



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

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ν. ΣΙΔΕΡΑΤΟΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2010

.....
Γεώργιος Ν. Σιδεράτος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεώργιος Ν. Σιδεράτος, 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αναπτύσσονται δύο προηγμένες μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου που βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης. Με βάση τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που παρέχονται από μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής κλίμακας, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα πρόβλεψης τα οποία αφού εξετάσουν την αξιοπιστία αυτών των προβλέψεων, δίνουν ακριβείς προβλέψεις της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου για τις επόμενες δύο ή τρεις ημέρες. Εκ των προτέρων, αναλύονται οι διαδικασίες που ακολουθούν τα μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής κλίμακας και οι παράγοντες που επηρεάζουν τις σχέσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού με την παραγωγή ενός αιολικού πάρκου, οι οποίες συνθέτουν και το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

Η δομή του πρώτου μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που θα παρουσιαστεί στην παρούσα διατριβή βασίζεται στην ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Δηλαδή, με χρήση τεχνικών ασαφούς λογικής αξιολογούνται οι καιρικές προβλέψεις και με βάση αυτήν την αξιολόγηση ενεργοποιείται ένα από τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης του μοντέλου. Η δομή του δεύτερου μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος στηρίζεται στην κατάσταση της ατμόσφαιρας την χρονική στιγμή που γίνεται η πρόβλεψη. Η ατμοσφαιρική κατάσταση πρώτα κατηγοριοποιείται μέσω έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη. Στην συνέχεια νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης παρέχουν μία πρώτη εκτίμηση της αιολικής ισχύος. Στο επόμενο βήμα αξιολογούνται οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τέλος νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης διορθώνουν την αρχική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος με βάση την παραπάνω αξιολόγηση. Στο δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ενσωματώθηκε μία μεθοδολογία που μετατρέπει τις προβλέψεις σημείου σε προβλεπόμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος.

Η επικύρωση των προτεινόμενων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος έγινε σε off-line και σε on-line κατάσταση σε πραγματικά αιολικά πάρκα με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος συγκρίνεται με την απόδοση άλλων προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης κατά την on-line λειτουργία τους σε πέντε διαφορετικά αιολικά πάρκα την ίδια χρονική περίοδο.

Λέξεις κλειδιά

Πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης, αυτό-οργανούμενος χάρτης, ασαφή λογική, αβεβαιότητα της πρόβλεψης, πιθανοτική πρόβλεψη, αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Abstract

In the present doctoral thesis, two advanced wind power forecasting methodologies are developed. The methodologies are based on techniques of artificial intelligence. The two wind power prediction models that were developed, give precise forecasts of a wind farm production for the next two or three days, based on the numerical weather predictions that are provided by meteorological models with high resolution. Beforehand, the processes that they follow the meteorological models are analyzed and the factors that influence the relations of numerical weather predictions with the wind farm production. These relations compose the problem of wind power forecasting.

The structure of the first wind power forecasting model that will be presented in the present thesis is based on the quality of the numerical weather predictions. Firstly, the weather forecasts' reliability are estimated with a fuzzy inference module and depended on the numerical weather predictions quality, one of the radial base neural networks of the model are activated. The structure of the second proposed wind power forecasting model is based on the atmospheric conditions at the prediction time. The atmospheric conditions are first classified via a self-organized map. Then radial base function networks provide a first estimation of the wind power production. In the following step the uncertainty of the numerical weather predictions is estimated. At the end, radial base neural networks correct the initial wind power estimation base on the uncertainty of the numerical weather predictions. At the second wind power forecasting model a methodology was integrated that modifies the wind power point predictions to predicted wind power densities.

The validation of the proposed wind power forecasting models is done in off-line and in on-line mode in real wind farms with different characteristics. Moreover, the on-line performance of the models is compared with the respective performance of two different state-of-art wind power forecasting models in five wind farms on the same evaluation period.

Word keys

Wind power forecasting, Rbf neural networks, self-organized map, fuzzy logic, prediction uncertainty, probabilistic wind power predictions, numerical weather predictions

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή άρχισε να εκπονείται επίσημα τον Νοέμβριο του 2003 στο εργαστήριο Ηλεκτρικής Ισχύος του τομέα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2009.

Επιβλέπων της διδακτορικής μου διατριβής ήταν ο καθηγητής του Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαος Χατζηαργυρίου στον οποίο θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την βοήθεια, την συμπαράσταση και την καθοδήγηση που μου προσέφερε τόσο για την εκπόνηση της διατριβής όσο και στην διαμόρφωση της προσωπικότητάς μου.

Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή κ. Ε. Διαλυνά και την κα. Σ. Καββατζά για την πολύτιμη συμπαράστασή τους και την αποτελεσματική καθοδήγησή τους στην περάτωση της παρούσας διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ. Καρινιοτάκη για την ανεκτίμητη υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές που μου προσέφερε. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους συναδέλφους και το διοικητικό προσωπικό του εργαστηρίου για το ευχάριστο κλίμα προσέφεραν και την βοήθεια τους στα διάφορα ζητήματα που ανέκυπταν κατά τη διάρκεια της διατριβής.

Ευχαριστώ θερμά για την υποστήριξή τους, τους γονείς μου Νίκο και Ειρήνη και όλα τα αδέρφια μου, ιδιαίτερώς εκείνα που με ανέχτηκαν συγκατοικώντας μαζί μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία, τον Νίκο, τον Νεκτάριο, τον Γιάννη και τον Αποστόλη που στέκονταν πάντα δίπλα μου.

Αθήνα Δεκέμβριος 2009

Γεώργιος 'Joe' Σιδεράτος

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2 Η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής	11
1.3 Η αξία της πρόβλεψη της αιολικής ισχύος	11
1.3.1 Διαχειριστής συστήματος μεταφοράς (TSO).....	12
1.3.2 Η σημαντικότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος	12
1.4 Δομή της διατριβής.....	13
2.Τα βασικά χαρακτηριστικά του άνεμου στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα	15
2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου	16
2.3 Μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια	18
2.3.1 Η θεωρητική μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια.....	18
2.2.2 Το κάθετο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου	19
2.2.3. Η καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή.....	19
2.2.4 Μοντελοποίηση της καμπύλη ισχύος	21
2.3 Βασικά στοιχεία της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος.....	23
2.3.1 Περιγραφή της δομής ενός μετεωρολογικού μοντέλου	23
2.3.2 Η Υδροστατική προσέγγιση	24
2.3.3 Μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης τεχνολογίας αιχμής	25
2.4 Επίδραση της τοπολογίας εδάφους στον άνεμο.....	33
2.4.1 Τραχύτητα.....	34
2.4.2 Εμπόδια.....	34
2.4.3 Ορεογραφία.....	35
2.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου	39
3. Περιγραφή των κυριότερων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	40
3.1 Εισαγωγή	40
3.2 Φυσική προσέγγιση.....	41
3.2.1 Μεθοδολογία των μοντέλων φυσικής προσέγγισης	41
3.2.2 Το μοντέλο Predictor	42
3.2.2 Το μοντέλο Previento.....	43
3.2.3 Το μοντέλο EWind.....	43
3.2.4 Το μοντέλο LocalPred	44
3.2.5 Το μοντέλο HIPROM	45
3.3 Στατιστική προσέγγιση	45
3.3.1 Εισαγωγή	45
3.3.2 Αυτό-παλινδρομικά μοντέλα	46
3.3.3 Μοντέλα πρόβλεψης τεχνητής νοημοσύνης	51
3.3.4 Το ερευνητικό πρόγραμμα ANEMOS	54
3.4 Συμπεράσματα	56
4.Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος	57

4.1 Εισαγωγή	57
4.2 Το σφάλμα πρόβλεψης-ορισμός	58
4.3 Πρωτόκολλο αποτίμησης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος	59
4.3.1 Μοντέλα αναφοράς.....	59
4.3.2 Αποτίμηση βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος της πρόβλεψης	60
4.3.3 Σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης	61
4.3.4 Αποτίμηση βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης	61
4.4 Μέθοδοι αξιολόγησης του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	62
4.4.1. Συσχέτιση του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με την προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου	62
4.4.2 Συσχέτιση του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με τις μετεωρολογικές συνθήκες	62
4.4.3 Μέθοδος παλινδρόμησης Εκατοστημορίων-Quantile Regression	63
4.4.4 Εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος	64
4.4.5 Προσεγγίσεις για την εκτίμηση των διαστημάτων πρόβλεψης	65
4.4.6 Μοντέλο ασαφούς λογικής για την παραγωγή συναρτήσεων εξαρτώμενων κατανομών	67
4.5 Μέθοδοι για την αξιολόγηση των διαστημάτων πρόβλεψης.....	68
4.5.1 Μεταβλητή ένδειξης	68
4.5.2 Αξιοπιστία.....	69
4.5.3. Αιχμηρότητα και ανάλυση.....	70

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΩΤΗΣ ΒΑΣΗΣ 71

5.1 Εισαγωγή	71
5.2 Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης.....	72
5.2.1 Νευρωνικά δίκτυα-γενικά.....	72
5.2.2 Η δομή των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινωτής βάσης.....	73
5.2.3 Συναρτήσεις ακτινωτής βάσης.....	74
5.2.4 Ορθογώνια μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων.....	74
5.3 Συμπεράσματα από τις πρώτες δοκιμές που έγιναν για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος	76
5.4 Μοντέλο καμπύλης ισχύος	79
5.5 Προετοιμασία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού.....	80
5.6 Το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος βασισμένο στην αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (Μοντέλο I)	82
5.6.1 Εισαγωγή	82
5.6.2 Δομή ενός μοντέλου ασαφούς λογικής.....	82
5.6.3 Εκτίμηση των παραμέτρων των ασαφών μοντέλων με χρήση του αλγόριθμου οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος Levenberg-Marquardt.....	85
5.6.4 Η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού	89
5.6.5 Η μονάδα πρόβλεψης αιολικής ισχύος	98
5.7 Συμπεράσματα	104

**6. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ
ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ, ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΟΗΟΝΕΝ ΚΑΙ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΩΤΗΣ ΒΑΣΗΣ 104**

6.1 Εισαγωγή	104
6.2 Αυτό-οργανωμένοι χάρτες.....	105
6.2.1 Γενικά.....	105
6.2.2 Αλγόριθμος εκπαίδευσης των αυτό-οργανωμένων χαρτών.....	106
6.3 Η μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του Μοντέλου II	108
6.4 Η ασαφής μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού	113
6.5 Η μονάδα τελικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του Μοντέλου II	117
6.6 Το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	119
6.7 Συμπεράσματα	122

**7. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ..... 123**

7.1 Εισαγωγή	123
7.2 Off-line αποτίμηση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II.....	125
7.2.1 Αποτίμηση σε αιολικό πάρκο με πολύπλοκο έδαφος.....	125
7.2.2 Αποτίμηση σε αιολικό πάρκο με επίπεδο έδαφος.....	140
7.2.3 Αποτίμηση σε παράκτιο αιολικό πάρκο	153
7.3 Η On-line αποτίμηση του Μοντέλου II	165
7.3.1 Εισαγωγή	165
7.3.2 Περιγραφή των αιολικών πάρκων στα οποία έγινε η on-line αποτίμηση.....	166
7.3.3 Τα αποτελέσματα από την on-line αποτίμηση του Μοντέλου II.....	167
7.3.4 Η απόδοση του Μοντέλου II σε συνάρτηση με τη πολυπλοκότητα του εδάφους.....	171
7.4 Αξιολόγηση του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.....	173
7.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου	174

8. Συμπεράσματα-Μελλοντικές προοπτικές 175

8.1 Συμπεράσματα	175
8.2 Συμβολή της διατριβής	177
8.3 Μελλοντικές προοπτικές.....	178

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι έρευνες σχετικά με τις κλιματολογικές συνθήκες στη γη έχουν δείξει ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας της έχει αυξηθεί σημαντικά τους τελευταίους δύο αιώνες. Η μελέτη της Διεθνούς Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή αναφέρει ότι η μέση θερμοκρασία της γης αυξήθηκε περίπου κατά 0.6 °C τον εικοστό αιώνα [1]. Η ίδια μελέτη αναφέρει ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και του μεθανίου (CH₄) έχουν αυξηθεί κατά 31% και 151% αντίστοιχα, από το 1750. Σε αυτήν, όπως και σε άλλες μελέτες, αναφέρεται ότι οι αυξανόμενες συγκεντρώσεις των αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα έχουν συμβάλει αρκετά στην παρατηρούμενη παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου, προέρχεται από την αυξανόμενη χρήση των ορυκτών καυσίμων τα τελευταία 150 έτη. Γι' αυτό θεωρείται σήμερα ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές των παραπάνω ρύπων είναι, εν μέρει, αρμόδιες για την τρέχουσα αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Τέτοια συμπεράσματα έχουν ευαισθητοποιήσει την κοινή γνώμη και έχουν οδηγήσει στην προώθηση μέτρων, για τη μείωση της εκπομπής αερίων ρύπων στην ατμόσφαιρα, σε πολλές χώρες.

Το τρέχον ενεργειακό σύστημα, που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, δεν είναι βιώσιμο, εφόσον εκτιμήσεις δείχνουν ότι είναι περιορισμένα τα αποθέματα. Σήμερα, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής δημιουργείται με ορυκτά καύσιμα. Το πετρέλαιο χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα των μεταφορών, ενώ το φυσικό αέριο και ο άνθρακας χρησιμοποιούνται περισσότερο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο μέλλον, η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας (IEA) προβλέπει μια αύξηση 60% στη ζήτηση ενέργειας από τώρα έως 2030 και διπλασιασμό στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Παράλληλα, επειδή στα αναπτυσσόμενα κράτη αυξάνεται διαρκώς η ζήτηση για ενέργεια, θα δημιουργηθεί η ανάγκη να ενταθεί η εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων. Έτσι, οι χώρες που εισάγουν ορυκτά καύσιμα, θα εξαρτώνται όλο και περισσότερο από τους προμηθευτές τους, ο αριθμός των οποίων συνεχώς μειώνεται. Αυτή η μείωση του αριθμού των προμηθευτών ορυκτών καυσίμων θα επιδεινώσει επίσης τον κίνδυνο διακοπής ανεφοδιασμού, προκαλώντας κοινωνικά προβλήματα.

Οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ενέργειας με ορυκτά καύσιμα, όπως είναι η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, έχουν οδηγήσει τα κράτη στην αναζήτηση πιο καθαρών και βιώσιμων πηγών ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, στην ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Σε πολλές χώρες έχουν εφαρμοστεί πολιτικές για την εξάλειψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με επιδότηση νέων εγκαταστάσεων ή της επικείμενης παραγωγής [3].

Με αυτόν τον στόχο, η Ευρωπαϊκή Ένωση εξέδωσε το 2001 την οδηγία για την προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, καθορίζοντας τους στόχους του κάθε κράτους - μέλους. Συγκεκριμένα, η οδηγία ορίζει ότι το 12% της ακαθάριστης εθνικής κατανάλωσης ενέργειας, και το 22.1% της ηλεκτρικής παραγωγής πρέπει να καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέχρι το 2010 [4]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, περισσότερες από δεκαπέντε πολιτείες έχουν εφαρμόσει πολιτικές,

με σκοπό να προωθήσουν την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [5]. Ένα άλλο παράδειγμα είναι Ινδία, όπου η χρήση όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, μικρό υδροθεραπευτήριο και βιομάζα) υποστηρίζεται με διαφορετικά μέσα στήριξης [6].

Οι πιο πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες σήμερα είναι: οι υδροηλεκτρικές μονάδες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ανεμογεννήτριες, η βιομάζα και οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής. Αν και οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες έχουν βελτιωθεί τόσο, ώστε να εφαρμόζονται χωρίς σημαντικές απώλειες, η αιολική ενέργεια είναι εκείνη με τη γρηγορότερη ανάπτυξη. Η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς έχει αυξηθεί από 4800 MW το 1995, σε περισσότερο από 74223MW το 2006 [7]. Το Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (GWEC) προβλέπει ότι μέχρι το 2010 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς παγκοσμίως θα είναι 149500MW.

Αυτή η σημαντική αύξηση των επενδύσεων σε αιολική παραγωγή, μπορεί να συνδεθεί με διάφορους παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι η διαθεσιμότητα του πόρου, εφόσον υπάρχει αέρας παντού. Σε μια μελέτη από τον Hoogwijk [8], αξιολογήθηκε η παγκόσμια χερσαία οικονομική δυνατότητα, που μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αιολικής ενέργειας. Αυτή ορίστηκε ως το ποσό ενέργειας που μπορεί να παραχθεί τεχνικά, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι το ποσό που είναι ίσο με την παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2001, θα μπορούσε να παραχθεί με λιγότερο από 0.07 US\$/kWh. Ένας άλλος παράγοντας, που ευνοεί τη χρήση της αιολικής ενέργειας έναντι άλλων ανανεώσιμων πηγών, είναι το κόστος της εγκατάστασης της. Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις ανταγωνιστικότερες τεχνολογίες από οικονομική άποψη [2]. Μπορεί η γεωθερμία ή οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής να έχουν μικρότερο κόστος, η χρήση τους όμως περιορίζεται γεωγραφικά. Εκτός από τους παραπάνω δύο παράγοντες, οι κυβερνήσεις των κρατών έχουν υποστηρίξει σημαντικά την εξάπλωση της αιολικής ενέργειας. Το 2001, μόνο πέντε χώρες είχαν φτάσει τα 1000MW της εγχώριας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, ενώ τέσσερα χρόνια αργότερα, ένδεκα χώρες είχαν φτάσει σε αυτό το σημείο [9].

Αυτή η μεγάλη κλίμακας εξάπλωση της αιολικής ισχύος έχει οδηγήσει σε μια μεγάλη αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας σε πολλά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μερικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η διείσδυση της αιολικής ενέργειας μπορεί να φτάσει σε επίπεδα της τάξης του 40% ως 50% της συνολικής ζήτησης [10]. Αυτό μπορεί να είναι προβληματικό για τους χειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή, σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, η αιολική ενέργεια είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη. Οι χειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να κινηθούν ανάλογα, για να διατηρήσουν την ισορροπία του δικτύου, όταν η διείσδυση είναι μεγάλη. Η παραδοσιακή λύση για την ασφάλεια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, είναι να σχεδιαστούν πρόσθετες εφεδρείες παραγωγής, προκειμένου το δίκτυο να είναι σε θέση να αντέξει στις απροσδόκητες μεταβολές της αιολικής ενέργειας, που διεισδύει. Η πρόσθετη κατανομή εφεδρειών παρέχεται από τις συμβατικές μονάδες. Παράλληλα, λόγω της μικρής και μεταβαλλόμενης συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, οι χειριστές του ηλεκτρικού δικτύου είναι αναγκασμένοι να καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης της ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες.

Για να διατηρηθεί η ισορροπία του ηλεκτρικού δικτύου, παραγωγοί και διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να προγραμματίσουν τα μέσα παραγωγής, ώστε να είναι κατάλληλα, για να καλύψουν τη ζήτηση του φορτίου που, έχει προβλεφθεί εκ των προτέρων. Εργαλεία, όπως η πρόβλεψη της ζήτησης του φορτίου, ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής και η οικονομική κατανομή μονάδων, χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας [12-14]. Ένας τρόπος να λυθούν μερικά από τα προβλήματα, που δημιουργούνται από την διείσδυση της αιολικής ενέργειας, είναι να χρησιμοποιηθούν οι προβλέψεις της αιολικής ισχύος, με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι προβλέψεις της ζήτησης του φορτίου, δηλαδή στον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής και στην ελαχιστοποίηση των λειτουργικών δαπανών. Στην πραγματικότητα, οι προβλέψεις αιολικής ενέργειας

θεωρούνται αναγκαίες, και μερικές φορές και υποχρεωτικές [15], σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου είτε η διείσδυση είναι υψηλή είτε δεν υπάρχει δυνατότητα για επιπλέον εφεδρεία. Η ανάγκη για μία ακριβή πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας αναγνωρίζεται σήμερα από τη βιομηχανία παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να υπάρχει δυνατότητα διείσδυσης μεγάλης κλίμακας, χωρίς προβλήματα. [16]

1.2 Η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής

Από την αρχή της ιστορίας, η πρόβλεψη του μέλλοντος αποτελούσε πάντα πρόκληση για τον άνθρωπο. Υπάρχουν αναφορές σε μύθους ή σε αρχαία κείμενα, για τις διάφορες τεχνικές που επινόησε ο άνθρωπος, για να προβλέψει το μέλλον. Αυτή η επιθυμία είναι μια από τις κινητήριες δυνάμεις πίσω από την επιστημονική έρευνα σε πολλούς τομείς. Για αιώνες, τα αστρονομικά μοντέλα αναπτύσσονταν, για να προβλέψουν τη θέση των πλανητών και την επίδραση τους στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Σε άλλες αντίστοιχες περιπτώσεις, έχουν καθοριστεί οι φυσικοί νόμοι, που περιγράφουν την έκβαση των διαφόρων διαδικασιών. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας της πληροφορικής, οι δυνατότητες για πρόβλεψη επεκτάθηκαν σε τομείς όπως η μετεωρολογία, όπου η υπολογιστική ικανότητα ήταν ένας σημαντικός περιορισμός [17]. Κατά συνέπεια, είναι τώρα δυνατόν να προβλεφθούν πιο σύνθετες διαδικασίες, όπως η παραγωγή αιολικής ενέργειας, με αρκετή ακρίβεια.

Η πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας στοχεύει, στο να παρέχει στους τελικούς χρήστες τις εκτιμήσεις της πιθανής διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, σε μία δεδομένη στιγμή στο μέλλον. Διάφοροι ορίζοντες πρόβλεψης μπορούν να εξεταστούν. Η περίπτωση που μας ενδιαφέρει εδώ, είναι η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη, που αντιστοιχεί σε προβλέψεις 48 ωρών, με ωριαία χρονική ανάλυση. Αυτός ο ορίζοντας πρόβλεψης και αυτή η χρονική ανάλυση καλύπτουν τις απαιτήσεις για τον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής από τους διαχειριστές δικτύων [18] ή για τη συμμετοχή των παραγωγών στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνηθέστερη μορφή της εξόδου των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ενέργειας είναι οι προβλέψεις σημείων. Δηλαδή, για κάθε χρονικό βήμα πρόβλεψης, παρέχεται μία τιμή της παραγόμενης αιολικής ενέργειας. Εντούτοις, τα πιθανοτικά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας που έχουν αναπτυχθεί, παρέχουν όλες τις πιθανές τιμές, που μπορεί να λάβει η αιολική παραγωγή μία συγκεκριμένη ώρα.

Για να εκτιμηθεί η αιολική παραγωγή, είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν οι προβλέψεις ενός μετεωρολογικού μοντέλου, οι οποίες είναι γνωστές ως αριθμητικές προβλέψεις καιρού, από ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος πρέπει να είναι ικανό να προσομοιώνει τα φαινόμενα του κατώτερου στρώματος της ατμόσφαιρας, που δεν έχουν συμπεριληφθεί από το μετεωρολογικό μοντέλο. Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις, προκειμένου να μετατραπούν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε αιολική ισχύ. Η κάθε προσέγγιση κρύβει διαφορετικές αδυναμίες. Ο σκοπός σήμερα είναι η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, με τη συνεργασία μοντέλων διαφορετικής προσέγγισης.

1.3 Η αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Η αιολική ενέργεια είναι η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η μεταβλητότητά της, όμως, όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια, αποτελεί εμπόδιο για την εξέλιξή της και την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο ισχύος. Για την αντιστάθμιση αυτής της μεταβλητότητας, απαιτούνται μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για τις επόμενες ώρες, είτε για τη διαχείριση είτε για το εμπόριο της ενέργειας. Αυτά τα λειτουργικά εργαλεία πρόβλεψης θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τελικών χρηστών, όπως είναι οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ενέργειας, οι αγοραστές της ενέργειας και οι διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς.

1.3.1 Διαχειριστής συστήματος μεταφοράς (TSO)

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

Οι προβλέψεις της ζήτησης φορτίου είναι συνήθως αρκετά ακριβείς, με σφάλμα μόλις 1.5-2.5% του επιπέδου της ζητούμενης ισχύος για προβλέψεις που αφορούν την επόμενη ημέρα, ενώ το σφάλμα δεν ξεπερνά το 5% για τις προβλέψεις που αφορούν την επόμενη εβδομάδα [18]. Παρ' όλ' αυτά, η έρευνα γύρω από τις μεθόδους πρόβλεψης της ζήτησης συνεχίζεται, καθώς η περαιτέρω μείωση του σφάλματος θα παρέχει σημαντική εξοικονόμηση, στις μονάδες που διευθύνουν μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ενέργειας.

Για να πραγματοποιηθεί ο προγραμματισμός της επόμενης μέρας, ο TSO μπορεί να λάβει υπόψη δικά του μέσα παραγωγής ενέργειας, εάν υπάρχουν, ή/και να αγοράσει ενέργεια από ανεξάρτητους παραγωγούς ενέργειας. Πρέπει, επομένως, ανάμεσα στους υποψήφιους παραγωγούς, να εντοπίσει εκείνους, που θα του παρέχουν την ενέργεια που απαιτεί η ζήτηση, και μάλιστα σε χαμηλό κόστος. Είναι εμφανές ότι οι παραγωγοί της αιολικής ισχύος δεν μπορούν να καταθέσουν τις προτάσεις τους, χωρίς να γνωρίζουν εκ των προτέρων την ισχύ, που θα παράγουν τα αιολικά πάρκα. Γι' αυτό το λόγο, γίνεται επιτακτική η ανάγκη για χρήση προηγμένων εργαλείων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [19].

1.3.2 Η σημαντικότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Αν και η σημαντικότητα της πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας είναι μεγάλη, όσον αφορά στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσής της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι δημοσιευμένες μελέτες που παρουσιάζουν την αξία της, είναι λίγες. Ένας από τους κύριους λόγους γι' αυτό, είναι 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 αιολικής ενέργειας που παράγεται, σε αντίθεση με ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, που στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στις πιο αργές μονάδες παραγωγής. Ένα άλλο θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι η κατανομή των αιολικών πάρκων μέσα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο τα αιολικά πάρκα είναι διάσπαρτα σε μια ευρεία περιοχή, τα σφάλματα των προβλέψεων των επιμέρους αιολικών πάρκων αλληλοαναιρούνται. Αντίθετα, σ' ένα αυτόνομο νησιωτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή όλων των αιολικών πάρκων συσχετίζεται ιδιαίτερα.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει την αξία της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, είναι ο αριθμός των γραμμών μεταφοράς που ρέει το φορτίο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα καλά διασυνδεδεμένο δίκτυο, όπως αυτό της δυτικής Δανίας, μπορεί να διαχειριστεί σχετικά εύκολα τις μεγάλες ποσότητες της αιολικής ενέργειας, που δεν έχουν προβλεφθεί σωστά [20]. Τα απομονωμένα ή ελαφρώς διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως αυτά που υπάρχουν στην Ιρλανδία, είναι ευαίσθητα στα σφάλματα της πρόβλεψης. Κατά συνέπεια, περιορίζεται το ποσό της αιολικής ενέργειας, που μπορεί να ενσωματωθεί στο δίκτυο.

Στο [21] χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο, για να ερευνηθεί η συμβολή της ακρίβειας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, στο κόστος της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το πιθανοτικό μοντέλο κόστους Elfin, που προτείνεται σε αυτή την μελέτη, εφαρμόστηκε σε τρεις περιπτώσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολογίζει το αναμενόμενο κόστος κάθε μονάδας, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις ζήτησης φορτίου και

αιολικής παραγωγής. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν, όπως ήταν αναμενόμενο άλλωστε, ότι η αυξανόμενη ακρίβεια των προβλέψεων οδηγεί σε χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες.

Μια άλλη δυσκολία στην αξιολόγηση της χρησιμότητας ή του όφελους, που απορρέει από τις προβλέψεις αιολικής ενέργειας, είναι ότι ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζονται οι προβλέψεις της αιολικής ισχύος διαφέρει, από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα άλλο. Στο [22] διαπιστώθηκε ότι, στον διαχειριστή του δικτύου μεταφοράς Elsam στη Δανία, η χρήση των προβλέψεων ποίκιλε μεταξύ των υπαλλήλων της. Μερικοί αναφέρονταν στις προβλέψεις πολύ συχνά, ενώ άλλοι τις χρησιμοποίησαν μόνο για να αξιολογήσουν ορισμένες καταστάσεις.

Πολλές μελέτες έχουν ερευνήσει την αξία των προβλέψεων της αιολικής ενέργειας, ως εργαλεία στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η λογική πίσω από αυτές τις μελέτες είναι ότι το κόστος από τα σφάλματα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, μπορεί «εύκολα» να συνδεθεί με τις ποινικές ρήτρες, στις οποίες υποβάλλονται οι παραγωγοί αιολικής ενέργειας στην αγορά ενέργειας. Μια τέτοια μελέτη πραγματοποιήθηκε για την αγορά Nordpool [23]. Οι συντάκτες προσομοίωσαν ένα σημαντικό ποσό παραγωγής αιολικής ενέργειας στη Δανία και εξέτασαν τον αντίκτυπό του στην αγορά Nordpool. Έδειξαν ότι η εφαρμογή ενός μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος (που σε αυτήν την περίπτωση αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Risø), με βάση τους κανόνες του Nordpool (εικοσιτετράωρες προσφορές που αρχίζουν τα μεσάνυχτα και προσφορές που υποβάλλονται το μεσημέρι), οδήγησε σε ποινικές ρήτρες, που αντιστοιχούσαν κατά προσέγγιση στο 12% της μέσης τιμής.

Στο [24] εξετάζεται η Ισπανική αγορά ενέργειας. Προτείνεται μία πιθανοτική μεθοδολογία, που εκτιμάει το κόστος από τα σφάλματα της πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας. Τα σφάλματα των προβλέψεων μοντελοποιήθηκαν με β - κατανομές [25, 26]. Με βάση αυτό το μοντέλο και τις τιμές ρύθμισης, υπολογίζονται οι πιθανές ποινικές ρήτρες, που θα πληρώνονταν από τους παραγωγούς αιολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου. Η μελέτη αυτή, που πραγματοποιήθηκε για ενιαίο αιολικό πάρκο, για δεκαπέντε αιολικά πάρκα και για τη συνολική παραγωγή αιολικής ενέργειας της Ισπανίας, χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, των σφαλμάτων που λήφθηκαν από το μοντέλο πρόβλεψης Previento [27, 26]. Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι τα ετήσια σφάλματα της πρόβλεψης θα κόστιζαν κατά προσέγγιση 10% των εσόδων των πάρκων από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Περαιτέρω, οι συντάκτες έδειξαν ότι το κόστος του σφάλματος ποίκιλε μέσα στο έτος, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται κατά τους θερινούς μήνες.

Σε μια άλλη μελέτη [28, 29] εξετάστηκε η περίπτωση της ολλανδικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας APX. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το όφελος από τη χρήση του μοντέλου πρόβλεψης, αντιστοιχούσε με το 87% του οφέλους που θα υπήρχε, αν οι προβλέψεις είχαν μηδενικό σφάλμα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή των πλειοδοτικών στρατηγικών προβλέψεων από τον Usaola και την ομάδα του, για την εκτίμηση του μοντέλου πρόβλεψης Sireolico στην Ισπανία, με την υπόθεση ότι συμμετέχει στην ισπανική ενεργειακή αγορά. Στη συνέχεια, επέκτεινε την έρευνά του σε διάφορα μοντέλα πρόβλεψης, προσομοιώνοντας τη συμμετοχή στην Ευρωπαϊκή ενεργειακή αγορά. Και στις δύο περιπτώσεις, το αποτέλεσμα ήταν η μείωση από 30% έως και 50% του συστηματικού κόστους, με τη χρήση εξελιγμένων προσεγγίσεων πρόβλεψης, αντί απλών μοντέλων πρόβλεψης [30,31].

1.4 Δομή της διατριβής

Ο σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να αναπτύξει ένα πλαίσιο με οδηγίες για κάποιον που επιθυμεί να αναπτύξει ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Συγκεκριμένα, απαντάει στα ερωτήματα όπως ποια είναι τα φαινόμενα της ροής του ανέμου στο επίπεδο του ύψους μιας ανεμογεννήτριας, ποια είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της εξόδου μιας ανεμογεννήτριας, τις δυνατότητες και τις αδυναμίες των μετεωρολογικών μοντέλων που η έξοδος τους είναι η βασική είσοδος ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής

ισχύος, ποιες είναι οι σχέσεις της απόδοσης ενός στατιστικού μοντέλου με τις μεταβλητές εισόδου που εφαρμόζει και τέλος τι μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για την εκτίμηση της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου. Παράλληλα, παρουσιάζονται δύο μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και που η απόδοση τους αποδείχθηκε ότι είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστική σήμερα γι' αυτό και μπορούν να εφαρμοστούν από οποιονδήποτε τελικό χρήστη. Τέλος σαν κύριος σκοπός κατά τη δημιουργία των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι οι οδηγίες και οι απαιτήσεις που έχουν εκφραστεί από τους τελικούς χρήστες τέτοιων μοντέλων πρόβλεψης.

Έτσι, το δεύτερο κεφάλαιο αυτής της διατριβής αναλύει τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου στο κατώτερο ατμοσφαιρικό στρώμα και τα βασικά φαινόμενα της ροής του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης που επηρεάζουν την έξοδο ενός αιολικού πάρκου. Παράλληλα, περιγράφει αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της εξόδου μίας ανεμογεννήτριας και τις σχέσεις της ταχύτητας του ανέμου με την αιολική παραγωγή. Μια λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας των μοντέλων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού δείχνει το πόσο περίπλοκο είναι το πρόβλημα της εκτίμησης του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης. Τέλος, περιγράφεται η σχέση της ακρίβειας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με την μορφολογία του εδάφους που είναι τοποθετημένο το υπό μελέτη αιολικό πάρκο.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι προσεγγίσεις του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Συγκεκριμένα, αναπτύσσονται οι βασικές φυσικές παραμετροποιήσεις όπως η υδροστατική και η μη υδροστατική προσέγγιση της προσομοίωσης του ανέμου. Στη συνέχεια περιγράφονται διεξοδικά οι στατιστικές μεθοδολογίες των βασικότερων μοντέλων πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής. Έτσι ο αναγνώστης με αυτό το κεφάλαιο θα έχει μια καλή επισκόπηση του τρόπου παραγωγής προβλέψεων της αιολικής ισχύος.

Τα κριτήρια αξιολόγησης των μοντέλων πρόβλεψης που έχουν καθιερωθεί σήμερα στο τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, αναπτύσσονται στο τέταρτο κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται επίσης οι μέθοδοι εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, καθώς και το μέγεθος του σφάλματος που αναμένεται από ένα μοντέλο πρόβλεψης.

Στο πέμπτο και το έκτο κεφάλαιο περιγράφονται οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια της διατριβής. Περιγράφονται διεξοδικά τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που είναι τα κύρια συστατικά των προτεινόμενων συστημάτων πρόβλεψης και μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για την εκπαίδευσή τους. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος σχεδιασμού των μοντέλων που βασίζονται σε ασαφή λογική. Παρουσιάζονται λοιπόν δύο μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που το πρώτο είναι βασισμένο στην ποιότητα των μετεωρολογικών προβλέψεων και το δεύτερο είναι βασισμένο στην κατάσταση της ατμόσφαιρας. Στο κείμενο θα αναφέρονται ως Μοντέλο I και Μοντέλο II αντίστοιχα. Το Μοντέλο I αποτελείται από μία μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και μία μονάδα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Ενώ, το Μοντέλο II αποτελείται από την μονάδα της προκαταρκτικής πρόβλεψης, την μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και την μονάδα της τελικής πρόβλεψης. Τέλος περιγράφεται μία μεθοδολογία που παρέχει πιθανοτικές προβλέψεις της αιολικής ισχύος.

Τέλος, στο κεφάλαιο επτά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μεθοδολογιών που περιγράφηκαν στα κεφάλαια πέντε και έξι. Εμφανίζονται αποτελέσματα τόσο από την off-line εκτέλεση όσο και από την on-line εκτέλεση σε πραγματικές συνθήκες. Οι προβλέψεις που αποτιμούνται αντιστοιχούν σε μία μεγάλη γκάμα αιολικών πάρκων, έτσι ώστε η αποτίμηση των προτεινόμενων μεθοδολογιών να γίνει σε όλες τις περιπτώσεις που επηρεάζουν την προβλεψιμότητα της αιολικής ισχύος.

Κεφάλαιο 2

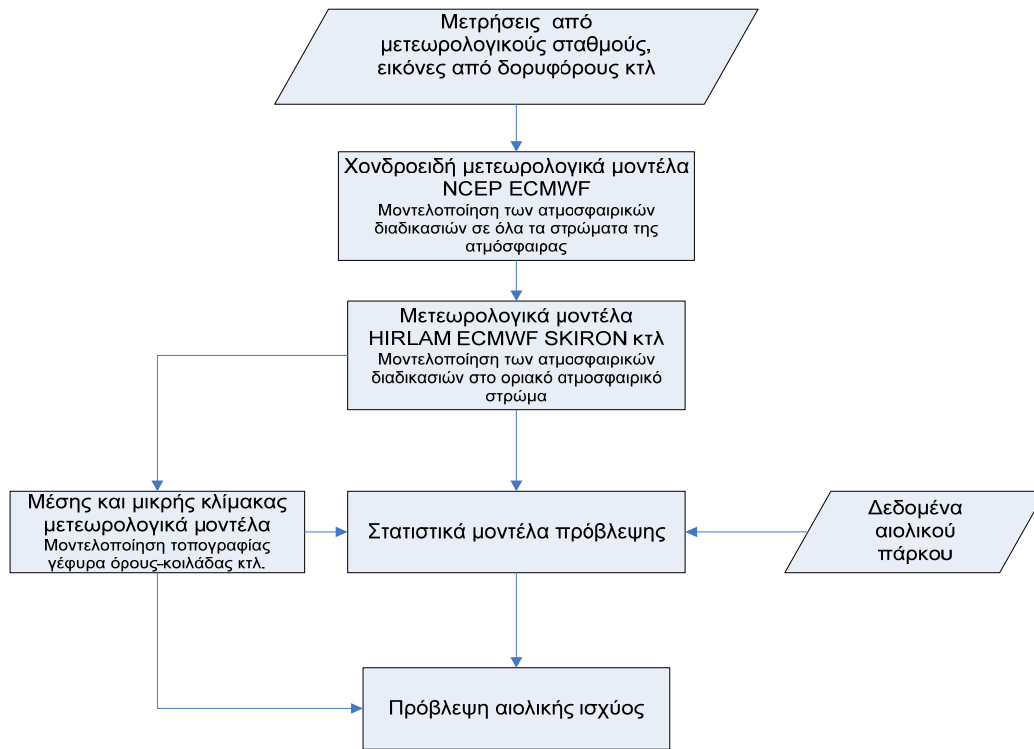
Τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα

2.1 Εισαγωγή

Ο άνεμος είναι ένα έντονα στοχαστικό φαινόμενο-διαδικασία. Αυτό θα φανεί καθαρά στο παρόν κεφάλαιο, όπου αναλύονται τα χαρακτηριστικά του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα, δηλαδή στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας. Η μεταβολή της ταχύτητας και της διεύθυνσης ενός ισοβαρούς μετώπου παραμένει σε πολλές περιπτώσεις ανεξήγητος, άρα και ακαθόριστος. Εν συνεχεία, η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική δεν μπορεί να καθοριστεί με σαφή και ντετερμινιστικό τρόπο, λόγω του ότι η ανάλυση της ατμόσφαιρας είναι πεπερασμένη και βρίσκεται σε επίπεδο αιολικού πάρκου και όχι στο επίπεδο της έλικας μιας ανεμογεννήτριας. Χαρακτηριστικά του ανέμου, που βασίζονται στην αλληλεπίδρασή του με την επιφάνεια της γης ή στη μεταβολή της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης του κατώτερου ατμοσφαιρικού στρώματος, μεταβάλλονται σε πολύ μικρότερη κλίμακα, από αυτή που μπορεί να περιγράψει η μετεωρολογία ή κλιματολογία [32].

Η χρήση στατιστικών μεθόδων στην επίλυση του προβλήματος της πρόβλεψης της ενέργειας από τον άνεμο θεωρείται απαραίτητη, όπως και η βοήθεια της μετεωρολογίας. Με μία αξιόπιστη- αν και όχι τόσο λεπτομερή- περιγραφή της ατμόσφαιρας πάνω σε μία χρονοσειρά αιολικής παραγωγής, μπορούν να αναγνωριστούν με συνδυαστικό τρόπο πολλές από τις άγνωστες ιδιότητες του ανέμου. Τέλος, η ενσωμάτωση της στατιστικής στην μετεωρολογία σίγουρα θα φέρει λύσεις ή έστω θα προάγει σημαντική πληροφορία στην εξέλιξη των ατμοσφαιρικών φαινομένων[33].

Το κεφάλαιο αυτό ξεκινάει με τη στατιστική περιγραφή του ανέμου σε τοπικό επίπεδο. Κοντά στην επιφάνεια της γης, σε μια τοποθεσία, το αιολικό δυναμικό μπορεί να περιγραφεί από μία τυπική κατανομή πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου. Στη συνέχεια, εξετάζεται η αντιστοιχία της κατανομής του ανέμου με την κατανομή της αιολικής ισχύος. Με σκοπό να δοθεί μια εικόνα της δυσκολίας της εκτίμησης των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, γίνεται μία εκτενής περιγραφή των μετεωρολογικών μοντέλων και των μεθόδων που χρησιμοποιούν. Μια σειρά από φαινόμενα του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα, συμπληρώνουν το πάζλ του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, που φαίνεται και σχηματικά με το ακόλουθο διάγραμμά ροής.



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα ροής του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

2.2 Στατιστικά χαρακτηριστικά του ανέμου

Ο άνεμος προκαλείται από την κίνηση αέριων μαζών, που οφείλονται κυρίως στις διαφορές των θερμοκρασιών και των πιέσεων των στρωμάτων της ατμόσφαιρας, που μεταβάλλονται συνεχώς [34]. Η αδιάκοπη μεταβολή της μορφής και της φυσικής κατάστασης των στρωμάτων της ατμόσφαιρας, έχει σαν αποτέλεσμα η συμπεριφορά του ανέμου να είναι διακοπτόμενη και έντονα μεταβαλλόμενη. Η ανάλυση των χρονοσειρών της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου έχει αποδείξει ότι τυχαία διαστήματα νηνεμίας εμφανίζονται τόσο σε ωριαία όσο και σε ημερήσια βάση. Η εμφάνιση των διαστημάτων, στα οποία μεταβάλλεται απότομα τόσο η ταχύτητα του ανέμου όσο και η διεύθυνσή του, κάνει πολύ δύσκολο τον υπολογισμό των στατιστικών ιδιοτήτων των χρονοσειρών του ανέμου και την μοντελοποίησή του. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός κατάλληλου στατιστικού μοντέλου, για την περιγραφή της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου. Από τις μελέτες που έγιναν σε διάφορες τοποθεσίες, προκύπτει ότι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου προσεγγίζεται καλύτερα με την κατανομή Weibull [35]. Γενικά, η κατανομή Weibull είναι ασύμμετρη και περιγράφεται με δύο παραμέτρους, [36] όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$f(u) = \left(\frac{k_w}{c_w}\right) \left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right) \quad (2.1)$$

Η παράμετρος k_w καθορίζει το σχήμα της κατανομής και η παράμετρος c_w καθορίζει το βαθμό της κατανομής, γι' αυτό και ονομάζονται συντελεστές σχήματος και κλίμακας της

κατανομής αντίστοιχα [37]. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες υπολογίζονται οι δύο αυτοί παράμετροι, όπως είναι η μέθοδος των ορμών ή η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας [38]. Μπορεί όμως εύκολα να υπολογιστεί, μετασχηματίζοντας την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας $F(u)$, λογαριθμίζοντας τα δύο μέλη της δύο φορές.

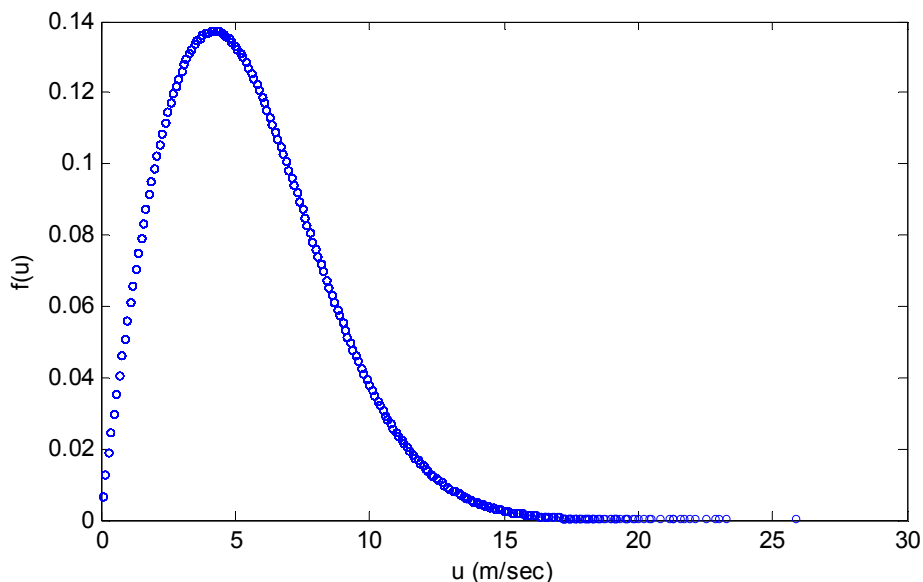
$$\ln[-\ln(1-F(u))] = k_w \ln(u) - k_w \ln c_w \quad (2.2)$$

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

$$F(u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{u}{c_w}\right)^{k_w}\right] \quad (2.3)$$

Αναπαριστώντας γραφικά το $\ln(u)$ με το $\ln[-\ln(1-F(u))]$ της εξίσωσης 2.2, η κλίση της ευθείας που προκύπτει είναι ο συντελεστής σχήματος k_w της κατανομής και το σημείο τομής με τον άξονα y ισούται με τον παράγοντα της εξίσωσης 2 $-k_w \ln c_w$ [35]. Γενικά, για την εκτίμηση των παραμέτρων k_w και c_w , χρειάζονται δεδομένα ταχύτητας του ανέμου, τα οποία να καλύπτουν περίοδο αρκετών χρόνων. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η κατανομή Weibull της ταχύτητας του ανέμου, όπως έχει εκτιμηθεί με τη χρονοσειρά των μετρήσεων της ταχύτητας, που αντιστοιχεί στο αιολικό πάρκο Klim. Η χρονοσειρά καλύπτει μια περίοδο τεσσάρων χρόνων και οι παράμετροι της κατανομής υπολογίστηκαν με την παραπάνω γραμμική μέθοδο ($k_w=6.13$, $c_w=1.94$). Όπως φαίνεται στο σχήμα, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull είναι ασύμμετρη από τη δεξιά πλευρά, κάτι που δείχνει ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι πιο σπάνιοι από τους μέτριους και ασθενείς ανέμους. Επίσης, τα χαρακτηριστικά του ανέμου αλλάζουν χρόνο με τον χρόνο, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στους παραμέτρους της κατανομής. Μία περιγραφή της συμπεριφοράς του ανέμου σε έναν μεγάλο αριθμό περιοχών στην Ευρώπη, είναι διαθέσιμη στον Ευρωπαϊκό Άτλαντα Αιολικού Δυναμικού [39]. Όλη η πληροφορία της συμπεριφοράς του ανέμου συγκεντρώνεται στις δύο παραμέτρους της συνάρτησης Weibull, συναρτήσκει με τη διεύθυνση του ανέμου.

Η κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου έχει συνήθως δύο κέντρα και σχετίζεται αποκλειστικά με τη μορφολογία του εδάφους της περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι συνήθως ο άνεμος έρχεται από δύο καθορισμένες κατευθύνσεις. Με βάση την κατανομή της διεύθυνσης του ανέμου, μπορούμε να εκτιμήσουμε ποιοι είναι οι άνεμοι που μας δίνουν μεγάλη αιολική παραγωγή, εφόσον οι ισχυροί άνεμοι προέρχονται από συγκεκριμένες διευθύνσεις [40].



