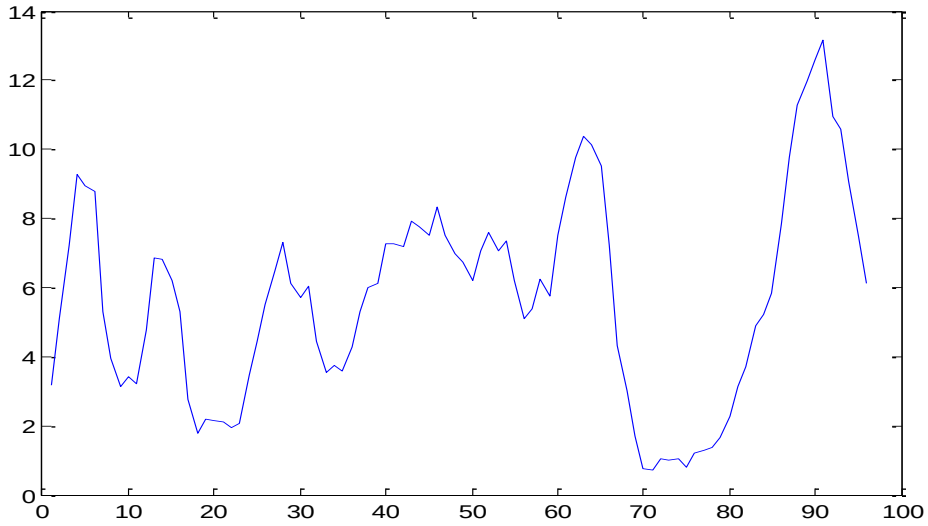
Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα του % κανονικοποιημένου μέσου απόλυτου σφάλματος και για τις 3 εκδοχές του αλγορίθμου που αναπτύξαμε αλλά και για το persistence κατά την πρώτη ώρα της πρόβλεψης:



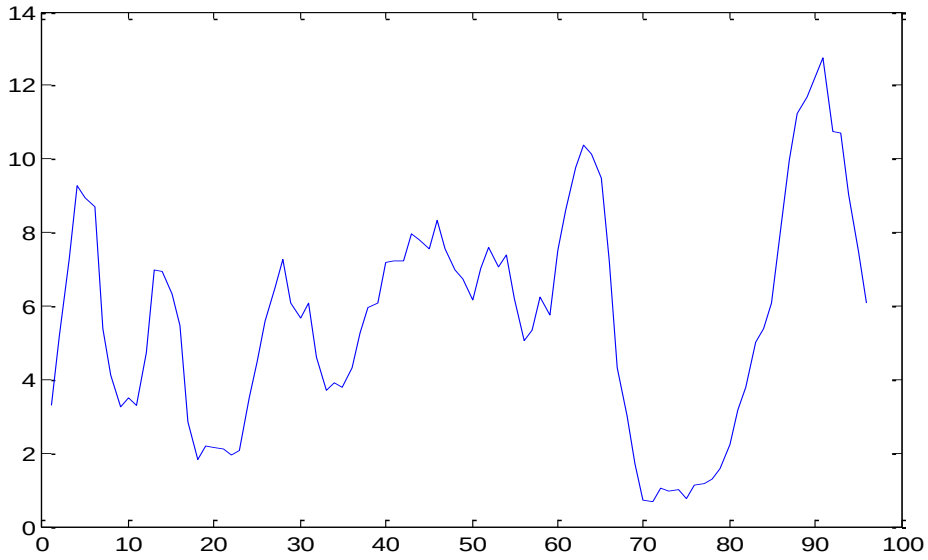
Ομοίως για το RMSE:



Παρακάτω παρατίθεται καθαρά για εποπτικούς λόγους το διάγραμμα του (%)NMAE για την 1^{η} εκδοχή για όλο το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης με δεδομένα όμως διαφορετικών προβλέψεων για κάθε ώρα :

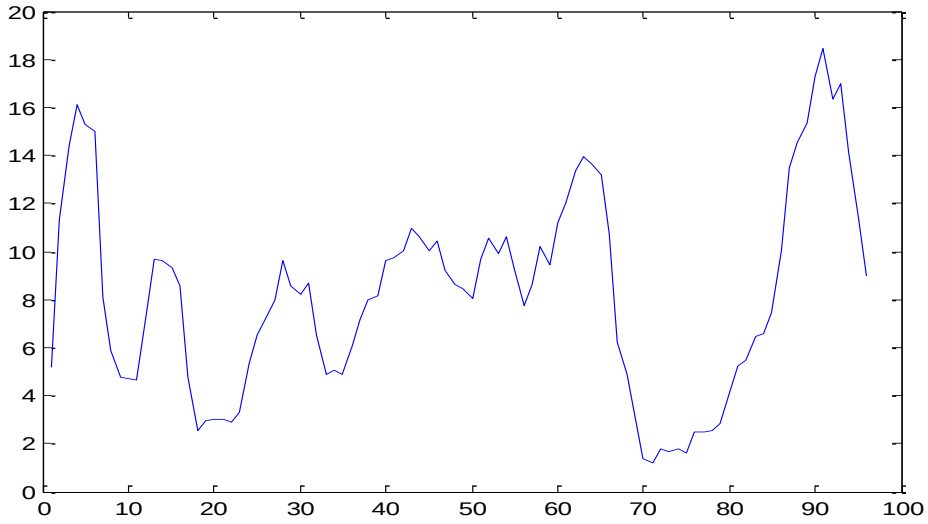


Και για τη δεύτερη εκδοχή:

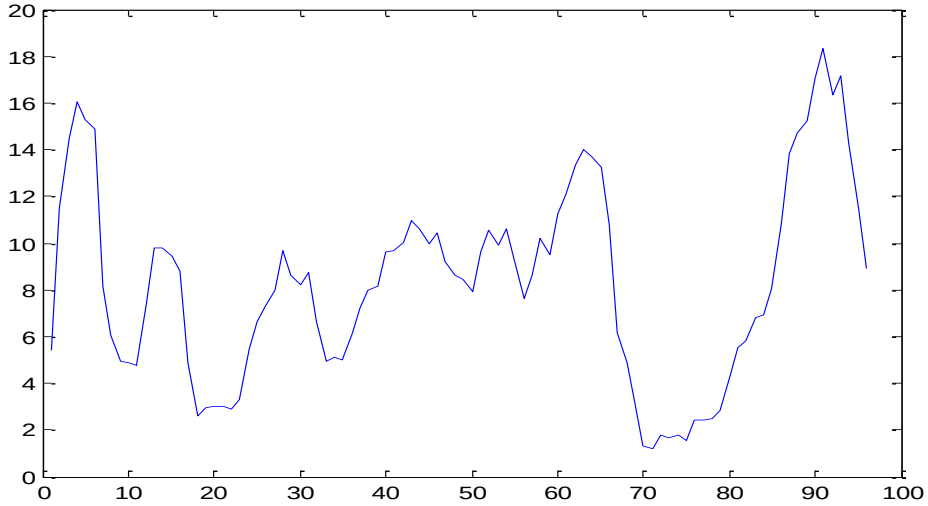


Ομοίως για το (%)RMSE:

Εκδοχή 1η



Εκδοχή 2η:



Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του μέσου απόλυτου σφάλματος και της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος υπεροχή στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κατά την 1η ώρα φαίνεται να έχει η 3η εκδοχή του αλγορίθμου που αναπτύξαμε, στην οποία χρησιμοποιήσαμε την αμοιβαία πληροφορία για την εκτίμηση των διερχόμενων μετώπων καιρού από την περιοχή ενδιαφέροντος. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από το συνολικό διάγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το μέσο απόλυτο σφάλμα , το οποίο αφορά μεγέθη παρόμοιας τάξεως με την ισχύ, δηλαδή τις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου και την πιο πρόσφατη τιμή της ισχύος, το persistence αποδίδει καλύτερα από όλες τις αναπτυσσόμενες εκδοχές του αλγορίθμου. Ακολουθεί σε απόδοση η 3η εκδοχή , ενώ η 1η και η 2η εκδοχή παρουσιάζουν παρόμοια απόδοση , χειρότερη από του persistence και της αμοιβαίας πληροφορίας. Λιγότερο αποδοτική από όλες τις εκδοχές φαίνεται να είναι η 2η , στην οποία χρησιμοποιήσαμε τη συσχέτιση.

Όσον αφορά το τετραγωνικό σφάλμα, φαίνεται ξεκάθαρα πως η 3η εκδοχή έχει το μικρότερο από όλα για όλα τα τέταρτα της 1ης ώρας της πρόβλεψης. Αυτό σημαίνει ότι έχει συλλάβει καλύτερα ακόμα και από το persistence τις περιπτώσεις που σχετίζονται με μεγέθη ανώτερης τάξεως από την ισχύ , δηλαδή μπορεί να προβλέπει καλύτερα την ισχύ που αντιστοιχεί στις μεσαίες και κυρίως στις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Το persistence έχει καλύτερη απόδοση από τις άλλες 2 εκδοχές για τα 2 πρώτα τέταρτα , αλλά χειρότερη για το 3ο και το 4ο τέταρτο , γεγονός το οποίο αναδεικνύει ότι τα μεγέθη ανώτερης τάξης έχουν μεγαλύτερη επιρροή στο τετραγωνικό σφάλμα, και εφόσον το persistence δε τα λαμβάνει καθόλου υπ'όψιν, είναι λογικό να αποκλίνει περισσότερο το σφάλμα του. Τέλος , πρέπει να σημειωθεί ότι ο βασικός αλγόριθμος και ο αλγόριθμος με βάση τη συσχέτιση έχουν παρόμοια συμπεριφορά και όσον αφορά τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, οπότε δεν φαίνεται η συσχέτιση να συνέβαλε ιδιαίτερα στην καλύτερη εκτίμηση των καιρικών συνθηκών στην περιοχή ενδιαφέροντος.