Σχήμα 2.2: Η Weibull συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου για το αιολικό πάρκο Klim

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

2.3 Μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια

2.3.1 Η θεωρητική μετατροπή του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια

Η αιολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την κινητική ενέργεια του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) αποτελούν το μέσο της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία ονομάζεται και αιολική ενέργεια. Οι Α/Γ λαμβάνουν την ενέργεια του ανέμου μέσω της έλικας. Η έλικα περιστρέφει τον δρομέα της γεννήτριας της Α/Γ, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η σχέση που συνδέει την ενέργεια του ανέμου με την έξοδο μίας Α/Γ, έχει την μορφή [34]:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho A_r C_p u^3 \quad (2.1)$$

Το u είναι η ταχύτητα του ανέμου, το ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και η σταθερά A_r η περιοχή που σαρώνει η έλικα.

Η ποσότητα C_p είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής της ισχύος και καθορίζει την απόδοση της Α/Γ. Ο συντελεστής C_p εξαρτάται από τη γωνία της έλικας και είναι ανάλογη με τον λόγο της ταχύτητας του άκρου της έλικας και της ταχύτητας του ανέμου. Η μέγιστη τιμή του C_p καθορίζεται από το όριο Betz, που ισούται με $16/27$ και αντιπροσωπεύει τη μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από τον άνεμο, όταν πέφτει κάθετα στο επίπεδο της έλικας. Στην πραγματικότητα, ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p παίρνει πολύ μικρότερες τιμές από το

όριο του Betz, λόγω των αεροδυναμικών απωλειών της έλικας και των μηχανικών απωλειών της Α/Γ. Ο συντελεστής C_p μίας κάλα σχεδιασμένης Α/Γ, είναι περίπου 0.35.

2.2.2 Το κάθετο προφίλ της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου u στην εξίσωση 2.1 αντιστοιχεί σ' αυτήν, όπως μετριέται στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ. Η ταχύτητα του ανέμου όμως, μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος που μετριέται. Αυτό οφείλεται στην τραχύτητα του εδάφους και στα εμπόδια που συναντάει ο άνεμος και γι' αυτό η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα, δηλαδή στο επίπεδο της ατμόσφαιρας κόντα στην επιφάνεια της γης. Προς το παρόν, αναφέρεται ως τραχύτητα το συνολικό αποτέλεσμα της επιφάνειας του εδάφους, που οδηγεί σε μία γενική επιβράδυνση του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης. Στοιχεία που επηρεάζουν την τραχύτητα, μπορεί να είναι το μέγεθος της βλάστησης, η επικάλυψη του εδάφους από χιόνι, η κατάσταση της θάλασσας κ.λπ.. Η ακριβής έννοια της τραχύτητας αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

Η εκτίμηση της τραχύτητας μιας περιοχής γίνεται με μια παράμετρο, που μετριέται σε μονάδες μήκους και ονομάζεται μήκος τραχύτητας z_0 . Το μήκος της τραχύτητας μπορεί να πάρει τιμές από 0.0002, που αντιστοιχεί σε θαλάσσια επιφάνεια μέχρι 1, που αντιστοιχεί σε περιοχή με έντονη ανομοιομορφία και μεγάλα εμπόδια. Έτσι, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μοντελοποιηθεί, σε συνάρτηση με το μήκος της τραχύτητας z_0 και με το ύψος z από την επιφάνεια της γης, με την παρακάτω σχέση:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2.2)$$

Όπου κ είναι η σταθερά von Kármán, που ισούται με 0.41 και u_* είναι η ταχύτητα τριβής, που περιγράφει το μέγεθος του στροβιλισμού της ροής του αέρα.

Από την παραπάνω σχέση, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z_1 της πλήμνης μίας Α/Γ, όταν είναι γνωστή η ταχύτητα σε κάποιο άλλο ύψος z_2 . Έτσι, η σχέση μετασχηματίζεται σε:

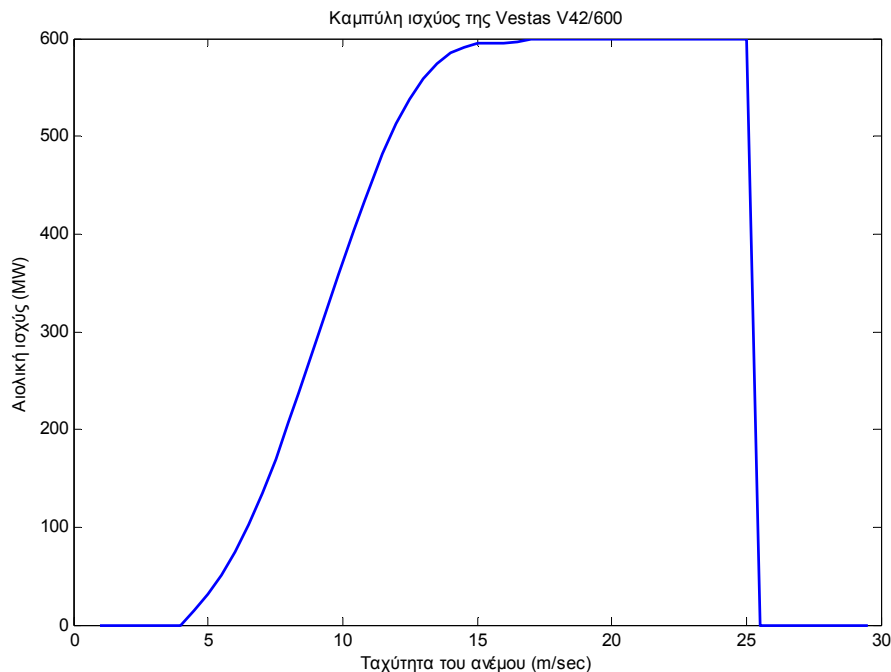
$$u(z_1) = \frac{\ln(z_1/z_0)}{\ln(z_2/z_0)} u(z_2) \quad (2.3)$$

Αν και η παραπάνω σχέση έχει εφαρμοστεί ευρέως, η χρήση της περιορίζεται μόνο για επίπεδες περιοχές και σταθερούς ανέμους, χωρίς έντονους στροβιλισμούς. Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από την πολυπλοκότητα του εδάφους τους, η παραπάνω λογαριθμική μοντελοποίηση του ανέμου αποκλίνει από τις πραγματικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Γι' αυτές τις περιοχές, η μοντελοποίηση θα πρέπει να γίνεται με πιο προηγμένες μεθόδους, βασισμένες στην υπολογιστική ρευστοδυναμική [41]. Παράλληλα, στις θαλάσσιες περιοχές η παραπάνω σχέση δεν ισχύει, όταν μεταβάλλεται απότομα ο άνεμος και γι' αυτό απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι θερμικές επιδράσεις του ανέμου [42].

Η παραπάνω διαδικασία υπολογισμού της ταχύτητας του ανέμου σε ένα σημείο, όταν είναι γνωστή σ' ένα άλλο σε μεγαλύτερο ύψος, ονομάζεται μετατροπή σε μικρότερη κλίμακα (downscaling) [40].

2.2.3. Η καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή

Αφού προσδιοριστεί η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του δρομέα της Α/Γ και δεδομένου του συντελεστή C_p , μπορεί να εκτιμηθεί η παραγωγή μίας Α/Γ. Γενικά, η έξοδος μίας Α/Γ για κάθε τιμή της ταχύτητας, έχει τη μορφή του σχήματος 2.3 και ονομάζεται καμπύλη ισχύος, η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε Α/Γ. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της Vestas V42/600.



Σχήμα 2.3. Η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της Vestas V42/600

Η καμπύλη ισχύος μίας Α/Γ έχει την παραπάνω μορφή ανεξάρτητα από τον τύπο της και παρέχεται από τον κατασκευαστή της με τη μορφή εξίσωσης ή με τη μορφή ενός πίνακα, όπου για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου δίνεται η παραγωγή της αντίστοιχης Α/Γ. Από την παραπάνω καμπύλη ισχύος παρατηρείται ότι η μία Α/Γ παράγει ισχύ μέσα από καθορισμένα όρια της ταχύτητας του ανέμου, ενώ έξω από τα όρια αυτά η παραγωγή της ισχύος είναι μηδενική. Το όριο που μία Α/Γ αρχίζει να παράγει ισχύ, ονομάζεται όριο διασύνδεσης (cut-in wind speed) της Α/Γ και αντιστοιχεί με την ταχύτητα του ανέμου που ξεπερνάει τις τριβές και τη μηχανική αντίδραση της Α/Γ (3-5 m.sec⁻¹ περίπου). Παράλληλα, η λειτουργία μίας Α/Γ διακόπτεται, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι τόσο ισχυρή, που μπορεί να αποφέρει σοβαρές μηχανικές καταπονήσεις. Το όριο αυτό της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται όριο αποκοπής (cut-off wind speed) και κυμαίνεται από 25 με 30 m.s⁻¹. Ακόμη μία Α/Γ παράγει την ονομαστική της τιμή ισχύος, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει μία ορισμένη τιμή, που και αυτή είναι χαρακτηριστική στην καμπύλη ισχύος. Η ταχύτητα αυτή είναι η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου και παίρνει τιμές από 12 μέχρι 16 m.s⁻¹. Έτσι, η Α/Γ παράγει την ονομαστική της τιμή, όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται μεταξύ της ονομαστικής της τιμής και του ορίου αποκοπής.

Επίσης, όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται μεταξύ του ορίου διασύνδεσης και της ονομαστικής της τιμής, η παραγωγή ισχύος μιας Α/Γ αυξάνεται απότομα και μη γραμμικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Παράλληλα, από την κατανομή Weibull προκύπτει ότι η συχνότητα των ασθενών και μέτριων ανέμων, που αντιστοιχούν στο παραπάνω διάστημα των τιμών της ταχύτητας και κατ' επέκταση στα χαμηλότερα και πιο απότομα τμήματα της καμπύλης ισχύος, είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των ισχυρών. Οπότε, οι μικρές μεταβολές της ταχύτητας των ασθενών ή των μέτριων ανέμων οδηγούν σε μεγάλες μεταβολές της αιολικής παραγωγής. Γενικά, ο συνδυασμός της μεγάλης συχνότητας των ανέμων, που αντιστοιχούν στα μη γραμμικά και απότομα τμήματα της καμπύλης ισχύος με την έντονη μεταβλητότητα του ανέμου, κάνει το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής ιδιαίτερα περίπλοκο.

Η μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ μέσω της καμπύλης ισχύος που λαμβάνεται από τον κατασκευαστή της Α/Γ, πρέπει να θεωρηθεί και εδώ ως θεωρητική, αφού πρέπει να θεωρήσουμε ότι η τιμή της ταχύτητας που εφαρμόζεται, είναι αυτή στο ύψος

του δρομέα και σταθερή σε όλο το επίπεδο της έλικας. Η παραγωγή μίας Α/Γ, που περιέχεται σε ένα αιολικό πάρκο, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, που πρέπει να συζητηθούν. Επομένως, η παραγωγή ενός πάρκου από την άθροιση των τιμών της ισχύος που προκύπτουν από τις καμπύλες ισχύος των Α/Γ του, αποτελεί μόνο μία θεωρητική εκτίμηση της εξόδου του πάρκου και η χρήση της στη διατριβή εφαρμόζεται μόνο ως μέτρο σύγκρισης. Για την καλύτερη εκτίμηση της συνολικής καμπύλης ισχύος ενός πάρκου, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί κάποια μέθοδος παλινδρόμησης και βελτιστοποίησης [43]. Παράλληλα, η πρόβλεψη παραγωγής ενός αιολικού πάρκου μπορεί να επιτευχθεί με προηγμένα στατιστικά μοντέλα, ικανά να προσομοιώσουν τους παράγοντες, που επηρεάζουν την καμπύλη ισχύος του πάρκου.

2.2.4 Μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος

Η ακριβής εκτίμηση της παραγωγής ενός πάρκου μόνο με την χρήση της καμπύλης ισχύος των Α/Γ που περιέχει, μπορεί να γίνει, όταν είναι γνωστή η τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του δρομέα κάθε Α/Γ ή όταν είναι δυνατή η προσομοίωση της ροής του ανέμου στην περιοχή του πάρκου.

Υποθέτοντας ότι είναι ομοιόμορφη η ροή του ανέμου που εισέρχεται στην περιοχή ενός πάρκου, οι Α/Γ που θα συναντήσει πρώτα ο άνεμος, θα απορροφήσουν ένα μέρος της ενέργειας του αέρα. Έτσι, ο άνεμος που πέφτει στις επόμενες Α/Γ, θα έχει μικρότερη ενέργεια, άρα και μικρότερη ταχύτητα. Γενικά, πίσω από κάθε Α/Γ υπάρχει μία ζώνη, όπου ο άνεμος στροβιλίζεται και έχει μικρότερη ταχύτητα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επίδραση σκίασης ή κύματος και έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγή κάποιων Α/Γ ενός αιολικού πάρκου να μην συμφωνεί, με την αντίστοιχη καμπύλη ισχύος του κατασκευαστή τους. Αν και οι Α/Γ είναι εγκατεστημένες σε μία απόσταση, που κυμαίνεται από τρεις μέχρι εννιά φορές τη διάμετρο του ρότορα, η επίδραση σκίασης επηρεάζει την απόδοσή τους και την καμπύλη ισχύος του πάρκου. Πολλές μελέτες έχουν γίνει για την προσομοίωση της επίδρασης σκίασης από μία Α/Γ [44,45,46]. Ένας τρόπος βελτιστοποίησης είναι η ομαδοποίηση των Α/Γ, με την κάθε ομάδα να βρίσκεται σε τέτοια απόσταση από την άλλη, ώστε να μην την επηρεάζει σημαντικά [47]. Αυτό εφαρμόζεται περισσότερο στα παράκτια αιολικά πάρκα, όπου είναι πιο ουσιαστικό το πρόβλημα της επίδρασης σκίασης. Ο περιορισμός για την απόσταση μεταξύ των Α/Γ, είναι το κόστος της σύνδεσής τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Βέβαια, και η μορφολογία του εδάφους μπορεί να εμποδίζει την επέκταση του αιολικού πάρκου.

Από τον ορισμό του φαινομένου της επίδρασης σκίασης του αέρα, είναι προφανές ότι η μείωση της παραγωγής της ισχύος ενός πάρκου εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου, δηλαδή, εξαρτάται από το πόσες Α/Γ προσβάλλονται από το φαινόμενο αυτό. Έτσι, ο προσδιορισμός της καμπύλης ισχύος του πάρκου δεν είναι συνάρτηση μόνο της ταχύτητας του ανέμου, αλλά και της διεύθυνσής του. Ακόμη, μεγέθη όπως η ένταση του στροβιλισμού του ανέμου ή η συχνότητα του αέρα, πρέπει να θεωρηθούν ως μεταβλητές για την εκτίμηση της καμπύλης ισχύος.

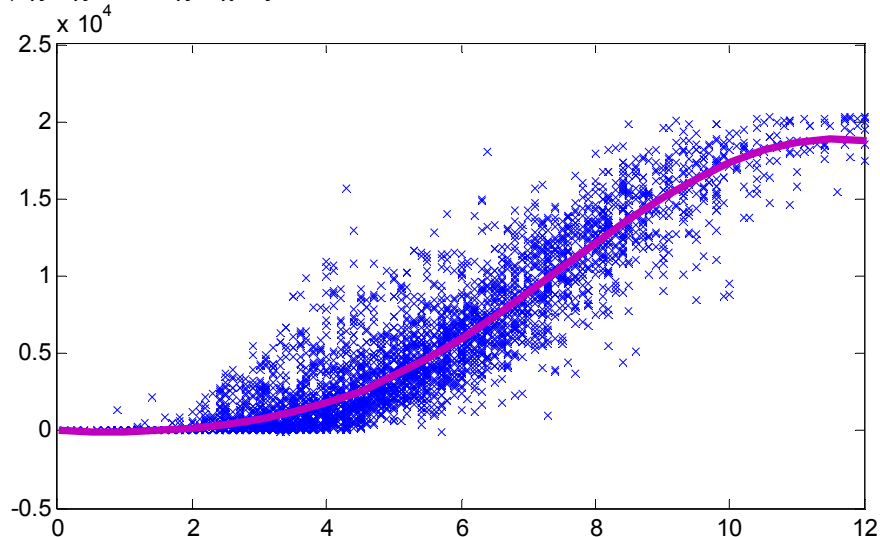
Άλλες παράμετροι, που πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη στην εκτίμηση της καμπύλης ισχύος ενός πάρκου, είναι οι ενέργειες του διαχειριστή του αιολικού πάρκου. Αυτές μπορεί να είναι η αποσύνδεση Α/Γ λόγω συντήρησης ή κορεσμού του ηλεκτρικού δικτύου. Η δεύτερη περίπτωση, που είναι πιο συνηθισμένη σε αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιείται όταν το ηλεκτρικό δίκτυο δεν μπορεί να απορροφήσει επιπλέον ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, για να αποφύγει τις μηχανικές καταπονήσεις των συμβατικών γεννητριών. Η αποκοπή Α/Γ λόγω κορεσμού μπορεί να προβλεφθεί, αν η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος συνδυάζεται με την πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου του ηλεκτρικού δικτύου [48].

Κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής ενός πάρκου, ο αριθμός των Α/Γ μπορεί να αυξάνεται, με αποτέλεσμα να αλλάζει η αντίστοιχη καμπύλη ισχύος. Έτσι, σε κάθε μεταβολή της σύστασης του αιολικού πάρκου, οι συντελεστές της καμπύλης ισχύος είναι αναγκαίο να αναβαθμίζονται. Παράλληλα, ο χώρος που περιβάλλει ένα αιολικό πάρκο εξελίσσεται πάντα. Η βλάστηση μεταβάλλεται ανάλογα με την εποχή, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ροή του ανέμου και να μεταβάλλεται η τραχύτητα του εδάφους. Ακόμη, εμπόδια όπως κτίρια και

δέντρα, είναι δυνατόν να εμφανιστούν σε κοντινή απόσταση από το πάρκο, κάτι που θα μεταβάλλει την καμπύλη ισχύος του. Οι επιδράσεις όλων αυτών των παραγόντων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο πώς επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος από ένα αιολικό πάρκο. Έτσι, η εκτίμηση της παράγωγής ισχύος του πάρκου πρέπει να γίνεται σε συνάρτηση με την περίοδο του έτους και οι παράμετροι του μοντέλου εκτίμησης να αναβαθμίζονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα [40].

Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για την εκτίμηση της καμπύλης ισχύος, με τη χρήση χρονοσειρών της παραγωγής ισχύος των υπό μελέτη πάρκων και των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να προέρχονται είτε από μετεωρολογικό ιστό, που είναι εγκατεστημένος κοντά στο πάρκο είτε από ανεμόμετρα, που είναι τοποθετημένα σε κάθε Α/Γ. Οι μετρήσεις της ισχύος λαμβάνονται από το σύστημα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) για κάθε Α/Γ ξεχωριστά, και στη συνέχεια αθροίζονται. Η καμπύλη ισχύος, που προέκυψε για το αιολικό πάρκο Klim, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, μαζί με τις αντίστοιχες μετρήσεις παραγωγής ισχύος και ταχύτητας του ανέμου. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν, καλύπτουν περίπου το πρώτο μισό του έτους 2000. Το πάρκο Klim βρίσκεται στη Δανία και έχει ονομαστική τιμή 21 MW.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της καμπύλης ισχύος ενός πάρκου, όπως είναι η μέθοδος παλινδρόμησης με διανύσματα υποστήριξης [49] ή μέθοδοι ασαφούς λογικής [50]. Γενικά, η παραμετροποίηση της καμπύλης ισχύος αποτελεί μια μέθοδο πρόβλεψης παραγωγής ισχύος ενός πάρκου, η οποία δεν βασίζεται μόνο στις χρονοσειρές της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου, αλλά λαμβάνονται υπόψη και οι παράγοντες που αναπτύχθηκαν παραπάνω (διεύθυνση του ανέμου, εποχή κ.λπ.). Στην ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που παρουσιάζονται εδώ, εφαρμόστηκε η απλή μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για τη μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος, εφόσον αυτή αποτελεί ένα βοηθητικό μέσο για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.



Σχήμα 2.4: Μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος του αιολικού πάρκου Klim με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με την βοήθεια των χρονοσειρών της αιολικής ισχύος και των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου που αντιστοιχούν στο πρώτο μισό του 2000.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται η πολύ μεγάλη διασπορά της εξόδου του αιολικού πάρκου στις διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Η απόκλιση από την καμπύλη ισχύος του πάρκου ξεπερνάει τα 10 MW, που αντιστοιχεί σε πάνω από το 50% της ονομαστικής τιμής του πάρκου. Αυτό οφείλεται στους παράγοντες που επιδρούν στην παραγωγή του αιολικού πάρκου που αναφέρθηκαν, αλλά και σε άλλους, που θα αναλυθούν στη συνέχεια, όπως είναι η τοπολογία του πάρκου.

Συμπερασματικά, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν πολλές θεωρήσεις πίσω από τις γνωστές καμπύλες ισχύος των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών. Ο πιο ακριβής τρόπος είναι η χρήση πολλαπλών καμπύλων, που προέρχονται από χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και αιολικής ισχύος αντίστοιχα και υπολογίζονται για συγκεκριμένη διεύθυνση και εποχή του έτους. Τέλος, η παραπάνω μέθοδος εκτίμησης της καμπύλης ισχύος μπορεί να βελτιωθεί, με τον ασαφή συνδυασμό των παραπάνω πολλαπλών καμπύλων [50].

2.3 Βασικά στοιχεία της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος

2.3.1 Περιγραφή της δομής ενός μετεωρολογικού μοντέλου

Ο κλάδος της μετεωρολογίας, που ασχολείται αποκλειστικά με το οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο, ονομάζεται μετεωρολογία της αιολικής ισχύος [32]. Ο τομέας αυτός έχει άμεση σχέση με την κλιματολογία και τη γεωγραφία. Σκοπός της μετεωρολογίας είναι η πρόβλεψη της ποιοτικής και ποσοτικής εξέλιξης των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, καθώς και η αλληλεπίδραση μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης. Η κλιματολογία συνδέεται άμεσα με τη μετεωρολογία, εφόσον βασίζεται στα ίδια δεδομένα, αλλά περιορίζεται στη μελέτη του κλίματος και σε πρακτικές εφαρμογές, π.χ. στη γεωργία, τη βιολογία και τα μέσα μεταφοράς. Η μετεωρολογία της αιολικής ισχύος αναλαμβάνει το κομμάτι της μετεωρολογίας, που σχετίζεται με το οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο και εφαρμόζεται αποκλειστικά σε εφαρμογές, όπως είναι η πρόβλεψη της παραγωγής της αιολικής ενέργειας και η εκτίμηση της διασποράς των αέριων ρύπων, στο επίπεδο που ασχολείται και η κλιματολογία. Η περιγραφή των ατμοσφαιρικών διαδικασιών του οριακού ατμοσφαιρικού επιπέδου απαιτεί αναλυτικά στοιχεία της επιφάνειας της γης [32]. Γι' αυτό, ένα μέρος της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος ανήκει στον τομέα της γεωγραφίας, εφόσον δίνεται έμφαση στην ορογραφία, την τραχύτητα του εδάφους και τη χαρτογράφηση των εμποδίων, που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο της υπό μελέτης περιοχής.

Τα μοντέλα, τα οποία ανήκουν στον κλάδο της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος, στην ουσία επιτυγχάνουν την προσομοίωση σε υπολογιστή των ατμοσφαιρικών φαινομένων και διαδικασιών, με σκοπό τη μελλοντική εκτίμηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας σε μια συγκεκριμένη περιοχή, βασισμένη στη γνώση της πραγματικής κατάστασης [51]. Αυτό μπορεί να γίνει, δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα φυσικά φαινόμενα στην ατμόσφαιρα είναι γνωστά. Η προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται με μετρήσεις από συνοπτικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, με μπαλόνια καιρού και με ραδιοβολίδα. Επίσης, αλλά μέσα παρατηρήσεων, από τα οποία ανακτάται πληροφορία σχετικά με την ατμόσφαιρα, είναι οι δορυφόροι, τα πλοία και τα αεροπλάνα. Βέβαια, πρώτα γίνεται προσπάθεια να απομονωθούν τα λανθασμένα δεδομένα και να συμπληρωθούν τα κενά μεταξύ των σταθμών (π.χ. οι ατμοσφαιρικές συνθήκες πάνω απ' τη θάλασσα).

Αν και η απόδοση του μετεωρολογικού μοντέλου εξαρτάται κυρίως από την αρχική περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, που γίνεται με τις μετρήσεις, το βήμα της αφομοίωσης των δεδομένων είναι ιδιαίτερα κρίσιμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν μεγάλες περιοχές, όπου η πυκνότητα των υψηλής ποιότητας παρατηρήσεων είναι ανεπαρκής. Ως έναν ορισμένο βαθμό, οι δορυφορικές παρατηρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τα κενά, αλλά αυτό δεν είναι μια αξιόπιστη αντιμετώπιση, δεδομένου ότι οι δορυφόροι παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα. Το πλεονέκτημα των δορυφόρων είναι ότι οι παρατηρήσεις των καιρικών φαινομένων γίνονται με κοινό τρόπο πάνω από το έδαφος και πάνω από τη θάλασσα. Ένα πρόβλημα όμως είναι ότι οι παρατηρήσεις τους περιλαμβάνουν λίγες μεταβλητές και κάποιες απ' αυτές περιέχουν πληροφορίες για τα υψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας πάνω από τα σύννεφα και όχι για το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα. Παρ' όλ' αυτά, υπάρχει τρόπος να εξαλειφθούν αυτές οι απώλειες, υπολογίζοντας τις επιπρόσθετες μεταβλητές με τα διαθέσιμα δεδομένα [40].

Συνεπώς, προσομοιώνοντας μια αρχική περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, το μοντέλο καιρικής πρόγνωσης προσεγγίζει τη μελλοντική εξέλιξή της. Για

τον σκοπό αυτό, το μοντέλο σχηματίζει ένα σύστημα από μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες δεν έχουν κάποια αναλυτική λύση, αλλά για λόγους ευστάθειας και κατά προσέγγιση, μπορεί να υπολογιστεί κάποια λύση για ένα μικρό χρονικό βήμα και σε μία επιλεγμένη περιοχή. Η επιλεγμένη περιοχή αναπαριστάται από το μοντέλο καιρικής πρόγνωσης, σαν ένα τρισδιάστατο πλέγμα, όπου για κάθε σημείο του υπολογίζονται οι μεταβλητές καταστάσεις της ατμόσφαιρας. Οι μεταβλητές αυτές είναι συνήθως 20-30. Το μέγιστο χρονικό βήμα, που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της ατμοσφαιρικής κατάστασης, καθορίζεται σε σχέση με τη χωρική απόσταση των σημείων του πλέγματος και τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο επίλυσης, έτσι ώστε η λύση να είναι ευσταθής.

Για την εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης της ατμόσφαιρας, τα υπάρχοντα μετεωρολογικά μοντέλα χρειάζονται πολύ χρόνο, προκειμένου να δώσουν αποτελέσματα, αν και εφαρμόζονται σε συστήματα με πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Με την τρέχουσα τεχνολογία υπολογιστών, η χωρική απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος μπορεί να είναι μέχρι μερικά χιλιόμετρα. Ακόμη όμως και μ' αυτή την κλίμακα, κάποιες διαδικασίες της ατμόσφαιρας είναι αδύνατον να προβλεφθούν. Τέτοιες διαδικασίες είναι τοπικές καταιγίδες, που προκαλούνται από διαφορές της θερμότητας, ρεύματα αέρα μέσα σε κοιλάδες και ακραίες ταχύτητες ανέμου πάνω από χαμηλούς λόφους. Επίσης, τα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη το πώς επηρεάζουν τον άνεμο τα εμπόδια που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης, όπως κτίρια κ.λπ.. Παρόλ' αυτά, με διάφορες μεθόδους, είναι δυνατόν να μειωθεί η χωρική απόσταση μεταξύ των σημείων του πλέγματος, η οποία ονομάζεται και χωρική ανάλυση (spatial resolution) μέχρι και μερικά εκατοστά, αλλά μόνο για πολύ συγκεκριμένες περιοχές και για ορίζοντα πρόβλεψης μόνο μερικών ωρών.

2.3.2 Η Υδροστατική προσέγγιση

Τα μετεωρολογικά μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί στον κλάδο της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα μεγάλης κλίμακας μοντέλα, που παρέχουν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, τα μέσης κλίμακας μοντέλα και τα μικρής κλίμακας υπολογιστικά μοντέλα δυναμικής των ρευστών [51].

Τα πλήρης κλίμακας μετεωρολογικά μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού προσομοιώνουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας για τις επόμενες 36 με 168 ώρες. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι ο Lorenz, εφαρμόζοντας τη θεωρία του χάους στην εξέλιξη των ατμοσφαιρικών συνθηκών, απέδειξε ότι η πρόβλεψη των μεταβλητών, που περιγράφουν τις ατμοσφαιρικές καταστάσεις, είναι αδύνατη σε κάθε περίπτωση, πέρα από δύο εβδομάδες [52]. Στην ουσία, τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα, που απέχουν χρονικά πάνω από δύο εβδομάδες, δεν παρουσιάζουν καμία συσχέτιση. Μερικά μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, για να πετύχουν μια μακροπρόθεσμη πρόβλεψη μέχρι 168 ώρες, χρησιμοποιούν ένα χωρικό πλέγμα, που καλύπτει όλη τη γήινη σφαίρα. Συνήθως, παρέχουν προβλέψεις για τις επόμενες δύο μέρες και αναβαθμίζουν τις προβλέψεις τους κάθε έξι ώρες ή μία φορά την ημέρα. Για να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων και το υπολογιστικό κόστος, γίνονται περικοπές στα δεδομένα, που αντιστοιχούν πάνω από περιοχές όπου υπάρχει λεπτομερής περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, και για τις οποίες δεν έχει ζητηθεί από το μετεωρολογικό μοντέλο να δώσει προβλέψεις [53].

Μια μέθοδος, που ακολουθείται για τον χειρισμό μικρότερου όγκου δεδομένων και την μείωση του υπολογιστικού κόστους, είναι η υδροστατική θεώρηση ότι η κάθετη κίνηση του ανέμου είναι αμελητέα σε σχέση με την οριζόντια κίνηση και ότι το επίπεδο βάθους του ρευστού είναι πολύ μικρότερο, σε σύγκριση με την ακτίνα της ατμόσφαιρας [54]. Η υδροστατική ροή του ανέμου περιγράφεται από τις «πρωτογενείς εξισώσεις», μια εκδοχή των εξισώσεων Navier-Stokes, που περιγράφουν την εξέλιξη των συνιστωσών της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας, της επιφανειακής πίεσης και της υγρασίας, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Για να ισχύουν οι πρωτογενείς εξισώσεις, πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω νόμοι: ο νόμος των ιδανικών αερίων:

$$p = \rho RT \quad (2.4)$$

και η υδροστατική εξίσωση

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = \frac{-RT}{p} \quad (2.5)$$

Όπου p είναι η πίεση σε Pa, ρ η πυκνότητα σε kg/m^3 , R η παγκόσμια σταθερά των αερίων (287 J/kg K), T η θερμοκρασία σε K και ϕ το γεωδυναμικό.

Επίσης, στις εξισώσεις αυτές περιέχονται οι παρακάτω προσεγγίσεις:

- Η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι σταθερή
- Το σχήμα της γης είναι σφαιρικό
- Η κάθετη δύναμη Coriolis είναι αμελητέα
- Οι κάθετες επιταχύνσεις του ανέμου αγνοούνται στην εξίσωση της κάθετης ορμής (υδροστατική προσέγγιση)

Οι πρωτογενείς εξισώσεις προσομοιώνουν την κατάσταση ενός οριζόντιου τμήματος αέρα σε διάφορα επίπεδα της ατμόσφαιρας που θεωρούνται ανεξάρτητα, ενώ για την αριθμητική περιγραφή της οριζόντιας μεταφοράς του ανέμου χρησιμοποιούνται πλαίσια Οϊλεριανών και ημί-λαγκρανζιανών εξισώσεων [55]. Οι Οϊλεριανές εξισώσεις, για να περιγράψουν τη ροή του ανέμου σε ένα σημείο, λαμβάνουν υπόψη τους τις καταστάσεις των γειτονικών σημείων στο χωρικό πλέγμα. Αντίθετα, οι ημί-λαγκρανζιανές εξισώσεις ξεετάζουν τις προηγούμενες χρονικά τροχιές που είχε ο άνεμος, στο υπό μελέτη χωρικό σημείο. Τέλος, οι Οϊλεριανές εξισώσεις περιγράφουν με πιο ακριβή τρόπο την κίνηση του αέρα, αλλά για μικρό χρονικό ορίζοντα, αφού σε πολλαπλά χρονικά βήματα πρόβλεψης δίνουν ασταθείς λύσεις. Αντίθετα, οι ημί-λαγκρανζιανές, η ακρίβεια των οποίων εξαρτάται από τον χρονικό ορίζοντα, εκτελούνται με μικρότερο υπολογιστικό κόστος και ο χρονικός ορίζοντας τους περιορίζεται μόνο από τις απαιτήσεις ακρίβειας του μετεωρολογικού μοντέλου.

Η χωρική ανάλυση που χρησιμοποιεί ένα υδροστατικό μοντέλο καθορίζει και την απόδοσή του. Για την περιγραφή φαινομένων, όπως για παράδειγμα αυτό του όρους/κοιλιάδας, η παράληψη της κάθετης κίνησης του ανέμου απαιτεί από τα μοντέλα να αυξήσουν τόσο την οριζόντια όσο και την κάθετη ανάλυση του χωρικού πλέγματος. Μερικές φορές όμως, για να διατηρηθεί η ακρίβεια των μετεωρολογικών μοντέλων που απαιτούν οι εφαρμογές, όπως είναι η πρόβλεψη αιολικής ισχύος, είναι απαραίτητη η μη-υδροστατική προσομοίωση. Γενικά, το κριτήριο της υδροστατικής θεώρησης πρέπει να εφαρμόζεται σε αναλογία με την οριζόντια ανάλυση του μοντέλου, τον βαθμό της ατμοσφαιρικής ευστάθειας και την πολυπλοκότητα του εδάφους της περιοχής [50].

2.3.3 Μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης τεχνολογίας αιχμής

Εκείνο που εφαρμόζεται στην πράξη για την πρόβλεψη της εξέλιξης των ατμοσφαιρικών διεργασιών πάνω από την υπό μελέτη περιοχή, είναι τα εμφωλιασμένα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού [56]. Στην αρχή, πραγματοποιείται μία χοντρική περιγραφή της ατμόσφαιρας όλης της γήινης σφαίρας, μέσω ενός πλέγματος πολύ χαμηλής οριζόντιας ανάλυσης. Για το μέρος του πλέγματος, στο οποίο περιέχεται η ζητούμενη περιοχή, εκτελείται ένα μοντέλο υψηλής ανάλυσης, λαμβάνοντας τα αποτελέσματα του πρώτου. Η παγκόσμια περιγραφή της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται μόνο από πολύ μεγάλους μετεωρολογικούς οργανισμούς. Τα μετεωρολογικά ινστιτούτα στην Ευρώπη λαμβάνουν τις προκαταρτικές προβλέψεις για όλη τη γη από το ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts), που παρέχει καιρικές προβλέψεις για δύο εβδομάδες. Αφού λάβουν τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, τα γενικευμένα δεδομένα που περιγράφουν την ατμόσφαιρα όλης της γης, προσομοιώνουν τις ατμοσφαιρικές διαδικασίες σε τοπικό επίπεδο, χρησιμοποιώντας για την περιγραφή χωρικό πλέγμα υψηλής οριζόντιας ανάλυσης, που μπορεί να μειωθεί μέχρι και 2 Km.

Επειδή η ακρίβεια των προβλέψεων των μοντέλων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού παραμένει χαμηλή, λόγω της πολυπλοκότητας του εδάφους ή των ιδιαιτεροτήτων της ροής του ανέμου, εφαρμόζονται τα μέσης κλίμακας μετεωρολογικά μοντέλα. Τα μέσης κλίμακας μετεωρολογικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τους την μη υδροστατική παράμετρο του ανέμου και προσομοιώνουν την ατμόσφαιρα μιας περιορισμένης περιοχής με

διαφορετικούς τρόπους, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές χωρικές αναλύσεις με τη μορφή εμφωλιασμένων μοντέλων.

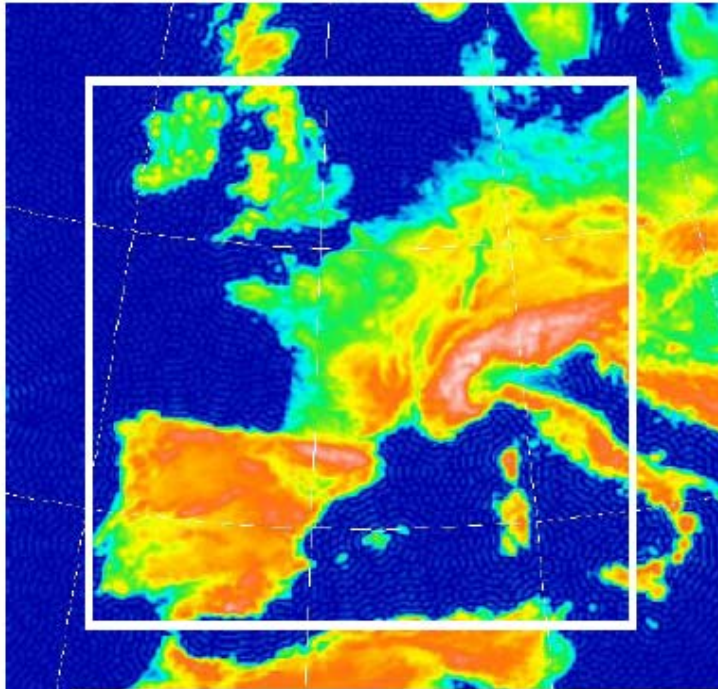
Τα μετεωρολογικά μοντέλα, που περιγράφουν την κατάσταση της ατμόσφαιρας με τη μεγαλύτερη ακρίβεια, είναι τα μοντέλα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD models). Τα μοντέλα αυτά επιλύουν τις πολύπλοκες μη γραμμικές εξισώσεις Reynolds Average Navier Stokes (RANS), οι οποίες προέρχονται από τη θεωρία της δυναμικής των ρευστών και είναι προσαρμοσμένες για την περιγραφή της ροής του ανέμου [57]. Τα CFD μοντέλα περιγράφουν τις ατμοσφαιρικές διεργασίες με μεγάλη λεπτομέρεια. Η οριζόντια ανάλυση του πλέγματος που εφαρμόζουν, κυμαίνεται από μερικά εκατοστά μέχρι μερικές δεκάδες μέτρα. Σ' αυτό οφείλεται η μεγάλη υπολογιστική ισχύς που απαιτούν, προκειμένου να δώσουν προβλέψεις. Συνήθως εκτελούνται για την εκτίμηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών πάνω από μία μικρή περιοχή, όπως ένα αιολικό πάρκο και για να προσομοιώσουν επιλεγμένα ατμοσφαιρικά φαινόμενα. Και σ' αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος εκτέλεσής τους αντιστοιχεί σε μερικές ώρες.

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι αδύνατη, χωρίς τη χρήση της εξόδου κάποιου από τα παραπάνω μετεωρολογικά μοντέλα. Αν και είναι δυνατόν να προβλεφθεί η αιολική παραγωγή για λίγες ώρες μπροστά με κάποια μέθοδο χρονοσειρών, η χρήση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι απαραίτητη για τον υπόλοιπο ορίζοντα πρόβλεψης. Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, συνήθως χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού, που παρέχονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες της κάθε χώρας. Τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που είναι σε χρήση, είναι το HIRLAM, το SKIRON και το ALADIN. Για την προσπάθεια ανάπτυξης των μοντέλων αιολικής ισχύος, που περιγράφονται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν προβλέψεις από όλα τα παραπάνω μοντέλα. Μία εκτενής περιγραφή των μοντέλων αυτών παρουσιάζεται παρακάτω.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο μέσης κλίμακας μοντέλο είναι το MM5 [58]. Αυτό αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Penn των Η.Π.Α. και είναι διαθέσιμο μέσω του διαδικτύου. Άλλα μέσης κλίμακας μοντέλα που είναι σε χρήση, είναι το RAMS [59], που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Κολοράντο, το KAMM [60] του πανεπιστημίου της Καλσρούης και το MesoNH [61] της μετεωρολογικής υπηρεσίας της Γαλλίας MeteoFrance. Το πιο γνωστό μικρής κλίμακας CFD μοντέλο είναι το WAsP [62], που αναπτύχθηκε από το εθνικό εργαστήριο του Risø της Δανίας. Τέτοια μοντέλα, που περιέχουν και CFD κώδικα, είναι επίσης το Fluent της Cener και το AriaLocal της ARIA [56].

ALADIN

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ALADIN (Limited Area, dynamical Adaptation, International Development) είναι ένα λειτουργικό υδροστατικό μοντέλο με ημί-λανγρανζιανό πλαίσιο εξισώσεων. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από επιμέρους τμήματα, που περιγράφουν τις διάφορες ατμοσφαιρικές διεργασίες, όπως τον στροβιλισμό, τις επιρροές της ορογραφίας και της βαρύτητας, τη λεπτομερή ανάλυση της μεταφοράς της θερμότητας, την κίνηση των συννέφων και την ακτινοβολία [63,64]. Η οριζόντια ανάλυση του πλέγματος είναι 10 Km, ενώ γίνεται ανάλυση σε 41 κάθετα επίπεδα. Ο χώρος στον οποίο γίνεται η προσομοίωση της ατμόσφαιρας, φαίνεται στο σχήμα 1 και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης.



Σχήμα 2.5: Ο ορεογραφικός χάρτης της περιοχής που μελετάει το μοντέλο ALADIN

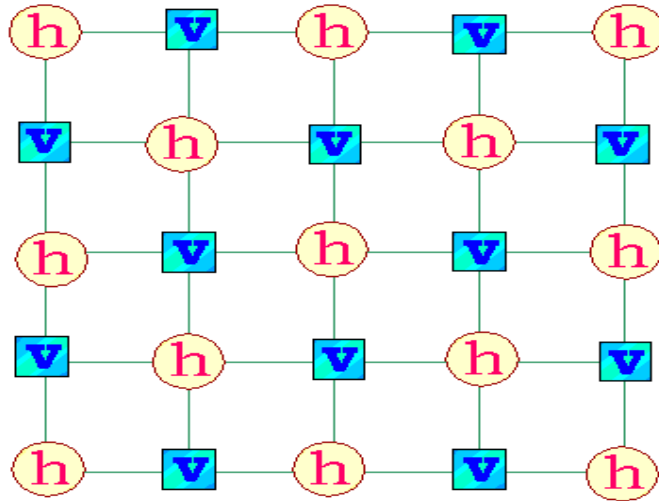
Το σύστημα αφομοίωσης που χρησιμοποιεί είναι της μορφής 4D-VAR χαρτών. Το μοντέλο ALADIN αναβαθμίζει τις προβλέψεις του 4 φορές την ημέρα, οι οποίες καλύπτουν την περίοδο των επόμενων δύο ημερών.

SKIRON

Το μετεωρολογικό σύστημα SKIRON σχεδιάστηκε με σκοπό την εφαρμογή του στην Ελληνική Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, για τοπική πρόγνωση καιρού. Το SKIRON αναπτύχθηκε από στο Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο της Αθήνας στο πλαίσιο ενός project, που είχε στόχο τη δημιουργία ενός συστήματος πρόβλεψης καιρού στην Ελλάδα [65]. Επιπλέον, στο πλαίσιο του project MEDUSA, έγινε χρήση του μοντέλου στην περιοχή της Μεσογείου και έδειξε ότι αποδίδει τόσο καλά, που το κάνει κατάλληλο όχι μόνο για προβλέψεις καιρού τοπικά, αλλά και για μέσης κλίμακας μελέτες.

Στην ουσία, το SKIRON είναι η εξέλιξη του μοντέλου Eta, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο του Βελιγραδίου, με ειδικό σκοπό την πρόγνωση του καιρού σε περιοχές με απότομη κλίση όρη. Το Eta έχει επιπλέον αναπτυχθεί από το Εθνικό Κέντρο για Περιβαλλοντική Πρόβλεψη (NCEP) στην Ουάσιγκτον από το 1993. Το μοντέλο έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ως ένα πλήρως λειτουργικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού στις Η.Π.Α.

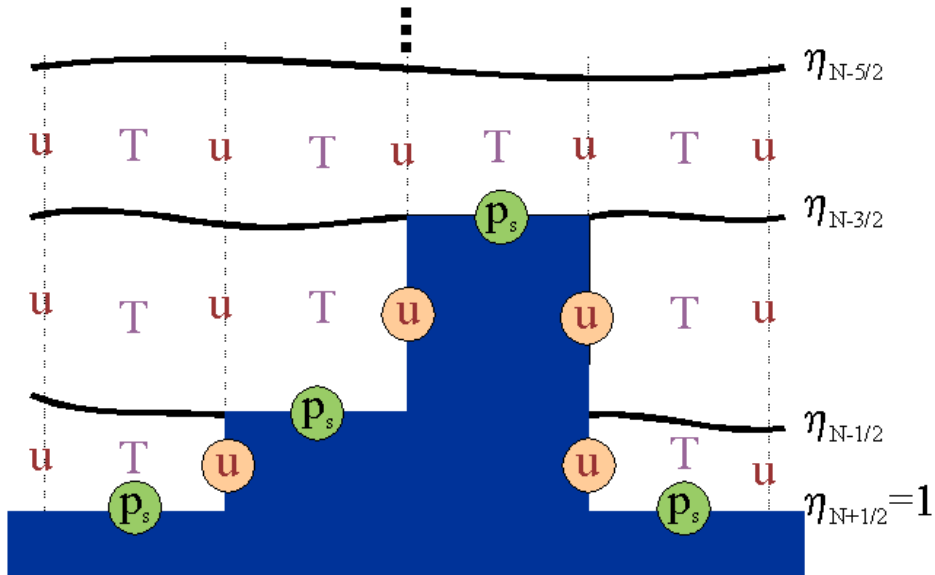
Το Eta μοντέλο έχει σχεδιαστεί ως ένα υδροστατικό μοντέλο, που χρησιμοποιεί στοιχειώδης εξισώσεις, βασισμένες σε υδροστατική προσέγγιση. Συνεπώς, η καλύτερη οριζόντια ανάλυση που μπορεί να εκτελεστεί, είναι περίπου 5-10 Km. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και το Eta είναι ένα μοντέλο που περιγράφει την κατάσταση της ατμόσφαιρας με ένα χωρικό πλέγμα. Για κάθε σημείο του πλέγματος, λύνονται μερικές διαφορικές εξισώσεις, που αναπαριστάνονται με προσαρμοσμένα αντικείμενα. Τα αντικείμενα είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να εκπληρώνουν τις απαιτήσεις για υπολογιστική οικονομία, καθώς και τους φυσικούς περιορισμούς της πραγματικής ατμόσφαιρας. Οριζόντια, το Eta μοντέλο προσομοιώνει την κατάσταση της ατμόσφαιρας σ' ένα ημι-εναλλασσόμενο πλαίσιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [66]:



Σχήμα 2.6 Το χωρικό πλέγμα του μοντέλου SKIRON

Όπου h είναι οριζόντια κατεύθυνση και v η κάθετη.

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον καθορισμό των παραμέτρων πάνω στο πλαίσιο σε έντονες φυσικές συνθήκες, όπως η επιρροή της ορογραφίας. Άλλωστε, το πρόβλημα της ικανοποιητικής προσομοίωσης της ορογραφίας ήταν το πρωταρχικό μέλημα, από την αρχή της ανάπτυξης του μοντέλου. Για το πρόβλημα αυτό έχει εφαρμοστεί ένα σύστημα κάθετων συντεταγμένων, όπου οι όγκοι των βουνών αναπαριστούνται από ένα σύνολο πακέτων, όπως φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 2.7 Σύστημα κάθετων συντεταγμένων

Με τον τρόπο αυτό, περιγράφεται η επιρροή που έχει ένα βουνό στην κίνηση του ανέμου. Επίσης, η μη γραμμική οριζόντια προσομοίωση του ανέμου βοηθάει στην περιγραφή όρων στις εξισώσεις του μοντέλου και εμποδίζει τον αριθμητικό θόρυβο, που είναι δεδομένος σε άλλα μοντέλα πρόβλεψης.

Ο υπολογισμός των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, σε κάθε σημείο του οριζόντιου και κάθετου πλαισίου από το Eta, γίνεται με διάφορες μεθόδους πολύπλοκης παραμετροποίησης. Η κάθετη τυρβώδης ανάμειξη των επιπέδων της ατμόσφαιρας αποτιμάται με χρήση των

συντελεστών του Mellor-Yamada, με επίπεδο τύρβης 2.5. Η κάθετη ανάμειξη στο επίπεδο της επιφάνειας υπολογίζεται από το μοντέλο ομοιότητας Monin-Obukhov. Η μη γραμμική τέταρτης τάξης πλευρική διάχυση εισάγεται με συντελεστή διάχυσης, που εξαρτάται από την παραμόρφωση και την τύρβη της κινητικής ενέργειας, με σκοπό τον έλεγχο του επιπέδου του θορύβου. Για την προσομοίωση των επιδράσεων της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας, χρησιμοποιείται η GFDL μέθοδος ακτινοβολίας, που περιλαμβάνει και τις επιδράσεις των τυχαίων επικαλύψεων από σύννεφα. Η μέθοδος μεγάλης κλίμακας συμπύκνωσης εφαρμόζεται, για να προσομοιώσει τις υγρές ατμοσφαιρικές διαδικασίες μεγαλύτερης κλίμακας [67].

Παράλληλα, η μέθοδος του Oregon State University έχει ενσωματωθεί, με σκοπό την πρόβλεψη των επιφανειακών διαδικασιών. Αυτή η μέθοδος περιγράφει κατάλληλα ανταλλαγές της θερμότητας, της υγρασίας και της ορμής μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης. Τέλος, για υπολογισμούς των επιφανειακών διαδικασιών, διάφορα στοιχεία του εδάφους (βλάστηση, τοπογραφία κτλ) προσομοιώνονται με υψηλή ανάλυση.

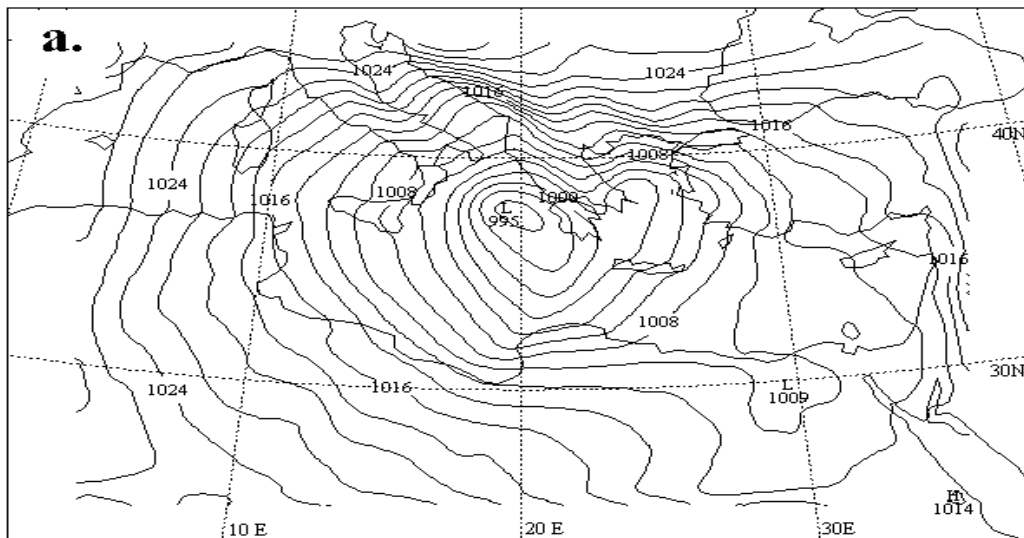
Μέσω του ερευνητικού προγράμματος SKIRON, το μοντέλο Eta επεκτάθηκε στο να μπορεί να προβλέπει την παραγωγή και τη διασπορά της ατμοσφαιρικής σκόνης, καθώς και άλλες μορφές ρύπανσης. Στην ουσία, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που εκτελείται πλήρως αυτόματα και παρέχει ένα κατάλληλο περιβάλλον για επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμών για την εκτέλεση του μοντέλου Eta. Ο βασικός σκοπός του ερευνητικού προγράμματος ήταν η δημιουργία ενός υπολογιστικά ευέλικτου μοντέλου, το οποίο να παράγει προβλέψεις, ιδιαίτερα για τοπικές συνθήκες καιρού.

Σε πρωταρχική φάση, το σύστημα SKIRON δέχεται στην είσοδο μετεωρολογικούς παραμέτρους (γεωδυναμικό, συνιστώσες του αέρα και υγρασία), που προέρχονται από πολύ μεγάλης κλίμακας ατμοσφαιρικά μοντέλα. Τέτοια μοντέλα είναι το μοντέλο της ECMWF, το μοντέλο του Εθνικού Κέντρου Περιβαλλοντικής Πρόβλεψης (National Centre for Environmental Prediction NCEP), το μοντέλο του πανεπιστημίου της πολιτείας της Florida και το LAPS από την NOAA/FSL. Τα δεδομένα που λαμβάνονται αποκωδικοποιούνται και μετασχηματίζονται σε δομή πλαισίου. Στο στάδιο προετοιμασίας, οι επιφανειακοί παράμετροι, παρατηρούμενοι ή προ-καθοριζόμενοι (όπως τοπογραφία, επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας, είδος του εδάφους και της βλάστησης, θερμοκρασία και υγρασία του εδάφους) τοποθετούνται πάνω στο πλαίσιο του SKIRON. Τα δεδομένα διαμορφώνονται σε σύνολα για την ευκολότερη επεξεργασία τους. Το τοπογραφικό σύνολο δεδομένων παρέχεται από το US Geological Survey (USGS) με 30 arc sec (750m) ανάλυση.

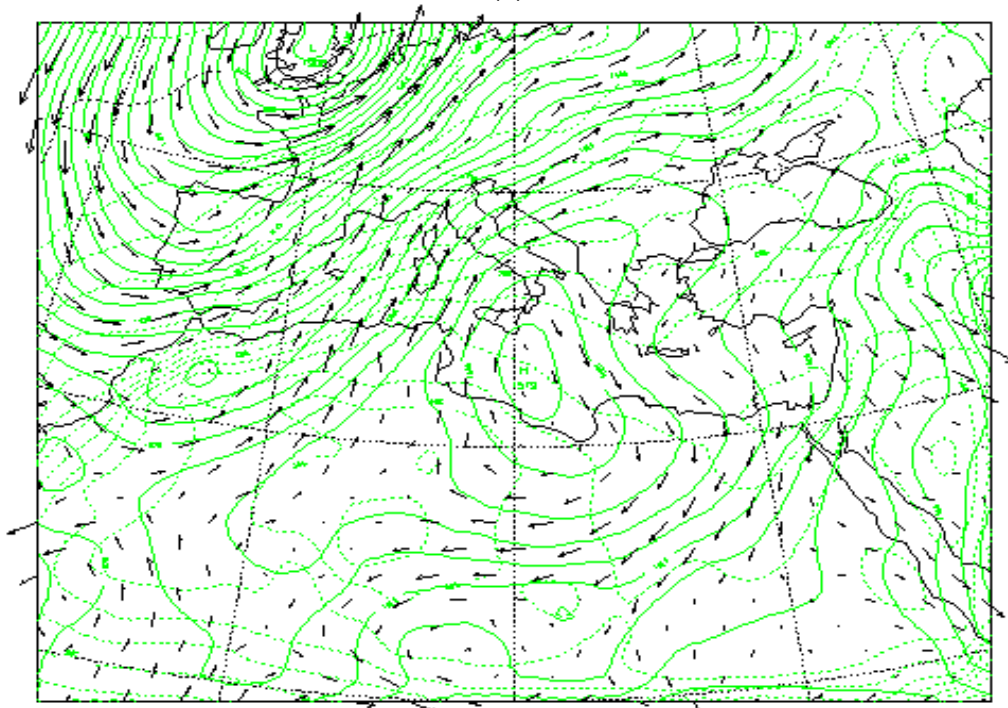
Για τη βλάστηση χρησιμοποιούνται 10x10 min δεδομένα πλαισίου από το μοντέλο ZOBLER, ενώ για το είδος του εδάφους εφαρμόζεται το σύνολο δεδομένων UNEP/FAO. Για την επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας υπάρχουν τρεις επιλογές: η διαφορά όσον αφορά το πλάτος της προκαθορισμένης επιφανειακής θερμοκρασίας, κλιματολογικά δεδομένα 1x1° από την NCAR και δεδομένα προσαρτημένα σε πλαίσιο από την ECMWF. Για την εδαφική θερμοκρασία και υγρασία, χρησιμοποιούνται ή δύο επίπεδα με προκαθορισμένες τιμές ή προσαρτημένα σε πλαίσιο δεδομένα από την ECMWF. Επιπλέον, οι κλίσεις και τα αξιμύθια των επικλινών επιφανειών υπολογίζονται και χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε επικλινές έδαφος. Τέλος, υπολογίζονται και οι διαφορές του αλμπέδο [68].

Τα σύνολα δεδομένων επεξεργάζονται από προ-επεξεργαστές, πριν χρησιμοποιηθούν από τον Eta. Στη συνέχεια, το Eta λαμβάνει τα επεξεργασμένα δεδομένα και τα περνάει ή σ' έναν μονό επεξεργαστή ή σε συνδυασμό επεξεργαστών, που λειτουργούν με τη μέθοδο του πολύ-προγραμματισμού [69]. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας καλύπτουν τις επόμενες 3 μέρες και διανέμονται κάθε μέρα στις 12UTC.

Τέλος, το σύστημα SKIRON περιέχει και ένα μοντέλο γραφικής αναπαράστασης των αποτελεσμάτων. Αυτό χρησιμοποιεί εργαλεία, όπως είναι τα γραφικά NCAR, που είναι ένα πακέτο για δισδιάστατα γραφικά ειδικευμένο σε μετεωρολογικές εφαρμογές, το VIS5D για τρισδιάστατη απεικόνιση και το METVIEW της ECMWF για δισδιάστατη απεικόνιση. Ένα παράδειγμα εξόδου του SKIRON δίνεται παρακάτω:



(α)



(β)

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

Το SKIRON σύστημα παρέχει επίσης τα αποτελέσματα του σε μορφή depri (depri format). Ένα αρχείο που περιέχει προβλέψεις από το SKIRON και είναι σε μορφή depri, φαίνεται παρακάτω. Τα μοντέλα πρόβλεψης της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου, που αναπτύχθηκαν σε αυτή τη διατριβή, λαμβάνουν τα δεδομένα σε αυτή την μορφή.

```
#version 1.11
#origin SKIRON model v6.0
#creator location_depri.x
#filesource ./anemos//061101.de
```

```

#site GEO 42.680 -1.580 612 10
#language UK
##shortname Alaiz
##sitename Alaiz
#averagetime 60 min
#datatype timeseries
#channel TimeNWP UTC Date d datetime
#channel ToyNWP UTC TimeofYear d toy
#channel PTimeNWP UTC Date d datetime
#channel PHorizonNWP DM PredictionTime h void
#channel PRunNWP DM PredictionRun h void
#channel WSpdNWP DM55m Windspeed m/s mean
#channel WDirNWP DM55m Winddirection deg mean dir
#channel WSpdNWP DM40m Windspeed m/s mean
#channel WSpdNWP DM30m Windspeed m/s mean
#channel WSpdNWP DM10m Windspeed m/s mean
#channel WDirNWP DM10m Winddirection deg mean dir
#channel AirPressNWP Surface Pressure hPa mean
#channel TempNWP DM2m Temperature C mean
#channel WSpdNWPErr Error WindspeedError 1 error
#channel WDirNWPErr Error WinddirectionError 1 error
#channel AirPressNWPErr Error PressureError 1 error
#channel TempNWPErr Error TemperatureError 1 error
#range WSpdNWP 0 50
#range WDirNWP 0 360
#range AirPressNWP 600 1200
#range TempNWP -20 40
#missingvalue WSpdNWP -99.00
#missingvalue WDirNWP -99.00
#missingvalue AirPressNWP -99.00
#missingvalue TempNWP -99.00
##dmroughness 0.0750
##forecasthorizont 72
##forecastresolution 1
##forecastdelivery 6
##gridresolution 25
#begindata 200111061200
200111061300 310.5417 200111061200 1 12 4.12 1.26 4.08 4.06 4.00 359.87 1025.90 6.18 0 0 0 0
200111061400 310.5833 200111061200 2 12 4.79 354.29 4.75 4.73 4.67 352.86 1025.26 7.40 0 0 0 0
200111061500 310.6250 200111061200 3 12 6.49 359.68 6.45 6.42 6.37 357.95 1024.91 7.75 0 0 0 0

```

Ο κώδικας του μοντέλου Eta έχει ανακατασκευαστεί από την ομάδα του SKIRON, στη μορφή ενός κατάλληλου ευρετηρίου δύο διαστάσεων, με σκοπό να τρέχει σε συστήματα με μεριζόμενη ή διασπαρμένη μνήμη, όπου εφαρμόζονται είτε το προγραμματιστικό περιβάλλον Παράλληλης Εικονικής Μηχανής (Parallel Virtual Machine) PVM είτε το προγραμματιστικό περιβάλλον της Διεπαφής Διαβίβασης Μηνυμάτων (Message Passing Interface) MPI [69]. Τέλος, το SKIRON σύστημα εφαρμόζεται σε υπολογιστικά συστήματα της τάξης Exemplar, όπως είναι το παράλληλο σύστημα HP/SPP-1600 Convex, όπου χρησιμοποιείται τεχνολογία βαθμωτής παράλληλης επεξεργασίας (Scalable Parallel Processing) SPP σε επεξεργαστές PA-RISC. Παρ' όλη τη μεγάλη υπολογιστική ισχύ που χρησιμοποιείται, ο χρόνος εκτέλεσης του συστήματος είναι μεγάλος η συχνότητα ενημέρωσης των μετεωρολογικών προβλέψεων είναι μια φορά την ημέρα και η πρόγνωση καλύπτει τις επόμενες 72 ώρες.

HIRLAM

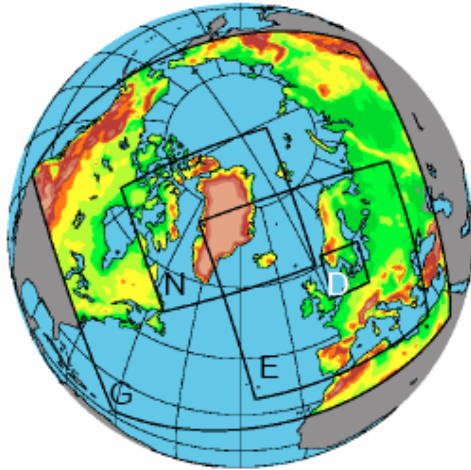
Το μοντέλο Hirlam (High Resolution Limited Area Model) αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Hirlam-5, με σκοπό την πρόγνωση του καιρού σε μικρή κλίμακα περιοχή και για μικρό ορίζοντα πρόβλεψης. Το ερευνητικό πρόγραμμα HIRLAM-5 είναι η συνέχεια του προγράμματος HIRLAM_4 και των προκάτοχων του και είχε σκοπό να αναπτύξει ένα σύστημα μετεωρολογικής πρόγνωσης, που να παρέχει μεγάλης ακρίβειας αριθμητικές προβλέψεις καιρού και να είναι λειτουργικό για τα μέλη του. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετείχαν οι μετεωρολογικές υπηρεσίες της Δανίας, της Φιλανδίας, της Ισλανδίας, της Ιρλανδίας, της Ολλανδίας, της Νορβηγίας, της Ισπανίας και της Σουηδίας, καθώς και η Meteo-France.

Όπως είδαμε και στο σύστημα SKIRON, ο σκοπός ενός μοντέλου καιρικής πρόγνωσης είναι η όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη παραμετροποίηση της ατμόσφαιρας με υψηλή ανάλυση. Στη περίπτωση του HIRLAM, μεγάλο ενδιαφέρον δίνεται στη χωρική ανάλυση του μοντέλου. Κάθε διαδικασία, που σχετίζεται με την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες σε εκτέλεση με υψηλή ανάλυση. Για παράδειγμα, στην παραμετροποίηση της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας μπορούν να προκύψουν καταστάσεις, αφού η μετάδοση ακτινοβολίας σε γειτονικά κουτιά του πλαισίου μπορούν να συμβάλλουν σε τοπικές θερμικές κινήσεις του αέρα. Τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται για αναλύσεις μικρότερες από 10 Km και δεν έχουν αντιμετωπιστεί πλήρως από το HIRLAM. Το HIRLAM παρέχει αναλύσεις με τη μέθοδο σημείων πλέγματος και με την φασματική μέθοδο.

Το σύστημα HIRLAM περιλαμβάνει ένα μεταβατικό μοντέλο αφομοίωσης δεδομένων (Data Assimilation), με τρεις ή τέσσερις διαστάσεις (3D-Var ή 4D-Var) και με ανάλυση συμβατικών και μη συμβατικών παρατηρήσεων, όπως δεδομένα από ραντάρ ή δορυφόρο. Επίσης, για την περιγραφή της κατάστασης της ατμόσφαιρας, χρησιμοποιείται το μοντέλο Βέλτιστης Παρεμβολής (Optimum Interpolation OI) για τα ανώτερα στρώματα αέρα. Για το κατώτερο οριακό στρώμα, το κάθε τετράγωνο τμήμα του πλαισίου χαρακτηρίζεται από πέντε διαφορετικά είδη εδάφους, που αντιστοιχούν σε νερό, πάγο, γυμνό έδαφος, χαμηλή βλάστηση και δάσος. Επιπλέον, για κάθε είδος εδάφους, ορίζονται ο τύπος της βλάστησης και οι μεταβλητές της υφής του εδάφους. Ο τύπος της βλάστησης καθορίζει το αλμπέδο, το τοπικό μήκος της τραχύτητας, το ποσοστό βλάστησης, και τον δείκτη της επιφάνειας φυλλώματος, ενώ η υφή του εδάφους καθορίζει τις υδρολογικές ιδιότητες, όπως η χωρητικότητα του εδάφους, το σημείο εκφύλισης και οι τιμές κορεσμού του εδάφους. Περαιτέρω ανάλυση γίνεται στην επιφανειακή θερμοκρασία της θάλασσας (SST), στον λόγο πάγου και νερού, στο βάθος του χιονιού, στην επιφανειακή και μέση θερμοκρασία του εδάφους και στην επιφανειακή και μέση κατ' όγκο σύσταση του νερού [70].

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

Συγκεκριμένα, το αντίστοιχο μοντέλο που χρησιμοποιείται στη μετεωρολογική υπηρεσία της Δανίας DMI [71] αποτελείται από διαφορετικά εμφωλιασμένα μοντέλα που το καθένα αντιστοιχεί σε διαφορετική περιοχή ενδιαφέροντος (σχ. 2.8).

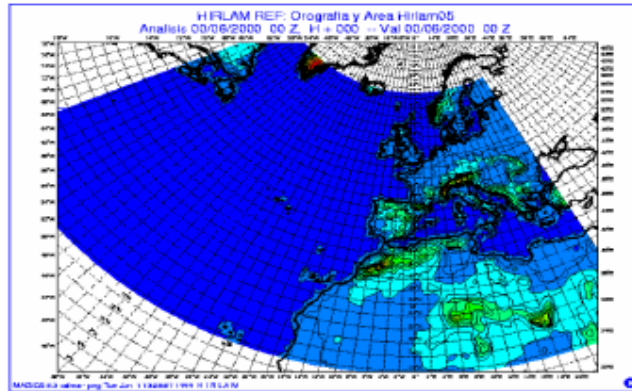


Σχήμα 2.9: Περιοχές ενδιαφέροντος του μοντέλου DMI-HIRLAM

Μετεωρολογικές προβλέψεις από το ECMWF λαμβάνονται για την αρχικοποίηση του μοντέλου G, στο οποίο εφαρμόζεται πλέγμα με πολύ χαμηλή οριζόντια ανάλυση 0.45° . Τα αποτελέσματα του G μοντέλου παρέχονται στα N και E μοντέλα, που εκτελούνται με

υψηλότερη ανάλυση 0.15° και δίνουν αποτελέσματα κάθε τρεις ώρες. Τέλος, ένα πολύ υψηλής ανάλυσης (0.05°) μοντέλο D παρέχει λεπτομερή περιγραφή της ατμόσφαιρας, πάνω από την περιοχή της Δανίας. Τα παραπάνω μοντέλα αναλύουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες σε 40 κάθετα επίπεδα. Το DMI-HIRLAM παρέχει προβλέψεις κάθε έξι ώρες, που καλύπτουν το διάστημα των επόμενων δύο ημερών.

Το Ισπανικό μοντέλο HIRLAM εφαρμόζεται από το Εθνικό Ινστιτούτο Μετεωρολογίας (INM). Το μοντέλο αυτό εκτελείται με δύο διαφορετικές χωρικές αναλύσεις παράλληλα. Η μία αντιστοιχεί σε 0.5° (42x42 Km²) και η άλλη σε 0.2° (17x17 Km²). Το HIRLAM0.2 δίνει αποτελέσματα για τις επόμενες 24 ώρες για κάθε ώρα, ενώ το HIRLAM0.5 παρέχει προβλέψεις για τις επόμενες δύο ημέρες, με χρονικό βήμα τριών ωρών.



Σχήμα 2.10: Περιοχή ενδιαφέροντος του INM-HIRLAM μοντέλου

Τέλος το Ιρλανδικό μοντέλο HIRLAM εφαρμόζεται στη μετεωρολογική υπηρεσία Met Eireann και αποτελείται από δύο εμφωλιασμένα μοντέλα. Το χαμηλής χωρικής ανάλυσης μοντέλο χρησιμοποιεί 31 κάθετα επίπεδα οριζόντιας ανάλυσης 0.15°, ενώ το εμφωλιασμένο μοντέλο εκτελείται σε 40 κάθετα επίπεδα οριζόντιας ανάλυσης 0.12°. Τα δύο αυτά μοντέλα παρέχουν προβλέψεις τέσσερις φορές την ημέρα για τις επόμενες 48 ώρες.



Σχήμα 2.11: Περιοχή ενδιαφέροντος του εμφωλιασμένου Ιρλανδικού μοντέλου HIRLAM

Οι προβλέψεις των παραπάνω μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού εφαρμόστηκαν για την ανάπτυξη των εργαλείων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή.

2.4 Επίδραση της τοπολογίας εδάφους στον άνεμο

Η ροή του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης, δηλαδή στο οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο, επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Γι' αυτό, η μελέτη του

εδάφους της περιοχής ενός αιολικού πάρκου, είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της παραγωγής του. Η λεπτομερής περιγραφή της επιφάνειας του εδάφους ονομάζεται τοπολογία. Με σκοπό λοιπόν, την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου και, κατ' επέκταση, της παραγόμενης αιολικής ισχύος, είναι απαραίτητη η γνώση της τοπολογίας της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το υπό μελέτη αιολικό πάρκο. Ανάλογα με την τοπολογία του εδάφους, τα αιολικά πάρκα κατηγοριοποιούνται σε πάρκα σε πολύπλοκο έδαφος (complex terrain), σε ημί-πολύπλοκο έδαφος (semi-complex terrain) και σε απλό έδαφος (simple terrain). Επίσης, τα πάρκα διακρίνονται σε «μέσα από την ακτή» (onshore), «κοντά στην ακτή» (near shore) και «πέρα από την ακτή» (offshore), ανάλογα με το αν είναι τοποθετημένα ενδοχώρα, παραθαλάσσια ή πάνω σε θαλάσσιο χώρο αντίστοιχα.

Η τοπολογία του εδάφους μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες: την τραχύτητα, τα εμπόδια και την ορογραφία [40].

2.4.1 Τραχύτητα

Ως τραχύτητα αναφέρεται το συνολικό αποτέλεσμα της επιφάνειας του εδάφους, που οδηγεί σε μία γενική επιβράδυνση του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης. Η εκτίμηση της τραχύτητας μιας περιοχής γίνεται με μια παράμετρο, που μετριέται σε μονάδες μήκους και ονομάζεται μήκος τραχύτητας. Αν και η τραχύτητα καθορίζεται από το μέγεθος και την κατανομή των στοιχείων τραχύτητας της περιοχής, όπως η βλάστηση, οι οικισμοί κ.λπ., το μήκος της τραχύτητας δεν είναι σταθερό, αλλά αλλάζει για διάφορους λόγους, π.χ. ανάλογα με το μέγεθος της βλάστησης, την επικάλυψη του εδάφους από χιόνι, την κατάσταση της θάλασσας, αν μιλάμε για offshore πάρκο, κ.ο.κ. [72].

Οι παραπάνω παράμετροι μπορούν να καθοριστούν στιγμιαία μέσω αεροφωτογραφιών, τοπογραφικών χαρτών, εικόνων από δορυφόρο κ.λπ., αλλά δεν μπορούν να δώσουν μια γενική εικόνα. Μια ακριβής περιγραφή των μεγεθών και των αλλαγών της τραχύτητας επιτυγχάνεται με τον χάρτη τραχύτητας, που περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με το έδαφος. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης του χάρτη τραχύτητας, είναι ότι μπορεί εύκολα να διαβαστεί από μετεωρολογικά και «φυσικά» μοντέλα πρόβλεψης αυτόματα.

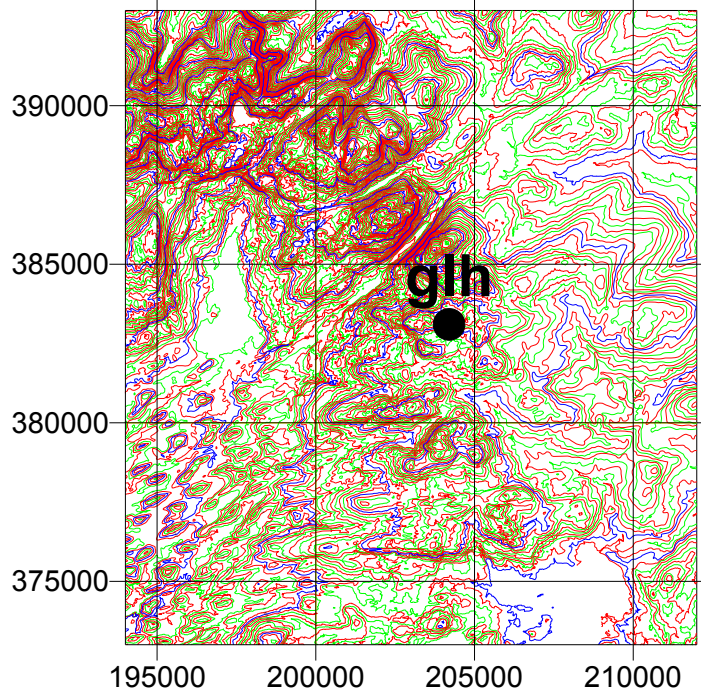
Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της τραχύτητας σε παραθαλάσσιες και θαλάσσιες περιοχές, όπου το μήκος της τραχύτητας στην επιφάνεια της θάλασσας μεταβάλλεται συνεχώς. Γενικά, οι offshore συνθήκες διαφέρουν κατά πολύ, από τους παράγοντες που επηρεάζουν την τραχύτητα στην επιφάνεια της γης. Το μήκος της τραχύτητας της επιφάνειας της θάλασσας αυξάνεται κατακόρυφα με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, ενώ σε μέτριους ανέμους παραμένει πολύ μικρή, ειδικά όταν η διεύθυνση τους παρουσιάζει μικρές κάθετες κλίσεις. Επίσης, αυξάνεται όσο μικραίνει η απόσταση από την ακτή και όσο βαθύτερο είναι το νερό. Ακόμα πιο πολύπλοκος είναι ο προσδιορισμός της τραχύτητας και, κατ' επέκταση, ο προσδιορισμός και η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου τοπικά, σε περιοχές είτε πολύ κοντά στην ακτή είτε πάνω στη θάλασσα. Κοντά στην ακτή, το μήκος της τραχύτητας ποικίλει, λόγω της μεταβλητότητας των κυμάτων και της μεγάλης μεταβολής της τραχύτητας μεταξύ της γης και της θάλασσας [73]. Παρόλ' αυτά, η τραχύτητα της θάλασσας είναι πολύ μικρότερη από αυτή σε χερσαία περιοχή. Τέλος, για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου, λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι σε πολύ ισχυρούς ανέμους, η τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας πλησιάζει αυτή που έχει μία ομαλή επιφάνεια γης.

2.4.2 Εμπόδια

Το δεύτερο στοιχείο που πρέπει να περιγραφεί κατά τη μελέτη της τοπογραφίας μιας περιοχής και για το χαρακτηρισμό της ανάλογα με τη πολυπλοκότητα του εδάφους, είναι τα εμπόδια που συναντάει ο άνεμος, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητά του. Πρέπει λοιπόν, να εξετασθεί τι εμπόδια υπάρχουν στην περιοχή, είτε με αεροφωτογραφίες είτε με επίσκεψη της περιοχής, ώστε να καθοριστούν η θέση, οι διαστάσεις και το πώς επηρεάζεται ο άνεμος κοντά σε κάθε εμπόδιο. Το τελευταίο γίνεται με τη βοήθεια ανεμομέτρου, που τοποθετείται κοντά στο εμπόδιο.

2.4.3 Ορεογραφία

Απαραίτητη για την εκτίμηση της μελλοντικής ταχύτητας του ανέμου είναι η ορεογραφία. Η ορεογραφία περιγράφεται με χάρτες, οι οποίοι παρουσιάζουν τις υψομετρικές καμπύλες του εδάφους μιας περιοχής. Οι υψομετρικές μεταβολές του εδάφους (με σημείο αναφοράς των μετρήσεων την επιφάνεια της θάλασσας) μπορούν να αποτυπωθούν ψηφιακά στους «διανυσματικούς χάρτες», που περιέχουν τις (x,y)-συντεταγμένες και το υψόμετρο των υψομετρικών καμπύλων. Παρακάτω φαίνεται ένας χάρτης ορεογραφίας με τις ισούψειες καμπύλες και τους διαφορετικούς χρωματισμούς, που δηλώνουν τη διαφορά ύψους.



Σχήμα 2.12 χάρτης ορεογραφίας στην περιοχή Golagh της Ιρλανδίας

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

2.4.3α Επίπεδη περιοχή

Η ροή του ανέμου πάνω από επίπεδο έδαφος μπορεί να μοντελοποιηθεί με απλά παραδοσιακά μοντέλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις που το έδαφος χαρακτηρίζεται από οριζόντια μη ομοιομορφία (π.χ. μεταβολές στη θερμοκρασία του εδάφους). Κυκλικά φαινόμενα της ροής του ανέμου, που οδηγούν σε ημερήσια περιοδικότητα, δημιουργούνται από τις έντονες μεταβολές του μήκους της τραχύτητας [40].

Ένα χαρακτηριστικό κυκλικό φαινόμενο, που εμφανίζεται στις παραθαλάσσιες περιοχές, είναι η γέφυρα στεριάς - θάλασσας. Η γέφυρα στεριάς - θάλασσας προκαλείται από τις διαφορές θερμικών ιδιοτήτων της επιφάνειας της θάλασσας και του εδάφους της παραθαλάσσιας περιοχής. Όταν πνέουν ήρεμοι άνεμοι, η θερμοκρασία της στεριάς αυξάνεται γρηγορότερα από αυτή της θάλασσας. Έτσι, η πίεση του αέρα πάνω από τη στεριά αυξάνεται γρηγορότερα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ρεύμα αέρα, που έχει κατεύθυνση από τη θάλασσα στη στεριά στα κατώτερα επίπεδα και από τη στεριά στη θάλασσα στα ανώτερα στρώματα του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος. Αντίθετα, τις νυχτερινές ώρες, που η

στεριά ψυχραίνεται γρηγορότερα απ' ό,τι η θάλασσα, η διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί ένα ρεύμα αέρα αντίστροφης κατεύθυνσης από αυτό της ημέρας. Η ταχύτητα του αέρα είναι πιο μεγάλη στην περίπτωση της κυκλικής ροής που συμβαίνει την ημέρα, σε σχέση με την αντίστοιχη νυχτερινή γέφυρα. Τις ώρες της δύσης και της ανατολής του ήλιου, οι άνεμοι έχουν την τάση να πνέουν σχεδόν παράλληλα με την ακτή. Εκτός από τις παραθαλάσσιες περιοχές, τέτοια φαινόμενα συμβαίνουν ακόμα και σε μικρές λίμνες. Τέτοιου είδους μηχανισμοί του ανέμου επηρεάζουν τη ροή του αέρα στις θαλάσσιες περιοχές.

Ένα ακόμη φαινόμενο είναι το αστικό θερμικό νησί, που προκαλείται από τη θέρμανση του αέρα πάνω από τις αστικές περιοχές. Οι επιδράσεις που οφείλονται στο θερμικό αστικό νησί ποικίλουν, ανάλογα την εποχή του χρόνου, τη γεωγραφική τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά της πόλης. Γενικά, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από μία αστική περιοχή, λόγω των ιδιοτήτων του εδάφους και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, δημιουργεί ένα κάθετο ρεύμα αέρα πάνω από την πόλη, που στα ανώτερα στρώματα κατευθύνεται προς την ύπαιθρο, ενώ παράλληλα επιφανειακοί άνεμοι από την ύπαιθρο συγκλίνουν στο κέντρο της πόλης. Το αστικό θερμικό νησί εμφανίζεται ακόμα και σε πόλεις 10 - 20 χιλιάδων κατοίκων ή σε βιομηχανικές μονάδες, που χαρακτηρίζονται από υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

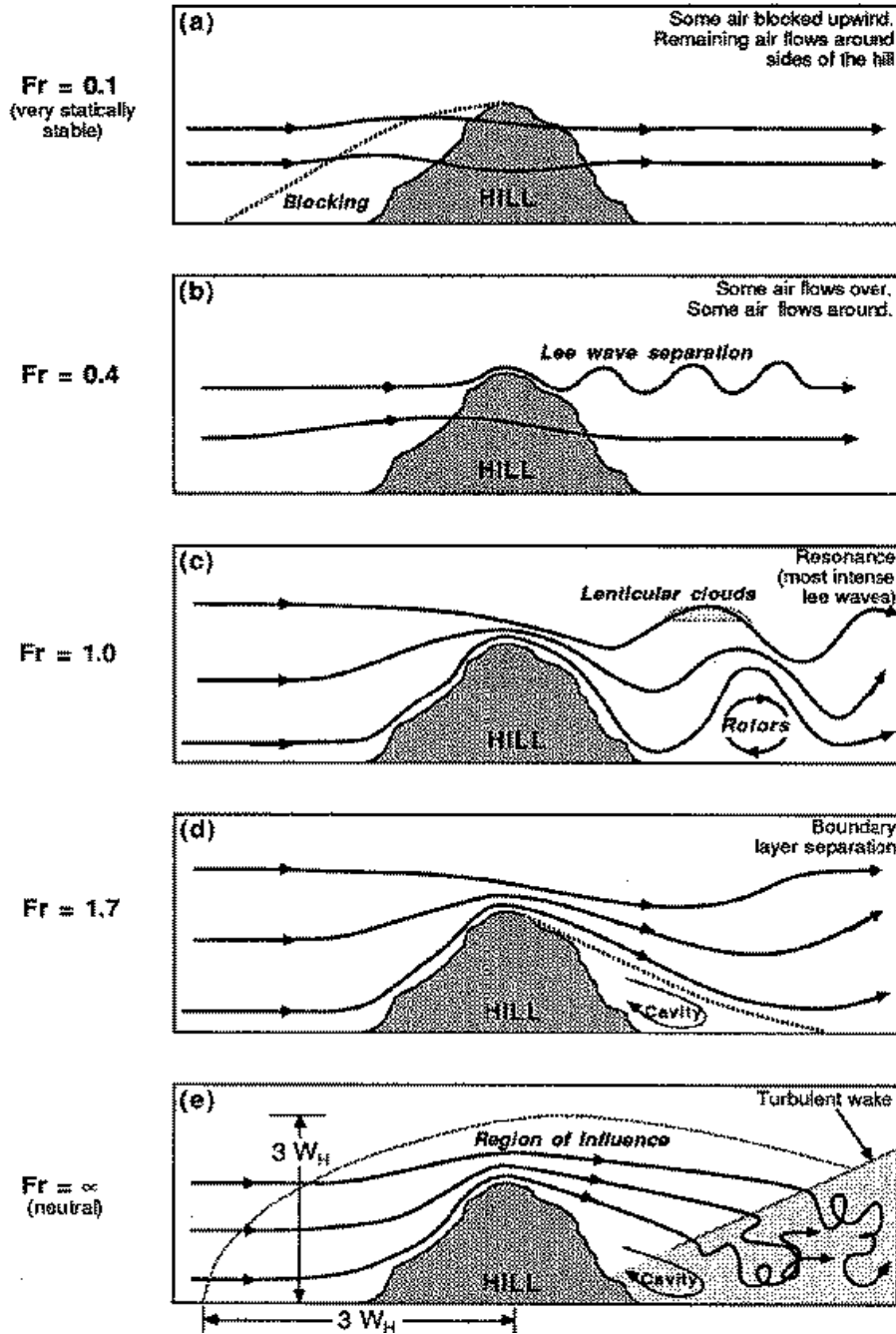
2.4.3β Λοφώδης περιοχή

Ως λοφώδης, ορίζεται η περιοχή που περιέχει διαδοχικούς λόφους και κοιλάδες. Μια τέτοια περιοχή χαρακτηρίζεται ως ημί-πολύπλοκη (semi-complex).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου, όταν πέφτει πάνω σε έναν λόφο, καθορίζονται από το μέγεθος και το σχήμα του λόφου, καθώς και από την ατμοσφαιρική ευστάθεια. Σε ευσταθείς συνθήκες, η κάθετη εκτόπιση του ανέμου λόγω της κλίσης του λόφου, σε συνδυασμό με την αντίθετη βαρυτική δύναμη, εγκλωβίζει ένα μέρος του αέρα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται επιδράσεις άνωσης. Σε μερικές περιπτώσεις μάλιστα, όπου επικρατούν ευσταθείς και καθορισμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι τόσο ασθενής, ώστε ο αέρας δεν φτάνει στην κορυφή του λόφου. Γενικά όμως, ο άνεμος που πέφτει στην πλαγιά ενός λόφου έχει περισσότερο την τάση να κινείται γύρω απ' τον λόφο, παρά πάνω από αυτόν. Υπάρχει πιθανότητα επίσης, η ροή του αέρα να χωρίζεται σε δύο ροές, μία που περνάει πάνω από τον λόφο και μία που κινείται γύρω από αυτόν [74].

Σε ακαθόριστες ατμοσφαιρικές συνθήκες, παρατηρείται, από τη μεριά του λόφου που πέφτει ο αέρας, μια επιβράδυνση στους πρόποδες του λόφου και μία επιτάχυνση στο πάνω μέρος, με τη μεγαλύτερη ταχύτητα να είναι αυτή στην κορυφή του. Παράλληλα, στην απάνεμη πλευρά, παρατηρείται διαχωρισμός της ροής του αέρα και έντονος στροβιλισμός. Ο στροβιλισμός εκφράζεται με την τυπική απόκλιση των μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου για το διάστημα μίας ώρας, κανονικοποιημένη με την ταχύτητα του ανέμου. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται η ροή του ανέμου, όταν πέφτει σε έναν λόφο, σε διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η μοντελοποίηση της ροής του ανέμου, όταν εισέρχεται μέσα σε μία κοιλάδα, περιλαμβάνει τέσσερα φαινόμενα: τη θερμική επίδραση, τη διοχέτευση του αέρα που εξαναγκάζεται από τα πλευρικά τοιχώματα, την προς τα κάτω μεταφορά της ορμής του αέρα και τη διοχέτευση του αέρα, καθοδηγούμενη από τη μεταβολή της πίεσης. Η θερμική επίδραση ονομάζεται και γέφυρα όρος/κοιλάδα και προκαλείται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας, από το βάθος της κοιλάδας μέχρι το ύψος του όρους. Τα πλευρικά τοιχώματα οδηγούν τον άνεμο κατά μήκος της κοιλάδας, αλλά προκαλούν και απότομες μεταβολές στη διεύθυνση του ανέμου κοντά σε αυτά. Κατά το φαινόμενο της προς τα κάτω μεταφοράς της ορμής, ο άνεμος στροβιλίζεται μέσα στην κοιλάδα όπως ο γεωστροφικός άνεμος, αλλά με μία κλίση προς το έδαφος, λόγω τριβής. Τέλος, ο αέρας μέσα στην κοιλάδα καθοδηγείται από τη μεταβολή της πίεσης κατά μήκος της κοιλάδας. Στις περιπτώσεις που κινείται κάθετα στον άξονα της κοιλάδας, αντιστρέφεται απότομα η διεύθυνσή του σε μεγαλύτερο ύψος. Οι δύο πρώτες διαδικασίες εμφανίζονται σε στενές και με απότομες πλαγιές κοιλάδες, ενώ οι δύο τελευταίες σε πλατιές και με μικρό βάθος κοιλάδες [75].



Σχήμα 2.13 Προσομοίωση της ροής του ανέμου πάνω από έναν απομονωμένο λόφο σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες ευστάθειας, που καθορίζονται από τον αριθμό Froude ($Fr = u/NL$ όπου N είναι η συχνότητα Brunt-Vaisala και L το μήκος κλίμακας Stull του λόφου).

2.4.3γ Πολύπλοκο έδαφος (complex terrain)

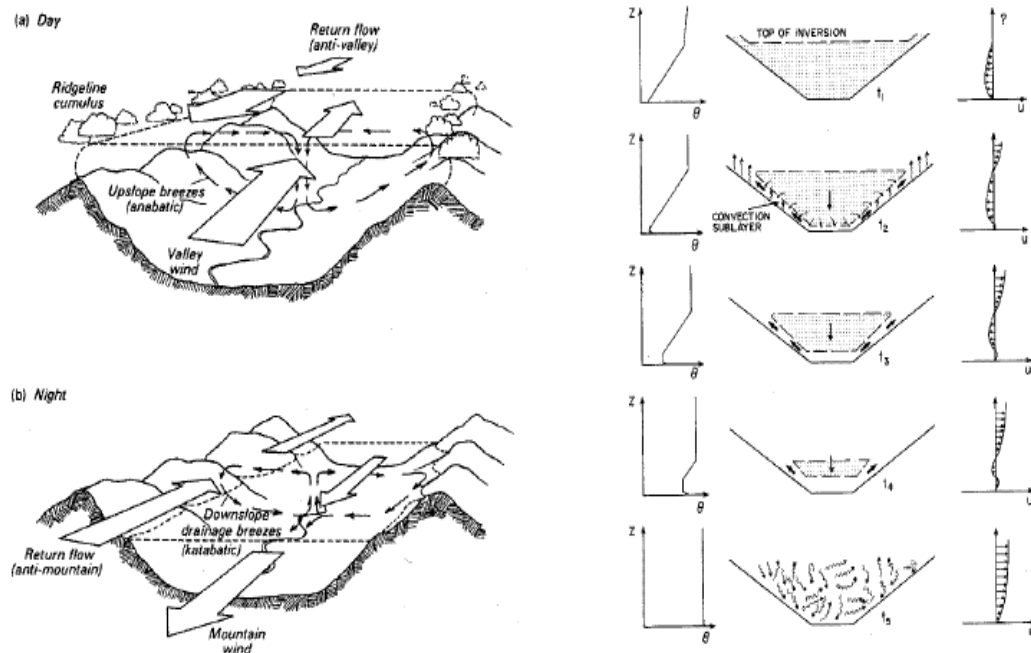
Το πολύπλοκο έδαφος αποτελείται από συνδυασμό κορυφογραμμών και κοιλάδων, που χαρακτηρίζονται από απότομες κλίσεις. Το πιο χαρακτηριστικό φαινόμενο του ανέμου, που παρατηρείται σε περιοχές με τέτοιου είδους έδαφος, είναι η γέφυρα όρος/κοιλάδα που αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά με πιο έντονες και απρόβλεπτες ιδιότητες. Το φαινόμενο αυτό συναντάται περισσότερο το καλοκαίρι, που η διαφορική θέρμανση των πλευρών των ορέων

είναι μεγαλύτερη, κάτι που οδηγεί σε απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης του αέρα στον οριζόντιο άξονα (σχήμα δεξιά).

Η ροή του ανέμου σε πολύπλοκο έδαφος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: τον άνεμο της πλαγιάς (slope wind) και τον άνεμο της κοιλάδας (valley wind) [76]. Ο άνεμος της πλαγιάς δημιουργείται από δυνάμεις άνωσης, που προκαλούνται από τις διαφορές της θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα που έρχεται σε επαφή με την πλαγιά και του περιβάλλοντα αέρα στο ίδιο ύψος μακριά από την πλαγιά (π.χ. σε ένα σημείο της πλαγιάς και το ισοϋψές σημείο πάνω από το κέντρο της κοιλάδας). Η διεύθυνση των ανέμων της πλαγιάς είναι ανοδική προς την πλαγιά του όρους κατά τη διάρκεια της ημέρας και καθοδική προς την κοιλάδα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επίσης, αυτή η κατηγορία του ανέμου είναι κυκλική, δηλαδή, την ημέρα ο άνεμος ανεβαίνει την πλαγιά του όρους, στη συνέχεια αλλάζει διεύθυνση και κατευθύνεται οριζόντια προς το κέντρο της κοιλάδας και τέλος, στο κέντρο της κοιλάδας κατεβαίνει κατακόρυφα. Τις νυχτερινές ώρες ακολουθεί την αντίστροφη διαδρομή.

Η κυκλική αυτή διαδρομή του ανέμου μεταφέρει θερμότητα κάθετα στην κοιλάδα, κάτι που συμβάλλει στη δημιουργία των ανέμων της κοιλάδας (valley winds). Αυτοί οι άνεμοι παράγονται από τις οριζόντιες μεταβολές της πίεσης, που οφείλονται στις διαφορές της θερμοκρασίας του αέρα στον χώρο πάνω από την κοιλάδα και του αέρα στο ίδιο ύψος κοντά στην πλαγιά του όρους. Οι άνεμοι της κοιλάδας πνέουν κατά μήκος αυτής. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ροή του ανέμου της κοιλάδας πνέει κοντά στο βάθος της κοιλάδας, με διεύθυνση κατά μήκος αυτής, γι' αυτό και ονομάζεται άνεμος της κοιλάδας προς τα κάτω (down-valley wind). Αντίθετα, την ημέρα, ο άνεμος της κοιλάδας έχει αντίθετη κατεύθυνση και η ροή του περνάει ψηλά από την κοιλάδα (up-valley wind) [75].

Στο δεξιό μέρος του σχήματος 2.13 φαίνονται οι συνθήκες του ανέμου σε διάφορες καταστάσεις, όπως μεταβάλλονται από τις νυχτερινές ώρες στις ημερήσιες. Η χρονική στιγμή t_1 αντιστοιχεί στην ώρα που ανατέλλει ο ήλιος, ενώ η τελευταία χρονική στιγμή t_5 αντιστοιχεί στο μεσημέρι.



Σχήμα 2.14 Φαινόμενο κοιλάδας όρους

Η παραπάνω ανάλυση των θερμικά καθοδηγούμενων ανέμων αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση μιας ομαλοποιημένης κοιλάδας, όπως φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος. Οι Whiteman και Doran περιγράφουν αναλυτικά τα διάφορα συστήματα του

ανέμου, που επικρατούν σε περιοχές με πολύπλοκο έδαφος. Η συχνότητα και η ένταση αυτών των ανέμων εξαρτάται άμεσα από την εποχή του χρόνου. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, εξαιτίας του χιονιού που καλύπτει τις πλαγιές των ορέων, οι νυχτερινές κυκλικές ροές του ανέμου παραμένουν, ακόμα και όλη την ημέρα, ενώ το καλοκαίρι τα φαινόμενα είναι πιο έντονα.

2.4.3δ Έντονα πολύπλοκο έδαφος

Η παρουσία βαθύτερων και στενότερων κοιλάδων σε συνδυασμό ψηλότερων και πιο απότομων ορέων σε μία περιοχή, χαρακτηρίζουν το έδαφος της ως έντονα πολύπλοκο. Τέτοιου είδους έδαφος έχουν οι περιοχές στα όρη των Άλπεων και στα Πυρηναία όρη. Επίσης, σε κάποια νησιά της Μεσογείου, όπως η Κρήτη και η Κορσική, όπου η αιολική παραγωγή είναι μεγάλης κλίμακας, η επίδραση της απότομης κλίσης των ορέων συνδυάζεται με το φαινόμενο της γέφυρας θάλασσας/γης και της έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα η μοντελοποίηση του ανέμου να απαιτεί πολύπλοκους μηχανισμούς. Η ροή του ανέμου γίνεται ακόμα περισσότερο ασαφής, με την επίδραση της ανομοιομορφίας της βλάστησης, που μεταβάλλεται απότομα σε σχέση με το ύψος. Επιπλέον, η θέρμανση του εδάφους ποικίλει, λόγω της σκιάς που προκαλούν οι υψηλές κορυφές των ορέων. Γενικά, ο προσδιορισμός της ταχύτητας του ανέμου σε τέτοιο έδαφος παραμένει μία πρόκληση για τον τομέα της μετεωρολογίας, που ασχολείται με τη ροή του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό επίπεδο.

Γενικά, όσο η κλίση του εδάφους αυξάνεται και οι διαστάσεις των βουνών μεγαλώνουν, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η εκτίμηση του ανέμου. Μια παράμετρος που ορίζει το πόσο απότομη είναι η κλίση του εδάφους και γενικά την ορειογραφία της περιοχής, είναι ο δείκτης ανωμαλίας του εδάφους RIX (ruggedness index). Ο RIX μιας περιοχής αντιστοιχεί με τη μέση επί τοις εκατό επιπλέον κλίση, από μια προκαθορισμένη κλίση, που λειτουργεί ως τιμή αναφοράς και ισούται συνήθως 30% [40].

2.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Ο άνεμος χαρακτηρίζεται από τη διαρκώς μεταβαλλόμενη και διακοπτόμενη φύση του. Είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο, ιδιαίτερα κοντά στην επιφάνεια της γης, που ενδιαφέρει τον τομέα της πρόβλεψης της ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτριες. Οι Α/Γ μπορούν να ξεπεράσουν τα 150μ ύψος, άλλα η επίδραση του εδάφους στον άνεμο είναι έντονη, ακόμα και στα 1000μ από την επιφάνεια της γης.

Η εκτίμηση των συστατικών του ανέμου, της ταχύτητας και της διεύθυνσης σε τοπικό επίπεδο, είναι μια κοπιαστική εργασία και ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα. Για να υπάρξει ακρίβεια και αξιοπιστία στην πρόγνωση του ανέμου, είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν λεπτομερής περιγραφή της ατμόσφαιρας, σε συνάρτηση με το χρόνο. Τα ισοβαρή μέτωπα όμως, διασχίζουν ολόκληρη τη γη. Γι' αυτό το λόγο, η εκτίμηση της ατμοσφαιρική κατάστασης πρέπει να γίνει σε όλη την έκταση της γης και για όλα τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Μία τέτοια πρόγνωση πραγματοποιείται μόνο από μερικά μετεωρολογικά κέντρα. Αυτή η πρόγνωση όμως θεωρείται χονδροειδής, γιατί τα σημεία στα οποία γίνεται απέχουν πολύ μεταξύ τους. Μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης λαμβάνουν τη χονδροειδή περιγραφή της ατμόσφαιρας για ένα τμήμα της γης και με επιπλέον πληροφορία, που προέρχεται από διάφορες μεθόδους μέτρησης, παρέχουν προβλέψεις για το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα σε ανάλυση μερικών χιλιομέτρων.

Η πρόβλεψη αιολικής ισχύος σήμερα, όπως θα φανεί και στο επόμενο κεφάλαιο, πραγματοποιείται με δύο προσεγγίσεις: τη φυσική και τη στατιστική. Η στατιστική προσέγγιση εκμεταλλεύεται οποιαδήποτε πληροφορία γίνεται διαθέσιμη για τη μελλοντική ατμοσφαιρική κατάσταση πάνω από την περιοχή του αιολικού πάρκου και, με μαθηματικές μεθόδους, προβλέπει την αιολική παραγωγή. Η φυσική προσέγγιση προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη χωρική ανάλυση της περιγραφής της ατμόσφαιρας, μοντελοποιώντας τις φυσικές διαδικασίες, που είναι πιθανόν να λάβουν χώρα στον χώρο ενός πάρκου. Γενικά, η

προσπάθεια για υψηλή χωρική ανάλυση και μεγάλη ακρίβεια στην πρόβλεψη του ανέμου, οδήγησε τους μετεωρολόγους να εγκαθιδρύσουν έναν νέο τομέα της επιστήμης, τη μετεωρολογία της αιολικής ισχύος.

Η μετεωρολογία της αιολικής ισχύος ασχολείται με την πρόγνωση του ανέμου σε στεριά και θάλασσα, χρησιμοποιώντας τόσο φυσικές παραμετροποιήσεις όσο και στατιστικές μεθόδους πρόβλεψης. Το σημαντικότερο επίτευγμα του συγκεκριμένου τομέα είναι η δημιουργία ενός συνόλου σεναρίων της μελλοντικής ατμοσφαιρικής κατάστασης, σε αντίθεση με τη ντετερμινιστική πρόβλεψη των γνωστών μετεωρολογικών προβλέψεων υψηλής κλίμακας. Αυτό οδηγεί τους δημιουργούς μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος σε νέες προκλήσεις, όπως ο συνδυασμός ή η επιλογή του καλύτερου σεναρίου-μέλους του συνόλου.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή των κυριότερων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής έχει απασχολήσει τους τομείς της μετεωρολογίας, των μαθηματικών και της εφαρμοσμένης πληροφορικής. Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός εργαλείου πρόβλεψης με απόδοση τέτοια, ώστε να είναι αποτελεσματικό για τις ανάγκες ενός διαχειριστή δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ή ενός ανεξάρτητου ιδιοκτήτη αιολικού πάρκου, ξεκίνησαν τη δεκαετία του '80. Από τότε, ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων έχει δημοσιευτεί, προσεγγίζοντας το πρόβλημα της πρόβλεψης με διαφορετικούς τρόπους.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να περιγράψει διεξοδικά τις μεθοδολογίες, που έχουν αναπτυχθεί και έχουν καθιερωθεί ως τεχνολογία αιχμής στον τομέα της πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Παράλληλα, παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί από ερευνητικά κέντρα ή από εταιρείες. Μερικά από αυτά βρίσκονται σε λειτουργία σήμερα, ενώ άλλα παραμένουν στο στάδιο της έρευνας. Τέλος, γίνεται μία μικρή παρουσίαση του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS, στο πλαίσιο του οποίου αναπτύχθηκαν τα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος, που αποτελούν την παρούσα διατριβή. Στο πλαίσιο του προγράμματος, δημιουργήθηκε ένα εμπορικό πακέτο, το οποίο αποτελεί τη μεγαλύτερη και πιο ουσιαστική προσπάθεια που έχει γίνει μέχρι τώρα, στο χώρο της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [77].

Με βάση το είδος των δεδομένων που επεξεργάζονται και τις μεθόδους που χρησιμοποιούν, τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες προσέγγισης του προβλήματος: τη φυσική προσέγγιση και τη στατιστική προσέγγιση [78, 79]. Τα φυσικά μοντέλα εστιάζουν την προσπάθειά τους στην ακριβή εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου στο σημείο κάθε Α/Γ, χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Μειώνουν το σφάλμα της πρόβλεψης με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων, που ονομάζονται στατιστικές τεχνικές της εξόδου του μοντέλου ή εν συντομία

MOS (Model Output Statistics). Αντίθετα, τα στατιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν κατευθείαν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, για να μοντελοποιήσουν τις σχέσεις τους με τη χρονοσειρά της αιολικής παραγωγής, χωρίς καμία ανάλυση των φυσικών φαινομένων. Βέβαια, υπάρχουν μοντέλα που προσεγγίζουν το πρόβλημα και με τις δύο μεθόδους.

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

3.2 Φυσική προσέγγιση

Τα μοντέλα που στηρίζονται στη φυσική προσέγγιση του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, χρησιμοποιούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού ως αρχικοποίηση για τη διαδικασία ανάλυσης και προσομοίωσης της ροής του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα πολύ υψηλής οριζόντιας ανάλυσης μετεωρολογικά μοντέλα, δηλαδή τα μοντέλα μέσης κλίμακας και τα CFD μοντέλα, λειτουργούν εμφωλιασμένα σε κάποιο κομμάτι του οριζόντιου πλέγματος ενός μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν συνήθως μέρος των φυσικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας. Στόχος τους είναι η λεπτομερής περιγραφή του οριακού ατμοσφαιρικού επιπέδου πολύ κοντά στην επιφάνεια της γης, πάνω από μία περιοχή ενδιαφέροντος.

3.2.1 Μεθοδολογία των μοντέλων φυσικής προσέγγισης

Η φυσική προσέγγιση του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι σαφώς καθορισμένη και αποτελείται από τρία στάδια επεξεργασίας: τη βαθμονόμηση προς τα κάτω, τον μοντελισμό καμπύλης ισχύος και τη στατιστική διόρθωση απόκρισης [57].

Τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού παρέχουν προβλέψεις, που αντιστοιχούν σε σημεία κοντά στην περιοχή του αιολικού πάρκου. Η οριζόντια χωρική ανάλυση που, εκτελείται για να προσομοιώσουν την ατμόσφαιρα, κυμαίνεται από 10 έως 15 χιλιόμετρα. Η περιοχή ενδιαφέροντος συνήθως περιέχεται σε κάποιο από τα πλαίσια του οριζόντιου πλέγματος, που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Πρωταρχικός σκοπός των φυσικών μοντέλων είναι η λεπτομερής περιγραφή της ατμόσφαιρας στον χώρο που περικλείει το πλαίσιο ενδιαφέροντος, σε τέτοια ανάλυση, ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν οι ατμοσφαιρικές μεταβλητές στο σημείο της πλήμνης της κάθε Α/Γ. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, η φυσική προσέγγιση απαιτεί τη χρήση ενός μετεωρολογικού μοντέλου μέσης ή μικρής κλίμακας.

Ως πρώτο βήμα καθορίζεται το επίπεδο, στο οποίο θα γίνει πιο ακριβής εκτίμηση των ατμοσφαιρικών μεταβλητών, σε σχέση με το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, που αποτελούν την αρχικοποίηση των μοντέλων μικρότερης κλίμακας. Σε αυτή τη φάση, τα μέσης ή/και μικρής κλίμακας μοντέλα εκτελούνται σε κάθε αναβάθμιση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, ενώ σε άλλες περιπτώσεις προσομοιώνουν τη ροή του ανέμου, με βάση έναν πρότυπο πίνακα, που περιέχει τις τυπικές περιπτώσεις της εξέλιξης της ροής. Ο συμβουλευτικός πρότυπος πίνακας δημιουργείται με κάποια μέθοδο ταξινόμησης, όπως η ανάλυση συστάδων (clustering analysis). Αφού γίνει η προσομοίωση της ροής του ανέμου στο χώρο του πάρκου, ακολουθεί η διαδικασία αναγνώρισης του κάθετου προφίλ του ανέμου. Αυτή η διαδικασία είναι πολύ σημαντική, ιδίως σήμερα, που το μέγεθος της έλικας μίας σύγχρονης Α/Γ ξεπερνάει τα 30 μέτρα και περιλαμβάνει μοντελοποιήσεις της

τραχύτητας του εδάφους, της θερμικής διαστρωμάτωσης, της ορεογραφίας της ευρύτερης περιοχής και φαινόμενα, όπως αυτό της σκίασης των ανεμογεννητριών [57].

Με τον τρόπο αυτό, προσδιορίζεται η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης της κάθε Α/Γ, η οποία μετατρέπεται σε αιολική ισχύ με κάποιο μοντέλο καμπύλης ισχύος. Στα πρώτα μοντέλα πρόβλεψης της ισχύος, χρησιμοποιούσαν τις καμπύλες ισχύος του κατασκευαστή των Α/Γ. Για τον σκοπό αυτό, έχουν δημοσιευτεί πολλές στατιστικές μεθόδους για την προσέγγιση της καμπύλης ισχύος. Λαμβάνοντας σαν παραμέτρους την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, περιγράφονται όλες οι συσχετίσεις τους με την παραγόμενη αιολική ισχύ.

Τόσο μετά την προς τα κάτω βαθμονόμηση όσο και στην έξοδο του μοντέλου καμπύλης ισχύος, λαμβάνει χώρα μία τεχνική διόρθωση των προβλέψεων, που ονομάζεται στατιστική διόρθωση απόκρισης (MOS multiple output statistics) και βασίζεται σε στατιστικές αναδρομικές μεθόδους, όπως η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση ή το φίλτρο Kalman [40]. Έτσι, κάθε φορά που λαμβάνονται καινούριες μετρήσεις, το μοντέλο MOS αναβαθμίζει τις παραμέτρους του. Η χρήση του μοντέλου MOS μπορεί να πετύχει μείωση του σφάλματος της πρόβλεψης μέχρι και 20%.

3.2.2 Το μοντέλο Predictor

Ένα από τα πρώτα μοντέλα πρόβλεψης παραγωγής αιολικών πάρκων που αναπτύχθηκαν, ήταν αυτό του Landberg. Το μοντέλο αυτό βασιζόταν σε φυσικές παραμετροποιήσεις, παρόμοιες με τη μεθοδολογία του Ευρωπαϊκού Αιολικού Χάρτη και χρησιμοποιούσε προβλέψεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού προέρχονταν από το μοντέλο DMI HIRLAM [80, 81].

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

Η προσομοίωση της ροής του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος γίνεται πρώτα με το μέσο-κλιμακούμενο μοντέλο KAMM (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) και στη συνέχεια με το μικρό-κλιμακούμενο μοντέλο WA^SP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Το WA^SP μοντελοποιεί τα εμπόδια της περιοχής, την τραχύτητα και τις αλλαγές της, καθώς και τις επιδράσεις της ορεογραφίας [39]. Αντίθετα, δεν περιλαμβάνει μονάδες που να περιγράφουν τα θερμικά φαινόμενα, όπως το φαινόμενο όρους/κοιλιάδας ή τη γέφυρα θάλασσας\εδάφους. Η εκτίμηση του ανέμου στην περιοχή του πάρκου, όπως διαμορφώνεται από το μοντέλο WA^SP, βελτιώνεται με τη χρήση στατιστικής διόρθωσης απόκρισης. Ένας συντελεστής διόρθωσης πολλαπλασιάζεται με την τιμή της ταχύτητας, με αποτέλεσμα να μειωθεί το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Έτσι, προκύπτει η προκαταρκτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, μετατρέποντας την ταχύτητα του ανέμου, μέσω των καμπύλων ισχύος των Α/Γ του πάρκου.

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

Τέλος εφαρμόζεται και δεύτερη στατιστική διόρθωση απόκρισης στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Προϋπόθεση για την εκτίμηση των παραμέτρων των μοντέλων στατιστικής απόκρισης, είναι να υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα τουλάχιστον τεσσάρων μηνών. Το παραπάνω μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι γνωστό ως Predictor και αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο RISOE της Δανίας [82].

3.2.2 Το μοντέλο Previento

Ένα μοντέλο παρόμοιο με το παραπάνω είναι το Previento, που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο του Oldenburg της Γερμανίας πρώτα από τον Bayer [83] και εξελίχθηκε στη συνέχεια από τους Focken και Lange [84]. Το Previento έχει εφαρμοστεί στη Γερμανία, δίνοντας προβλέψεις τόσο σε απομονωμένα πάρκα όσο και στην συνολική αιολική παραγωγή της χώρας. Το μοντέλο αρχικοποιείται με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού του μοντέλου Lokalmodel, που παρέχονται από την Γερμανική μετεωρολογική υπηρεσία και του μοντέλου της ECMWF. Το Previento βελτιώνει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, μοντελοποιώντας τις τοπικές συνθήκες της περιοχής και δίνοντας έμφαση στην ορογραφία και την εξαρτώμενη από τη διεύθυνση του ανέμου επιφανειακή τραχύτητα.

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

Ο Lange ενσωμάτωσε στο Previento ένα μοντέλο εκτίμησης αβεβαιότητας της πρόβλεψης, που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο [85]. Ο Focken ανέπτυξε μία προχωρημένη μέθοδο, για να προβλέψει τη συνολική παραγωγή όλης της Γερμανίας, χρησιμοποιώντας δεδομένα από 50 αντιπροσωπευτικά αιολικά πάρκα, που έχουν επιλεγεί με κατάλληλο τρόπο, ώστε να λάβουν χώρα τα οφέλη της χωρικής εξομάλυνσης [86]. Ο Tambke και ο Lange προσάρμοσαν το Previento, ώστε να μπορεί να λειτουργεί και σε θαλάσσια αιολικά πάρκα, μοντελοποιώντας με λεπτομέρεια τα φαινόμενα του αέρα πάνω από τη θάλασσα, λόγω της θερμικής αλληλεπίδρασης στεριάς και θάλασσας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης ανέμου και κυμάτων. Τέλος, απέδειξαν ότι το κάθετο προφίλ του ανέμου δεν ακολουθεί το λογαριθμικό πρότυπο του Monin-Obukhov σε ασταθείς καταστάσεις της ατμόσφαιρας, λόγω της συχνής καθόδου του ατμοσφαιρικού επιπέδου Ekman [87, 88]. Το Previento σήμερα είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος στην Ευρώπη. Παρόλ' αυτά, υστερεί σε περιοχές με πολύπλοκο έδαφος.

3.2.3 Το μοντέλο EWind

Το μοντέλο Ewind, που αναπτύχθηκε από την True Wind Inc, συνδυάζει τις φυσικές θεωρήσεις με στατιστικές μεθόδους [89]. Το EWind χρησιμοποιεί αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι, ώστε να παρέχουν ακριβή πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου. Το σύστημα προβλέπει την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και στη συνέχεια μετατρέπει τις προβλέψεις αυτές σε παραγόμενη ισχύ. Τα στοιχεία που συλλέγονται από τον χώρο πρόβλεψης, έχουν τη δυνατότητα συνεχούς ανατροφοδότησης, έτσι ώστε να παρέχουν τις καλύτερες δυνατές προβλέψεις σε όλο το διάστημα.

Το Ewind, αντίθετα με τα περισσότερα μοντέλα, έχει δυνατότητα παγκόσμιας πρόβλεψης. Η αρχική διαμόρφωση του EWind χρησιμοποιεί ένα μέσης κλίμακας μοντέλο MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System Model), για να κάνει προβλέψεις καιρού

(η τρέχουσα έκδοση του είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο, παρόμοιο με το MM5). Ωστόσο, τώρα χρησιμοποιούνται και άλλα μέσης κλίμακας μοντέλα, όπως τα ForeWind, MM5, WRF, COAMPS, workstation-ETA και OMEGA (το μοντέλο αυτό εκτελείται πάνω σ' ένα μοναδικό, αδόμητο δίκτυο με μεταβλητή ανάλυση, η οποία επιτρέπει υψηλότερη ανάλυση σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως βουνά και ακτογραμμές καθώς και γύρω από κινούμενα καιρικά συστήματα).

Οι προβλέψεις των ατμοσφαιρικών μοντέλων τροφοδοτούν τα προσαρμοστικά στατιστικά μοντέλα. Τα στατιστικά μοντέλα είναι ένα σύνολο σχέσεων μεταξύ της εξόδου των βασισμένων στη φυσική ατμοσφαιρικών μοντέλων και των μεταβλητών, που πρόκειται να προβλεφθούν για μια τοποθεσία, όπως πχ. η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και η πυκνότητα του αέρα στη θέση των Α/Γ. Τα στατιστικά μοντέλα, στην ουσία, βασίζονται στη γραμμική παλινδρόμηση πολλών μεταβλητών και στα νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο είδος στατιστικών μοντέλων επιλέγει αυτόματα τις καλύτερες προγνωστικές μεταβλητές από το ατμοσφαιρικό μοντέλο [90]. Πέρα από την πρόβλεψη του ανέμου, οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να περιλαμβάνουν θερμοκρασία, μεταβλητότητα, συννεφιά, και άλλες παραμέτρους. Τα νευρωνικά δίκτυα του EWind συνδυάζονται με αλυσίδες Markov.

3.2.4 Το μοντέλο LocalPred

Το LocalPred και το RegioPred είναι δύο εργαλεία πρόβλεψης, σχεδιασμένα ειδικά για περιοχές με περίπλοκο έδαφος, που αναπτύχθηκαν από τον Martí Perez [91]. Το LocalPred, συγκεκριμένα, έχει τη δυνατότητα να παρέχει πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, βασισμένες σε μοντέλα ARMA και ARX. Επίσης, περιλαμβάνει μια εξελιγμένη μονάδα στατιστικού υποβιβασμού (statistical downscaling module), ικανή να αναγνωρίζει και να απομακρύνει συστηματικά λάθη των αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Το LocalPred είναι σχεδιασμένο, για να χρησιμοποιεί αριθμητικές προβλέψεις καιρού από οποιοδήποτε μετεωρολογικό μοντέλο (HIRLAM, ECMWF, AVN κ.α.). Είναι ικανό να κάνει προβλέψεις αιολικής ισχύος, βασισμένο μόνο σε online μετρήσεις, χωρίς εκ των προτέρων εκπαίδευση. Εάν δεν υπάρχουν μετρήσεις αιολικής ισχύος, μπορεί να λειτουργήσει μόνο με αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Διορθώσεις πραγματοποιούνται μέσω υψηλής ανάλυσης φυσικών υπολογισμών. Όταν είναι διαθέσιμες οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και οι on-line μετρήσεις, το LocalPred υπολογίζει μια βέλτιστη πρόβλεψη για κάθε χρονικό βήμα, συνδυάζοντας τις προβλέψεις από τις παραπάνω μονάδες (modules).

Για μακροπρόθεσμες προβλέψεις (μέχρι 6-8 ώρες) η **μονάδα χρονοσειρών** (time series module) παρέχει προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου ή/ και της παραγόμενης ισχύος, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις απ' ευθείας σύνδεσης δεδομένα μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος του Α/Π (LocalPred 1.1).

Για μέσου χρόνου προβλέψεις (μεγαλύτερες από 8 ώρες) χρησιμοποιούνται αριθμητικές προβλέψεις καιρού από διαφορετικές πηγές (HIRLAM, AVN, ECMWF). Για να μειωθούν τα σφάλματα, εκτελείται μια MOS διόρθωση (LocalPred 1.0), παρέχοντας μια πιο ακριβή πρόβλεψη. Η πρόβλεψη του ανέμου μετατρέπεται σε πρόβλεψη ισχύος, μέσω της **μονάδας καμπύλης ισχύος** (LocalPred 2), η οποία έχει υπολογιστεί με τη χρήση ιστορικών δεδομένων παραγωγής ισχύος και NWP [92].

Η υψηλής ανάλυσης **φυσική μονάδα** (LocalPred 1.2) αποτελείται από το MM5 μοντέλο και τους CFD υπολογισμούς. Σκοπός αυτής της μονάδας είναι να εξετάζει τις επιπτώσεις της τοπογραφίας και της τραχύτητας, με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Το LocalPred χρησιμοποιεί ως είσοδο αριθμητικές προβλέψεις καιρού και μετρούμενα από το Α/Π δεδομένα (ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, παραγωγή ισχύος, θερμοκρασία και πίεση). Ως παραλλαγή, το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει μια μονάδα, που βασίζεται μόνο σε χρονοσειρές ή δύο μονάδες MOS και καμπύλης ισχύος, με απ' ευθείας σύνδεσης δεδομένα. Λεπτομερής περιγραφή της δομής του LocalPred γίνεται στο [91].

Το RegioPred είναι ένα εργαλείο για την πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος σε εθνικό επίπεδο. Λειτουργεί συνδεδειγμένα με το LocalPred, μέσω μιας μονάδας αναβάθμισης (up-scaling module). Το RegioPred παρέχει ακριβή πρόβλεψη με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, μέσω μιας επιλογής αιολικών πάρκων αναφοράς.

3.2.5 Το μοντέλο HIPROM

Το μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού HIRLAM εφαρμόστηκε και ως μοντέλο πρόβλεψης αιολικής ισχύος [94]. Το μοντέλο έτρεχε με τον ενφωλιασμένο τρόπο σε διαφορετικές οριζόντιες χωρικές αναλύσεις (0.45°, 0.225°, 0.15°, 0.05°, 0.014°) στην περίπτωση της Δανίας και με θεωρητικές καμπύλες ισχύος υπολογιζόταν η παραγωγή αιολικής ενέργειας. Το μοντέλο ονομάστηκε HIPROM (HIRlam Power prediction Model). Μπορεί αυτή η μέθοδος να μην έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά έγινε μία αξιολόγηση μελέτη από τον Jorgensen και την Moehrlen [50] για το πώς επηρεάζει η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού την απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

3.3 Στατιστική προσέγγιση

3.3.1 Εισαγωγή

Τα μοντέλα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού προβλέπουν τις μεταβλητές, που περιγράφουν την κατάσταση του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος σε μία περιοχή ενδιαφέροντος. Οι ερευνητές του τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος στοχεύουν στον πιο αποδοτικό μετασχηματισμό της ατμοσφαιρικής κατάστασης, όπως περιγράφεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε αιολική ενέργεια. Στην περίπτωση που το πρόβλημα της αιολικής ισχύος προσεγγίζεται χωρίς περαιτέρω φυσικές θεωρήσεις και παραμετροποιήσεις της ροής του ανέμου στην επιλεγμένη περιοχή, γίνεται προσπάθεια να αποκωδικοποιηθεί με στατιστικές μεθόδους η περιγραφή της ατμόσφαιρας, σε παραγωγή του υπό μελέτη αιολικού πάρκου.

Στην πραγματικότητα, το βασικό μέλημα του ερευνητή είναι να βρει την πιο κατάλληλη συνάρτηση f , που να μεταφέρει τον χώρο $\Omega_I \{I_{t+1/t}, I_{t+2/t}, \dots, I_{t+k/t}\}$ του διανύσματος που περιγράφει την ατμοσφαιρική κατάσταση, στον χώρο $\Omega_P \{\bar{P}_{t+1/t}, \bar{P}_{t+2/t}, \dots, \bar{P}_{t+k/t}\}$ της αιολικής ισχύος [95]. Η επιλογή της συνάρτησης μεταφοράς f , καθώς και ο υπολογισμός των παραμέτρων της, πραγματοποιείται με τη συσχέτιση της χρονοσειράς των μετρήσεων της εξόδου του υπό μελέτη πάρκου με τις αντίστοιχες για κάθε χρονική στιγμή αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Δηλαδή, η συνάρτηση μεταφοράς f δέχεται ως είσοδο την περιγραφή της προβλεπόμενης ατμοσφαιρικής κατάστασης και την ανάγει σε αιολική παραγωγή.

Το πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξης ενός στατιστικού μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, είναι ο συντονισμός (tuning) των παραμέτρων της συνάρτησης μεταφοράς f έτσι, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη σύνδεση των μεταβλητών εισόδου με την προβλεπόμενη χρονοσειρά της αιολικής ισχύος. Η μέθοδος που ακολουθείται πάντα, είναι επαναληπτική και έχει στόχο να ελαχιστοποιήσει μία συνάρτηση κόστους C , που σχετίζεται με την απόδοση του στατιστικού μοντέλου. Εάν, λοιπόν, e_t είναι το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του μοντέλου, τότε η συνάρτηση κόστους $C(e_t)$ δίνει πληροφορία σχετικά με την κατανομή του σφάλματος του εκάστοτε μοντέλου στο σύνολο εκπαίδευσης.

Η πιο συνηθισμένη συνάρτηση κόστους που εφαρμόζεται, είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος rms , η οποία ορίζεται ως εξής:

$$C(e_t) = rms(e_t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^N e_t^2} \quad (3.1)$$

Η συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους, που εφαρμόστηκε και για τον σχηματισμό των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, αποτελείται από τρία συστατικά, όπως αναφέρεται στους Focken and Lange [57]: το συστηματικό σφάλμα (ή κλίση του σφάλματος) της πρόβλεψης, τη διαφορά των σχετικών αποκλίσεων των χρονοσειρών της πραγματικής τιμής και της προβλεπόμενης από το μοντέλο τιμής της αιολικής ισχύος, καθώς και έναν όρο, την διασκόρπιση $disp$, που εμπεριέχει την αντί-συσχέτιση r μεταξύ των δύο παραπάνω χρονοσειρών. Με μαθηματικούς όρους, τα παραπάνω περιγράφονται ως εξής, για προβλέψεις της αιολικής ισχύος για μία ώρα μπροστά:

$$rms^2 = bias^2 + sbias^2 + disp^2$$

$$bias = \frac{1}{N} e_t$$

$$sbias = \sigma(\hat{p}_{t+1/t}) - \sigma(p_{t+1/t})$$

$$disp = \sqrt{2\sigma(\hat{p}_{t+1/t})\sigma(p_{t+1/t})(1 - r(\hat{p}_{t+1/t}, p_{t+1/t}))}$$

$$r(\hat{p}_{t+1/t}, p_{t+1/t}) = \sum_{i=0}^{N-m-1} \hat{p}_{t+1+m/t} p_{t+1/t}$$

Έτσι λοιπόν, η χρήση της συνάρτησης της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ως συνάρτηση κόστους, δίνει πληροφορία σχετικά με την κεντρική τιμή της κατανομής του σφάλματος. Με τη βοήθεια του συστηματικού σφάλματος bias, εκτιμάει αν προβλέπεται σωστά η μεταβλητότητα της χρονοσειράς της αιολικής παραγωγής μέσω της διαφοράς των σχετικών αποκλίσεων των δύο χρονοσειρών και, τέλος, κάνει αναφορά στην ύπαρξη των σφαλμάτων φάσης.

Παράλληλα, με την μοντελοποίηση του μετασχηματισμού της ατμοσφαιρικής κατάστασης σε αιολική παραγωγή, ενσωματώνεται στα στατιστικά μοντέλα και η αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, έτσι ώστε να έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν ταυτόχρονα την «παραμένουσα» συμπεριφορά του ανέμου. Η προσαρμογή της «παραμένουσας» ιδιότητας της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος στα στατιστικά μοντέλα δίνει το πλεονέκτημα έναντι των μοντέλων φυσικής προσέγγισης να αποδίδουν καλύτερα μέχρι και 25%, για χρονικό ορίζοντα μέχρι και 6 ώρες μπροστά [96]. Η δυνατότητα αυτή των στατιστικών μοντέλων είναι πολύ σημαντική, σε περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμες οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Υπάρχουν δύο τρόποι παραγωγής των προβλέψεων από τα στατιστικά μοντέλα. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο πρόβλεψης δέχεται συνολικά όλα τα διαθέσιμα δεδομένα για όλο τον ορίζοντα πρόβλεψης (π.χ. για τις επόμενες δύο μέρες) και παρέχει την αντίστοιχη πρόβλεψη με μία μόνο εκτέλεση. Στη δεύτερη περίπτωση, το μοντέλο μπορεί σχεδιάζεται έτσι, ώστε να εκτελείται επαναληπτικά, δίνοντας τις ωριαίες προβλέψεις ξεχωριστά, μέχρι να καλύψει τη χρονική περίοδο πρόβλεψης [79]. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο εκπαιδεύεται μία φορά, συγκεκριμένα για να προβλέψει την αιολική ισχύ της επόμενης ώρας. Η επαναληπτική διαδικασία της πρόβλεψης δίνει τη δυνατότητα στο μοντέλο να χρησιμοποιεί την προηγούμενη πρόβλεψή του στην είσοδο, διατηρώντας έτσι την ικανότητα να προβλέπει στα πιο μακροχρόνια βήματα με βάση την «παραμένουσα» συμπεριφορά του ανέμου. Είναι προφανές όμως, ότι όσο αυξάνονται τα βήματα της πρόβλεψης, η αβεβαιότητα που υπεισέρχεται στην είσοδο του μοντέλου αυξάνεται. Παρόλ' αυτά, όπως αποδείχθηκε στη διατριβή, δεν είναι τέτοια, ώστε να αχρηστεύει την ισχύ του παράγοντα της «παραμένουσας» τιμής της αιολικής ισχύος στην πρόβλεψη.

Στην ενότητα αυτή, γίνεται μία επισκόπηση των στατιστικών μοντέλων της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Η ταξινόμησή τους γίνεται με βάση τη μεθοδολογία, με την οποία έχουν αναπτυχθεί. Μετά από την παρουσίαση των παρακάτω στατιστικών μεθοδολογιών, ο αναγνώστης θα είναι σε θέση να αντιληφθεί με ποιους τρόπους είναι δυνατόν να προσεγγιστεί ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα, αυτό της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [97].

3.3.2 Αυτό-παλινδρομικά μοντέλα

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες στατιστικές μέθοδοι, που έχουν εφαρμοστεί για την πρόβλεψη χρονοσειρών, είναι τα αυτό-παλινδρομικά μοντέλα κινητού μέσου όρου (ARMA), τα αυτό-παλινδρομικά μοντέλα εξωγενών μεταβλητών (ARX) και οι μέθοδοι διαδικασιών Box-Jenkins. Τα παραπάνω μοντέλα αποτελούνται από δύο συνιστώσες. Το πρώτο μέρος AR, που είναι κοινό σε ολόκληρη την οικογένεια των αυτό-παλινδρομικών μοντέλων, δηλώνει ότι η τιμή p_{t+1} της χρονοσειράς P τη χρονική στιγμή $t+1$, συνδέεται γραμμικά με τις

παλαιότερες τιμές της χρονοσειράς $P \{p_t, p_{t-1}, p_{t-2}, \dots, p_{t-r}\}$. Στα μοντέλα ARMA, το δεύτερο μέρος του μοντέλου αποτελεί τον κινητό μέσο όρο της χρονοσειράς $e \{e_t, e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-q}\}$, η οποία προκύπτει από το σφάλμα των παλαιότερων προβλέψεων του μοντέλου και θεωρείται ανεξάρτητα πανομοιότυπα κατανομημένη με μηδενικό μέσο όρο και τυπική απόκλιση σ . Αντίθετα, στα μοντέλα ARX, το δεύτερο τμήμα αποτελεί τον γραμμικό συνδυασμό εξωγενών μεταβλητών εισόδου με την τιμή της χρονοσειράς P , που πρόκειται να προβλεφθεί. Τα παραπάνω μοντέλα περιγράφονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \hat{p}_{t+1/t} &= c + \sum_{i=0}^{r-1} \phi_i p_{t-i} + \sum_{j=0}^{m-1} \theta_j e_{t-j} && \text{ARMA} \\ \hat{p}_{t+1/t} &= c + \sum_{i=0}^{r-1} \phi_i p_{t-i} + \sum_{j=0}^{q-1} \eta_j d_{t-j} && \text{ARX} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Όπου $\hat{p}_{t+1/t}$ είναι η πρόβλεψη του μοντέλου για το επόμενο χρονικό βήμα που προκύπτει με βάση την υπάρχουσα γνώση της χρονικής στιγμής t . Τα $c, \phi_i, \theta_j, \eta_j$ είναι σταθερές, που υπολογίζονται με κάποιον επαναληπτικό αλγόριθμο εκπαίδευσης και αποτελούν τους συντελεστές του μοντέλου. Τα r, m, q καθορίζουν την τάξη του μοντέλου. Το r είναι ο αριθμός των παλαιότερων τιμών της χρονοσειράς που εφαρμόζεται στην αυτό-παλινδρομική διαδικασία, το m καθορίζει το πλήθος των σφαλμάτων που έχουν προηγηθεί και χρησιμοποιούνται στον κινητό μέσο όρο και το q είναι ο αριθμός των εξωγενών μεταβλητών.

Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη των αυτό-παλινδρομικών μοντέλων είναι να καθοριστούν οι τάξεις των συνιστωσών τους r, m, q . Αυτό γίνεται είτε τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος είτε με ανάλυση των διαγραμμάτων αυτό-συσχέτισης και μερικής αυτό-συσχέτισης [95]. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φάση αναγνώρισης του μοντέλου. Στη διαδικασία αυτή, για κάθε συνδυασμό των r και m ή r και q υπολογίζονται οι συντελεστές του μοντέλου. Αν και το μοντέλο είναι γραμμικό, οι συντελεστές του υπολογίζονται με κάποιον μη γραμμικό αμερόληπτο αλγόριθμο, λόγω της αυτό-παλινδρομικής φύσης της χρονοσειράς P .

3.3.2α Διάφορες μελέτες με αυτό-παλινδρομικά μοντέλα

Στην περίπτωση της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, οι Milligan και Schwartz δοκίμασαν διάφορα μοντέλα ARMA διαφορετικής τάξης στις χρονοσειρές της αιολικής παραγωγής των πάρκων του Lake Benton της Μινεσότα και του Storm Lake της Αϊόβα [98]. Απέδειξαν και στις δύο περιπτώσεις ότι το ARMA(1,24) έχει την καλύτερη απόδοση για χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών. Παράλληλα, αφού διαπίστωσε την εποχικότητα των χρονοσειρών της αιολικής ισχύος, εφαρμόζοντας διαφορετικές χρονικές περιόδους στο σύνολο εκπαίδευσης των μοντέλων, δοκίμασαν δυναμική εκπαίδευση των μοντέλων με διαφορετικά εύρη χρονικού πλαισίου (από μία μέχρι και μερικές εβδομάδες πίσω). Η κάθε περίπτωση της δυναμικής εκπαίδευσης απέδιδε χειρότερα, από τα μοντέλα που είχαν εκπαιδευτεί με συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Τέλος, η μελέτη τους έδειξε ότι η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος με δεκάλεπτο χρονικό βήμα είναι δυνατή για χρονικό ορίζοντα μισής ώρας, με καταλληλότερο μοντέλο το ARMA(0,36).

Ο Makaron ανέπτυξε ένα παρόμοιο μοντέλο ARMA για την πρόβλεψη της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, με δεκάλεπτο χρονικό βήμα για λογαριασμό του ανεξάρτητου διαχειριστή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Καλιφορνίας (California ISO) [99]. Ο χρονικός ορίζοντας των προβλέψεων που παρείχε, αντιστοιχούσε από τις επόμενες 2.5 ώρες από την τελευταία διαθέσιμη μέτρηση της αιολικής ισχύος, μέχρι τις επόμενες 3.5 ώρες. Επίσης, εφάρμοσε το μοντέλο έτσι, ώστε ή να δίνει δεκάλεπτες προβλέψεις ή να προβλέπει τη συνολική παραγωγή της αιολικής ενέργειας στο παραπάνω χρονικό διάστημα. Το μοντέλο ARMA που δημιούργησε, περιείχε μία επιπλέον συνιστώσα για την αντιστάθμιση της κλίσης του σφάλματος, χρησιμοποιώντας τα σφάλματα των προβλέψεων του τελευταίου μήνα. Ακόμη, στην είσοδο του μοντέλου δεν έθεσε αυτούσιες τις τιμές της ισχύος, αλλά τη διαφορά της πιο πρόσφατης μέτρησης με τις παλαιότερες τιμές της

αιολικής ισχύος. Τέλος, έθεσε ως 95% διάστημα εμπιστοσύνης της πρόβλεψης, το διπλάσιο της σχετικής απόκλισης των προηγούμενων προβλέψεων του μοντέλου (24-72 ώρες πριν).

Ο Duran στο [100] μελέτησε την αυτό-παλινδρομικότητα των ωριαίων χρονοσειρών της αιολικής παραγωγής τριών πάρκων της Ισπανίας, με βάση την περίοδο εκπαίδευσης, την τάξη του μοντέλου AR και τον ορίζοντα πρόβλεψης. Στην ουσία, εφάρμοσε μοντέλα σε τρεις περιπτώσεις πρόβλεψης των 6, 12 και 24 ωρών μπροστά. Απέδειξε ότι η τάξη του μοντέλου εξαρτάται από το αιολικό πάρκο και είναι ανεξάρτητη από τον χρονικό ορίζοντα. Επίσης, καλύτερη απόδοση εμφάνιζαν τα μοντέλα που χρησιμοποιούσαν τις προβλέψεις των προηγούμενων χρονικών βημάτων. Το διάστημα της περιόδου εκπαίδευσης έδειξε να έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση των μοντέλων. Η βέλτιστη χρονική περίοδος, κατά την οποία το μοντέλο μπορούσε να αποκτήσει την απαραίτητη γνώση, εκτιμήθηκε σε ένα με δύο χρόνια. Αφού εκτίμησε την τάξη του AR μοντέλου και την χρονική περίοδο εκπαίδευσης, πρόσθεσε τη συνιστώσα της εξωγενούς μεταβλητής, που στην περίπτωση αυτή είναι η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου. Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από το μοντέλο ECMWF. Η βελτίωση της απόδοσης του ARX μοντέλου ξεπέρασε το 60% σε ένα από τα τρία πάρκα.

3.3.2β Το μοντέλο WPPT

Το πιο ευρέως διαδεδομένο αυτό-παλινδρομικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, φαίνεται να είναι το WPPT (Wind Power Prediction Tool- εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος), που αναπτύχθηκε στον τομέα IMM (Informatics and Mathematical Modelling) του πολυτεχνείου DTU (Denmark Technical University) της Δανίας [101,102]. Το μοντέλο αυτό είναι παραλλαγή του τύπου ARX και χρησιμοποιεί ως εξωγενείς μεταβλητές τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τις μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου, όταν αυτές είναι διαθέσιμες. Ενδιαφέρον προκαλούν οι δύο μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου, αφού φαίνεται να καθιερώνονται ως μέθοδοι εκπαίδευσης των αυτό-παλινδρομικών μοντέλων τεχνολογίας αιχμής. Οι μέθοδοι εκτίμησης των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν στο WPPT, είναι η τοπικά σταθμισμένη παλινδρόμηση (off-line) και η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (on-line).

Στη πρώτη μέθοδο οι εξωγενείς μεταβλητές χωρίζονται σε δύο ομάδες x_s και u_s . Στη συνέχεια, αντικαθίστανται οι σταθεροί συντελεστές της εξίσωσης ARX από ομαλοποιημένες συναρτήσεις $\theta(u_s)$, που εξαρτώνται από τις εξωγενείς μεταβλητές u_s [103]. Τότε, το μοντέλο ARX παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$p_s = x_s^T \theta(u_s) + e_s \quad s=1, \dots, N \quad (3.3.2)$$

Όπου p_s είναι η προβλεπόμενη τιμή της αιολικής ισχύος, N ο αριθμός των παρατηρήσεων και e_s το ανεξάρτητα πανομοιότυπα κατανομημένο σφάλμα με κατανομή $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$. Ο υπολογισμός των συναρτήσεων θ γίνεται τοπικά σε επιλεγμένα σημεία u_p ($p=1..k$) των μεταβλητών u_s και για κάθε σημείο ξεχωριστά. Αν θ_p είναι μία από τις συναρτήσεις θ , που αντιστοιχεί σε ένα σημείο u_p , το οποίο περιέχει δύο μεταβλητές, δηλαδή $u_p=[u_{p1}, u_{p2}]$, τότε η θ_p μπορεί να γραφεί με τη μορφή πολυώνυμου $q(u_p)=[1 \ u_{p1} \ u_{p2} \ u_{p1}^2 \ u_{p1}u_{p2} \ u_{p2}^2]$, με συντελεστές $\hat{\phi}_p$. Το $\hat{\phi}_p$ είναι ένα διάνυσμα, με τις σταθερές παραμέτρους της συνάρτησης θ_p τοπικά εκτιμημένες στο u_p και για την παραπάνω περίπτωση περιέχει έξι στοιχεία. Αν θεωρηθεί ως $z_p = x_s q(u_p)^T$, τότε σταθμισμένη μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων για την εκτίμηση των συντελεστών $\hat{\phi}_p$ δίνει:

$$\hat{\phi}_p = (z_p^T \lambda_s w_{u_p, s} z_p)^{-1} z_p^T \lambda_s w_{u_p, s} p_s \quad (3.3.3)$$

Το λ_s , που ονομάζεται εκθετικός παράγοντας «λήθης», ελέγχει το βάρος w_s των παλαιότερων παρατηρήσεων, που λαμβάνονται υπόψη στην πρόβλεψη, δηλαδή είναι ο πίνακας $\lambda_s=[\lambda^{s-1}, \lambda^{s-2}, \dots, \lambda, 1]$, με το λ να έχει προκαθορισμένη τιμή μεταξύ του 0.95 και 0.999 [103]. Παράλληλα, το w_s είναι το γινόμενο των τιμών της συναρτήσεως στάθμης W_s , με

$$W_s = \begin{cases} 0 & u \in [1, \infty] \\ \left(1 - \left(\frac{|u_s - u_p|}{h(u_p)}\right)^3\right)^3 & u \in [0, 1] \end{cases} \quad (3.3.4)$$

για κάθε $s=1..N$. Το h έχει προκαθορισμένη τιμή για κάθε μεταβλητή που περιέχεται στο u_p και εξαρτάται από τον αριθμό των παρατηρήσεων. Ο παραπάνω αλγόριθμος προσαρμόζει το μοντέλο πρόβλεψης σε συνάρτηση με το χρόνο, γι' αυτό πρέπει να εξακριβωθεί η περίοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων του. Επιπλέον, αξιοσημείωτη είναι η μελέτη του Christiansen, που εφάρμοσε τους αλγόριθμους απότομης κλίσης και Gauss-Newton για την προσαρμοστική εκτίμηση των παραμέτρων λ και h αντίστοιχα.

Η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται κατά την on-line λειτουργία του μοντέλου [104]. Ο αλγόριθμος αυτός έχει στόχο να ελαχιστοποιήσει το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων του μοντέλου για κάθε $s=1..N$, η παλαιότητα των οποίων ελέγχεται από την σταθμισμένη συνάρτηση w_s και τον εκθετικό παράγοντα «λήθης» λ_s . Η εξίσωση του αναδρομικού αλγόριθμου έχει τη μορφή

$$\hat{\phi}_s(u_p) = \hat{\phi}_{s-1}(u_p) + w_{u_p,s} R_{u_p,s}^{-1} z_s [y_s - z_s^T \hat{\phi}_{s-1}(u_p)] \quad (3.3.5)$$

Ο πίνακας R ονομάζεται σταθμισμένη συνδιασπορά ή πίνακας κέρδους και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{u_p,s} = \lambda R_{u_p,s-1} + w_{u_p,s} z_s z_s^T \quad (3.3.6)$$

Η αρχική τιμή του θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε οι αρχικές εκτιμήσεις του μοντέλου να έχουν μεγάλη διασπορά.

Το WPPT υπάρχει σε δύο εκδόσεις, που περιγράφονται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \hat{p}_{t+k/t} &= a_1 p_t + a_2 p_{t-1} + b_1^m w_{t+k/t}^m + b_2^m (w_{t+k/t}^m)^2 \dots \\ &\dots + \sum_{i=1}^2 [c_i^c \cos \frac{2i\pi h_{t+k}^{24}}{24} + c_i^s \sin \frac{2i\pi h_{t+k}^{24}}{24}] + m + e_{t+k} \end{aligned} \right\} \text{WPPTv1} \quad (3.7)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{t+k}^{pc} &= f(w_{t+k/t}^m, d_{t+k/t}^m, k) + e_{t+k} \\ \hat{p}_{t+k/t} &= a(d_{t+k/t}^m, k) p_t + b(d_{t+k/t}^m, k) p_{t+k}^{pc} + \\ &+ c^c(d_{t+k/t}^m, k) \cos \frac{2\pi h_{t+k}^{24}}{24} + c^s(d_{t+k/t}^m, k) \sin \frac{2\pi h_{t+k}^{24}}{24} \end{aligned} \right\} \text{WPPTv2}$$

Όπου w και d είναι η προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αντίστοιχα και h η ώρα της ημέρας. Οι σταθερές a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1^c , c_2^s και m στην πρώτη εξίσωση είναι χρονικά μεταβαλλόμενες και αντίστοιχα στη δεύτερη εξίσωση τα a , b , c^c , c^s είναι οι ομαλά χρονικά μεταβαλλόμενοι συντελεστές-συναρτήσεις. Στο WPPTv1 οι παράμετροι υπολογίζονται με την αναδρομική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αντίθετα, η συνάρτηση f , όπως και οι συντελεστές στο WPPTv2, προσεγγίζεται και με τους δύο παραπάνω αλγόριθμους.

Η πρώτη έκδοση του μοντέλου δίνει προβλέψεις μέχρι και 39 ώρες μπροστά και τις αναβαθμίζει κάθε ώρα. Στη δεύτερη έκδοση, το μοντέλο καμπύλης ισχύος αναβαθμίζει τις προβλέψεις του, όταν γίνονται διαθέσιμες νέες αριθμητικές προβλέψεις καιρού, δηλαδή κάθε

έξι ώρες, ενώ το υπό συνθήκη παραμετρικό μοντέλο εκτελείται ανά ώρα. Τέλος, το τελικό μοντέλο δίνει προβλέψεις ανά ώρα.

3.3.2γ Το μοντέλο Sipreolico

Στο πανεπιστήμιο του Carlos III της Μαδρίτης, ο Sanchez [105] ανέπτυξε ένα σύνολο εννιά μοντέλων, τα δύο από τα οποία είναι παρόμοια με το WPPT. Το πρώτο από τα εννιά μοντέλα είναι τύπου ARMA και κάνει προβλέψεις με βάση τις τρεις πιο πρόσφατες τιμές της αιολικής ισχύος και την τιμή της ισχύος της προηγούμενης μέρας, που αντιστοιχεί στην ώρα της πρόβλεψης. Τα επόμενα τρία μοντέλα έχουν την ίδια παραμετροποίηση με το πρώτο, μόνο που προστίθεται η τιμή της προβλεπόμενης τιμής της ταχύτητας με τη μορφή χρονοσειράς (μοντέλο ARMAX). Δηλαδή, το ένα από τα τρία δέχεται ακριβώς την τιμή της ταχύτητας, το δεύτερο το άθροισμα της πρώτης και της δεύτερης δύναμης της τιμής αυτής και το τρίτο το άθροισμα των τριών πρώτων δυνάμεων της τιμής της ταχύτητας του ανέμου. Στα άλλα τρία μοντέλα απλώς προστίθενται ο παράγοντας της διεύθυνσης του ανέμου στα προηγούμενα τρία, με την μορφή σειράς Fourier. Τέλος, τα τελευταία δύο μοντέλα είναι τα υπό συνθήκη μη παραμετρικά ARX μοντέλα και οι συντελεστές-συναρτήσεις τους καθορίζονται με βάση την ταχύτητα του ανέμου και την ώρα της ημέρας που γίνεται η πρόβλεψη. Στο ένα από τα δύο τελευταία μοντέλα, η υπό συνθήκη παραμετροποίηση γίνεται ανεξάρτητα για τις δύο μεταβλητές, ενώ στο δεύτερο γίνεται συζευγμένα και ταυτόχρονα ανεξάρτητα για τον παράγοντα της ώρας. Η εκτίμηση των συναρτήσεων παλινδρόμησης εδώ γίνεται με έναν αναδρομικό αλγόριθμο, που είναι παραλλαγή της τοπικά σταθμισμένης παλινδρόμησης που περιγράφηκε παραπάνω.

Σε όλα τα μοντέλα γενικά, εφαρμόζεται η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων με χρήση του παράγοντα «λήθης». Παράλληλα, οι συντελεστές των μοντέλων προσεγγίζονται και με τη διαδικασία του φίλτρου Kalman. Το φίλτρο Kalman δεν είναι ευαίσθητο στις γρήγορες ή απότομες αλλαγές του συστήματος, έτσι οι παράμετροι των μοντέλων εξελίσσονται αργά. Αντίθετα, η αναδρομική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων έχει ανάλογη προσαρμοστικότητα με την τάση της εξέλιξης του συστήματος. Έτσι, με τον τρόπο αυτό, μετά την διαδικασία εκτέλεσης των μοντέλων, υπάρχουν 18 διαφορετικές προβλέψεις, που πρέπει να συνδυαστούν [106].

Σημαντική βελτίωση στην απόδοση των μοντέλων επιτεύχθηκε με την ενσωμάτωση ενός προσαρμοστικού αλγόριθμου, επιλογής του παράγοντα λήθης, στην αναδρομική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, που βασίζεται στην απόσταση Cook. Ο αλγόριθμος αυτός συνδυάζει τη μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου, που προκύπτει από την είσοδο μιας καινούριας παρατήρησης και την ιστορική απόδοση των μοντέλων με τη χ^2 κατανομή της πιθανότητας της μεταβολής των παραμέτρων.

Οι 18 προβλέψεις των εννιά μοντέλων, εκπαιδευμένων με δύο διαφορετικές μεθόδους, συνδυάζονται με τη μέθοδο του εκθετικά σταθμισμένου μέσου τετραγωνικού σφάλματος, χρησιμοποιώντας έναν παράγοντα «λήθης» στα σφάλματα των μοντέλων του τελευταίου 24ωρου. Η τελική πρόβλεψη προκύπτει από τα μοντέλα που απέδωσαν καλύτερα το τελευταίο 24ωρο, λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα «λήθης».

3.3.2δ Το μοντέλο της RAL

Η RAL (Rutherford Appleton Laboratory) δημιούργησε ένα μοντέλο, το οποίο δίνει προβλέψεις τόσο για οχτώ ώρες μπροστά με δεκαπεντάλεπτο βήμα, όσο και για 48 ώρες μπροστά με ωριαίο χρονικό βήμα. Η ταχύτητα του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού μετατρέπεται σε αιολική ισχύ με δύο τρόπους: είτε απευθείας με τη χρήση των καμπύλων ισχύος, όπως παρέχονται από τον κατασκευαστή, είτε με την καμπύλη ισχύος, που έχει εκτιμηθεί με τις χρονοσειρές της ισχύος και του ανέμου. Στη δεύτερη περίπτωση, μετά από κάθε πρόβλεψη, γίνεται προσαρμογή των παραμέτρων συσχέτισης της μετατροπής ταχύτητας ανέμου και αιολικής ισχύος. Τέλος, μία τρίτη πρόβλεψη προκύπτει με τη βοήθεια ενός αυτό-παλινδρομικού μοντέλου. Οι προβλέψεις συγχωνεύονται, με τη βοήθεια ενός φίλτρου, που βασίζεται στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων.

3.3.3 Μοντέλα πρόβλεψης τεχνητής νοημοσύνης

Σε πολλές δημοσιεύσεις έχει προσεγγιστεί το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Όπως και στην παρούσα διατριβή, οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης αποδείχθηκαν κατάλληλες να περιγράψουν τόσο την αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, όσο και τις σχέσεις μεταξύ των ατμοσφαιρικών διαδικασιών, που εξελίσσονται στην περιοχή του υπό μελέτη αιολικού πάρκου, μέσω των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με την παραγόμενη αιολική ισχύ.

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

3.3.3α Διάφορες μελέτες με νευρωνικά δίκτυα

Ο Methaprayoon εφάρμοσε έναν πολύ-επίπεδο αναγνωριστή για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής του αιολικού πάρκου στο Lawton City του Τέξας. Ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης έφτανε μέχρι τρεις μέρες με 10λεπτη χρονική ανάλυση [107].

Για τον σχεδιασμό του νευρωνικού δικτύου, στην αρχή πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των μετεωρολογικών προβλέψεων και της χρονοσειράς της ισχύος, με τη βοήθεια του συντελεστή συσχέτισης για την επιλογή των μεταβλητών εισόδου. Οι μεταβλητές εισόδου κανονικοποιήθηκαν έτσι, ώστε να βρίσκονται στο διάστημα [0,1] και να έχουν μηδενικό μέσο όρο και μοναδιαία τυπική απόκλιση. Με τον αντίστροφο τρόπο, η έξοδος του νευρωνικού δικτύου μετατρέπεται σε τιμές της αιολικής ισχύος. Το νευρωνικό δίκτυο που εφαρμόστηκε, αποτελείται από ένα κρυμμένο επίπεδο και το επίπεδο εξόδου. Ο αριθμός των νευρώνων του κρυμμένου επιπέδου καθορίστηκε με μία εμπειρική επαναληπτική μέθοδο, κατά την οποία η διαδικασία εκπαίδευσης πρέπει να εφαρμόζεται σε νευρωνικό δίκτυο, το μέγεθος του οποίου αυξάνεται κατά έναν νευρώνα τη φορά. Η μέθοδος σταματούσε, όταν η αύξηση του αριθμού των νευρώνων στο κρυμμένο επίπεδο είτε οδηγούσε σε μεγαλύτερο σφάλμα είτε δεν παρουσίαζε σημαντική βελτίωση στην απόδοση του νευρωνικού δικτύου. Η συνάρτηση μεταφοράς στους κόμβους του κρυμμένου επιπέδου που εφαρμόστηκε, ήταν η υπερβολική εφαπτομένη, η οποία έχει τη μορφή

$$\tanh(1.5h) = \left(\frac{e^{1.5h} - e^{-1.5h}}{e^{1.5h} + e^{-1.5h}} \right) \quad (3.3.8)$$

Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt, που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο των μοντέλων πρόβλεψης για την εκπαίδευση των ασαφών μοντέλων, εφαρμόστηκε για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Οι συγγραφείς, τέλος, ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο, βασισμένο σε υποθετικά τεστ για την εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης της πρόβλεψης, με σκοπό την εφαρμογή του μοντέλου πρόβλεψης από έναν TSO για τον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής.

Ο Li δημοσίευσε ένα μοντέλο, βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα, το οποίο έδινε προβλέψεις της αιολικής παραγωγής ξεχωριστά για κάθε ανεμογεννήτρια του υπό μελέτη πάρκου. Αφού μελέτησε τις χρονοσειρές της ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας, είδε ότι η παραγωγή τους διέφερε σημαντικά [108]. Έτσι, για κάθε ανεμογεννήτρια, ανέπτυξε έναν αναγνωριστή δύο επιπέδων. Τα νευρωνικά δίκτυα είχαν την ίδια δομή, δηλαδή το διάγραμμα

εισόδου τους περιείχε τέσσερις μεταβλητές. Στο κρυμμένο επίπεδό τους τοποθέτησε οχτώ νευρώνες. Για να διευκολύνει την εκμάθηση των νευρωνικών δικτύων και να βελτιώσει την ακρίβεια της πρόβλεψης, τροποποίησε τα δεδομένα με τη βοήθεια συναρτήσεων, με σκοπό να αυξήσει την επιρροή της ταχύτητας του ανέμου και να μειώσει την επίδραση της διεύθυνσης του ανέμου στην έξοδο των νευρωνικών δικτύων.

Επίσης, οι συναρτήσεις προεργασίας των δεδομένων εισόδου που επιλέχθηκαν με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες των συνιστωσών του ανέμου, όπως η ταχύτητα αποκοπής των Α/Γ ή το γεγονός ότι οι ισχυροί άνεμοι προέρχονται από συγκεκριμένες διευθύνσεις. Το μοντέλο αυτό σχεδιάστηκε περισσότερο για να μετατρέπει την ταχύτητα του ανέμου, όπως μετρείται στο ύψος της πλήμνης της Α/Γ ή κοντά σ' αυτήν, σε παραγόμενη αιολική παραγωγή, για τις περιπτώσεις που δεν είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις της αιολικής ισχύος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μοντελισμός καμπύλης ισχύος και εφαρμόζεται κυρίως στα μοντέλα φυσικής προσέγγισης.

Σε μία επόμενη εργασία του [109], ο Li ανέπτυξε ένα παρόμοιο μοντέλο για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για ένα χρονικό βήμα (επόμενο 10λεπτό, 1 ώρα μπροστά, 24 ώρες μπροστά), βασισμένο πάλι σε νευρωνικά δίκτυα. Αυτή τη φορά όμως, χρησιμοποίησε μία παραλλαγή των παραπάνω νευρωνικών δικτύων, τους αναδρομικούς πολυεπίπεδους αναγνωριστές. Η διαφορά τους με τους παραδοσιακούς πολυεπίπεδους αναγνωριστές, είναι ότι οι κόμβοι του κάθε επιπέδου συνδέονται με κόμβους του ίδιου επιπέδου, στο οποίο ανήκουν. Οι αναδρομικοί πολυεπίπεδοι αναγνωριστές μπορούν να περιγραφούν απλά από τις παρακάτω δύο εξισώσεις, που εκφράζουν την έξοδο $y_{k,j}$ τη χρονική στιγμή t του κόμβου j , ο οποίος ανήκει στο επίπεδο k .

$$a_{k,j}(t) = \sum_{i=1}^{p_k} w_{k,j,i} y_{k-1,i}(t) + \sum_{i=1}^{pr_k} wr_{k,j,i} y_{k,i}(t-1) \quad (3.3.9)$$

$$y_{k,j}(t) = f_k(a_{k,j}(t))$$

Όπου p_k και pr_k είναι ο αριθμός των συνδέσεων του κόμβου j με τους κόμβους των επιπέδων $k-1$ και k αντίστοιχα. Τα w και wr είναι τα βάρη των παραπάνω συνδέσεων και το f η συνάρτηση μεταφοράς του κόμβου που, αν βρίσκεται σε κρυμμένο επίπεδο, είναι σιγμοειδής, ενώ αν βρίσκεται στο επίπεδο εξόδου, είναι γραμμική. Η διαδικασία που ακολούθησε για να εκπαιδεύσει τους αναδρομικούς πολυεπίπεδους αναγνωριστές, βασιζόταν στον αλγόριθμο οπισθοδρομικού σφάλματος, όπου το χρονικό βήμα εκπαίδευσης αποτελούσε παράμετρο εκπαίδευσης. Σε κάθε εποχή εκπαίδευσης, ένα αποσυνδεδεμένο επεκταμένο φίλτρο Kalman είκοσι ρωών αναβάθμιζε τα βάρη των νευρώνων [110]. Το πρόβλημα που αντιμετώπιζον οι αναδρομικοί αναγνωριστές, είναι ότι βασίζονται περισσότερο στην πληροφορία, που περιέχεται στα πιο πρόσφατα δείγματα του συνόλου εκμάθησης. Στη δημοσίευση αυτή, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την επανάληψη της διαδικασίας εκπαίδευσης, με διαφορετικό σύνολο δεδομένων, κάθε φορά που αποτελούσε τυχαίο υποσύνολο του συνόλου εκμάθησης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημοσίευση του Μπαρμπούνη [111], ο οποίος εφάρμοσε τρία είδη αναδρομικών πολυεπίπεδων αναγνωριστών. Ο πολύ-επίπεδος αναγνωριστής πεπερασμένης πηγαίας απόκρισης, είναι ένα αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο, όπως περιγράφηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι τα βάρη των νευρώνων, τόσο των εμπρόσθιων όσο και των αναδρομικών, έχουν αντικατασταθεί με ένα αυτό-παλινδρομικό μοντέλο ARMA. Αντίστοιχα, στον πολύ-επίπεδο αναγνωριστή τοπικής ενεργοποίησης έχει αφαιρεθεί το άθροισμα του κινητού μέσου όρου από το παραπάνω νευρωνικό δίκτυο. Τέλος, το διαγώνιο αναδρομικό νευρωνικό δίκτυο είναι ένας αναδρομικός πολύ-επίπεδος αναγνωριστής, όπου ο κάθε κόμβος συνδέεται μόνο με τον εαυτό του και με κόμβους του προηγούμενου επιπέδου.

Τα τρία παραπάνω νευρωνικά δίκτυα εφαρμόστηκαν στο αιολικό πάρκο του Ρόκα στην Κρήτη, χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού του SKIRON και δίνοντας προβλέψεις μία φορά την ημέρα για 72 ώρες μπροστά. Η μελέτη έδειξε ότι ο πολυεπίπεδος αναγνωριστής πεπερασμένης πηγαίας απόκρισης αποδίδει καλύτερα για τα περισσότερα χρονικά βήματα πρόβλεψης.

3.3.3β Το μοντέλο WPMS

Ένα μοντέλο πρόβλεψης, βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα, είναι το WPMS (Σύστημα διαχείρισης αιολικής ισχύος- Wind Power Management System), που αναπτύχθηκε από τους Ernst και Rohrig για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Γερμανίας [112,113]. Λόγω της μεγάλης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος και της ευρύτατα διασπαρμένης παραγωγής της Γερμανίας, το μοντέλο αυτό δέχεται on-line μετρήσεις της αιολικής παραγωγής επιλεγμένων πάρκων, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μία ομάδα αιολικών πάρκων, που είναι εγκαταστημένα στην ίδια περιοχή. Γι' αυτό, περιέχει έναν αλγόριθμο για την εκτίμηση της στιγμιαίας συνολικής αιολικής παραγωγής της Γερμανίας της τρέχουσας ώρας, που έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Το νευρωνικό δίκτυο που εφαρμόστηκε, παρέχει την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος για τις επόμενες 72 ώρες, αποτελείται από τρία επίπεδα νευρώνων και εκπαιδεύτηκε με τον αλγόριθμο εκμάθησης της βαθμωτής καθόδου, που ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων της οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος. Το μοντέλο λαμβάνει στην είσοδό του τρεις τιμές της προβλεπόμενης ταχύτητας και τρεις τιμές της προβλεπόμενης διεύθυνσης του ανέμου, προερχόμενες από μοντέλο των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, που αντιστοιχούν στην ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη, στην προηγούμενη ώρα και στην επόμενη ώρα από αυτήν. Επίσης, στην είσοδο περιέχονται η ώρα της ημέρας και η ημερομηνία του έτους, με τη μορφή συνημίτονου και ημίτονου. Τέλος, στην είσοδο εφαρμόζονται παλαιότερες μετρήσεις της αιολικής ισχύος, καθώς και επιπλέον μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία.

3.3.3γ Το μοντέλο AWPPS

Για την ανάπτυξη μοντέλου αιολικής ισχύος, αναδρομικό πολυεπίπεδο αναγνωριστή υψηλής τάξης χρησιμοποίησε και ο Καρινιοτάκης [114]. Η διαφορά αυτού του αναγνωριστή με τους παραπάνω, είναι ότι οι κόμβοι ενός επιπέδου συνδέονται με τους κόμβους του ίδιου επιπέδου, μέσω του γινομένου τους. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης LEMNOS, τέθηκε σε on-line λειτουργία στο νησί της Λήμνου και έδινε προβλέψεις για τις επόμενες 12 ώρες, χρησιμοποιώντας τις χρονοσειρές των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος [115]. Σε μία επόμενη δημοσίευση του ίδιου, συγκρίνονται τα μοντέλα ARMA, νευρωνικά δίκτυα wavelet, πολυεπίπεδους αναγνωριστές, αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης και μοντέλα ασαφούς λογικής. Αυτή η μελέτη έδειξε ότι τα μοντέλα ασαφούς λογικής αποδίδουν καλύτερα. Η μελέτη αυτή έγινε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος CARE, που είχε σκοπό τη δημιουργία και ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και την εγκατάστασή τους στην Κρήτη και στη Μαδέρα της Ισπανίας [116].

Τα μοντέλα ασαφούς λογικής, που περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5, διακρίνονται κάθε μεταβλητή εισόδου σε ασαφή σύνολα και την περιγράφουν με συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια κανόνων του τύπου «If ... then ...», προκύπτει το αποτέλεσμα. Στο επίπεδο εξόδου του ασαφούς μοντέλου, ο Καρινιοτάκης πρόσθεσε ARX μοντέλα [117]. Για την εκπαίδευση των ασαφών μοντέλων εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος του οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος, με κριτήριο γενίκευσης τη μέθοδο της αντελικύρωσης (cross-validation criterion). Η τελική μορφή του μοντέλου εφαρμόστηκε σε πολλά τοπικά και εθνικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, με επιτυχία. Τέλος, στο μοντέλο που ονομάζεται πλέον AWPPS (Advanced Wind Power Prediction System), ενσωματώθηκε μία μονάδα εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης, σχεδιασμένη από τον Pinson, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS [118].

3.3.3δ Νεύρο-ασαφή μοντέλα πρόβλεψης

Μια εναλλακτική μέθοδος, παρόμοια με την παραπάνω, έχει αναπτύξει ο Jang και έχει εφαρμοστεί για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος από τους Cam και Potter. Το προσαρμοστικό μοντέλο ασαφούς απόκρισης (ANFIS) συνδυάζει την ασαφή λογική με τα νευρωνικά δίκτυα και εκπαιδεύεται με τον αλγόριθμο της απότομης κλίσης και τη μέθοδο των εκτιμητών ελαχίστων τετραγώνων. Το ANFIS μοντέλο είναι το ίδιο μοντέλο που

περιγράφεται στο κεφάλαιο 5, με τη διαφορά ότι στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος Levenberg-Marquardt.

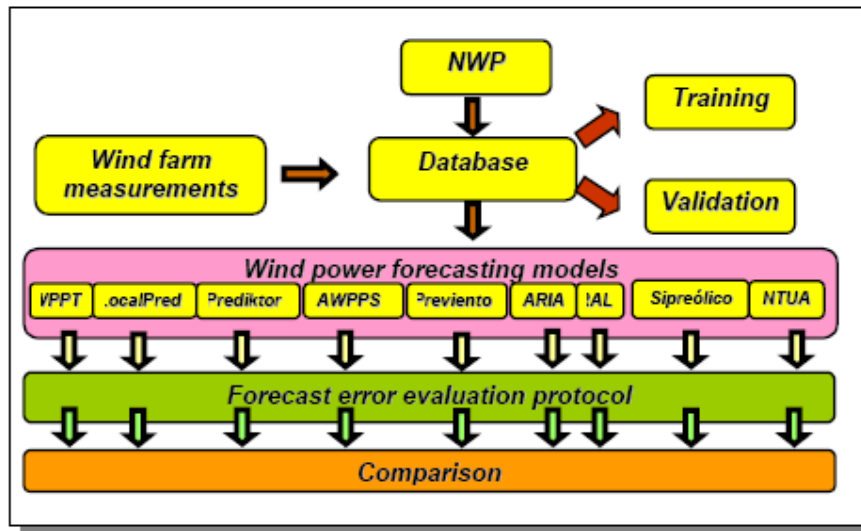
3.3.4 Το ερευνητικό πρόγραμμα ANEMOS

Η αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ευρώπη και η δυσκολία ενσωμάτωσης της, τόσο στα διασυνδεδεμένα όσο και στα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οδήγησε την Ευρωπαϊκή Ένωση στη σύσταση του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS (Development of A NEXt generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of Onshore and offShore) [119]. Στο πρόγραμμα ANEMOS, ερευνητές του τομέα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, μαζί με παραγωγούς αιολικής ισχύος και διαχειριστές δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, αντάλλαξαν τη γνώση και την εμπειρία τους, με σκοπό την ανάπτυξη ενός προχωρημένου εργαλείου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης αιολικής ενέργειας τέτοιο, ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες της αγοράς ενέργειας και να υποστηρίζει τη διαχείριση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τις απαιτήσεις των παραγωγών και διαχειριστών ενέργειας, διάφορα μοντέλα πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής εξελεγχθήκαν και ενσωματώθηκαν σε μία μονάδα, λειτουργώντας ταυτόχρονα. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν νέα μοντέλα, όπως αυτά που περιγράφονται στην παρούσα διατριβή, τα οποία επικυρώθηκαν με τα ήδη υπάρχοντα και ενσωματώθηκαν στη βασική πλατφόρμα του ANEMOS. Το ANEMOS έδωσε την ίδια βαρύτητα στην εξέλιξη των στατιστικών και των φυσικών μοντέλων, ενώ παράλληλα εξέτασε λεπτομερώς τον συνδυασμό και των δύο προσεγγίσεων, δίνοντας μία ενιαία πρόβλεψη μεγαλύτερης ακρίβειας.

Σε πρώτη φάση, τελικοί χρήστες, όπως εταιρείες ενέργειας, διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς και διανομής, ανεξάρτητοι παραγωγοί αιολικής ισχύος, ρυθμιστικές αρχές κ.λπ., απαντώντας σε κατάλληλα ερωτηματολόγια, καθόρισαν τις ανάγκες που σχετίζονται με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Έμφαση δόθηκε στην εμπειρία εκείνων των χρηστών, που ήδη εφαρμόζουν κάποιο εργαλείο πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Η πρωταρχική απαίτηση ήταν να δίνονται 48ωρες προβλέψεις, τουλάχιστον μία φορά την ημέρα, τόσο σε επίπεδο μεμονωμένου πάρκου όσο και σε επίπεδο ευρύτερης περιοχής ή κράτους.

Με βάση τις ανάγκες των τελικών χρηστών, επτά μοντέλα πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής βελτιώθηκαν, ενώ τα μοντέλα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (που παρουσιάζονται και στην παρούσα διατριβή) και το μοντέλο της ARIA (μοντέλο φυσικής προσέγγισης με παρόμοια δομή με το Predictor) αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια του προγράμματος. Τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν συνολικά είναι τα εξής:

- AWPPS (Armines Wind Power Prediction System)
- Predictor (RISOE)
- Zephyr/WPPT (RISOE/DTU)
- Previento (U. Oldenburg)
- LocalPred (CENER/CIEMAT)
- Sipreolico (UC3M/REE)
- NTUA model (E.M.Π.)
- ARIA model (ARIA co.)



Σχήμα 3.1 Δομή της δομής του εργαλείου πρόβλεψης αιολικής ισχύος ANEMOS

Τα παραπάνω μοντέλα, που περιγράφηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες, προσαρμόστηκαν για να εφαρμοστούν σε διάφορα αιολικά πάρκα της Ισπανίας, της Γερμανίας, της Γαλλίας, της Ελλάδας, της Δανίας και της Ιρλανδίας. Οι υπό μελέτη περιπτώσεις επιλέχθηκαν έτσι, ώστε να αντιστοιχούν σε αιολικά πάρκα με διάφορους τύπους εδάφους (επίπεδο, ημιπολύπλοκο, πολύπλοκο, έντονα πολύπλοκο έδαφος, θαλάσσια περιοχή) και υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Η αποτίμηση των μοντέλων επέτρεψε να αναγνωριστούν τα πλεονεκτήματά τους, οι περιορισμοί της κάθε προσέγγισης και οι περιοχές με δυνατότητα βελτίωσης.

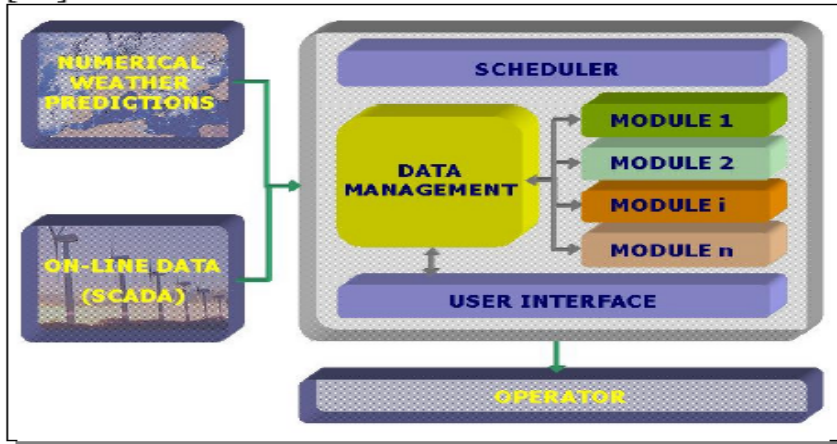
Στο ANEMOS, έμφαση δόθηκε στην παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών μεγάλων θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Αξιολογες μελέτες δημοσιεύτηκαν σχετικά με την εκτίμηση του κάθετου προφίλ του ανέμου σε θαλάσσια περιοχή και τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης των κυμάτων και του αέρα.

Εκτός από τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, στο ANEMOS αναπτύχθηκαν και μέθοδοι εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης και των διαστημάτων εμπιστοσύνης. Τα μοντέλα αυτά θα περιγραφούν στο επόμενο κεφάλαιο. Γενικά, αναγνωρίστηκε η ανάγκη να εστιασθεί η μελλοντική έρευνα στη μετατροπή των μοντέλων έτσι, ώστε να χρησιμοποιούν σύνολα αριθμητικών προβλέψεων καιρού και να παρέχουν πιθανοτικές προβλέψεις.

Τέλος, με βάση τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών, σχεδιάστηκε η πλατφόρμα του ANEMOS, με τη χρήση προχωρημένων διεπαφών επικοινωνίας, που μπορούν να αλληλεπιδρούν από απόσταση. Η πλατφόρμα, που ονομάστηκε ANEMOS.Shell, δέχεται μέσω του διαδικτύου αριθμητικές προβλέψεις καιρού από διάφορα μετεωρολογικά μοντέλα (HIRLAM, SKIRON, ALADIN) και online δεδομένα από το σύστημα SCADA του κάθε διαχειριστή δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αποθηκεύονται σε μία ενιαία βάση δεδομένων. Η πλατφόρμα επιστρέφει on-line στους τελικούς χρήστες τις προβλέψεις του κάθε μοντέλου ξεχωριστά, καθώς και την πρόβλεψη που προκύπτει από τον συνδυασμό όλων των προβλέψεων των μοντέλων. Παράλληλα, παρέχει την αβεβαιότητα της πρόβλεψης. Η δομή της πλατφόρμας του ANEMOS φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Η online εγκατάσταση του ANEMOS έγινε για τους τελικούς χρήστες, που διαχειρίζονται τα υπό μελέτη πάρκα: EDF, EHN, ELSAM, EWE, ESB, IDEA, καθώς και τη ΔΕΗ. Γενικά, έχει διαμορφωθεί σε ένα εμπορικό πακέτο και διατίθεται στην αγορά ενέργειας. Δύο νέα ερευνητικά προγράμματα, χρηματοδοτούμενα από την Ευρωπαϊκή Ένωση, έχουν ήδη ξεκινήσει, με σκοπό την ανάπτυξη εφαρμογών, που θα ενσωματωθούν στην πλατφόρμα του ANEMOS. Το ANEMOS.plus έχει σκοπό τη δημιουργία μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας τις προβλέψεις και την αβεβαιότητα τους, θα διαχειρίζονται το δίκτυο

ηλεκτρικής ενέργειας με τον βέλτιστο τρόπο. Συγκεκριμένα, πρόκειται να αναπτυχθούν μοντέλα για τη βελτίωση των προσφορών ενέργειας στους διαχειριστές μεταφοράς ενέργειας, για τον βέλτιστο προγραμματισμό των συμβατικών μονάδων και για τη μεγαλύτερη απορρόφηση της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, χρησιμοποιώντας μέσα αποθήκευσης. Από την άλλη, το ερευνητικό πρόγραμμα SAFEWIND αποσκοπεί στη δημιουργία μοντέλων πιθανοτικών προβλέψεων, με βαρύτητα στις ακραίες καιρικές συνθήκες, όπου παρουσιάζεται η μεγαλύτερη αιολική παραγωγή. Τα μοντέλα που θα αναπτυχθούν και στα δύο ερευνητικά προγράμματα, θα ενσωματωθούν στο ANEMOS.Shell.



Σχήμα 2 Η πλατφόρμα του ANEMOS

3.4 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε, ο τομέας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, αν και καινούριος στον χώρο της έρευνας, έχει αναπτυχθεί σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, εφαρμόζοντας ποικίλες μεθοδολογίες από τους τομείς της φυσικής, των μαθηματικών και της πληροφορικής. Οι τόσο διαφορετικές προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν το πρόβλημα, δείχνουν το μέγεθος της πολυπλοκότητάς του. Παρόλ' αυτά, οι προσπάθειες των ερευνητών σήμερα, επικεντρώνονται στην εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης και, κατ' επέκταση, στην ανάπτυξη μοντέλων, που θα παρέχουν δέσμες πιθανοτικών προβλέψεων, καθώς και στην πιο ακριβή πρόβλεψη στις ακραίες ατμοσφαιρικές καταστάσεις, απ' όπου προέρχεται η υψηλότερη αιολική παραγωγή (καταιγίδες, τυφώνες κ.λπ.). Από τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, που περιγράφηκαν σ' αυτό το κεφάλαιο, κάποια εφαρμόζονται ήδη από διαχειριστές δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιώντας με επιτυχία τα οφέλη της πρόβλεψης.

Το πρώτο μοντέλο, που εφαρμόστηκε σε πραγματικές συνθήκες στις εταιρείες συστήματος μεταφοράς ηλεκτρισμού της Δυτικής Δανίας, ήταν το Zephyr [120]. Το Zephyr είναι ο συνδυασμός του WPPT και του Predictor, δηλαδή ο συνδυασμός ενός στατιστικού και ενός φυσικού μοντέλου. Μέσω των ευρωπαϊκών προγραμμάτων CARE και MORE-CARE, εγκαταστάθηκαν τα μοντέλα AWPPS της ARMINES και το μοντέλο της RAL (χωρίς δημοσιεύσεις) στη διεύθυνση μεταφοράς της Δ.Ε.Η. της Κρήτης και στην αντίστοιχη της νήσου Μαδέρα [116]. Τα μοντέλα χρησιμοποιούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού του SKIRON και παρέχουν 48ωρες προβλέψεις. Το WPMS της ISET παρέχει προβλέψεις για το 95% της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος της Γερμανίας. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς στη Γερμανία, είναι ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα online δεδομένα για τη συνολική παραγωγή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της E.On., η συνολική παραγωγή των 5 GW προκύπτει από δεκαέξι αντιπροσωπευτικά πάρκα εγκατεστημένης ισχύος 425 MW [113].

Τα μοντέλα EWind και Predictor χρησιμοποιούνται ήδη στην Καλιφόρνια. Παρέχουν προβλέψεις σε δύο μεγάλα αιολικά πάρκα, το πάρκο στο Altamont Pass, με ονομαστική ισχύ 90 MW και το πάρκο San Gorgonio Pass, ισχύος 66.6 MW, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια

[121]. Τέλος, το Sireolico εφαρμόζεται για λογαριασμό του Red Electrica de Espana, διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς της Ισπανίας, δίνοντας προβλέψεις για το 80% του συνολικού αριθμού των Ισπανικών αιολικών πάρκων [105].

Η ικανότητα ενός μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος είναι δύσκολο να πιστοποιηθεί, εφόσον η απόδοση του εξαρτάται τόσο από το αιολικό πάρκο που εφαρμόζεται όσο και από την ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού [96]. Πολύ σημαντική ήταν η συνολική αποτίμηση των μοντέλων, που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο του προγράμματος ANEMOS, σε διάφορες υπό μελέτη περιπτώσεις. Η μελέτη έδειξε την ικανότητα του κάθε μοντέλου στις διάφορες περιπτώσεις πρόβλεψης. Γενικά, η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ενός μοντέλου κυμαίνεται μεταξύ 10% και 20%, για πάρκα που η πολυπλοκότητα του εδάφους δεν είναι πολύ έντονη για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης. Αντίθετα, όταν η πρόβλεψη αντιστοιχεί σε μια ευρύτερη περιοχή, που περιέχει περισσότερα από ένα πάρκα, τότε το σφάλμα περιορίζεται σε ποσοστό κάτω του 10%. Η πρόβλεψη της ισχύος σε μία ευρύτερη περιοχή γίνεται με κάποιον αλγόριθμο αναβάθμισης των προβλέψεων των μεμονωμένων πάρκων. Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης ενός μοντέλου πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, όπως και τα βασικά στοιχεία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης.

Κεφάλαιο 4

Η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

4.1 Εισαγωγή

Όταν γίνεται προσπάθεια να προβλεφτεί ένα μέγεθος, το αποτέλεσμα περιέχει πάντα ένα ποσοστό αβεβαιότητας και έναν βαθμό ασάφειας [28]. Όμως, ανάλογα με την εφαρμογή, η ευαισθησία στο μέγεθος των σφαλμάτων διαφέρει σημαντικά. Στο πλαίσιο της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, τα σφάλματα που περιέχονται συνεπάγονται οικονομικές απώλειες για τους τελικούς χρήστες και συνέπειες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας από τη διαχείριση των ενεργειακών ανισομερειών. Η εκτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας της πρόβλεψης, όχι μόνο για τον βαθμό εμπιστοσύνης, που πρόκειται να δοθεί από τον τελικό χρήστη, αλλά και για την απόκτηση μιας βαθύτερης γνώσης του χειρισμού της «καλής» και της «φτωχής» πρόβλεψης.

Αρχικά, είναι απαραίτητο να δοθεί η ερμηνεία της «καλής» και της «φτωχής» πρόβλεψης και να οριστεί τι είναι αυτό που καθιστά μια πρόβλεψη καλύτερη από μια άλλη. Γενικά, η αξιολόγηση των προβλέψεων εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο διαφωνίας ανάμεσα στους δημιουργούς των μοντέλων πρόβλεψης και στους χειριστές αυτών, αλλά και ανάμεσα στους ίδιους τους δημιουργούς. Ένα μοντέλο πρόβλεψης πρέπει να έχει τρία βασικά

χαρακτηριστικά: Πρώτον, οι προβλέψεις θα πρέπει να συμπίπτουν με τα αληθινά πιστεύω των δημιουργών των μοντέλων και να μην συγχέονται με το κριτήριο μεγίστης χρησιμότητας των χρηστών των μοντέλων. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό της συνέπειας (consistency). Δεύτερον, η ποιότητα (quality), που δηλώνει τη συμφωνία των προβλεπόμενων και των μετρούμενων τιμών. Τέλος, αυτό της αξίας (value) της πρόβλεψης, το οποίο συνδέεται άμεσα με την εφαρμογή της πρόβλεψης και απεικονίζει τις οικονομικές ή μη ωφέλειες που προκύπτουν από τη χρήση της πρόβλεψης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εκτίμηση των προβλέψεων της αιολικής ισχύος με προσεγγίσεις που προσανατολίζονται είτε στα μέτρα του σφάλματος είτε στις κατανομές τους. Στην ουσία, θα παρουσιαστεί ένα σετ κριτηρίων αξιολόγησης που έχει κατοχυρωθεί τόσο από τους δημιουργούς όσο και από τους τελικούς χρήστες ως πρωτόκολλο αποτίμησης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [122].

4.2 Το σφάλμα πρόβλεψης-ορισμός

Η απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης εξαρτάται από τον τρόπο σχεδιασμού και από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής που πρόκειται να εφαρμοστεί. Σήμερα, λόγω του κόστους των συστημάτων πρόβλεψης και της οικονομικής επιβάρυνσης που μπορεί να έχει η ακρίβεια τους, υπάρχει απαίτηση από τους τελικούς χρήστες να καθοριστεί μία πρότυπη μεθοδολογία που θα παρουσιάζει την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης με τρόπο που να γίνεται εμφανή τα πλεονεκτήματα της εξεταζόμενης προσέγγισης σε σύγκριση με τις μεθόδους τεχνολογίας αιχμής. Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS δημοσιεύτηκε ένα πρωτόκολλο αποτίμησης που αποτελείται από ένα σύνολο κριτηρίων και αναφορικών μεθόδων πρόβλεψης. Η επιλογή των κριτηρίων έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις των τελικών χρηστών που συμμετείχαν στο πρόγραμμα και με βάση της μέχρι τότε βιβλιογραφίας σχετικά με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Τα μοντέλα αναφοράς που προτάθηκαν περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ το πρότυπο πλαίσιο των κριτηρίων αποτίμησης παρουσιάζεται παρακάτω.

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

$$e_{t+k/t} = \hat{P}_{t+k/t} - P_{t+k/t} \quad (4.1)$$

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

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

$$e_{t+k/t} = \frac{1}{P_n} (\hat{P}_{t+k/t} - P_{t+k/t}) \quad (4.2)$$

Όπου P_n είναι η εγκατεστημένη ισχύς. Σε αντίθεση με άλλα προβλήματα πρόβλεψης όπως η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, η παρουσίαση του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ως το επί τοις εκατό ποσοστό της μετρούμενης τιμής καθίσταται αδύνατη αφού η παραγωγή ενός πάρκου μπορεί να ισούται με μηδέν. Παράλληλα εφαρμόζοντας το κανονικοποιημένο σφάλμα είναι δυνατόν να συγκριθεί η απόδοση ενός μοντέλου σε διαφορετικά πάρκα ανεξάρτητα από το μέγεθός τους. Από την πλευρά της αγοράς ενέργειας όπου σημασία έχει το ποσό της υπερεκτιμημένης ή υποεκτιμημένης ενέργειας, θεωρείται η πιο αντιπροσωπευτική παρουσίαση του σφάλματος.

4.3 Πρωτόκολλο αποτίμησης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

4.3.1 Μοντέλα αναφοράς

Η ακρίβεια των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος που έχουν αναπτυχθεί είναι το βασικό κριτήριο για την λειτουργικότητα τους σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με αιολική διείσδυση. Σαν κριτήριο αξιολόγησης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι απαραίτητο να επιλεγεί μία μέθοδος που να υπολογίζει την παραγωγή ενός αιολικού πάρκου με απλές θεωρήσεις χωρίς να εφαρμόζονται προχωρημένες επιστημονικές μέθοδοι έτσι ώστε η απόδοση της να είναι ανεξάρτητη από τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των προβλέψεων των αναπτυχθέντων μοντέλων.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος αναφοράς στους τομείς της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και της μετεωρολογίας είναι η μέθοδος της 'παραμένουσας τιμής'. Με την μέθοδο αυτή θεωρείται ότι η μελλοντική παραγωγή του πάρκου είναι σταθερή σε όλο τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης και ίση με την τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος. Η 'παραμένουσα τιμή' περιγράφεται μαθηματικά ως:

$$\widehat{P}_{t+k/t}^{pres} = P_t \quad (4.3)$$

Με την μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να αξιολογηθεί αν ένα μοντέλο πρόβλεψης αιολικής ισχύος μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια την μεταβλητότητα της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου. Παρά την απλότητα της είναι δύσκολο για ένα μοντέλο να αποδώσει καλύτερα στα πρώτα ωριαία βήματα πρόβλεψης (μέχρι 4-6 ώρες μπροστά). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι αλλαγές στην ατμόσφαιρα ιδιαίτερα στην Ευρώπη γίνονται αργά, αφού ένα βαρομετρικό σύστημα χρειάζεται τρεις με τέσσερις μέρες για να διασχίσει την ήπειρο. Έτσι οι απότομες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου σε ωριαία βάση είναι σπάνιες και συμβαίνουν σε κλίμακα ημερών. Παράλληλα, η αδράνεια της έλικας των Α/Γ είναι ένας ακόμα λόγος για την πολύ καλή απόδοση της 'παραμένουσας τιμής' στην πρόβλεψη της επόμενης ώρας.

Σε μερικές δημοσιεύσεις ερευνητών του τομέα πρόβλεψης αιολικής ισχύος έχει χρησιμοποιηθεί σαν μοντέλο αναφοράς μία πιο γενικευμένη εκδοχή της μεθόδου της παραμένουσας τιμής που μοιάζει με την μέθοδο του κινητού μέσου όρου των αυτό-παλινδρομικών μοντέλων. Στην περίπτωση αυτή, η πιο πρόσφατη μέθοδος της αιολικής ισχύος αντικαθίστανται με τον μέσο όρο των n πιο πρόσφατων μετρήσεων δηλαδή:

$$\widehat{P}_{t+k/t}^n = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n P_{t-i} \quad (4.4)$$

Ο Nielsen [123] μελέτησε τις δύο παραπάνω μεθόδους και όρισε σαν καλύτερη μέθοδο τον μέσο όρο όλων των διαθέσιμων δεδομένων μέχρι την χρονική στιγμή t. Στη συνέχεια με σκοπό να δημιουργήσει μία μέθοδο που να αποδίδει εξίσου καλά τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα συνδύασε τις παραπάνω δύο μεθόδους με το n να αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων της αιολικής ισχύος N με την παρακάτω σχέση:

$$\widehat{P}_{t+k/t}^{pn} = r_k P_t + (1-r_k) \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N P_{t-i} \quad (4.5)$$

Όπου r_k είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του p_t και p_{t+k}

Βέβαια η τελευταία βελτιωμένη έκδοση απαιτεί τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης που μπορεί να θεωρηθεί ότι χρησιμοποιεί μαθηματικές μεθόδους για την εκτίμηση της ισχύος και όχι μόνο απλές θεωρήσεις. Αυτός και είναι ο λόγος που δεν έχει εφαρμοστεί ποτέ σαν μοντέλο αναφοράς στο τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Γενικά σαν κριτήριο βαθμολόγησης επιδόσεων στα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος εφαρμόζεται η μέθοδος

της παραμένουσας τιμής και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται και για την πιστοποίηση των μοντέλων που αναπτύσσονται στην διατριβή αυτή.

4.3.2 Αποτίμηση βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος της πρόβλεψης

Το πρώτο μέτρο του σφάλματος ορίζεται ως η κλίση (bias) του σφάλματος που προκύπτει από όλη την χρονική περίοδο αποτίμησης και υπολογίζεται για κάθε χρονικό βήμα k της πρόβλεψης ως εξής:

$$bias(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} e_{t+k/t} \quad (4.6)$$

Όπου N_T είναι ο αριθμός των προβλέψεων που προέκυψαν. Η κλίση του σφάλματος είναι ο πρώτος παράγοντας για την εκτίμηση της απόδοσης ενός μοντέλου πρόβλεψης. Παρέχει πληροφορίες για το αν το μοντέλο έχει την τάση να υπερεκτιμάει ή υποεκτιμάει την παραγωγή της αιολικής ισχύος. Στη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η κλίση του σφάλματος διατηρείται κοντά στο μηδέν χάρη στις στατιστικές μεθόδους που εφαρμόζονται (ακόμα και οι φυσικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τεχνικές MOS για να απομακρύνουν το bias) και γι' αυτό είναι αδύνατον να πιστοποιηθεί μία προσέγγιση με κριτήριο αυτό. Υπολογίζοντας τη κλίση για διάφορα υποσύνολα στα οποία επικρατούν διαφορετικές καιρικές συνθήκες, μπορεί να βγάλει κανείς συμπεράσματα, για ποιες συνθήκες η μέθοδος π.χ. υπερεκτιμά την πρόβλεψη. Εκτός, όμως, από αυτή τη υπό συνθήκη προσέγγιση, η κλίση του σφάλματος δεν δίνει πληροφορίες για την ικανότητα του μοντέλου. Έτσι είναι απίθανο μια μέθοδος με μηδενική κλίση να δίνει τέλειες προβλέψεις. Στην περίπτωση που το bias προκύπτει μηδενικό, οι θετικές και αρνητικές τιμές του σφάλματος αλληλοαναιρούνται.

Το πιο διαδεδομένο μέτρο του σφάλματος που φανερώνει τη ποιοτική απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης, είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE-Mean Square Error), το οποίο ισούται με το μέσο όρο των αθροισμάτων όλων των τετραγωνικών σφαλμάτων.

$$MSE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \quad (4.7)$$

και παράλληλα η τετραγωνική ρίζα αυτού, δηλαδή (RMSE- Root Mean Square Error):

$$RMSE(k) = \left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

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

$$MAE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} |e_{t+k/t}| \quad (4.9)$$

Στατιστικά η τιμή του MAE σχετίζεται με τη ροπή πρώτης τάξης της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης και για το λόγο αυτό είναι μεγέθη που σχετίζονται άμεσα με την παραγόμενη ισχύ. Η τιμή του RMSE σχετίζεται με τη ροπή δεύτερης τάξης και έτσι με τη μεταβλητότητα του σφάλματος πρόβλεψης και γι' αυτό τα μεγάλα σφάλματα της πρόβλεψης έχουν την μεγαλύτερη επίδραση.

Τα παραπάνω μεγέθη σφάλματος μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας το σφάλμα $e_{t+k/t}$ ή το κανονικοποιημένο σφάλμα. Έτσι προκύπτουν τα κανονικοποιημένα μέτρα σφάλματος, το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα NMAE και η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα πρόβλεψης είναι μη στατικά. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του μη γραμμικού προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, υπάρχουν περίοδοι ή συγκεκριμένες συνθήκες για τις οποίες μπορεί να γίνει ευκολότερα η πρόβλεψη από άλλες. Π.χ. η προβλεψιμότητα του ανέμου στην Ευρώπη τους καλοκαιρινούς μήνες είναι μεγαλύτερη από αυτήν το υπόλοιπο έτος.

4.3.3 Σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης

Η αξιολόγηση και η πιστοποίηση ενός μοντέλου πρόβλεψης είναι απαραίτητη για να μπορεί να θεωρηθεί ικανό να λειτουργήσει σε πραγματικές συνθήκες, ιδίως όταν αναφέρεται στην αιολική παραγωγή ενός πάρκου. Είναι πολύ σημαντική η εκτίμηση διαφόρων κριτηρίων ώστε να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του σε κάθε περίπτωση πρόβλεψης. Το πρωτόκολλο που προτείνεται στο [122] περιλαμβάνει τα κριτήρια του μέσου απόλυτου σφάλματος, του μέσου σφάλματος (που γενικά αναφέρεται και ως κλίση του σφάλματος) και την ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος κανονικοποιημένα με την ονομαστική τιμή της αιολικής παραγωγής. Παράλληλα το πρωτόκολλο προτείνει μία πιο στιβαρή βαθμονόμηση της επίδοσης ενός μοντέλου, την εκτίμηση του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των προβλέψεων και των μετρήσεων της αιολικής ισχύος, την παρουσίαση ιστογραμμάτων της κατανομής του σφάλματος και τον υπολογισμό της βελτίωσης της απόδοσης ή ικανότητας σε σχέση με κάποιο μοντέλο αναφοράς. Η βελτίωση ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε αντιστοιχία με ένα μοντέλο αναφοράς δίνεται από την σχέση:

$$Imp_{EC}^k = 100 * \frac{EC_{pers}^k - EC_{model}^k}{EC_{pers}^k} \% \quad (4.10)$$

Όπου το k είναι το χρονικό βήμα της πρόβλεψης και το EC αναφέρεται στο κριτήριο αξιολόγησης MAE ή RMSE τόσο της παραμένουσας τιμής (persistence-επιλεγμένο μοντέλο αναφοράς) όσο και του μοντέλου (model).

4.3.4 Αποτίμηση βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης

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

- 1) Η κλίση $bias_k^e$ αντιστοιχεί στο κεντρική τιμή της κατανομής και δίνει πληροφορίες για το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Δίνεται από τη σχέση (4.6).
- 2) Η τυπική απόκλιση std_k^e αντανάκλα τη διασπορά της κατανομής και έτσι μας πληροφορεί για το βαθμό αβεβαιότητας της πρόβλεψης.

$$\sigma_k = \left[\frac{1}{N_T - 1} \sum_1^{N_T} (e_{t+k/t} - bias_k)^2 \right]^{1/2} \quad (4.11)$$

- 3) Η ασυμμετρία ή λοξότητα \hat{v}_k^e περιγράφει την έλλειψη συμμετρίας της κατανομής. Δίνει την τάση της πρόβλεψης να είναι υποεκτιμημένη ή υπερεκτιμημένη και μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

$$\hat{v}_k^e = \frac{N_T}{(N_T - 1)(N_T - 2)} \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{e_{t+k/t} - bias_k}{\hat{\sigma}_k^e} \right)^3 \quad (4.12)$$

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

$$\hat{K}_k^e = \frac{N_T(N_T + 1)}{(N_T - 1)(N_T - 2)(N_T - 3)} \sum_{i=1}^{N_T} \left(\frac{e_{i+k/i} - bias_k}{\hat{\sigma}_k^e} \right)^4 - \frac{3(N_T - 1)^2}{(N_T - 2)(N_T - 3)} \quad (4.13)$$

4.4 Μέθοδοι αξιολόγησης του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Οι τυπικές μετρήσεις του σφάλματος της πρόβλεψης, που όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης των μοντέλων/μεθόδων πρόβλεψης, βασίζονται σε ετήσιους μέσους όρους των δεδομένων και παρέχουν μόνο μία σταθερή τιμή για την κάθε στιγμή του ορίζοντα της πρόβλεψης. Το μέγεθος του σφάλματος, όμως, εξαρτάται και από τις προβλεπόμενες μετεωρολογικές συνθήκες. Απαιτείται επομένως, μια πιο αναλυτική αξιολόγηση του σφάλματος, όπου πρέπει να ταυτοποιηθούν οι κυριότεροι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις τυπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και το πώς αυτές συνδέονται με το αντίστοιχο σφάλμα πρόβλεψης.

4.4.1. Συσχέτιση του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με την προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου

Με την προϋπόθεση ότι το σφάλμα της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου δεν αλλάζει ιδιαίτερα στο εύρος κάποιων τυπικών προκαθορισμένων τιμών των ταχυτήτων, η ακρίβεια της πρόβλεψης ισχύος για μια συγκεκριμένη ταχύτητα, εκφρασμένη ως τυπική απόκλιση ανέμου μπορεί να περιγραφεί σχετικά καλά με μια απλή μέθοδο [57].

Για μικρές αποκλίσεις ανάμεσα στις μετρούμενες και τις προβλεπόμενες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, η τυπική απόκλιση σ_k με τη χρήση του τύπου του Taylor γίνεται:

$$\sigma(e_p) | u_{pred} = \left| \frac{dP}{du} \right|_{u_{pred}} \overline{\sigma(e_u)} \quad (4.14)$$

Η παραπάνω σχέση λαμβάνει υπόψη την παράγωγο $dP/du(u_{pred})$ της καμπύλης ισχύος και τη μέση τυπική απόκλιση $\overline{\sigma(e_u)}$ του σφάλματος της πρόβλεψης της ταχύτητας. Η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπ' όψιν του τις αποκλίσεις ανάμεσα στη θεωρητική και στην πραγματική καμπύλη ισχύος. Αυτού του είδους το σφάλμα, το οποίο μπορεί να έχει μεγάλη επιρροή στο σφάλμα της πρόβλεψης, μπορεί να απαλειφθεί χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα μετρούμενα δεδομένα για αυτές τις συστηματικές αποκλίσεις, ενώ η σχέση 4.14 γενικά μοντελοποιεί την επίπτωση της αύξησης του σφάλματος στην καμπύλη ισχύος.

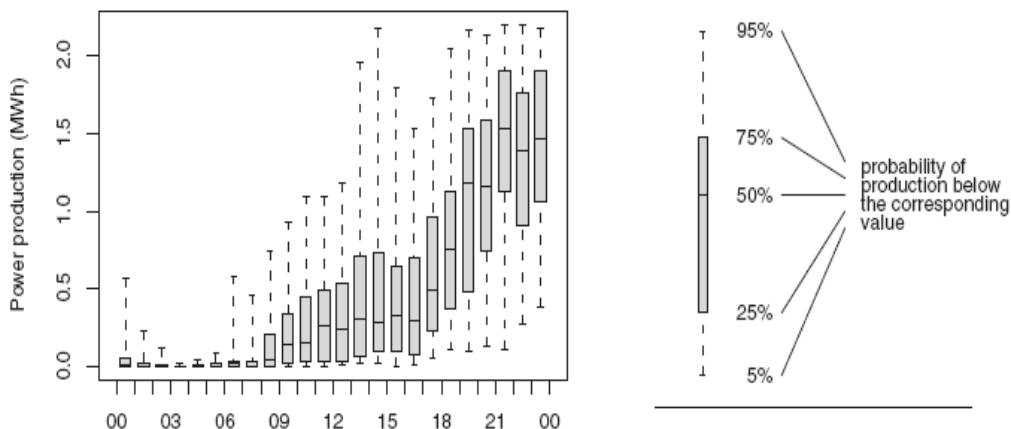
4.4.2 Συσχέτιση του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος με τις μετεωρολογικές συνθήκες

Σε αυτό το σημείο θα αναλύσουμε το σφάλμα της πρόβλεψης για συγκεκριμένες καιρικές καταστάσεις. Αυτό απαιτεί την ανάλυση των μετεωρολογικών συνθηκών με τη χρήση πολλών μεταβλητών και όχι μόνο της ταχύτητας του ανέμου. Αυτές οι μεταβλητές περιέχουν πληροφορίες για την ατμοσφαιρική κατάσταση και την εξέλιξη αυτής στη διάρκεια της ημέρας.

Η απόδοση των διάφορων μοντέλων αριθμητικών προβλέψεων καιρού δεν είναι το ίδιο καλή για κάθε μετεωρολογική κατάσταση, και η ακρίβεια αυτών των μοντέλων εξαρτάται κάθε φορά από τις συνθήκες τις οποίες καλούνται να προβλέψουν. Μέχρι τώρα έχουν δημιουργηθεί διάφορες προσεγγίσεις που περιέχουν πληροφορίες για τις αλλαγές της αξιοπιστίας των αριθμητικών προβλέψεων στις προβλέψεις της αιολικής ισχύος. Η πιο γνωστή από αυτές είναι η χρήση των «προβλέψεων συνόλου» (ensemble predictions) οι οποίες εκμεταλλεύονται τις χαοτικές ιδιότητες των μη γραμμικών εξισώσεων κίνησης των μετεωρολογικών μεταβλητών. Σε γενικές γραμμές η διαδικασία αυτών των προσεγγίσεων αρχίζει με την περιγραφή της καθημερινής καιρικής κατάστασης με τη χρήση συγκεκριμένων μετεωρολογικών μεταβλητών, συνεχίζει με την κατάταξή τους σε κατηγορίες, και αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία ένα τυπικό σφάλμα πρόβλεψης, το οποίο καθορίζεται από ιστορικά δεδομένα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατηγοριοποίηση αυτή είναι η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis-PCA) και η ανάλυση κατά συστάδες (Cluster Analysis) [57].

4.4.3 Μέθοδος παλινδρόμησης Εκατοστημορίων-Quantile Regression

Για ένα δεδομένο σύστημα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, η παραπάνω ανάλυση του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης εκατοστημορίων (quantiles) της αιολικής ισχύος [124]. Αναφερόμαστε, δηλαδή, στην «επέκταση» των μοντέλων πρόβλεψης σημείου της αιολικής ισχύος με δυνατότητα να παρέχουν πολλαπλά σημεία με καθορισμένη πιθανότητα εμφάνισης. Με τη μέθοδο παλινδρόμησης εκατοστημορίων (Quantile Regression) υπολογίζεται ένας πεπερασμένος αριθμός από εκατοστημόρια (quantiles) της πιθανοτικής κατανομής της παραγόμενης αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα. Το εκατοστημόριο q ορίζεται ως η τιμή της αιολικής ισχύος όπου η παραγωγή αιολικής ισχύος είναι μικρότερη από αυτή, με καθορισμένη πιθανότητα η οποία ισούται με q . Στο σχήμα 4.1 δίνεται ένα παράδειγμα τέτοιων προβλέψεων, όπου οι κατανομές χαρακτηρίζονται από εκατοστημόρια ίσα με 5%, 25%, 50%, 75% και 95%.



Σχήμα 4.1: Ένα παράδειγμα ωριαίας πιθανοτικής πρόβλεψης από την άποψη εκατοστημορίων 95,75,50,25 και 5 (από αριστερά, από πάνω προς τα κάτω) (Το σχήμα προέρχεται από το deliverable του ANEMOS ‘Uncertainty estimation’)

Αυτό ερμηνεύεται ως εξής, π.χ. υπάρχει 95% πιθανότητα για παραγωγή ισχύος μικρότερη από 0,55 MWh την πρώτη ώρα. Επίσης, ανά δύο τα εκατοστημόρια ορίζουν ένα διάστημα πρόβλεψης, π.χ. τα εκατοστημόρια 95 και 5 ορίζουν το διάστημα πρόβλεψης 90%, αντίστοιχα και τα 75 και 25 ορίζουν το 50%.

Το κυρίως πλεονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι το σχήμα των κατανομών δε χρειάζεται να έχει καθοριστεί εκ των προτέρων, ενώ πληροφορίες για αυτές τις κατανομές μπορούν να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο πρόβλεψης.

4.4.4 Εκτίμηση διαστημάτων εμπιστοσύνης της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη διαστημάτων που μπορεί να συναντήσει κανείς στη μελέτη της ακρίβειας των προβλέψεων σημείου: τα διαστήματα εμπιστοσύνης (confidence intervals) και τα διαστήματα πρόβλεψης (prediction intervals) [125]. Υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά

ανάμεσα σε αυτά τα δύο διαστήματα. Δεδομένου ενός πληθυσμού $\{p_t\}_{t=1,\dots,T}$, το διάστημα

εμπιστοσύνης αποδίδει την μέτρηση της εμπιστοσύνης της εκτίμησης $\hat{\theta}(\{p_t\}_{t=1,\dots,T})$ μιας παραμέτρου θ για το σύνολο του πληθυσμού, ενώ το διάστημα της πρόβλεψης δίνει μια συγκεκριμένη εμβέλεια τιμών στις οποίες θα ανήκει, με ένα δεδομένο βαθμό εμπιστοσύνης,

το επόμενο τυχαία επιλεγμένο «άτομο» $p_t(t > T)$ που ανήκει στον πληθυσμό.

Ο παραπάνω διαχωρισμός των διαστημάτων, μεταφράζεται στο πρόβλημα της πρόβλεψης ως εξής: έστω ένα στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης g το οποίο έχει σχεδιαστεί για πρόβλεψη με μοναδιαίο βήμα. Οι παράμετροι w του στατιστικού μοντέλου, εκτιμούνται στο σύνολο

εκμάθησης που αποτελείται από N_L ζεύγη $\{y_t, p_t\}_{t=1,\dots,N_L}$, όπου το y_t είναι το διάνυσμα που περιέχει τις παρελθοντικές τιμές της αιολικής ισχύος (μέχρι τη στιγμή $t-1$) και τις παρελθοντικές τιμές των προβλεπόμενων μεταβλητών, ενώ το p_t είναι η παρατήρηση της αιολικής ισχύος τη χρονική στιγμή t . Άρα

$$y_t = (p_{t-1}, p_{t-2}, \dots, p_{t-m}, x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-m}, \hat{x}_{t/t-1}) \quad (4.15)$$

Τα ζεύγη δεδομένων, δημιουργούνται σύμφωνα με τη διαδικασία:

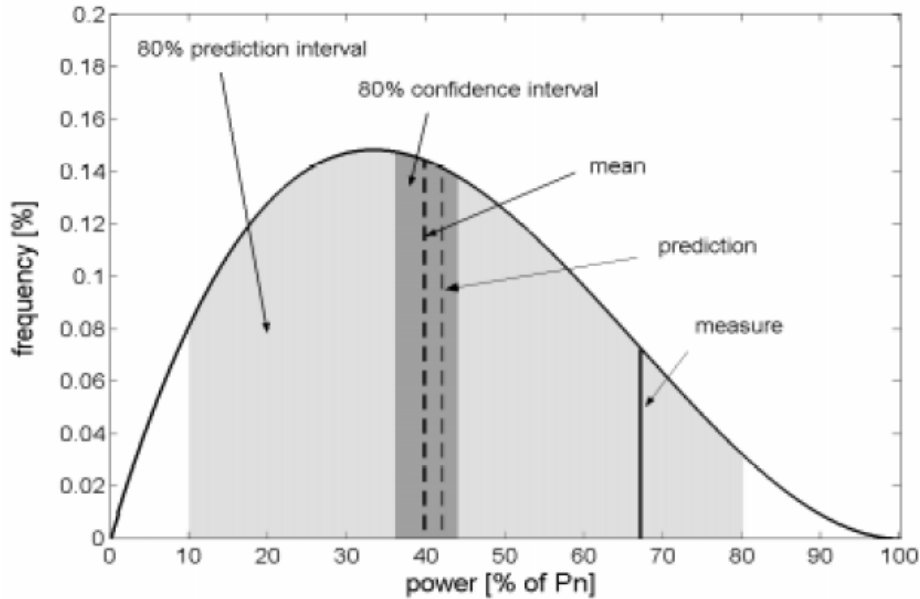
$$p_t = g(y_t, w) + e_t \quad (4.16)$$

Όπου w είναι οι παράμετροι του μοντέλου g και $\{e_t\}$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή. Για $t > N_L$ το εκπαιδευόμενο μοντέλο g παράγει τη χρονική τιμή t μία πρόβλεψη

$\hat{P}_{t+1/t}$ που αποτελεί μια εκτίμηση του μέσου $\bar{P}_{t+1/t}$ της προβλεπόμενης κατανομής F_{t+1}^P για τη χρονική στιγμή $t+1$, δεδομένου του y_{t+1} . Η αβεβαιότητα που υφίσταται εδώ, οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούμε ένα πεπερασμένο δείγμα για την εκπαίδευση του μοντέλου, το οποίο μπορεί να μην αντικατοπτρίζει την πραγματική συμπεριφορά της διαδικασίας και του τρόπου εκτίμησης των παραμέτρων w [127].

Εναλλακτικά, το διάστημα πρόβλεψης που αντιστοιχεί σε μια πρόβλεψη σημείου είναι ένα μέτρο της ακρίβειας αυτής της πρόβλεψης κι επίσης περιλαμβάνει αναγκαία το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα, με το οποίο μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαφορά ανάμεσα στα δύο διαστήματα. Η συνεχής καμπύλη αναπαριστά την κατανομή πιθανότητας της αναμενόμενης παραγωγής αιολικής

ισχύος. Οι δύο κάθετες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το μέσο της κατανομής $\bar{P}_{t+1/t}$ και την πρόβλεψη σημείου $\hat{P}_{t+1/t}$. Η σκούρα γκρι περιοχή είναι το διάστημα εμπιστοσύνης που αντιστοιχεί στο $\hat{P}_{t+1/t}$ και η ανοιχτή γκρι περιοχή είναι το διάστημα πρόβλεψης. Η συνεχής κάθετη γραμμή, δηλώνει την παρατηρούμενη τιμή ισχύος.



Σχήμα 4.2: Ενδεικτικό παράδειγμα των διαστημάτων πρόβλεψης και εμπιστοσύνης.

4.4.5 Προσεγγίσεις για την εκτίμηση των διαστημάτων πρόβλεψης

Στη συνέχεια θα περιγραφούν δύο προσεγγίσεις εκτίμησης των διαστημάτων πρόβλεψης, μία παραμετρική και μία μη-παραμετρική.

4.4.5α Βασική παραμετρική προσέγγιση

Η πιο απλή και γνωστή παραμετρική προσέγγιση για την εκτίμηση των διαστημάτων πρόβλεψης είναι η μέθοδος των Box και Jenkins, στην οποία πραγματοποιείται η υπόθεση ότι για το μοντέλο πρόβλεψης, η ακολουθία $\{e_t\}$ είναι ανεξάρτητη και ακολουθεί την κανονική κατανομή με μηδενικό μέσο όρο και διακύμανση $\sigma_e^2 < \infty$. Ο Koehler [128] πρότεινε τη διακύμανση της κατανομής ίση με την τυπική απόκλιση των σφαλμάτων της πρόβλεψης, σε k ώρες μπροστά δηλαδή:

$$\hat{\sigma}_{e,k}^2 = \sigma^2(k) \quad (4.17)$$

Η εκτίμηση των διαστημάτων πρόβλεψης με την μέθοδο των Box και Jenkins δείχνει ότι είναι συμμετρικά γύρω από το σημείο πρόβλεψης και για συγκεκριμένες χρήσεις της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά.

Επίσης, ο Lange παρατήρησε ότι τα διαστήματα εμπιστοσύνης, θα μπορούσαν να μοντελοποιηθούν με κατανομές Gauss, των οποίων η τυπική απόκλιση ισούται με την τυπική απόκλιση των κατανομών του μη-εξαρτώμενου σφάλματος [57]. Παράλληλα, πρότεινε ένα μοντέλο περιγραφής του τρόπου γραφικής αποτύπωσης από τα διαστήματα της ταχύτητας του ανέμου στα διαστήματα της αιολικής ισχύος, βασιζόμενο στην παραγωγή της καμπύλης ισχύος ενός αιολικού πάρκου. Ένα εμπόδιο που συναντά μια τέτοια προσέγγιση είναι η υπόθεση ότι τα σφάλματα της προβλεπόμενης ισχύος ακολουθούν την κατανομή Gauss. Επίσης, η μέθοδος του Lange δεν λαμβάνει υπόψη το ίδιο το σφάλμα της μεθόδου η οποία περιορίζεται μόνο για εφαρμογή σε φυσικές προσεγγίσεις αφού απαιτεί λεπτομερή

καμπύλη ισχύος. Τέλος, οι τυπικές αποκλίσεις των κατανομών του σφάλματος της ταχύτητας του ανέμου δεν είναι εύκολο να αποκτηθούν, αφού πολλές φορές οι προβλέψεις και οι μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες στο επίπεδο του αιολικού πάρκου.

4.4.5β Μη-παραμετρική προσέγγιση

Όταν δεν μπορούμε να κάνουμε να κάνουμε υποθέσεις για την κατανομή που ακολουθεί το σφάλμα της πρόβλεψης, γιατί αυτές οι υποθέσεις δεν είναι ισχυρές, μια εναλλακτική λύση είναι η δημιουργία ενός μη-παραμετρικού μοντέλου για την εκτίμηση των προβλεπόμενων κατανομών ή των διαστημάτων πρόβλεψης. Μια τέτοιου είδους προσέγγιση είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της αβεβαιότητας τόσο των φυσικών όσο και των στατιστικών μεθόδων πρόβλεψης. Κυρίως χρησιμοποιείται για μη-γραμμικές, όπως άλλωστε είναι και η διαδικασία της παραγωγής αιολικής ενέργειας.

Ήδη έχουμε αναφέρει μια μη-παραμετρική προσέγγιση, αυτή την παλινδρόμησης εκατοστημορίων (Quantile Regression). Όπως αναφέρθηκε, όμως, και παραπάνω, στη μέθοδο της παλινδρόμησης εκατοστημορίων, η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από εκατοστημόρια της προβλεπόμενης κατανομής, τα οποία θέλουμε να εκτιμήσουμε. Η προσέγγιση που θα αναπτύξουμε στη συνέχεια, μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύκολη εκτίμηση πολλαπλών διαστημάτων πρόβλεψης (ή και πολλών εκατοστημορίων), με μία μόλις επανάληψη της μεθόδου. Δηλαδή, η προβλεπόμενη κατανομή κατασκευάζεται με μία μόλις εφαρμογή της μεθόδου. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται εμπειρική (empirical method).

Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε τη μεθοδολογία στη οποία βασίζεται η εμπειρική προσέγγιση, θα περιγράψουμε την ταξινόμηση των συνθηκών της πρόβλεψης που συσχετίζονται με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των κατανομών του σφάλματος πρόβλεψης και θα αναφερθούμε στις εξαρτώμενες κατανομές των σφαλμάτων της πρόβλεψης σαν συνάρτηση των συνθηκών πρόβλεψης, μέσω ενός μοντέλου ασαφούς λογικής.

Γενικά, εμπειρικές χαρακτηρίζονται οι μέθοδοι που βασίζονται στη γνώση ή στην εμπειρία. Η εμπειρική φύση της μεθόδου εκτίμησης των διαστημάτων πρόβλεψης στηρίζεται στο γεγονός ότι τα διαστήματα πρόβλεψης παράγονται από την παρατηρούμενη συμπεριφορά των μοντέλων πρόβλεψης σημείου που εφαρμόζονται. Η συμπεριφορά της προσέγγισης πρόβλεψης σημείου χαρακτηρίζεται από την πρόσφατη λειτουργία της. Πραγματοποιείται, επομένως, η υπόθεση, ότι τα μελλοντικά σφάλματα πρόβλεψης θα κατανέμονται με τον ίδιο τρόπο όπως τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα σφάλματα.

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό των διαστημάτων πρόβλεψης είναι η συλλογή των σφαλμάτων πρόβλεψης που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν από το μοντέλο πρόβλεψης. Τα διαστήματα που επρόκειτο να υπολογιστούν στηρίζονται στις πιο πρόσφατες πληροφορίες. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιείται ένα «παράθυρο» (χρονικό διάστημα που περιέχει συγκεκριμένο αριθμό ωρών) το οποίο μπορούμε να φανταστούμε να ολισθαίνει και να αποθηκεύονται σε αυτό, οι τιμές των σφαλμάτων. Το μέγεθος n αυτού του «παραθύρου» αντιστοιχεί στον αριθμό των δειγμάτων των σφαλμάτων. Για τη χρονική στιγμή t ορίζουμε

ένα ξεχωριστό δείγμα $S_{t,k}$ για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης k , καθώς η αβεβαιότητα της πρόβλεψης μεταβάλλεται για διαφορετικούς ορίζοντες. Για μια δεδομένη χρονική στιγμή, τα σφάλματα που συλλέγουμε, είναι πάντα τα πιο πρόσφατα.

Όταν είναι γνωστή η πραγματική μέτρηση της αιολικής ισχύος, η τιμή της συγκρίνεται με όλες τις παρελθοντικές προβλέψεις που πραγματοποιήθηκαν για αυτή τη χρονική στιγμή. Η χρήση των πιο πρόσφατων πληροφοριών για μια συγκεκριμένη μέθοδο για την εκτίμηση της μελλοντικής αβεβαιότητας, έχει ως κίνητρο τη μη-σταθερή φύση των σφαλμάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε το σύνολο των σφαλμάτων πρόβλεψης που αντιστοιχούν σε προβλέψεις σημείου με βήμα k μέχρι τη χρονική στιγμή t , ως:

$$\Omega_{t,k} = \{e_{t-i+k/t-i}, i \in \mathbf{N}, i \geq k\} \quad (4.18)$$

Στην πρόβλεψη μη γραμμικών διαδικασιών, το σχήμα της κατανομής των σφαλμάτων πρόβλεψης διαμορφώνεται σαν συνάρτηση των τιμών των μεταβλητών που έχουν ληφθεί υπόψη στην πρόβλεψη. Στην περίπτωση της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, μπορούν να υπάρχουν κι άλλες μεταβλητές που έχουν επίπτωση στα χαρακτηριστικά των κατανομών των σφαλμάτων πρόβλεψης. Αυτές τις μεταβλητές θα τις ονομάσουμε ισχυρές μεταβλητές (influential variables). Προφανώς σε αυτές περιλαμβάνεται η προβλεπόμενη ισχύς, αλλά επίσης μπορεί να περιλαμβάνονται η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, αλλά και άλλες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη ισχύος και επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης.

Έστω ότι εφαρμόζεται η εμπειρική προσέγγιση, η εκτίμηση των διαστημάτων πρόβλεψης δεν λαμβάνει υπόψη το βαθμό επιρροής των ισχυρών μεταβλητών, δηλαδή χειρίζεται τα διαστήματα πρόβλεψης σαν μη-εξαρτώμενα. Απαιτείται επομένως μια πιο δυναμική προσέγγιση, που θα είναι κατάλληλη για την εκτίμηση εξαρτημένων διαστημάτων πρόβλεψης. Η ταξινόμηση των συνθηκών πρόβλεψης, βελτιώνει τα αποτελέσματα της εμπειρικής προσέγγισης.

Αρχικά, πρέπει να αναφέρουμε ότι η συνθήκη πρόβλεψης τη χρονική στιγμή t ορίζεται από την από τη σχέση που συνδέει τις τιμές της κάθε μιας από τις L ισχυρές μεταβλητές:

$$c_{t,k} = \{v_{t,k}^1, v_{t,k}^2, \dots, v_{t,k}^L\}, \quad c_{t,k} \in C = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_L \quad (4.19)$$

όπου C είναι το σύνολο των πιθανών συνθηκών πρόβλεψης για κάθε χρονική στιγμή t και πρόβλεψη για k ώρες μπροστά.

Θα κατανοήσουμε πως λειτουργεί η ταξινόμηση των συνθηκών πρόβλεψης μέσα από ένα παράδειγμα. Έστω ότι υπάρχουν δύο ισχυρές μεταβλητές, π.χ. οι προβλέψεις της αιολικής ισχύος και της διεύθυνσης του ανέμου, για τις οποίες το σύνολο των πιθανών συνθηκών πρόβλεψης χωρίζεται σε δύο υποσύνολα, τα $C((1,1),(2,2))$, τα οποία αντιστοιχούν στο υποσύνολο των συνθηκών πρόβλεψης για τα οποία η προβλεπόμενη αιολική ισχύς θα βρίσκεται στο πρώτο υποσύνολο και η προβλεπόμενη διεύθυνση του ανέμου στο δεύτερο. Το C ανακατασκευάζεται από την ένωση όλων των υποσυνόλων του. Σκοπός είναι να συνδέσουμε τα χαρακτηριστικά των κατανομών των σφαλμάτων πρόβλεψης με κάθε ένα υποσύνολο. Θέλοντας να βελτιώσουμε την εμπειρική προσέγγιση, θα λάβουμε τα πρόσφατα σφάλματα της πρόβλεψης και θα τα αντιστοιχίσουμε σε κάθε ένα από αυτά τα υποσύνολα.

Πλέον ορίζουμε το $\Omega_{t,k}$ (σχέση 5.5.4) ως $\Omega_{t,k}(\{(l, j_l)\})$ το υποσύνολο των παρελθοντικών σφαλμάτων πρόβλεψης που αντιστοιχούν στο υποσύνολο των συνθηκών πρόβλεψης $C(\{(l, j_l)\})$.

$$\Omega_{t,k}(\{(l, j_l)\}) = \{e_{t-i+k/t-i}, \in \Omega_{t,k} \mid c_{t-i,k} \in C(\{(l, j_l)\}), \forall j_l\} \quad (4.20)$$

Τώρα, μπορούμε να αποσπάσουμε, όπως και στην εμπειρική προσέγγιση, από κάθε υποσύνολο $\Omega_{t,k}(\{(l, j_l)\})$ ένα δείγμα $S_{t,k}(\{(l, j_l)\})$, μεγέθους n για τα n πρόσφατα σφάλματα πρόβλεψης, αλλά από όμοιες συνθήκες πρόβλεψης.

4.4.6 Μοντέλο ασαφούς λογικής για την παραγωγή συναρτήσεων εξαρτώμενων κατανομών

Η ασαφής λογική είναι ένα εναλλακτικό παράδειγμα της δυαδικής λογικής όπου κάθε γεγονός μπορεί να χαρακτηριστεί ως είτε σωστή είτε λάθος (και επομένως 1 ή 0). Αντίθετα, θεωρεί ότι μπορεί να χαρακτηριστεί με ένα βαθμό αλήθειας, που αποτελεί μια συνεχή συνάρτηση μεταξύ του 0 και του 1.

Προηγουμένως αναφέραμε ότι το σύνολο C των πιθανών συνθηκών πρόβλεψης διαιρείται σε υποσύνολα $C(\{(l, j_l)\})$ που συσχετίζονται με τα διαφορετικά χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, εξηγήσαμε ότι ένα δεδομένο υποσύνολο $C(\{(l, j_l)\})$ ορίζεται ως η σχέση των υποσυνόλων $V_l^{j_l} (l=1, \dots, L)$ για τις διάφορες μεταβλητές εισόδου.

Σε κάθε ένα από τα V-υποσύνολα, μπορούμε να συσχετίσουμε ένα ασαφές σύνολο $A_l^{j_l}$. Ένα ασαφές σύνολο χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση μέλους που μας δείχνει το βαθμό

αληθείας μιας μεταβλητής ώστε να αποτελεί αυτή στοιχείο του $V_l^{j_l}$.

Ας γυρίσουμε πίσω στο παράδειγμα που δώσαμε λίγο παραπάνω, όπου θεωρήσαμε δύο ισχυρές μεταβλητές, τις προβλέψεις της αιολικής ισχύος και της διεύθυνσης του ανέμου. Και για τις δύο μεταβλητές τα σύνολα των πιθανών τιμών, χωρίστηκαν σε δύο υποσύνολα. Συνεπώς προκύπτουν τέσσερα υποσύνολα σφαλμάτων πρόβλεψης

$$S_{t,k}((1,1), (2,1)), S_{t,k}((1,1), (2,2)), S_{t,k}((1,2), (2,1)), S_{t,k}((1,2), (2,2))$$

που αντιστοιχίζονται σε διαφορετικά υποσύνολα των συνθηκών πρόβλεψης

$$C((1,1), (2,1)), C((1,1), (2,2)), C((1,2), (2,1)), C((1,2), (2,2))$$

για μια δεδομένη χρονική στιγμή t και βήμα πρόβλεψης k. Επιπλέον, το μοντέλο ασαφούς λογικής θα έχει μια βάση-κανόνα που αποτελείται από τέσσερις κανόνες, έναν για κάθε C-υποσύνολο. Στη συνέχεια, ας υποθέσουμε ότι για μια δεδομένη χρονική στιγμή t και βήμα

πρόβλεψης k, οι βαθμοί αληθείας της παρούσας συνθήκης πρόβλεψης $C_{t,k}$, που είναι μέρος του C-υποσυνόλου, εκτιμούνται να είναι αντίστοιχα 0,3, 0,5, 0,15, 0,05. Τότε, το μοντέλο

ασαφούς λογικής, ορίζει την αντίστοιχη κατανομή των σφαλμάτων $F_{t,k}^e$ ως εξής:

$$F_{t,k}^e = 0,3F_{t,k}^e((1,1), (2,1)) + 0,5F_{t,k}^e((1,1), (2,2)) + 0,15F_{t,k}^e((1,2), (2,1)) + 0,05F_{t,k}^e((1,2), (2,2))$$

4.5 Μέθοδοι για την αξιολόγηση των διαστημάτων πρόβλεψης

Οι μέθοδοι που ακολουθούν επικεντρώνονται στην αξιολόγηση των διαστημάτων πρόβλεψης ή των εκατοστημορίων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Η διαδικασία που ακολουθείται για την αξιολόγηση, αρχίζει με την εκτίμηση της «αξιοπιστίας», συνεχίζει με τη μελέτη της «αιχμηρότητας» και της «ανάλυσης».

4.5.1 Μεταβλητή ένδειξης

Προτού φτάσουμε στην αξιολόγηση των διαστημάτων πρόβλεψης, πρέπει να αναφερθούμε στη μεταβλητή ένδειξης (indicator variable), η οποία ορίζεται για μια πρόβλεψη που πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή t και για ορίζοντα k ως εξής:

$$I_{t,k}^{(a)} = \begin{cases} 1, & \text{εάν } p_{t+k} \in \hat{I}_{t+k/t}^{(a)} \\ 0, & \text{εάν } p_{t+k} \notin \hat{I}_{t+k/t}^{(a)} \end{cases} \quad (4.21)$$

Αυτή η μεταβλητή ένδειξης μας λέει αν η πραγματική έξοδος P_{t+k} τη χρονική στιγμή $t+k$ βρίσκεται (επιτυχία) ή όχι (αποτυχία) μέσα στο διάστημα πρόβλεψης που έχει εκτιμηθεί. Η μεταβλητή ένδειξης μπορεί να εφαρμοστεί και όταν πρόκειται για τα εκατοστημόρια μιας πιθανοτικής πρόβλεψης. Πράγματι, το αν βρίσκεται ή όχι μέσα στο διάστημα η τιμή P_{t+k} , αντικαθίσταται από το αν η P_{t+k} βρίσκεται κάτω ή πάνω από το εκτιμώμενο εκατοστημόριο $\hat{P}_{t+k}^{(a)}$.

Επιπλέον, μπορούμε να ορίσουμε ως $n_{k,1}^{(a)}$ το άθροισμα των «επιτυχιών» και $n_{k,0}^{(a)}$ το άθροισμα των αποτυχιών (για δεδομένο ορίζοντα k) για N_T υλοποιήσεις:

$$n_{k,1}^{(a)} = \# \{ I_{t,k}^{(a)} = 1 \} = \sum_{t=1}^{N_T} I_{t,k}^{(a)}, \quad (4.22)$$

$$n_{k,0}^{(a)} = \# \{ I_{t,k}^{(a)} = 0 \} = N_T - n_{k,1}^{(a)} \quad (4.23)$$

Η μελέτη της σειράς μεταβλητής ένδειξης $I_{t,k}^{(a)}, t = 1, \dots, N_T$ στο σύνολο εκτίμησης δεδομένων, θα μας δώσει πληροφορίες για την αξιοπιστία και τη συνολική ικανότητα του διαστήματος πρόβλεψης.

4.5.2 Αξιοπιστία

Ο ευκολότερος τρόπος για να ελεγχθεί η αξιοπιστία των διαστημάτων πρόβλεψης είναι η σύγκριση της εμπειρικής κάλυψης με την ονομαστική (π.χ. ίση με την απαιτούμενη πιθανότητα $(1-\alpha)$). Μία εκτίμηση $\hat{a}_k^{(a)}$ της πραγματικής κάλυψης $a_k^{(a)}$, για δεδομένο ορίζοντα k , λαμβάνεται από τον υπολογισμό του μέσου της χρονοσειράς $I_{t,k}^{(a)}, t = 1, \dots, N_T$ του συνόλου εκτίμησης:

$$\hat{a}_k^{(a)} = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} I_{t,k}^{(a)} = \frac{n_{k,1}^{(a)}}{n_{k,0}^{(a)} + n_{k,1}^{(a)}} \quad (4.24)$$

Αυτό το τυπικό μέτρο για την εκτίμηση της αξιοπιστίας των διαστημάτων πρόβλεψης, προτάθηκε από τους Ballie και McNees. Σε αυτή την ιδέα βασίζονται και τα διαγράμματα αξιοπιστίας τα οποία αποδίδουν την εμπειρική κάλυψη προς την ονομαστική κάλυψη, για διάφορες τιμές της δεύτερης. Εναλλακτικά, μπορεί να απεικονιστεί ως η απόκλιση από την περίπτωση της «τέλειας αξιοπιστίας», για την οποία η εμπειρική κάλυψη θα ήταν μοναδιαία. Τα διαγράμματα αξιοπιστίας μας επιτρέπουν να συνοψίσουμε την εκτίμηση της βαθμονόμησης των διάφορων διαστημάτων ή εκατοστημορίων, κι έτσι πολύ εύκολα να

μπορούμε να διακρίνουμε αν μια μέθοδος τείνει να υποεκτιμά ή να υπερεκτιμά την αβεβαιότητα.

4.5.3. Αιχμηρότητα και ανάλυση

Όταν ασχολούμαστε με την αιχμηρότητα και την ανάλυση, εστιάζομαστε στο μέγεθος των διαστημάτων πρόβλεψης, ή γενικότερα στο σχήμα των προβλεπόμενων κατανομών. Στη μετεωρολογία, η αιχμηρότητα μιας πιθανοτικής πρόβλεψης αναλογεί στην ικανότητα αυτών των προβλέψεων να αποκλίνουν από τις μέσες κλιματολογικές πιθανότητες, ενώ η ανάλυση αναλογεί στην ικανότητα να παρέχονται διαφορετικές εξαρτώμενες κατανομές πιθανότητας $q(P | \hat{P})$, εξαρτώμενες από το επίπεδο του αντικειμένου πρόβλεψης. Για τα πιθανοτικά μοντέλα με τέλεια αξιοπιστία, οι δύο αυτές έννοιες είναι ισοδύναμες.

Δεδομένου ότι η αξιολόγηση της αξιοπιστίας προηγείται, εκτιμούμε στη συνέχεια το σχήμα των πιθανοτικών κατανομών. Οι κατανομές που είναι πιο «στενές», καθίστανται πιο χρήσιμες σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Αν, όμως, διαφορετικές πιθανοτικές μέθοδοι πρόβλεψης, παράγουν κατανομές με παρόμοια αιχμηρότητα, τότε οι κατανομές των οποίων το σχήμα φανερώνει μεγαλύτερες διακυμάνσεις κατά την περίοδο εκτίμησης (έχει δηλαδή καλύτερη ικανότητα διάκρισης ανάμεσα στα μελλοντικά γεγονότα), πρέπει να προτιμούνται. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τον ορισμό που δίνει η μετεωρολογία για την ανάλυση.

Ορίζουμε:

$$\delta_{t,k}^{(a)} = r_{t+k/t}^{(1-a/2)} - \hat{r}_{t+k/t}^{(a/2)} \quad (4.25)$$

το μέγεθος του κεντρικού διαστήματος πρόβλεψης (με προκαθορισμένη πιθανότητα $(1-\alpha)$) που εκτιμάται για τη χρονική στιγμή t και για k ώρες μπροστά.

Εάν δύο μέθοδοι πρόβλεψης της αβεβαιότητας παρέχουν διαστήματα που έχουν ένα αποδεκτό επίπεδο αξιοπιστίας, τότε προτιμάται η μέθοδος που παρέχει πιο «στενά» διαστήματα. Στη συνέχεια, το κριτήριο της *αιχμηρότητας* αξιολογείται υπολογίζοντας το μέσο μέγεθος $\bar{\delta}_{t,k}^{(a)}$ των διαστημάτων πρόβλεψης για ένα δεδομένο ορίζοντα k :

$$\bar{\delta}_k^{(a)} = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} \delta_{t,k}^{(a)} = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (r_{t+k/t}^{(1-a/2)} - \hat{r}_{t+k/t}^{(a/2)}) \quad (4.26)$$

Εάν δύο προσεγγίσεις έχουν παρόμοιες αιχμηρότητες, τότε η μεγαλύτερη τιμή της ανάλυσης μεταφράζεται σε καλύτερης ποιότητας διαστήματα πρόβλεψης. Αν και δεν είναι δυνατόν να επαληθεύσουμε άμεσα αυτή την ιδιότητα, μπορούμε να μελετήσουμε τη διακύμανση του

μεγέθους των διαστημάτων με τη χρήση της τυπικής απόκλισης $\sigma_k^{(a)}$ του μεγέθους του διαστήματος (για ένα δεδομένο ορίζοντα k και ονομαστική κάλυψη $(1-\alpha)$)

$$\sigma_k^{(a)} = \left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (\delta_k^{(a)} - \bar{\delta}_k^{(a)})^2 \right]^{1/2} \quad (4.27)$$

Εξαιτίας της μη γραμμικότητας και της ετεροσκεδαστικής φύσης της αιολικής παραγωγικής διαδικασίας, η αβεβαιότητα της πρόβλεψης είναι ιδιαίτερα μεταβλητή και για αυτό αναμένεται να υπάρξει μεγάλη μεταβλητότητα και όσον αφορά το μέγεθος του διαστήματος.

Τα δ-διαγράμματα και τα σ-διαγράμματα, τα οποία δίνουν αντίστοιχα τις $\bar{\delta}_{t,k}^{(a)}$ και $\sigma_k^{(a)}$ σαν συνάρτηση του ονομαστικού ποσοστού κάλυψης, μας επιτρέπουν να αποκτήσουμε καλύτερη εικόνα του σχήματος των προβλεπόμενων κατανομών [38].

Κεφάλαιο 5

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΩΤΗΣ ΒΑΣΗΣ (Μοντέλο I)

5.1 Εισαγωγή

Η παραμετρομετροποίηση του ανέμου με σκοπό την εκτίμηση της παραγωγής της αιολικής ενέργειας από ένα αιολικό πάρκο συνιστά την χρήση προηγμένων στατιστικών μεθόδων. Ο άνεμος χαρακτηρίζεται από την έντονη μεταβλητότητά του και θεωρείται ένα πολύ περίπλοκο μη-γραμμικό σύστημα. Παράλληλα, η μη-γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος του πάρκου κάνει πιο δύσκολη την επίλυση του προβλήματος. Η μεθοδολογία και οι εκτιμητές που πρέπει να επιλέξουμε στο πρόβλημα της εκτίμησης της αιολικής ενέργειας πρέπει να είναι ικανοί να συλλάβουν τις στοχαστικές διαδικασίες του ανέμου που είναι δυνατόν να εμφανιστούν στην περιοχή του υπό μελέτη πάρκου και να τις συσχετίσει με επιτυχία με την αντίστοιχη παραγωγή του. Γενικά στη πραγματικότητα τα πιο πολλά συστήματα στο κόσμο είναι μη γραμμικά [129]. Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί όπως η αυτό-παλινδρομική διαδικασία κινητού μέσου ή τα αυτό-παλινδρομικά έτερο-σκεδαστικά υπό συνθήκη μοντέλα για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Παρ' όλ' αυτά τέτοια μοντέλα δεν μπορούν να περιγράψουν ένα σύστημα όπως η έξοδος ενός αιολικού πάρκου που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό μη-γραμμικών προτύπων.

Πέρα από αυτά τα στατιστικά μοντέλα όμως, υπάρχουν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που μπορούν να συλλάβουν πιο γενικευμένα τη γνώση. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι δομές που αποθηκεύουν τις διάφορες μορφές που μπορεί να εξελιχθεί μια διαδικασία και στηρίζονται αποκλειστικά στις ιστορικές χρονοσειρές του προβλήματος. Στην ουσία έχουν την δυνατότητα να συλλάβουν τις λειτουργικές σχέσεις μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου ακόμα και στις περιπτώσεις που είναι άγνωστες ή δεν μπορούν να περιγραφούν με άλλο

τρόπο. Παρ' όλ' αυτά για να αποδώσουν σωστά χρειάζονται αρκετά δεδομένα για την εκπαίδευση τους [130].

Η περιοχή έρευνας στην οποία έχουν εφαρμοστεί περισσότερο τα νευρωνικά δίκτυα είναι η πρόβλεψη. Π.χ. κατ' επανάληψη έχουν αναπτυχθεί μοντέλα με χρήση νευρωνικών δικτύων, με σκοπό τη πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην οικονομετρία [131]. Στο [132] γίνεται εκτενής ανασκόπηση των μοντέλων που χρησιμοποιούν νευρωνικά δίκτυα. Επίσης στο [133] συγκρίνονται τα στατιστικά μοντέλα που βασίζονται στα νευρωνικά δίκτυα και τα μοντέλα που βασίζονται στη παλινδρόμηση.

Χρησιμοποιώντας την γνώση που διατυπώθηκε στα προηγούμενα κεφαλαία και τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης σαν εργαλεία για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα πρόβλεψης κατά την διάρκεια αυτής της διατριβής. Τα δεδομένα που εφαρμόστηκαν και στις δύο περιπτώσεις είναι οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και η χρονοσειρά της αιολικής παραγωγής του πάρκου που μελετάται. Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος βασισμένο στην αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (Μοντέλο I). Το δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης (Μοντέλο II) το οποίο είναι βασισμένο στην ατμοσφαιρική κατάσταση, θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Πριν όμως θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στις δοκιμές που έγιναν στο ξεκίνημα της διατριβής στα αποτελέσματα των οποίων βασίστηκαν δομές του Μοντέλου I και του Μοντέλου II. Παράλληλα θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα των δοκιμών σε ένα πραγματικό αιολικό πάρκο για να γίνουν εμφανή τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Επίσης, θα παρουσιαστούν δύο βοηθητικά μοντέλα, το μοντέλο καμπύλης ισχύος και το μοντέλο προεπεξεργασίας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, που χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό του Μοντέλου I και του Μοντέλου II.

Τέλος, στην επόμενη παράγραφο περιγράφεται η δομή και η λειτουργία των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης, έτσι όπως εφαρμόστηκαν για την ανάπτυξη του Μοντέλου I και του Μοντέλου II.

5.2 Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης

5.2.1 Νευρωνικά δίκτυα-γενικά

Η ιδέα στην οποία βασίστηκε η δημιουργία των νευρωνικών δικτύων, προήλθε από τις λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου. Γενικά, τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από ένα αριθμό κελιών επεξεργασίας διασυνδεδεμένα μεταξύ τους που ονομάζονται νευρώνες. Οι νευρώνες είναι ομαδοποιημένοι σε επίπεδα κι αυτό γιατί στο κάθε επίπεδο εκτελείται διαφορετική επεξεργασία. Κάθε νευρώνας επεξεργάζεται με τη βοήθεια μίας συνάρτησης μεταφοράς ένα σήμα εισόδου που μπορεί να προέρχεται, είτε από άλλους νευρώνες, είτε από την είσοδο του νευρωνικού δικτύου. Μετά την επεξεργασία του σήματος εισόδου δημιουργείται ένα καινούριο σήμα που είτε μεταφέρεται στους νευρώνες του επόμενου επιπέδου, είτε αντιπροσωπεύει την έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Με αυτό τον τρόπο ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αποθηκεύσει και να χειριστεί αρκετά αποτελεσματικά ένα πολύ μεγάλο αριθμό περιπτώσεων και να περιγράψει εξ ολοκλήρου ένα μη γραμμικό σύστημα. Τέλος, πέρα από την ικανότητα εκμάθησης του συνόλου των περιπτώσεων που έχουν συμβεί στο παρελθόν, έχουν και την δυνατότητα γενίκευσης της πληροφορίας που περιέχουν, έτσι ώστε να μπορούν να χειριστούν τις μελλοντικές περιπτώσεις που δεν έχουν δει ποτέ πριν.

Τη δεκαετία του '80 δημιουργήθηκαν πολλά διαφορετικά είδη νευρωνικών δικτύων. Αυτά που συναντιούνται περισσότερο σε εφαρμογές είναι οι πολυεπίπεδοι αναγνωριστές, τα νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης και οι αυτό-οργανωμένοι χάρτες Kohonen. Τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης λειτουργούν ως συσχετιστική μνήμη. Μία συσχετιστική μνήμη μπορεί να κάνει πρόβλεψη ανακαλώντας εκδοχές που μοιάζουν εν μέρη με τη τρέχουσα κατάσταση. Παράλληλα τα δίκτυα Kohonen βασίζονται στην αυτό-οργανωμένη συμπεριφορά του ανθρώπινου εγκεφάλου [130].

Πέρα από τη δομή τους, τα νευρωνικά δίκτυα χρειάζονται κάποιο επαναληπτικό αλγόριθμο για να αποθηκεύσουν την πληροφορία που τους δίνεται. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Κατά την εκπαίδευση πραγματοποιείται η ρύθμιση των παραμέτρων του κάθε νευρώνα. Κάθε νευρώνας αποτελείται από έναν αριθμό που ονομάζεται βάρος και που περιέχει την πληροφορία η οποία λαμβάνεται από την διαδικασία εκπαίδευσης και την συνάρτηση μεταφοράς η οποία είναι προκαθορισμένη. Πριν ξεκινήσει η εκπαίδευση του μοντέλου είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι μεταβλητές εισόδου που θα εφαρμοστούν στο νευρωνικό δίκτυο και θα αποτελέσουν το διάνυσμα εισόδου του. Ο καθορισμός μπορεί να γίνει απλά με τον υπολογισμό της συσχέτισης της κάθε μεταβλητής με την έξοδο που πρόκειται να προβλεφθεί. Αφού βρεθεί το κατάλληλο διάνυσμα εισόδου, τότε συλλέγονται τα αντίστοιχα δεδομένα από τις ιστορικές χρονοσειρές και δημιουργείται το σύνολο δεδομένων εισόδου με τις αντίστοιχες τιμές της εξόδου. Το τελευταίο διάνυσμα εξόδου ονομάζεται και διάνυσμα στόχου.

Το σύνολο δεδομένων που προκύπτει χωρίζεται σε δύο υποσύνολα: το σύνολο εκπαίδευσης και το σύνολο αποτίμησης. Το νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει από το σύνολο εκπαίδευσης, ενώ με το σύνολο αποτίμησης επικυρώνεται αν η πληροφορία που έχει αποκτηθεί μπορεί να γενικευθεί σε ένα ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων από αυτό της εκπαίδευσης. Πολλές φορές και με σκοπό την γενίκευση της μάθησης του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιείται ένα τρίτο σύνολο που προκύπτει από το σύνολο εκπαίδευσης και ονομάζεται σύνολο επικύρωσης. Σε αυτό το σύνολο που δεν συμμετέχει στην διαδικασία της εκπαίδευσης, εφαρμόζονται διάφορα κριτήρια που δίνουν πληροφορία σχετικά με το πόσες φορές πρέπει να εφαρμόσουμε τον επαναληπτικό αλγόριθμο εκπαίδευσης και με το μέγεθος του δικτύου έτσι ώστε να συλλάβει μόνο την κατάλληλη πληροφορία. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαδικασία γενίκευσης και έχει σαν σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης του νευρωνικού δικτύου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι και η πιο κρίσιμη για την καλή απόδοση του νευρωνικού δικτύου. Γι' αυτό υπάρχουν δύο λόγοι: ο πρώτος είναι όταν το δίκτυο είναι μικρό και δεν μπορεί να αποθηκεύσει όλες τις περιπτώσεις που απαιτούνται για να εκτιμήσει το μέλλον, και ο δεύτερος όταν είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να υποθέτει ότι οι μόνες περιπτώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι αυτές που αντιστοιχούν στο σύνολο εκπαίδευσης (υπέρ-προσαρμογή-overfitting).

5.2.2 Η δομή των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινωτής βάσης

Όπως αναφέρθηκε η σχεδίαση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε με χρήση νευρωνικών δικτύων στην αρχή ενώ στη συνέχεια ενσωματώθηκαν και τεχνικές ασαφούς λογικής για τον εντοπισμό του μεγέθους της αβεβαιότητας της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου που προέρχεται από τα μετεωρολογικά μοντέλα.

Το είδος των νευρωνικών δικτύων που εφαρμόστηκε είναι τα δίκτυα ακτινωτής βάσης και επιλέχθηκε εμπειρικά με την αποτίμηση πολλών ειδών νευρωνικών δικτύων (αναδρομικά δίκτυα, αναγνωριστές (perceptrons) πολλαπλών επιπέδων εκπαιδευόμενα με διαφόρους μεθόδους οπισθοδρομικής, κ.τ.λ.) στις διάφορες μεθόδολογίες που αναπτύχθηκαν.

Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης αποδείχτηκαν τα πιο κατάλληλα για την επίλυση ενός τόσο μη γραμμικού προβλήματος όπως η πρόβλεψη παραγωγής αιολικής ισχύος λόγω της χαρακτηριστικής δομής τους. Αυτά τα δίκτυα αποτελούνται από δύο επίπεδα τα οποία εκπαιδεύονται με διαφορετικούς τρόπους. Στο πρώτο «κρυμμένο» επίπεδο πραγματοποιείται ταξινόμηση του συνόλου εκμάθησης με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων [134], ενώ στο δεύτερο επίπεδο εξόδου γραμμικοποιείται η έξοδος του πρώτου επιπέδου με το διάνυσμα στόχου.

Αναλυτικά, για τον πρώτο νευρώνα υπολογίζεται στην αρχή η ευκλείδεια απόσταση του πίνακα εκμάθησης με τον ανάστροφό του, πολλαπλασιάζεται με το φάσμα της ακτινωτής συνάρτησης βάσης και το αποτέλεσμα προκύπτει από το πέρασμα του γινομένου στην ακτινωτή συνάρτηση μεταφοράς. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται ένας πίνακας που περιέχει την απόσταση κάθε διανύσματος του συνόλου εκμάθησης με τα υπόλοιπα διανύσματα. Στη συνέχεια με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων επιλέγεται ως νευρώνας το

διάνυσμα από τον πίνακα εκμάθησης με το μεγαλύτερο σφάλμα σε σχέση με το διάνυσμα στόχου. Τέλος αφαιρείται από τον πίνακα των αποστάσεων η επίδραση του τελευταίου επιλεγμένου νευρώνα στην διαδικασία της εύρεσης του επόμενου νευρώνα. Στην ουσία ορθογωνιοποιείται ο επιλεγμένος νευρώνας με τον πίνακα των αποστάσεων.

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά, δηλαδή υπολογίζεται ο νέος πίνακας των αποστάσεων των διανυσμάτων εκμάθησης, στη συνέχεια με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν τα σφάλματα σε σχέση με το διάνυσμα στόχου που αντιστοιχούν σε κάθε διάνυσμα του συνόλου εκμάθησης και τέλος επιλέγεται ως νέος νευρώνας το διάνυσμα στο οποίο αντιστοιχεί το μεγαλύτερο σφάλμα. Έτσι στο πρώτο επίπεδο ενός δικτύου ακτινωτής βάσης, το σύνολο εκμάθησης χωρίζεται σε υποσύνολα που οι νευρώνες αποτελούν τους πυρήνες τους και ονομάζονται συναρτήσεις βάσης. Η επιλογή και ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης είναι πολύ κρίσιμη για την απόδοση του δικτύου.

5.2.3 Συναρτήσεις ακτινωτής βάσης

Οι συναρτήσεις ακτινωτής βάσης είναι μία ειδική κατηγορία συναρτήσεων. Το κοινό χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι ότι η απόκριση τους μειώνεται ή αυξάνεται μονότονα με την απόσταση από ένα κεντρικό σημείο. Στα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης, το κεντρικό σημείο επιλέγεται με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, ενώ το σχήμα τους καθορίζεται από τα κριτήρια γενίκευσης.

Μια τυπική συνάρτηση ακτινωτής βάσης είναι γκαουσιανή και στην περίπτωση της μονοδιάστατης εισόδου έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\phi(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c\|^2}{r^2}\right) \quad (5.1)$$

Όπου c είναι το κεντρικό σημείο δηλαδή η βάση της συνάρτησης με της οποίας την απόσταση μειώνεται μονοτονικά. Το r είναι η ακτίνα ή φάσμα της ακτινωτής συνάρτησης που καθορίζει το σχήμα της και το σύμβολο $\| \cdot \|$ παριστάνει την ευκλείδεια απόσταση. Από τον τύπο της φαίνεται ότι αν η είσοδος x ταυτίζεται με την βάση της συνάρτησης, η απόκρισή της έχει την τιμή ένα, ενώ όσο απομακρύνεται από την βάση τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν.

Άλλες συναρτήσεις ακτινωτής βάσης που συχνά χρησιμοποιούνται και έχουν παρόμοιες ιδιότητες είναι η συνάρτηση του σφηνοειδούς λεπτού πιάτου:

$$\phi(x) = x^2 \log(x) \quad (5.2)$$

η πολύ-τετραγωνική συνάρτηση:

$$\phi(x) = (x^2 - b^2)^{1/2} \quad (5.3)$$

και η ανάστροφη πολύ-τετραγωνική:

$$\phi(x) = (x^2 - b^2)^{-1/2} \quad (5.4)$$

Πρακτικά η επιλογή της συνάρτησης μεταφοράς στα νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης δεν επηρεάζει την απόδοσή τους. Στην εφαρμογή που μελετάμε χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση (4.1).

5.2.4 Ορθογώνια μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων

Όπως αναφέρθηκε ο τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων ενός νευρωνικού δικτύου είναι καθοριστικός για την απόδοσή του. Στη περίπτωση των νευρωνικών δικτύων συναρτήσεων ακτινωτής βάσης, οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν είναι τα κέντρα ή βάσεις και τα

αντίστοιχα φάσματα των συναρτήσεων ακτινωτής βάσης. Πρακτικά, η επιλογή των κέντρων γίνεται μέσα από το σύνολο εκπαίδευσης. Το ερώτημα που τίθεται είναι με ποια κριτήρια μπορεί να γίνει η επιλογή των κατάλληλων δειγμάτων εισόδου από το σύνολο εκπαίδευσης, έτσι ώστε το νευρωνικό δίκτυο να έχει τη μέγιστη απόδοση. Μια συνηθισμένη μέθοδος είναι η αυθαίρετη επιλογή μερικών δειγμάτων εισόδου και μετά με κάποια επαναληπτική μέθοδος βελτιστοποίησης [135] (π.χ. αλγόριθμος αναμενόμενης τιμής-μεγιστοποίησης) μετακινούνται τα κέντρα στη κατάλληλη θέση. Βέβαια μια τέτοια μέθοδος δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι το νευρωνικό δίκτυο θα ανταποκρίνεται με ακρίβεια σ' όλο το φάσμα των περιπτώσεων που περιέχει το σύνολο εκπαίδευσης.

Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων που εφαρμόστηκαν για την ανάπτυξη των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος χρησιμοποιήθηκε η ορθογώνια μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Με την μέθοδο αυτή επιλέγονται ένα-ένα τα κέντρα κάθε συνάρτησης βάσης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος. Για να γίνει κατανοητός ο αλγόριθμος υποθέτουμε ότι ο πίνακας T αντιπροσωπεύει το σύνολο εκπαίδευσης με διαστάσεις $n \times m$ όπου m είναι ο αριθμός των μεταβλητών που περιέχει το διάνυσμα εισόδου και n είναι ο αριθμός των δειγμάτων του συνόλου εκπαίδευσης. Το διάνυσμα στόχου θα συμβολίζεται ως d και περιέχει n στοιχεία. Έτσι η μαθηματική έκφραση του νευρωνικού δικτύου συναρτήσεων ακτινωτής βάσης έχει τη παρακάτω μορφή

$$d = A\Phi + \beta \quad (5.5)$$

Όπου A είναι οι συντελεστές (ή βάρη) του γραμμικού επιπέδου εξόδου του νευρωνικού δικτύου, $\Phi = [\phi_i(x)]$ με i από 1 έως M και M ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης της μορφής της εξίσωσης 4.1. Τέλος β είναι η κλίση ή η πόλωση του δεύτερου επιπέδου.

Για την επιλογή του κέντρου της πρώτης συνάρτησης βάσης, υποθέτουμε ότι η κάθε γραμμή του πίνακα T αποτελεί και μία βάση. Έτσι υπολογίζουμε την έξοδο του κρυμμένου επιπέδου P ως εξής:

$$P = \exp\left(-\frac{\|T^T - T\|^2}{r^2}\right) \quad (5.6)$$

Αφού βρεθεί η απόκριση του πρώτου επιπέδου για κάθε δείγμα του συνόλου εκμάθησης υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους του σφάλματος [134] e βάση του οποίου γίνεται η επιλογή της βάσης:

$$e = \frac{(P^T d)^2}{P^T P d^T d} \quad (5.7)$$

Όποτε το κέντρο της πρώτης συνάρτησης βάσης αντιστοιχεί στο διάνυσμα του πίνακα T με το μεγαλύτερο σφάλμα e . Πρέπει να αναφέρουμε ότι το σφάλμα e δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό σφάλμα αλλά σχετίζεται με την διασπορά του διανύσματος στόχου d όσον αφορά τον θόρυβο β της σχέσης (4.5).

Για να επιλέξουμε το κέντρο της δεύτερης συνάρτησης βάσης, ορθογωνιοποιείται ο πίνακας P με βάση το πρώτο κέντρο με την μέθοδο Gram-Schmidt και υπολογίζεται ξανά το σφάλμα e . Ο πίνακας P ονομάζεται πίνακας προβολής.

Γενικά εάν βρισκόμασταν το k βήμα για να βρούμε τη βάση της k -ιστής συνάρτησης, η ορθογωνιοποίηση του P_k σε σχέση με τις $k-1$ συναρτήσεις βάσης που αποτελούν τον πίνακα βαρών w_{k-1} του κρυμμένου επιπέδου θα είχε ως εξής:

$$a_k = \frac{w_{k-1}^T P_{k-1}}{w_{k-1}^T w_{k-1}} \quad (5.8)$$

$$P_k = P_{k-1} - w_{k-1} a_k$$

Οπότε με τον καινούριο πίνακα προβολής υπολογίζονται τα νέα σφάλματα και το διάνυσμα από το σύνολο εκπαίδευσης που παρουσιάζει το μεγαλύτερο σφάλμα από την εξίσωση (4.9) επιλέγεται σαν το κέντρο της καινούριας συνάρτησης ακτινωτής βάσης.

Κάθε φορά που μία καινούργια συνάρτηση βάσης προστίθεται στο κρυμμένο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου, υπολογίζονται ο πίνακας βαρών A και η πόλωση β του δεύτερου επιπέδου της εξίσωσης (4.5) με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι υπολογίζεται για κάθε καινούργια συνάρτηση βάσης το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το σφάλμα του νευρωνικού δικτύου να φτάσει ένα προκαθορισμένο όριο. Παρ' όλ' αυτά με σκοπό την γενίκευση του δικτύου σε σύνολα ανεξάρτητα από το σύνολο δεδομένων, ο αριθμός των επαναλήψεων του παραπάνω αλγόριθμου προσεγγίζεται με τη βοήθεια των κριτηρίων γενίκευσης που θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Με τα κριτήρια αυτά τέλος γίνεται εκτίμηση του φάσματος r των συναρτήσεων βάσης από την εξίσωσή

$$r = \frac{sp}{\sqrt{-\log(1/2)}} \quad (5.9)$$

όπου η σταθερά sp συνήθως κυμαίνεται από μία μέχρι τρεις φορές σχετική απόκλιση του συνόλου εκπαίδευσης.

5.3 Συμπεράσματα από τις πρώτες δοκιμές που έγιναν για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Το σύνολο εκμάθησης ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που εκπαιδεύεται με σκοπό την πρόβλεψη παραγωγής ενός αιολικού πάρκου, αποτελείται κυρίως από χρονοσειρές μετρήσεων της αιολικής ισχύος και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οι μετρήσεις προέρχονται από συστήματα SCADA, ενώ οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού από μετεωρολογικά μοντέλα υψηλής ανάλυσης [51]. Η προσπάθεια πρόβλεψης της αιολικής ισχύος ξεκίνησε με τον σχεδιασμό ενός απλού μοντέλου που αποτελούνταν από ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης και λάμβανε στην είσοδο τις τριάντα δύο πιο πρόσφατες ωριαίες μετρήσεις της αιολικής ισχύος. Δηλαδή αν θεωρήσουμε ως t την ώρα που γίνεται η πρόβλεψη και P την μέση ωριαία τιμή της αιολικής ισχύος, τότε η είσοδος I του νευρωνικού έχει τη παρακάτω μορφή:

$$I(t) = \{P(t), P(t-1), \dots, P(t-31)\} \quad (5.10)$$

Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε περιείχε εξήντα τέσσερις νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο και εκπαιδεύτηκε για μια περίοδο χιλίων πεντακοσίων ωρών. Σκοπός του μοντέλου αυτού ήταν να δοθεί μία άποψη για το αν είναι δυνατόν να συλληφθεί η συμπεριφορά του ανέμου μέσω της εκπαίδευσης ενός νευρωνικού δικτύου με χρήση αποκλειστικά παλαιότερων τιμών της ισχύος. Κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα του παραπάνω μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα I για το αιολικό πάρκο του Golagh στην Ιρλανδία.

Πίνακας I.

Ώρες μπροστά	1	2	3	4	5	6	7	8
NMAE	0.1617	0.1741	0.1871	0.1987	0.2091	0.2210	0.2321	0.2408

Με σκοπό να εκτιμηθεί η επιρροή της ώρας για την οποία γίνεται η πρόβλεψη, κρατήσαμε την δομή και την είσοδο του νευρωνικού δικτύου αμετάβλητα και οργανώσαμε το μοντέλο έτσι ώστε να εκτελείται κάθε φορά εκπαιδευόμενο μόνο με δείγματα που αντιστοιχούν στην ίδια ώρα με το δείγμα που δοκιμάζεται. Κατ' αρχήν συλλέγεται το σύνολο εκμάθησης που περιλαμβάνει τρεις χιλιάδες ωριαία δείγματα (κάθε δείγμα αποτελείται από τριάντα δύο τιμές της ισχύος). Όταν το μοντέλο εκτελείται, επιλέγει από το σύνολο εκμάθησης τα δείγματα που αντιστοιχούν στις επτά επόμενες ώρες από την ώρα πρόβλεψης. Π.χ. αν η ώρα που γίνεται η πρόβλεψη είναι στις μία τότε τα δείγματα που λαμβάνονται αντιστοιχούν στις ώρες από μία μέχρι εφτά. Αφού γίνει η συλλογή των δειγμάτων με βάση την ώρα που αντιστοιχεί στο δείγμα δοκιμής, εκπαιδεύεται το νευρωνικό δίκτυο με αυτό το υποσύνολο και στη συνέχεια αποτιμάται το δείγμα. Τέλος το δείγμα δοκιμής προστίθεται στο σύνολο εκμάθησης ενώ ταυτόχρονα αφαιρείται το παλαιότερο δείγμα που περιέχεται, με αποτέλεσμα το χρονική περίοδος εκμάθησης να είναι σταθερή και ίση με τρεις μήνες. Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα που δίνεται από την εξίσωση 4.7 αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στο παρακάτω πίνακα. Η αποτίμηση έγινε στην ίδια χρονική περίοδο με το προηγούμενο μοντέλο.

Πίνακας II.

Ωρες μπροστά	1	2	3	4	5	6	7	8
NMAE	0.1343	0.1543	0.1650	0.1791	0.1920	0.2008	0.2151	0.2242

Από τα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε ότι αν και δε είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με ακρίβεια η αιολική ισχύ με τη χρήση παλαιότερων τιμών της, μπορούμε όμως να συλλάβουμε ομοιότητα στην συμπεριφορά της μεταβλητότητας της ισχύος και κατ' επέκταση του ανέμου, προσεγγίζοντας την με βάση την ώρα που πρόκειται να προβλεφθεί.

Στο παραπάνω μοντέλο προστέθηκε ένα ακόμα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης που λάμβανε στην είσοδο του την έξοδο του πρώτου, αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τις οχτώ τελευταίες τιμές της ισχύος από την τρέχουσα ώρα πρόβλεψης. Το τελευταίο νευρωνικό δίκτυο περιείχε ενενήντα έξι νευρώνες στο «κρυμμένο» του στρώμα και είχε ξεχωριστή περίοδο εκμάθησης από το πρώτο δίκτυο. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού όπως έχει αναφερθεί και σ' άλλη ενότητα παρέχονται από μετεωρολογικά μοντέλα όπως είναι το SKIRON, το HIRLAM και το ALADDIN. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζονται οι προβλέψεις του ιρλανδικού μοντέλου HIRLAM. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού περιλαμβάνουν τιμές για την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου και την θερμοκρασία και την πίεση της ατμόσφαιρας που αντιστοιχούν σε κάποιο ύψος ή σε κάποιο επίπεδο που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική πίεση. Οπότε το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο που έχει τεθεί για να διορθώνει την προκαταρκτική πρόβλεψη της ισχύος με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού λαμβάνει στην είσοδο την παρακάτω σχέση:

$$I(t) = \{ P_{\text{pred}}(t), P(t-1), P(t-2), P(t-3) \dots P(t-8), WS_{10m}(t), WS_{29L}(t), WS_{30L}(t), WS_{31L}(t), WD_{10m}(t), WD_{29L}(t), WD_{30L}(t), WD_{31L}(t), T_{10m}(t), T_{29L}(t), T_{30L}(t), T_{31L}(t) \} \quad (5.11)$$

Όπου WS είναι η ταχύτητα του ανέμου και WD η διεύθυνση του ανέμου που έχουν εκτιμηθεί στα 10m και στα οριζόντια επίπεδα του χωρικού πλέγματος του μετεωρολογικού μοντέλου 29, 30, 31 και T η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας μετρούμενη στα 2m καθώς επίσης και οριζόντια επίπεδα 29, 30, 31. Το $P_{\text{pred}}(t)$ είναι η έξοδος του πρώτου νευρωνικού δικτύου. Όπου P είναι η μέτρηση της ισχύος για τις ώρες από t-1 μέχρι t-8. Πρέπει να σημειωθεί, ότι σ' αυτή τη περίπτωση όσο και στις παραπάνω που χρησιμοποιήθηκαν τιμές από την χρονοσειρά της ισχύος, για πρόβλεψη πάνω από μια ώρα μπροστά δηλαδή για t+1 και πέρα το μοντέλο εκτελείται επαναληπτικά με αποτέλεσμα να απορρίπτεται από την είσοδο η παλαιότερη τιμή της ισχύος και να προστίθεται στην αρχή του διανύσματος της εισόδου η τελευταία πρόβλεψη. Αυτό γίνεται για κάθε χρονικό βήμα πρόβλεψης, παραδείγματος χάρι για πέντε ώρες μπροστά η πρόβλεψη προκύπτει από την παρακάτω είσοδο.

$$I(t+5)=\{P_{\text{pred}}(t+4), P_{\text{pred}}(t+3), P_{\text{pred}}(t+1), P_{\text{pred}}(t), P(t-1), P(t-2), P(t-3), P(t-4), WS_{10m}(t), WS_{29L}(t), WS_{30L}(t), WS_{31L}(t), WD_{10m}(t), WD_{29L}(t), WD_{30L}(t), WD_{31L}(t), T_{10m}(t), T_{29L}(t), T_{30L}(t), T_{31L}(t)\} \quad (5.12)$$

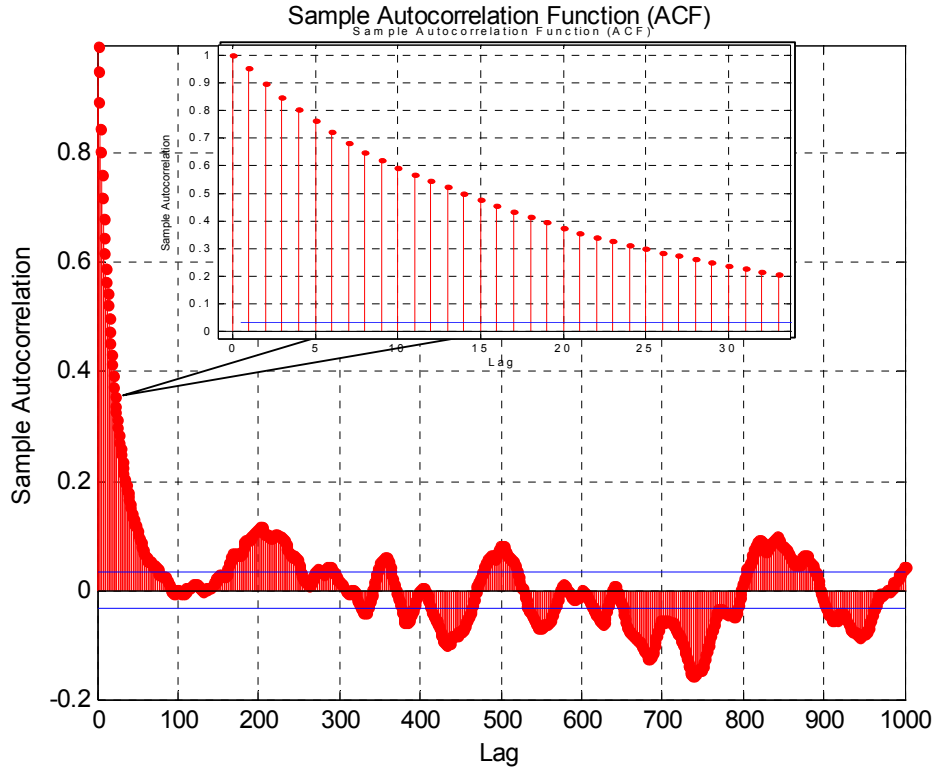
Όπου P_{pred} είναι η προηγούμενη πρόβλεψη της ισχύος από το μοντέλο σε προηγούμενο βήμα.

Συνοψίζοντας, το μοντέλο εκπαιδεύει κάθε φορά ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης με τα δείγματα που αντιστοιχούν στις ώρες πρόβλεψης (μέχρι και οχτώ ώρες μπροστά) τα οποία συλλέγει από τον συνολικό πίνακα εκμάθησης. Μετά παράγει πρόβλεψη με το παραπάνω νευρωνικό δίκτυο με βάση τις μετρήσεις της τρέχουσας ώρας. Στη συνέχεια ένα δεύτερο ήδη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης λαμβάνει τη παραπάνω πρόβλεψη μαζί με μετρήσεις ισχύος και με αριθμητικές προβλέψεις καιρού και δίνει την τελική πρόβλεψη της ισχύος για χρονικό ορίζοντα οχτώ ωρών. Στη περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού τότε το μοντέλο δίνει σαν πρόβλεψη την έξοδο του πρώτου νευρωνικού δικτύου. Αποτελέσματα για αυτή την μεθοδολογία παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας III.

Ώρες μπροστά	1	2	3	4	5	6	7	8
NMAE	0.1057	0.1244	0.1376	0.1497	0.1514	0.1598	0.1651	0.1721

Η τελική πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής προέρχεται από δύο βήματα: η πρώτη εκτίμηση στηρίζεται στην υπό συνθήκη αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της ισχύος και στη συνέχεια διαβαθμίζεται με βάση της μετεωρολογικές προβλέψεις. Από το παρακάτω σχήμα παρατηρείται πως μειώνεται η τιμή της συναρτήσεως της αυτό-συσχέτισης (autocorrelation function) της αιολικής ισχύος σε σχέση με την χρονική καθυστέρηση (lags). Αν και φαίνεται ότι για χρονική καθυστέρηση 32 ωρών υπάρχει μεγάλη συσχέτιση στην χρονοσειρά της αιολικής ισχύος τόσο από τα παραπάνω αποτελέσματα όσο και από τον Q υποθετικό έλεγχο των Ljung-Box-Pierce [145], η σημαντικότητα της αυτό-συσχέτισης της χρονοσειράς είναι πολύ μικρή αφού η τιμή της πιθανοφάνειας είναι μηδενική για κάθε χρονική καθυστέρηση. Παράλληλα από το παρακάτω σχήμα μία ασθενής αυτό-παλινδρομικότητα παρατηρείται σε διαστήματα μίας με τεσσάρων ημερών (24-96 ώρες) κάτι που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένα ατμοσφαιρικό σύστημα να περάσει πάνω από την περιοχή ενός αιολικού πάρκου [57].



Σχήμα 5.1 Η αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της αιολικής ισχύος

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι η χρήση των παλαιότερων μετρήσεων της αιολικής ισχύος στην είσοδο ενός συστήματος πρόβλεψης της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου δεν αποτελεί γενικευμένη γνώση για την εξέλιξη της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος. Αντίθετα η περιγραφή της μελλοντικής ατμοσφαιρικής κατάστασης πάνω από την περιοχή του υπό μελέτη πάρκου που προέρχεται από τα μετεωρολογικά μοντέλα και η ποιότητα της αποδείχθηκε ότι είναι κρίσιμη για την ακρίβεια των προβλέψεων της αιολικής ισχύος. Παρ' όλ' αυτά σε περιπτώσεις που το αιολικό πάρκο είναι τοποθετημένο σε περιοχές όπου η εξέλιξη των καιρικών φαινομένων είναι πιο ομαλή (επίπεδο έδαφος), η αυτό-παλινδρομικότητα της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος είναι περισσότερο ευσταθής και η χρήση των παλαιότερων μετρήσεων οδηγεί σε πιο ακριβείς προβλέψεις.

5.4 Μοντέλο καμπύλης ισχύος

Στην παράγραφο 2.2.4, περιγράφηκαν οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί για την απ' ευθείας μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε παραγόμενη αιολική ισχύ. Είναι δυνατόν με εφαρμογή της τιμής της ταχύτητας του ανέμου στις καμπύλες ισχύος κάθε ανεμογεννήτριας να γίνει μια εκτίμηση της αιολικής παραγωγής του αιολικού πάρκου. Μια πιο ακριβής μέθοδος που περιγράφηκε, είναι η συσχέτιση των χρονοσειρών της ταχύτητας του ανέμου με την χρονοσειράς της αιολικής ισχύος με κάποια μέθοδο, όπως αυτή των ελαχίστων τετραγώνων.

Στην παρούσα ενότητα, θα περιγραφεί μια μέθοδος που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της συνολικής καμπύλης ισχύος ενός αιολικού πάρκου χρησιμοποιώντας παράλληλα και την διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου είναι αυτές που παρέχονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και αντιστοιχούν στο πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης.

Με σκοπό να ληφθεί υπ' όψιν στο μοντέλο καμπύλης ισχύος, η επίδραση της ορογραφίας στην ροή του ανέμου και στην καμπύλη ισχύος, το εύρος τιμών της διεύθυνσης του ανέμου χωρίστηκε σε 35 διαστήματα των 10° . Επαναληπτικά για κάθε διάστημα ξεχωριστά, ανακτήθηκαν οι τιμές της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου που ανήκουν σε εκείνες τις περιπτώσεις που η τιμή της διεύθυνσης βρίσκεται στο συγκεκριμένο διάστημα. Στη συνέχεια, με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, υπολογίστηκε η συσχέτιση μεταξύ ταχύτητας και αιολικής ισχύος που αντιστοιχεί στο παραπάνω διάστημα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν 35 τρίτου βαθμού πολυώνυμα, που συνθέτουν και το συνολικό μοντέλο καμπύλης ισχύος.

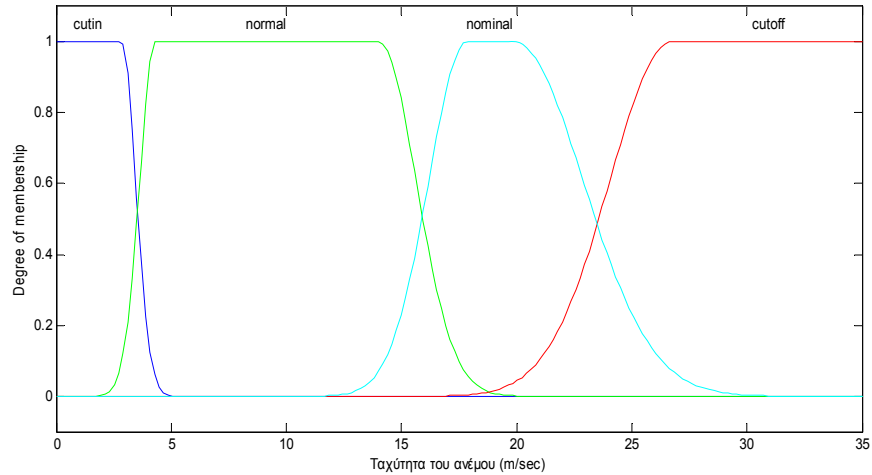
Έτσι δημιουργήθηκε η υπό συνθήκη καμπύλη ισχύος, η οποία εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αφού χρησιμοποιεί ως δεδομένα μόνο μετεωρολογικές προβλέψεις. Επιπλέον, θα χρησιμοποιηθεί και ως μοντέλο αναφοράς για την πιστοποίηση των συστημάτων πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή. Πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της απλότητας του μοντέλου καμπύλης ισχύος, η έξοδος του θα αποκαλείται ως η 'θεωρητική' τιμή της ισχύος.

5.5 Προετοιμασία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού

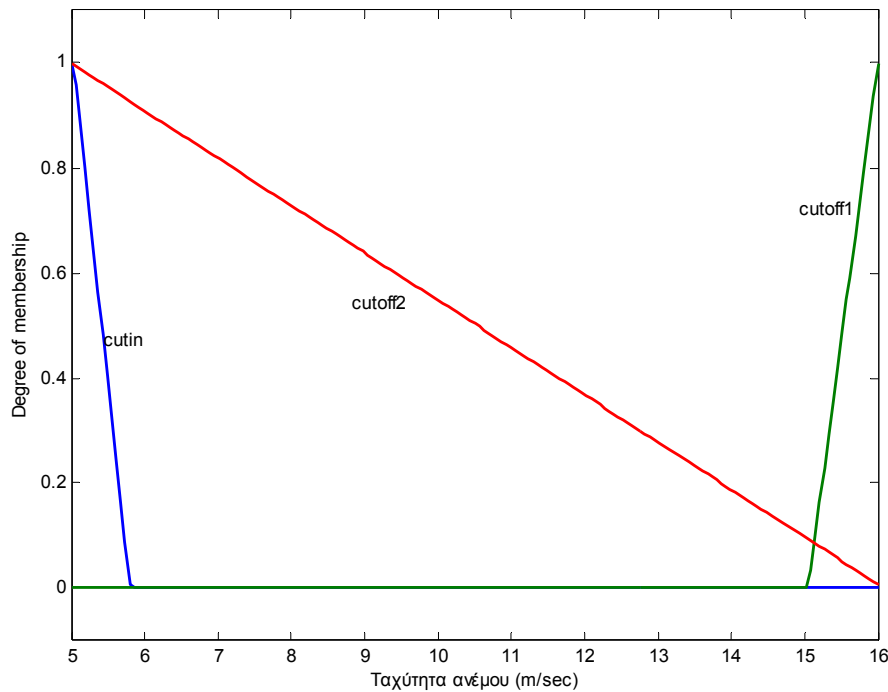
Ένα από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης ισχύος μίας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου είναι το γεγονός ότι για χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας από το όριο διασύνδεσης είναι σταθερά μηδέν, ενώ αντίθετα πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας παίρνει την ονομαστική τιμή του πάρκου. Επιπλέον για πολύ μεγάλες ταχύτητες που ξεπερνούν το όριο αποκοπής, η λειτουργία κάποιων αν όχι όλων των ανεμογεννητριών διακόπτεται και η έξοδος του αιολικού πάρκου μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή απ' το μηδέν μέχρι την ονομαστική τιμή του πάρκου. Παρατηρείται λοιπόν ότι στα διαστήματα της ταχύτητας κάτω από το όριο διασύνδεσης και πάνω από απ' την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου η τιμή της αιολικής ισχύος είναι σταθερή και επομένως δεν χρειάζεται επιπλέον παραμετροποίηση. Επομένως, χωρίς να αλλάξει κάτι σημαντικό στην εκτίμηση της αιολικής ισχύος, οι τιμές της ταχύτητας που είναι μικρότερες από το όριο διασύνδεσης και αυτές που είναι μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και του ορίου αποκοπής, μπορούν να πάρουν σταθερές τιμές και ίσες με το όριο διασύνδεσης και την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου αντίστοιχα.

Αντίθετα, στα σημεία ασυνέχειας της καμπύλης ισχύος, δηλαδή κοντά στο όριο διασύνδεσης, στην ονομαστική ταχύτητα και στο όριο αποκοπής, η ασάφεια της αιολικής παραγωγής είναι πολύ μεγάλη όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4. Γενικά, τα σημεία αυτά εξαρτώνται κυρίως από την τοπολογία του εδάφους που είναι τοποθετημένο το αιολικό πάρκο.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της καμπύλης ισχύος είναι δυνατόν να προσαρμοστούν εκ των προτέρων στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου που προέρχεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, με την βοήθεια της ασαφούς λογικής. Έτσι δημιουργήθηκε ένα απλό μοντέλο ασαφούς λογικής που λαμβάνει την τιμή της ταχύτητας και την προσαρμόζει με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις. Στα σχήματα 6.2 και 6.3 φαίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής της εισόδου και της εξόδου του μοντέλου αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2 Τα ασαφή σύνολα και οι συναρτήσεις συμμετοχής της ταχύτητας του ανέμου στην είσοδο



Σχήμα 5.3 Τα ασαφή σύνολα και οι συναρτήσεις συμμετοχής της ταχύτητας του ανέμου στην έξοδο

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται ότι η ταχύτητα στην είσοδο του μοντέλου χωρίζεται σε τέσσερα ασαφή σύνολα. Παράλληλα η έξοδος μοντελοποιείται πάλι με τέσσερα ασαφή σύνολα που φαίνονται σχήμα 5.3. Τα ασαφή σύνολα συνδέονται μέσω των ασαφών κανόνων. Κάθε ασαφές σύνολο της εισόδου αντιστοιχεί με ένα ασαφές σύνολο της εξόδου. Συγκεκριμένα, το ασαφές σύνολο 'nominal' αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο 'cutoff1' το οποίο παίρνει τιμές κοντά στην ονομαστική ταχύτητα του πάρκου. Αντίθετα, το ασαφές σύνολο 'cutoff' συνδέεται με το ασαφές σύνολο 'cutoff2' το οποίο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αλλά όταν η ταχύτητα εισόδου ξεπερνάει τα 28 m/sec, τότε έχουμε σίγουρα ολική αποκοπή του

αιολικού πάρκου και η ταχύτητα εξόδου παίρνει τιμή κοντά στο 5 m/sec. Επίσης τα ασαφή σύνολα της εισόδου *cutin* συνδέεται με το αντίστοιχο σύνολο της εξόδου και τέλος όταν η ταχύτητα βρίσκεται στο σύνολο 'normal' δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα ασαφή μοντέλα και η μέθοδος εκπαίδευσης που εφαρμόστηκε.

5.6 Το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος βασισμένο στην αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (Μοντέλο I)

5.6.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε μια προηγμένη μέθοδο η οποία βασίστηκε σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και ασαφούς λογικής. Το μοντέλο πρόβλεψης αποτελείται από δύο μονάδες, την μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και την μονάδα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Για την προσέγγιση της μελλοντικής παραγωγής ενός αιολικού πάρκου επιλέχθηκαν τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης. Ένω, με τεχνικές ασαφούς λογικής ελέγχεται η αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, έτσι ώστε να βελτιωθεί την ακρίβεια της πρόβλεψης. Σκοπός του μοντέλου που παρουσιάζεται, είναι να παρέχει προβλέψεις κάθε ώρα και να προσδιορίζει την αιολική ισχύ του πάρκου για όσο διάστημα είναι διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Για την περίπτωση που μελετάμε (το αιολικό πάρκο του Golagh) χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το ιρλανδικό μοντέλο HIRLAM [71] οι οποίες καλύπτουν τις επόμενες σαράντα οχτώ ώρες. Το μοντέλο HIRLAM παρέχει προβλέψεις κάθε έξι ώρες, γι' αυτό ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του μοντέλου που αναπτύχθηκε, περιορίζεται στις σαράντα δύο ώρες, για να διατηρείται σταθερός σε κάθε ώρα της ημέρας. Στη πραγματικότητα, οι αναβαθμίσεις των μετεωρολογικών προβλέψεων γίνονται στις ώρες 00:00, 06:00, 12:00 και 18:00 UTC, οπότε για την εκτέλεση του μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος στις 05:00 UTC υπάρχουν διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού μόνο για τις επόμενες σαράντα δύο ώρες. Έτσι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας περιορίζεται στις σαράντα δύο ώρες.

Η βοήθεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που παρέχονται από τα μετεωρολογικά μοντέλα είναι απαραίτητη για μία ακριβή εκτίμηση της ισχύος κι αυτό γιατί η παραγωγή της ισχύος εξαρτάται από την κατάσταση της ατμόσφαιρας πάνω από την περιοχή του πάρκου την στιγμή της πρόβλεψης. Παράλληλα, αποδεικνύεται ότι όσο πιο ακριβείς είναι οι προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου, τόσο πιο ακριβής προκύπτει και η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Στην ουσία, ένα σφάλμα των καιρικών προβλέψεων οδηγεί σε σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Ένας τρόπος, λοιπόν, για την καλύτερη προσέγγιση της εξόδου ενός αιολικού πάρκου είναι η ανάλυση της ποιότητας των προβλέψεων που παρέχονται από τα μετεωρολογικά μοντέλα και η εκτίμηση της αβεβαιότητάς τους. Επιπλέον, η πρόβλεψη ενός μεγέθους έχει επιστημονική βάση μόνο όταν ακολουθείται από την αβεβαιότητα της. Προς στο παρόν, που ο σκοπός μας είναι η πιο ακριβής ντετερμινιστική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, περιοριζόμαστε στην προσπάθεια χαρακτηρισμού των προβλέψεων της ταχύτητας του ανέμου σε «καλές» ή «ανεπαρκείς».

Παρακάτω περιγράφεται η μονάδα αξιολόγησης που χαρακτηρίζει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε «καλές» ή «ανεπαρκείς» με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής αφού πριν περιγραφεί η δομή και η λειτουργία ενός τέτοιου μοντέλου.

5.6.2 Δομή ενός μοντέλου ασαφούς λογικής

Η ασαφής λογική προτάθηκε για πρώτη φορά το 1965 από τον L. A. Zadeh [139] και είναι μία λογική που παίρνει στοχαστικές αποφάσεις σε αντίθεση με τις συμβατικές ντετερμινιστικές αποφάσεις της καθημερινής ζωής όπως είναι το σωστό ή λάθος, το ναι ή όχι, το άσπρο ή μαύρο. Για παράδειγμα στη τελευταία περίπτωση, αντί του άσπρου ή μαύρου, η ασαφής λογική κάνει εκτιμήσεις δίνοντας αποχρώσεις του γκρι.

Όπως αναφέρθηκε, η σημαντικότερη πληροφορία στην οποία βασίζεται η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού που λαμβάνονται από τα μετεωρολογικά μοντέλα. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού όμως παρέχονται πολλές φορές με μεγάλη αβεβαιότητα χωρίς να υπάρχει πληροφορία σχετικά με αυτήν. Εφαρμόζοντας την ασαφή λογική και χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες παραμέτρους, μπορεί να εκτιμηθεί όχι μόνο αν οι προβλέψεις αυτές είναι ακριβείς ή ανεπαρκείς, αλλά και το πόσο ανεπαρκείς είναι για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να καθοριστεί και η αβεβαιότητα της ίδιας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος τοποθετώντας την σε πιθανοτικά διαστήματα εμπιστοσύνης.

Οι αποφάσεις που παρέχει η ασαφής λογική προκύπτουν από τον συνδυασμό διαφόρων παραμέτρων που περιγράφουν το αποτέλεσμα. Όπως και στις αποφάσεις που παίρνει ο άνθρωπος, οι παράμετροι χωρίζονται σε κατηγορίες οι οποίες δεν είναι ευκρινώς διαχωρισμένες αλλά συγχέονται μεταξύ τους. Γι' αυτό οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται ασαφή σύνολα. Για παράδειγμα αν πρέπει να αποφασίσουμε αν κάποιος έχει τη δυνατότητα να παίξει μπάσκετ, που μία παράμετρος είναι το ύψος του, οι κατηγορίες ψηλός ή κοντός συγχέονται όταν αυτός είναι μέτριου αναστήματος. Γενικά η κάθε παράμετρος που χρησιμοποιείται για να παρθεί μία απόφαση με ασαφή λογική, χωρίζεται σε ασαφή σύνολα. Έτσι η τιμή μίας παραμέτρου μπορεί να αντιστοιχεί αποκλειστικά ή να είναι τελείως ανεξάρτητη με κάποιο από τα ασαφή σύνολα που αντιστοιχούν στην παράμετρο αυτή. Επίσης, μπορεί να περιγράφεται κατά ένα ποσοστό με αυτό το ασαφή σύνολο. Το κάθε ασαφές σύνολο που στην ουσία είναι ένα υποσύνολο του χώρου των τιμών της παραμέτρου, περιγράφεται από μία ξεχωριστή συνάρτηση. Μία τέτοια συνάρτηση δίνει 1, την μέγιστη δηλαδή τιμή της, όταν η τιμή της αντίστοιχης παραμέτρου περιγράφεται αποκλειστικά από αυτό το ασαφές σύνολο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση δίνει την τιμή 0. Στις ενδιάμεσες περιπτώσεις δηλαδή το πόσο συμμετέχει η τιμή της παραμέτρου στο ασαφές σύνολο, η αντίστοιχη συνάρτηση δίνει μία τιμή στο διάστημα από 0 μέχρι 1. Γενικά η συνάρτηση που περιγράφει ένα ασαφές σύνολο δίνει το βαθμό συμμετοχής της τιμής της παραμέτρου στο σύνολο αυτό και γι' αυτό ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής.

Οι πιο απλές συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιούνται είναι η τριγωνική και τραπεζοειδής που έχουν την παρακάτω μορφή αντίστοιχα

$$triangular = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c < x \end{array} \right\} \quad (5.13)$$

$$trapezoid = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d < x \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

Επίσης πολύ συχνά χρησιμοποιούνται γκαουσιανές συναρτήσεις της μορφής

$$P = \exp\left(-\frac{\|x-c\|^2}{r^2}\right) \quad (5.15)$$

καθώς και σιγμοειδής συναρτήσεις της μορφής

$$sigmoidal = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (5.16)$$

$$\text{ή} \quad bell = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (5.17)$$

Οι συναρτήσεις συμμετοχής συνήθως χρησιμοποιούνται ως κλειστές συναρτήσεις. Δηλαδή μέσα σε ένα διάστημα, αυξάνονται από τη τιμή 0 μέχρι την τιμή 1 και στη συνέχεια μειώνονται μέχρι την τιμή 0, ενώ εκτός του συγκεκριμένου διαστήματος έχουν πάντα την τιμή 0. Έτσι ένας παράγοντας ή καλύτερα μία μεταβλητή ενός μοντέλου ασαφούς λογικής χαρακτηρίζεται από μία κατηγορία αν η τιμή της βρίσκεται στο διάστημα που η αντίστοιχη συνάρτηση συμμετοχής παίρνει τιμές εκτός του 0.

Στη περίπτωση της εκτίμησης της αβεβαιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αλλά και της αβεβαιότητας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν γκαουσιανές και τραπεζοειδής συναρτήσεις συμμετοχής.

Για να πάρει ένα μοντέλο ασαφούς λογικής μία απόφαση χρησιμοποιεί μία σειρά από κανόνες του τύπου

«ΑΝ το Y ανήκει σε ‘ψηλός’ ΚΑΙ το B ανήκει σε ‘αδύνατος’ ΤΟΤΕ το S ανήκει σε ‘μπάσκετ’»

στους οποίους συμμετέχουν όλα τα ασαφή σύνολα της κάθε παραμέτρου του ασαφούς μοντέλου. Έτσι στους κανόνες αυτούς αντικαθίστανται η συμμετοχή που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία του ασαφούς μοντέλου. Στο παραπάνω παράδειγμα, όπου εφαρμόζουμε ασαφή λογική για να εκτιμήσουμε ποιο είναι το κατάλληλο αγώνισμα για ένα παιδί, το Y και το B που είναι οι μεταβλητές εισόδου του ασαφούς μοντέλου, αντιστοιχούν στο ύψος και το βάρος του παιδιού που εξετάζεται, ενώ το S είναι η μεταβλητή εξόδου. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται και γλωσσικές μεταβλητές του μοντέλου ασαφούς λογικής. Η μεταβλητή εξόδου μπορεί να περιγράφεται με τον ίδιο τρόπο όπως οι μεταβλητές εισόδου δηλαδή σε διάφορα ασαφή σύνολα με τη βοήθεια συναρτήσεων συμμετοχής (ασαφές μοντέλο Mamdani). Μπορεί όμως η κάθε κατηγορία της μεταβλητής εξόδου να αποτελεί μία απλή σταθερά ή από ένα πολυώνυμο (ασαφές μοντέλο Sugeno). Στη πρώτη περίπτωση το ασαφές μοντέλο είναι μηδενικού βαθμού και στη δεύτερη n-οστού και η κάθε κατηγορία του y_i περιγράφεται από τη σχέση:

$$y_i = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \quad (5.18)$$

Τα προθέματα ‘ψηλός’, ‘αδύνατος’ και ‘μπάσκετ’ αντιστοιχούν σε ένα από τα ασαφή σύνολα κάθε γλωσσικής μεταβλητής.

Η μετατροπή των καθαρών (πραγματικών) τιμών των μεταβλητών εισόδου σε ασαφείς τιμές μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής εισάγονται μέσα στους κανόνες. Δηλαδή τα γλωσσικά ασαφή σύνολα που περιέχονται στους κανόνες αντικαθίστανται με τους αντίστοιχους βαθμούς συμμετοχής. Τότε με τη βοήθεια λογικών πράξεων (AND, OR, NOT) προκύπτει η απόκριση του κάθε κανόνα που ονομάζεται βαθμός ενεργοποίησης του κανόνα. Οι λογικές πράξεις πραγματοποιούνται με διάφορους τρόπους. Στα ασαφή μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, οι κανόνες περιγράφονται με την λογική πράξη AND. Αυτή η πράξη αντιστοιχεί στην τομή των συνόλων και υπολογίζεται με το πολλαπλασιασμό των βαθμών συμμετοχής των ασαφών συνόλων που περιέχονται στον κανόνα. Οπότε ο βαθμός ενεργοποίησης f του κανόνα k προκύπτει από τους βαθμούς συμμετοχής $\mu_{ij}(x)$ των ασαφών συνόλων i της μεταβλητής εισόδου j από τον τύπο:

$$f_k = \prod_{j=1}^n \mu_{ij}(x) \quad \text{για κάθε } i \in 1 \dots m_j \quad (5.19)$$

όπου n είναι ο αριθμός των μεταβλητών και m_j ο αριθμός των ασαφών συνόλων κάθε μεταβλητής εισόδου j . Βέβαια πέρα από την παραπάνω σχέση, η λογική πράξη AND μπορεί να πραγματοποιηθεί και με άλλες μεθόδους όπως το ελάχιστο των βαθμών συμμετοχής. Γενικά έχει αναπτυχθεί ολόκληρη άλγεβρα για τον υπολογισμό του βαθμού ενεργοποίησης των κανόνων.

Είναι προφανές ότι για να προκύψει μία απόφαση μόνο με την χρήση της λογικής πράξης AND πρέπει να εφαρμοστούν $K=m_1 \times m_2 \times \dots \times m_j$ κανόνες. Έτσι μετά την αποτίμηση του κάθε κανόνα προκύπτουν K βαθμοί ενεργοποίησης όπου η συγχώνευση τους θα αποτελέσει την έξοδο του ασαφούς μοντέλου. Λόγω του ότι κάποιοι κανόνες έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα για την λήψη μιας απόφασης έναντι κάποιων άλλων, πολλαπλασιάζουμε το βαθμό ενεργοποίησης του κάθε κανόνα k με ένα βάρος w_k .

Η διαφορά των ασαφών μοντέλων τύπου Mamdani έναντι αυτών τύπου Sugeno [140] που αναφέρθηκαν παραπάνω, εντοπίζεται στο τρόπο σύνδεσης των βαθμών ενεργοποίησης των κανόνων για να προκύψει η έξοδος. Γενικά, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξόδου του ασαφούς μοντέλου από τους βαθμούς ενεργοποίησης ονομάζεται αποασαφοποίηση.

Στα ασαφή μοντέλα τύπου Mamdani [141], πριν γίνει η διαδικασία της αποασαφοποίησης πραγματοποιούνται άλλα δύο βήματα: η διαδικασία της συναιτιότητας και η διαδικασία της συσσώρευσης. Κατά τη διαδικασία της συναιτιότητας προβάλλεται ο βαθμός ενεργοποίησης κάθε κανόνα στις συναρτήσεις συμμετοχής της γλωσσικής μεταβλητής εξόδου. Αυτό γίνεται είτε με το γινόμενο μεταξύ του βαθμού ενεργοποίησης και των συναρτήσεων συμμετοχής, είτε με την επιλογή του ελάχιστου αυτών των δύο. Το αποτέλεσμα της συναιτιότητας αναφέρεται για κάθε κανόνα ξεχωριστά και είναι η ενεργοποίηση της περιοχής της γλωσσικής μεταβλητής της εξόδου μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής της. Οι ενεργοποιημένες περιοχές τότε αθροίζονται ή επιλέγεται η μεγαλύτερη από αυτές (διαδικασία συσσώρευσης). Από την περιοχή που προκύπτει υπολογίζεται η έξοδος του ασαφούς μοντέλου με την μέθοδο αποασαφοποίησης. Οι πιο συνηθισμένες στρατηγικές αποασαφοποίησης που χρησιμοποιούνται στα ασαφή μοντέλα τύπου Mamdani είναι ο υπολογισμός της κεντρικής τιμής ή της διχοτόμου της περιοχής. Άλλες μέθοδοι αποασαφοποίησης είναι η μέγιστη, η ελάχιστη και μέση τιμή του μεγίστου της περιοχής.

Η διαδικασία αποασαφοποίησης για τα ασαφή μοντέλα τύπου Sugeno είναι πιο άμεση. Αναφέρθηκε και παραπάνω ότι η γλωσσική μεταβλητή εξόδου στα ασαφή μοντέλα Sugeno περιγράφονται με σταθερές ή με γραμμικές συναρτήσεις συμμετοχής. Για τα μοντέλα αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι αποασαφοποίησης

α) Ο σταθμικός μέσος όρος (weighted average) που εκφράζεται με στη σχέση:

$$y = \frac{(f_k w_k)^T y_k}{\sum_{k=1}^K f_k w_k} \quad (5.20)$$

β) Το σταθμικό άθροισμα (weighted summary) που έχει την μορφή:

$$y = (f_k w_k)^T y_k \quad (5.21)$$

Όπου το y_k είναι η συμμετοχή του βαθμού ενεργοποίησης στις συναρτήσεις συμμετοχής της γλωσσικής μεταβλητής εξόδου και y η έξοδος του ασαφούς μοντέλου.

Τέλος τα συστήματα πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας που αναπτύχθηκαν περιέχουν ασαφή μοντέλα τύπου Sugeno με μέθοδο αποασαφοποίησης τον σταθμικό μέσο όρο.

5.6.3 Εκτίμηση των παραμέτρων των ασαφών μοντέλων με χρήση του αλγόριθμου οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος Levenberg-Marquardt.

Στα ασαφή μοντέλα που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε τραπεζοειδής και γκαουσιανές συναρτήσεις συμμετοχής. Από τις εξισώσεις 5.13 και 5.14 φαίνεται ότι πρέπει να εφαρμοστεί κάποια μέθοδος έτσι ώστε να καθοριστούν με τον βέλτιστο τρόπο οι παράμετροι των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών μοντέλων. Άλλοι παράμετροι των ασαφών μοντέλων που πρέπει να καθοριστούν είναι τα βάρη των κανόνων.

Ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται ευρέως στην εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων και κυρίως στους πολυεπίπεδους αναγνωριστές είναι αυτός της οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος. Ο αλγόριθμος αυτός έχει εφαρμοστεί με πολλές εκδοχές όπως ο ψευδό-αλγόριθμος Newton, ο αλγόριθμος συζευγμένης κλίσης, η μέθοδος ταχύτερης καθόδου ή ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt. Όλες αυτές οι εκδοχές του αλγόριθμου οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος έχουν εφαρμοστεί με τον ίδιο τρόπο και για την εκτίμηση των παραμέτρων των ασαφών μοντέλων. Σαν πιο αποδοτική μέθοδος έχει αποδειχθεί ο αλγόριθμος του Levenberg-Marquardt και για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε στα ασαφή μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την περίπτωση της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [142].

Πριν εφαρμοστεί ο αλγόριθμος εκπαίδευσης θα πρέπει να καθοριστεί η δομή του. Δηλαδή πρέπει να εκτιμηθεί εκ των προτέρων ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου, ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής, ο τύπος τους αλλά και οι αρχικές τιμές των παραμέτρων τους. Επίσης πρέπει να καθοριστούν οι κανόνες και οι αρχικές τιμές των αντίστοιχων βαρών. Όλα τα παραπάνω έχουν πραγματοποιηθεί με την μέθοδο δοκιμής σφάλματος, εκτός από τα βάρη των κανόνων που αυθαίρετα έχουν τεθεί ίσον με 1.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης όπως αυτός της οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος χρησιμοποιούν μια συνάρτηση κόστους με σκοπό να την ελαχιστοποιήσουν. Η συνάρτηση κόστους πρέπει να είναι τέτοια που να σχετίζεται με την ποιότητα της προσαρμογής των παραμέτρων του μοντέλου. Σαν κριτήριο εκπαίδευσης η μέθοδος οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος χρησιμοποιεί το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων που ορίζεται από τη παρακάτω σχέση [143]:

$$E = \frac{\|t - y(\underline{z})\|^2}{2} = \frac{\|e(l)\|^2}{2} \quad (5.22)$$

Όπου το t είναι η επιθυμητή έξοδος, το y η έξοδος του ασαφούς μοντέλου και το $\|\cdot\|$ συμβολίζει τη νόρμα δεύτερης τάξεως, το l είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγόριθμου και το e το σφάλμα του ασαφούς μοντέλου σε κάθε επανάληψη.

Το διάνυσμα \underline{z} αποτελείται από τους παραμέτρους του ασαφούς μοντέλου που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Δηλαδή για την περίπτωση που έχουν εφαρμοστεί τραπεζοειδής συναρτήσεις συμμετοχής στο ασαφές μοντέλο έχει την μορφή:

$$\underline{z} = [a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, w_k]^T \quad (5.23)$$

Ενώ για την περίπτωση που έχουν εφαρμοστεί γκαουσιανές συναρτήσεις το διάνυσμα \underline{z} έχει την μορφή

$$\underline{z} = [c_{ij}, r_{ij}, w_k]^T \quad (5.24)$$

Για να ελαχιστοποιηθεί η παραπάνω συνάρτηση κόστους η κλασική μέθοδος που ακολουθείται είναι να παραγωγιστεί το δεύτερο μέλος της μία φορά ως προς το διάνυσμα \underline{z} και να τεθεί ίσον με το μηδέν. Στη συνέχεια το αποτέλεσμα της παραγωγίσης πρέπει να αναλυθεί στις επιμέρους μερικές παραγώγους της κάθε παραμέτρου του ασαφούς μοντέλου. Αφού υπολογιστούν οι μερικές παράγωγοι τότε προστίθενται στις αρχικές τιμές των παραμέτρων και υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η συνάρτηση κόστους να αρχίσει να συγκλίνει.

Με παρόμοιο τρόπο ο αλγόριθμος οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος Levenberg-Marquardt ακολουθεί τα παρακάτω βήματα [143, 144].

Αν $d\mathbf{z}$ είναι η αναβάθμιση των παραμέτρων του ασαφούς μοντέλου με

$$d\mathbf{z}(n) = \mathbf{z}(n-1) - \mathbf{z}(n)$$

τότε χωρίς μεγάλο σφάλμα ισχύει η παρακάτω σχέση

$$y(\underline{z}) + d\underline{z} \approx y(\underline{z} + d\underline{z}) \quad (5.25)$$

Έτσι παραγωγίζοντας την συνάρτηση κόστους και με την βοήθεια της παραπάνω σχέσης προκύπτει:

$$(J^T(l)J(l))d\underline{z}(l) = J^T(l)e(l) \quad (5.26)$$

όπου ο πίνακας J είναι η Ιακωβιανή μήτρα που για την περίπτωση των ασαφών μοντέλων ορίζεται ως:

$$J = \frac{\partial y(\underline{z})}{\partial \underline{z}^T} \quad (5.27)$$

Τέλος, με σκοπό να ελέγχεται το μέγεθος και κατεύθυνση της αναβάθμισης των παραμέτρων έτσι ώστε να πετυχαίνετε πιο γρήγορα η σύγκλιση της μεθόδου, προστίθεται στο πρώτο μέλος της παραπάνω εξίσωσης μία επιπλέον παράμετρος a . Έτσι επιλύοντας την εξίσωση ως προς το διάνυσμα $d\underline{z}$ προκύπτει η σχέση:

$$d\underline{z}(l) = (J^T(l)J(l) + a(l)I)^{-1} J^T(l)e(l) \quad (5.28)$$

Το μόνο που μένει λοιπόν τώρα είναι να υπολογιστεί η Ιακωβιανή μήτρα και να καθοριστεί η παράμετρος a .

Η Ιακωβιανή μήτρα όπως αναφέρθηκε αποτελείται από τις μερικές παραγώγους της εξόδου του ασαφούς μοντέλου με τις αντίστοιχες παραμέτρους του. Για να υπολογιστούν αυτές πρέπει να αναλυθούν στις μερικές παραγώγους των συστατικών του ασαφούς μοντέλου. Δηλαδή αν το διάνυσμα \underline{z} διαιρεθεί σε δύο επιμέρους διανύσματα \underline{z}_1 και \underline{z}_2 που το πρώτο αντιστοιχεί στους παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και το δεύτερο στα βάρη των κανόνων, τότε οι μερικές παράγωγοι θα έχουν την μορφή

$$\frac{\partial y}{\partial \underline{z}_1} = \frac{\partial y}{\partial w_k} \frac{\partial w_k}{\partial f_k} \frac{\partial f_k}{\partial \mu_{ij}} \frac{\partial \mu_{ij}}{\partial \underline{z}_1} \quad \text{και} \quad \frac{\partial y}{\partial \underline{z}_2} = \frac{\partial y}{\partial w_k} \quad (5.29)$$

όπου κάθε μερική παράγωγος ισούται με:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial w_k} &= \frac{(w_k f_k) y_i (\sum_{k=1}^K w_k f_k - w_k^2 f_k)}{(\sum_{k=1}^K w_k f_k)^2} \\ \frac{\partial w_k}{\partial f_k} &= w_k \\ \frac{\partial f_k}{\partial \mu_{ij}} &= \prod_{i=1}^n \mu_{ij} / \mu_{ij} \end{aligned} \quad (5.30)$$

Η μερική παράγωγος $\partial \mu_{ij} / \partial \underline{z}_1$ για την περίπτωση των τραπεζοειδών συναρτήσεων συμμετοχής έχουν την μορφή

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial a_{ij}} &= (x - b_{ij}) / (b_{ij} - a_{ij}) && \text{για } a_{ij} \leq x \leq b_{ij} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial b_{ij}} &= (a_{ij} - x) / (b_{ij} - a_{ij}) && \text{για } a_{ij} \leq x \leq b_{ij} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial c_{ij}} &= (d_{ij} - x) / (d_{ij} - c_{ij}) && \text{για } c_{ij} \leq x \leq d_{ij} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial d_{ij}} &= (x - c_{ij}) / (d_{ij} - c_{ij}) && \text{για } c_{ij} \leq x \leq d_{ij} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial a_{ij}} &= 0 \quad \frac{\partial \mu_{ij}}{\partial b_{ij}} = 0 && \text{για } x < a_{ij} \text{ και } x > b_{ij} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial c_{ij}} &= 0 \quad \frac{\partial \mu_{ij}}{\partial d_{ij}} = 0 && \text{για } x < c_{ij} \text{ και } x > d_{ij}
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Ενώ για την περίπτωση των γκαουσιανών συναρτήσεων συμμετοχής είναι

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial c_{ij}} &= \frac{2(x - c_{ij})}{r_{ij}^2} e^{-\left(\frac{x - c_{ij}}{r_{ij}}\right)^2} \\
\frac{\partial \mu_{ij}}{\partial r_{ij}} &= \frac{(x - c_{ij})^2}{r_{ij}^3} e^{-\left(\frac{x - c_{ij}}{r_{ij}}\right)^2}
\end{aligned} \tag{5.32}$$

Η αρχική τιμή της παραμέτρου ρύθμισης α επιλέγεται τυχαία. Σε κάθε επανάληψη όμως αυξάνεται αν η αναβάθμιση των παραμέτρων του ασαφούς μοντέλου αποτύχει να βελτιώσει την απόδοσή του και μειώνεται στη περίπτωση που μειώνεται το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος. Με τον τρόπο αυτό οι παράμετροι του μοντέλου λαμβάνουν σιγά-σιγά τις βέλτιστες τιμές.

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης των ασαφών μοντέλων που είναι σχεδιασμένα με τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής, υπάρχουν περιορισμοί στη σχεδίαση τους που πρέπει να ελέγχονται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Γενικά πρέπει πάντα για κάθε συνάρτηση συμμετοχής να ισχύει η συνθήκη

$$a_{ij} < b_{ij} \leq c_{ij} < d_{ij} \tag{5.33}$$

Όταν σε κάποια επανάληψη δεν ισχύει κάποιος από τους παραπάνω περιορισμούς τότε πραγματοποιείται η παρακάτω σχέση και μειώνεται η παράμετρος ρύθμισης α

$$a_{ij} \approx b_{ij} = c_{ij} \approx d_{ij} \tag{5.34}$$

Τέλος ο εντοπισμός των κατάλληλων κανόνων εξετάζεται το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος για κάθε περίπτωση διάταξης των κανόνων σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Δηλαδή, εξετάζονται όλοι οι συνδυασμοί των ασαφών συνόλων των γλωσσικών μεταβλητών

εισόδου με τα ασαφή σύνολα της γλωσσικής μεταβλητής εξόδου και κάθε φορά υπολογίζεται η τιμή της συναρτήσεως κόστους.

5.6.4 Η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Με σκοπό να εντοπιστούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού με χαμηλή ακρίβεια, σχεδιάστηκε μία μονάδα βασισμένη σε ασαφή λογική, που συνδυάζει την προβλεπόμενη ταχύτητα με την τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος. Στο σχεδιασμό της μονάδας αυτής χρησιμοποιείται η θεώρηση ότι η αιολική ισχύς μεταβάλλεται πιο αργά από την ταχύτητα του ανέμου. Σκοπός της μονάδας αξιολόγησης, γενικά, είναι να ξεχωρίσει τις ακριβείς αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το σύνολο δεδομένων, έτσι ώστε, ο τελικός χρήστης του μοντέλου πρόβλεψης να εμπιστεύεται περισσότερο τις προβλέψεις αυτές. Όπως θα δούμε και στα αποτελέσματά του, η μονάδα αξιολόγησης διαχωρίζει με σαφή τρόπο τις 'φτωχές' αριθμητικές προβλέψεις καιρού και επιπλέον παρέχει έναν βαθμό εμπιστοσύνης στις υπόλοιπες προβλέψεις.

Όπως είδαμε και στις προηγούμενες ενότητες, που περιγράφεται η δομή και η εκπαίδευση ενός ασαφούς μοντέλου, η ασαφή λογική δίνει την δυνατότητα να μοντελοποιηθούν καταστάσεις που συγχέονται μεταξύ τους. Ειδικά για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, η οποία στηρίζεται σε άλλες προβλέψεις, τις μετεωρολογικές, μία κατάσταση είναι πάντα ασαφή λόγω της αβεβαιότητας των δεδομένων και μπορεί να μοιάζει με μία άλλη η οποία να έχει διαφορετική εξέλιξη.

Αυτό που προκαλεί μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος είναι η σχέση της αιολικής ισχύος με την προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου. Για να προσεγγιστεί η ασάφεια αυτής της σχέσης, θεωρήθηκε ότι και οι δύο αυτοί παράμετροι ακολουθούν την κανονική κατανομή σε όλο το εύρος των τιμών τους. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί, ότι η θεώρηση αυτή για μικρές ταχύτητες του ανέμου είναι λανθασμένη, εφόσον η κατανομή της αιολικής ισχύος στην περιοχή αυτή είναι εκθετική, αλλά παρέμεινε έτσι, για λόγους απλούστευσης και εξαιτίας του ότι η μεγάλη αβεβαιότητα της πρόβλεψης βρίσκεται στις μεσαίες και μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Στην πραγματικότητα η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που προτείνεται αναλύει τρεις μεταβλητές: την προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου, τον αριθμό των χρονικών βημάτων πρόβλεψης και τον λόγο λ των τιμών των αθροιστικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της πιο πρόσφατης τιμής της αιολικής ισχύος και της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου, ο οποίος εκφράζεται από την εξίσωση (5.35).

$$\lambda = \frac{\text{Pr}_{\text{αιολ. ισχύος}}}{\text{Pr}_{\text{ταχ. ανέμου}}} \quad (5.35)$$

Όπου:

$$\text{Pr} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (5.36)$$

Pr είναι η κανονική αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας,

x είναι το υπό εξέταση δείγμα,

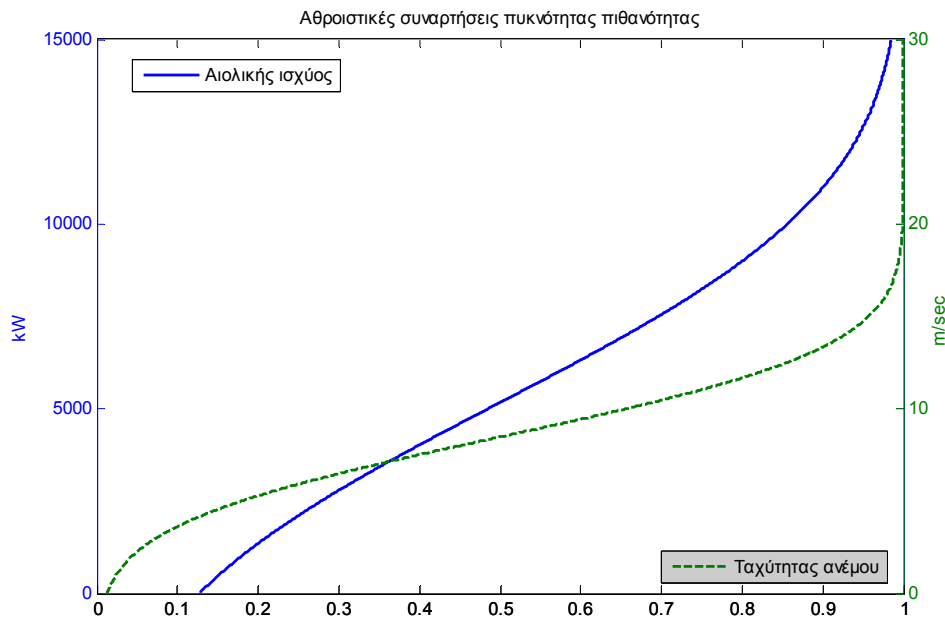
σ είναι η τυπική απόκλιση της χρονοσειράς,

μ είναι η μέση τιμή της χρονοσειράς.

Ο λόγος των τιμών των δύο συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας αντιπροσωπεύει τη συσχέτιση μεταξύ της αιολικής ισχύος και της προβλεπόμενης τιμής της ταχύτητας. Η τιμή της αιολικής ισχύος που χρησιμοποιείται, είναι αυτή που αντιστοιχεί στην προηγούμενη ώρα από αυτήν που γίνεται η πρόβλεψη. Για το πρώτο λοιπόν βήμα της πρόβλεψης, χρησιμοποιείται η τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος, ενώ στα επόμενα βήματα

λαμβάνεται η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος της προηγούμενης ώρας. Στο σχήμα 5.4 φαίνονται οι αθροιστικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου για το αιολικό πάρκο Golagh. Φαίνεται λοιπόν ότι διαιρώντας με την αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου, επιτυγχάνεται να διατηρείται ο λόγος σε ένα σταθερό αλλά ασαφές διάστημα {0.6-1.2} όταν οι προβλέψεις είναι ακριβείς. Ενώ στην αντίθετη περίπτωση όταν δεν συμφωνεί η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου με την αντίστοιχη αιολική ισχύ, ο λόγος παίρνει τιμές κοντά στο 0 ή κοντά στο 2. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίζονται πιο εύκολα οι 'φτωχές' μετεωρολογικές προβλέψεις διαχωρίζονται πιο συγκεκριμένα τα ασαφή σύνολα του μοντέλου. Η επιλογή του παραπάνω λόγου σαν μεταβλητή εισόδου στην ασαφή μονάδα έγινε με λεπτομερή ανάλυση των χρονοσειρών αιολικής ισχύος και ταχύτητας του ανέμου.

Στην είσοδο της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, ενσωματώθηκε ο αριθμός των βημάτων της πρόβλεψης για να κάνει πιο ελαστική την απόφαση του μοντέλου στους μακροχρόνιους ορίζοντες. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο γιατί η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της ισχύος αυξάνεται, όσο αυξάνεται ο αριθμός των βημάτων μπροστά. Αφού λοιπόν η ασαφή μονάδα χρησιμοποιεί την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος της προηγούμενης ώρας, όταν εκτελείται πέρα από το πρώτο βήμα της πρόβλεψης, είναι αναγκαίο να αυξάνει την εμπιστοσύνη του στην πρόβλεψη της ταχύτητας αναλογικά με το χρονικό βήμα της πρόβλεψης.



Σχήμα 5.4 Οι αθροιστικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου

Η κάθε μία μεταβλητή εισόδου της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού μοντελοποιήθηκε με τη δημιουργία τριών ασαφών συνόλων που ονομάστηκαν ως περιοχή χαμηλής, περιοχή μεσαίας και περιοχή υψηλής τιμής της μεταβλητής. Η συμμετοχή του κάθε ασαφούς συνόλου στην διαδικασία ασαφοποίησης του μοντέλου περιγράφεται με γκαουσιανές συναρτήσεις της μορφής 5.15. Αφού, λοιπόν, εφαρμόζονται τρεις μεταβλητές εισόδου που αναλύονται με τρία ασαφή σύνολα η καθεμία, το ασαφές μοντέλο περιέχει 27 κανόνες ασάφειας. Τέλος, η έξοδος του μοντέλου περιγράφεται με δύο ασαφή σύνολα που αντιστοιχούν το ένα σε ακριβείς προβλέψεις και το άλλο σε 'φτωχές' προβλέψεις. Οι

συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής εξόδου είναι τραπεζοειδείς της μορφής (5.14). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των συνόλων ασάφειας καθώς και το είδος των συναρτήσεων συμμετοχής των συνόλων επιλέχθηκαν εμπειρικά με τη μέθοδο δοκιμής-σφάλματος.

Κατά την εκτέλεση της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, οι ασαφείς αριθμοί που προκύπτουν από τις συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου κατά την διαδικασία της ασαφοποίησης εισάγονται στους κανόνες ασάφειας. Έτσι προκύπτουν οι επιμέρους αποφάσεις από τους κανόνες όπου συνδυάζονται με τις διαδικασίες της συναιτιότητας και της συσσώρευσης και το αποτέλεσμα προβάλλεται στην έξοδο του μοντέλου μέσω της διαδικασίας της αποασαφοποίησης. Με τον τρόπο αυτό συνδυάζονται τα δεδομένα και εντοπίζονται οι 'φτωχές' αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Οι παράμετροι της μονάδας αξιολόγησης, δηλαδή οι παράμετροι των συναρτήσεων συμμετοχής των μεταβλητών και τα βάρη των κανόνων ασάφειας, εκτιμήθηκαν με τον αλγόριθμο εκμάθησης Levenberg-Marquardt [143,144]. Ο αλγόριθμος εκμάθησης Levenberg-Marquardt, καθώς και ο αλγόριθμος για τον σχηματισμό των κανόνων ασάφειας περιγράφονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το ασαφές μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε δύο στάδια: Πρώτα εκπαιδεύτηκε με μεταβλητές εισόδου την προβλεπόμενη ταχύτητα και τον λόγο της εξίσωσης 5.35 σε ένα σύνολο δεδομένων. Μετά εκτελέστηκε και δημιουργήθηκε συνολικά το Μοντέλο I, όπως θα περιγραφεί στην επόμενη ενότητα. Το Μοντέλο I εκτελέστηκε για όλον τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης σε ένα ανεξάρτητο από το προηγούμενο σύνολο δεδομένων. Στο δεύτερο στάδιο, ενσωματώθηκε στην είσοδο του ασαφούς μοντέλου το βήμα της πρόβλεψης και το μοντέλο εκπαιδεύτηκε ξανά, χρησιμοποιώντας παράλληλα και τις προβλέψεις της παραπάνω εκτέλεσης του Μοντέλου I. Η εκπαίδευση της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και στα δύο στάδια ολοκληρώθηκε σε τρεις κύκλους και διήρκεσε ενενήντα λεπτά περίπου για την περίπτωση του αιολικού πάρκου Golagh.

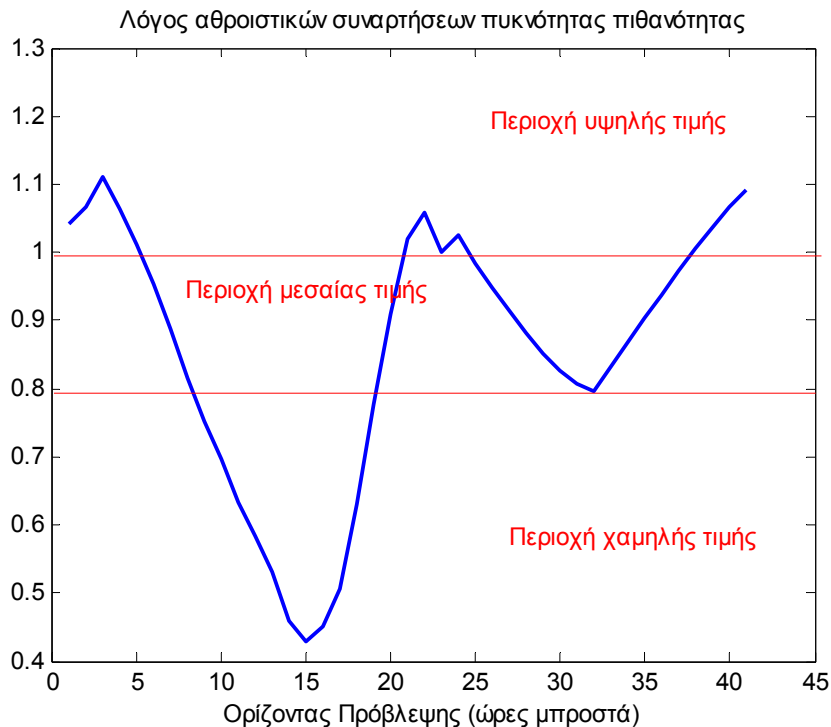
Για την εκπαίδευση της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, είναι αναγκαία η εφαρμογή μιας μεταβλητής που να λειτουργεί σαν διάνυσμα στόχου. Αυτή η μεταβλητή θα πρέπει να παρέχει την ποσοστιαία απόκλιση της προβλεπόμενης ταχύτητας από την πραγματική. Σαν μία τέτοια μεταβλητή επιλέχθηκε η διαφορά της πραγματικής τιμής της αιολικής ισχύος με την τιμή της ισχύος που προκύπτει από το μοντέλο της καμπύλης ισχύος που περιγράφηκε στην ενότητα 5.4 αντικαθιστώντας την προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητα του ανέμου που πρόκειται να αξιολογηθεί. Η διαφορά αυτή κανονικοποιήθηκε με την ονομαστική τιμή του υπό μελέτη αιολικού πάρκου, ώστε να παίρνει τιμές μεταξύ του μηδέν και ένα. Το πλεονέκτημα αυτής της επιλογής ως διάνυσμα στόχου της διαδικασίας εκπαίδευσης είναι ότι το μοντέλο καμπύλης ισχύος λαμβάνει υπ' όψιν και την διεύθυνση του ανέμου.

Παράλληλα με τον προσδιορισμό των παραμέτρων του προτεινόμενου ασαφούς μοντέλου, εκτελείται και ο αλγόριθμος επιλογής των πιο κατάλληλων κανόνων ασάφειας. Γενικά, οι κανόνες ασάφειας διαμορφώνονται με σχεδόν ίδιο τρόπο σε όλες τις περιπτώσεις πάρκων που εκτελέστηκε το ασαφές μοντέλο. Τυπικά, αν ο λόγος 5.35 έχει υψηλή τιμή και η τιμή της ταχύτητας είναι χαμηλή, τότε γίνεται αντιληπτό ότι αυτή η ισχύς δεν θα μπορούσε να προέλθει από μία τέτοια ταχύτητα. Με τον ίδιο τρόπο το ασαφές μοντέλο εντοπίζει τις περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλή ενώ η αιολική ισχύς είναι χαμηλή. Αναφέρεται πάλι, ότι μπορούμε να θεωρήσουμε χωρίς σημαντικό σφάλμα ότι η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει πιο γρήγορα από την αιολική ισχύ και βάση αυτής της θεώρησης συγκρίνεται η αιολική ισχύ της τρέχουσας ώρας με την ταχύτητα του ανέμου της επόμενης. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο παραδείγματα για να φανεί πώς λειτουργούν οι κανόνες ασάφειας και γενικά η απόδοση του μοντέλου. Το πρώτο παράδειγμα αναφέρεται στην πρόβλεψη που έγινε στις 01:00 της 01/09/2001 (σχήματα 5.5, 5.5, 5.7, 5.8), ενώ το δεύτερο παράδειγμα είναι ένα στιγμιότυπο από το πρώτο βήμα της πρόβλεψης που έχει διάρκεια τρεις μέρες (σχήματα 5.9, 5.10, 5.11, 5.12). Στα σχήματα 5.5 και 5.9 παρουσιάζεται ο λόγος των τιμών των αθροιστικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου. Η αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στα σχήματα 5.6 και 5.10. Τα σχήματα 5.7 και 5.11 δείχνουν την έξοδο της μονάδας αξιολόγησης και τέλος, στα

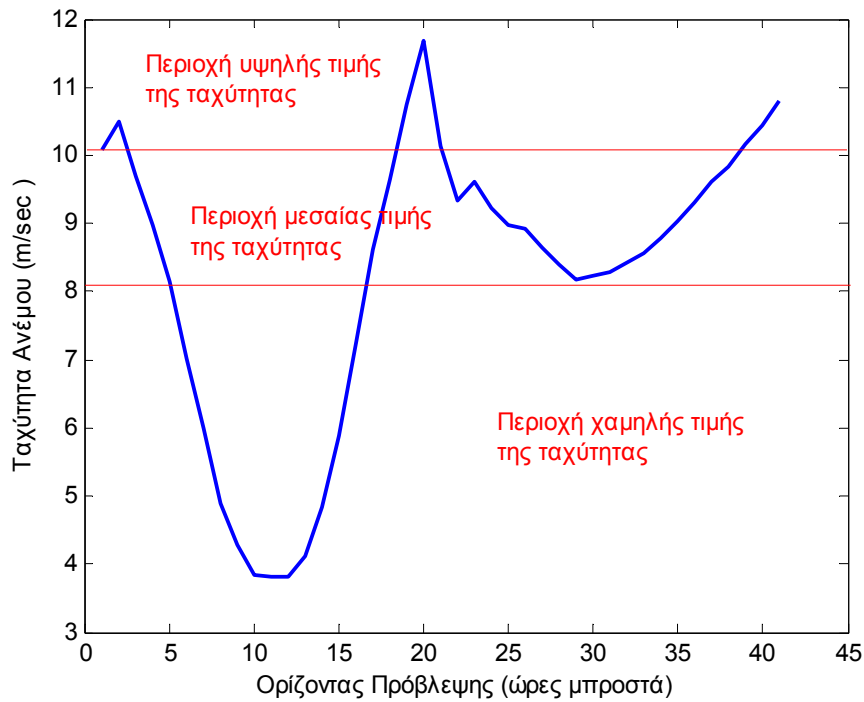
5.8 και 5.12 παρουσιάζεται η πραγματική τιμή της αιολικής ισχύος και η έξοδος του μοντέλου καμπύλης ισχύος που αναφέρεται ως η 'θεωρητική' τιμή της αιολικής ισχύος.

Στο πρώτο παράδειγμα, υπάρχουν μεγάλα σφάλματα στα πρώτα έξι βήματα της πρόβλεψης και μεταξύ των χρονικών βημάτων 17 και 23. Στα πρώτα έξι βήματα, ο λόγος και η ταχύτητα μειώνονται ανάλογα με την πραγματική τιμή της ισχύος και εισέρχονται στην 'περιοχή μεσαίας τιμής'. Στο τρίτο χρονικό βήμα, που η ταχύτητα φεύγει από την 'περιοχή υψηλής τιμής' ενώ ο λόγος παραμένει στην αντίστοιχη περιοχή, η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αρχίζει να δίνει ένδειξη για την χαμηλή ποιότητα της πρόβλεψης της ταχύτητας. Παρατηρούμε ότι η μονάδα χρειάζεται δύο με τρεις ώρες για να βεβαιωθεί ότι η πρόβλεψη της ταχύτητας είναι 'φτωχή'. Το γεγονός αυτό θεωρείται ως πλεονέκτημα για το ασαφές μοντέλο γιατί σε περιπτώσεις που η αιολική ισχύ μεταβάλλεται απότομα χωρίς να έχει μεταβληθεί ανάλογα η ταχύτητα του ανέμου, σωστά αποφεύγει να χαρακτηρίσει την πρόβλεψη της ταχύτητας ως ανακριβή. Τέτοιες περιπτώσεις, για παράδειγμα, είναι όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στο όριο αποκοπής, η μικρή τιμή της αιολικής ισχύος δεν συνεπάγει και λανθασμένη πρόβλεψη του ανέμου.

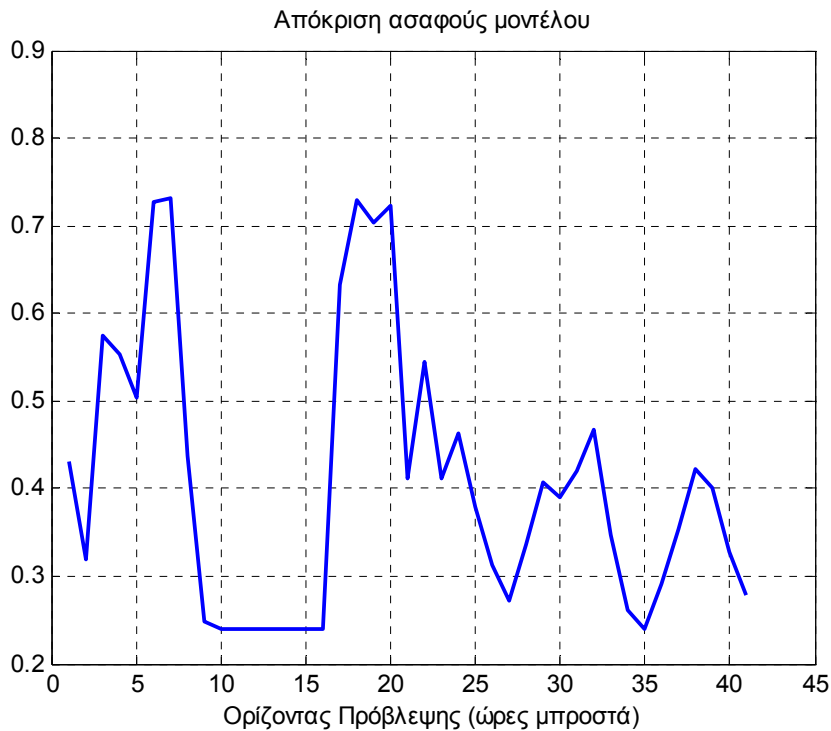
Στην δεύτερη περίπτωση που υπάρχει μεγάλη απόκλιση της 'θεωρητικής' από την πραγματική τιμή της αιολικής ισχύος, η μονάδα αξιολόγησης εντοπίζει αμέσως το πρόβλημα, αφού η ταχύτητα αυξάνεται και εισέρχεται στην 'περιοχή μεσαίας τιμής' πιο γρήγορα σε σχέση με τον λόγο. Η ταχύτητα του ανέμου εισέρχεται προς στιγμήν στο εικοστό βήμα, σε αντίθεση με τον λόγο που εισέρχεται στο εικοστό πρώτο βήμα στην 'περιοχή υψηλής τιμής' και παραμένει. Στη συνέχεια από το εικοστό βήμα και μετά η ταχύτητα μειώνεται απότομα και εισέρχεται ξανά στην 'περιοχή μεσαίας τιμής' ενώ ο λόγος παραμένει στην 'περιοχή υψηλής τιμής'.



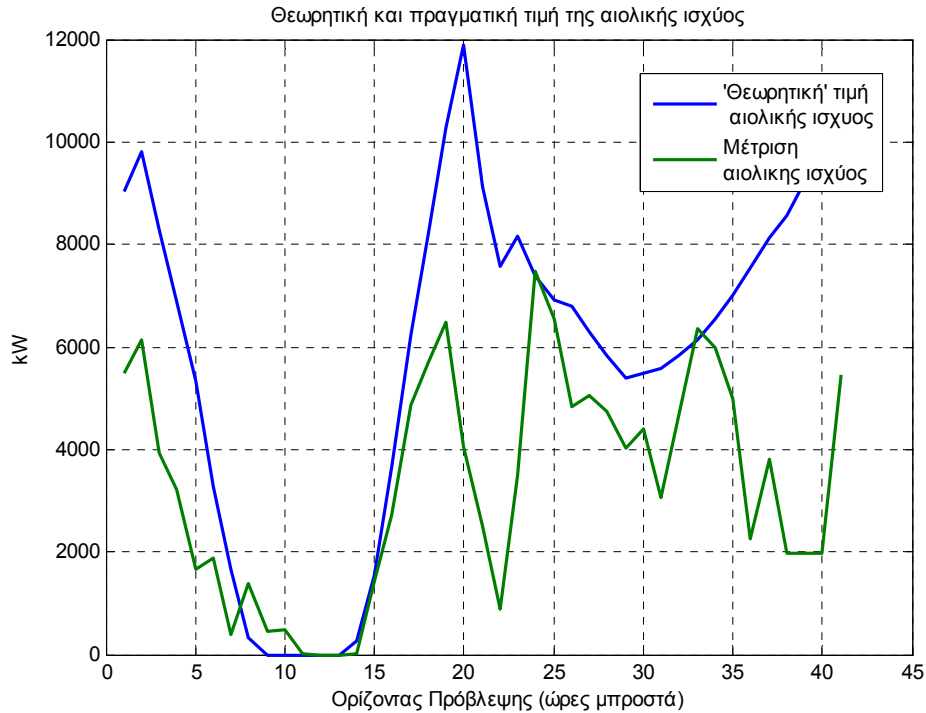
Σχήμα 5.5 Ο λόγος των τιμών των αθροιστικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου κατά την πρόβλεψη του Μοντέλου I που έγινε στις 01:00 της 01/09/2001.



Σχήμα 5.6 Η ταχύτητα του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που ελήφθησαν στις 00:00 της 30/08/2001 από το μοντέλο HIRLAM.



Σχήμα 5.7 Η έξοδος του ασαφούς μοντέλου κατά την πρόβλεψη του Μοντέλου I που έγινε στις 01:00 της 01/09/2001.



Σχήμα 5.8 Η 'θεωρητική' και η πραγματική τιμή της αιολικής ισχύος

Τέλος, 'φτωχές' προβλέψεις παρατηρούνται και στα τελευταία βήματα της πρόβλεψης. Στα χρονικά βήματα όμως αυτά, η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του λόγου, είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αν και εντοπίζει το πρόβλημα, αδυνατεί να πάρει μία σίγουρη απόφαση.

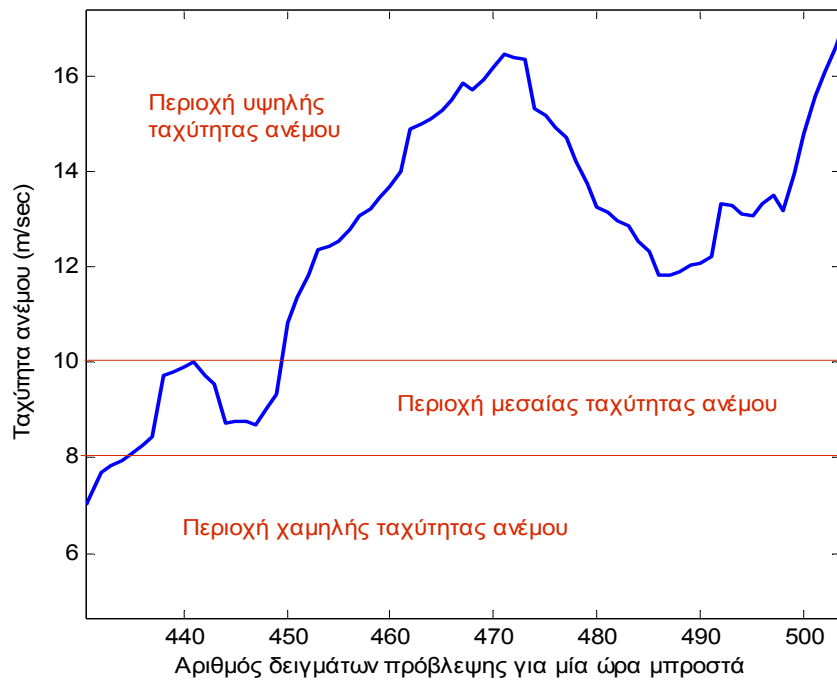
Στο δεύτερο παράδειγμα που περιγράφεται από τα σχήματα 5.9, 5.10, 5.11 και 5.12 και αντιστοιχεί στο πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης, παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις της πραγματικής από την 'θεωρητική' τιμή της αιολικής ισχύος στις περισσότερες περιπτώσεις που παρουσιάζονται. Πρέπει να αναφερθεί ότι το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται το παράδειγμα είναι συνεχές. Στις πρώτες είκοσι ώρες υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής και παράλληλα παρατηρείται μία καθυστέρηση δύο τριών ωρών στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου, κάτι που εντοπίζεται επ' ακριβώς από το ασαφές μοντέλο. Επίσης στις περιπτώσεις 443 και 444, υπάρχει ένα χωρικό σφάλμα το οποίο αναγνωρίζεται ουσιαστικά. Στη συνέχεια που η ταχύτητα αυξάνεται, οι διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος οφείλονται, είτε σε απότομες μεταβολές της διεύθυνσης, είτε σε αποτελέσματα σκίασης και αποκοπής ανεμογεννητριών. Στις περιπτώσεις αυτές η μονάδα αξιολόγησης δεν αντιδράει, εφόσον δεν μπορεί να αμφισβητηθεί η ποιότητα της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου. Τέλος, στις περιπτώσεις 486, 489, 490 και 491 όπου υπάρχει ένα μεγάλο χωρικό σφάλμα της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού εντοπίζει εύστοχα την χαμηλή ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων.

Στα παραπάνω δύο παραδείγματα φαίνεται η μεθοδολογία που ακολουθεί η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και η ικανότητα της στον εντοπισμό των σφαλμάτων της ταχύτητας του ανέμου μέσω της θεωρητικής τιμής της αιολικής ισχύος. Σημειώνεται ότι ο εντοπισμός των χωρικών σφαλμάτων και των σφαλμάτων φάσης [50] αποτελεί ακόμη πρόκληση για τους ερευνητές της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Το ασαφές μοντέλο όμως που προτείνεται στη παρούσα διατριβή, παρέχει σημαντική

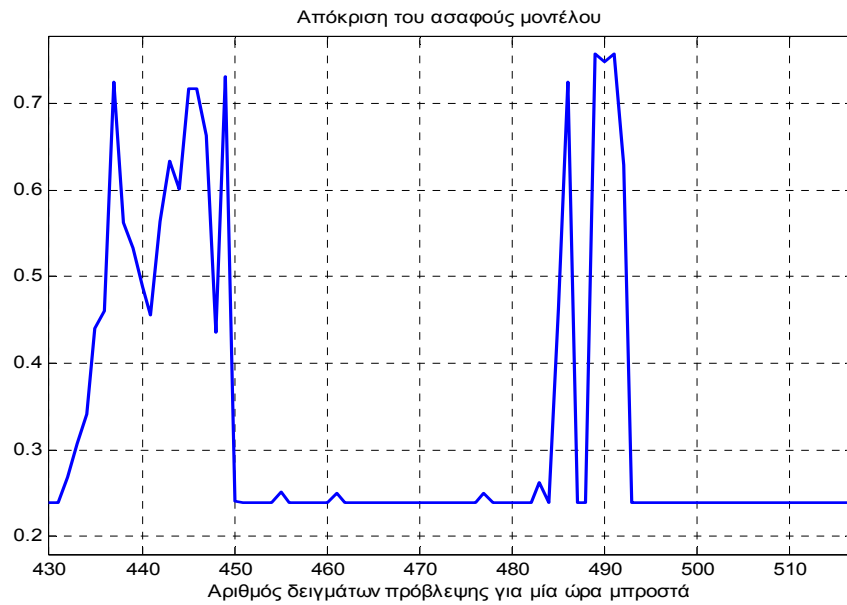
πληροφορία για τέτοιου είδους σφάλματα και γενικά με μεγάλη βεβαιότητα καθοδηγεί το Μοντέλο I ώστε να προβλέπει πιο σωστά.



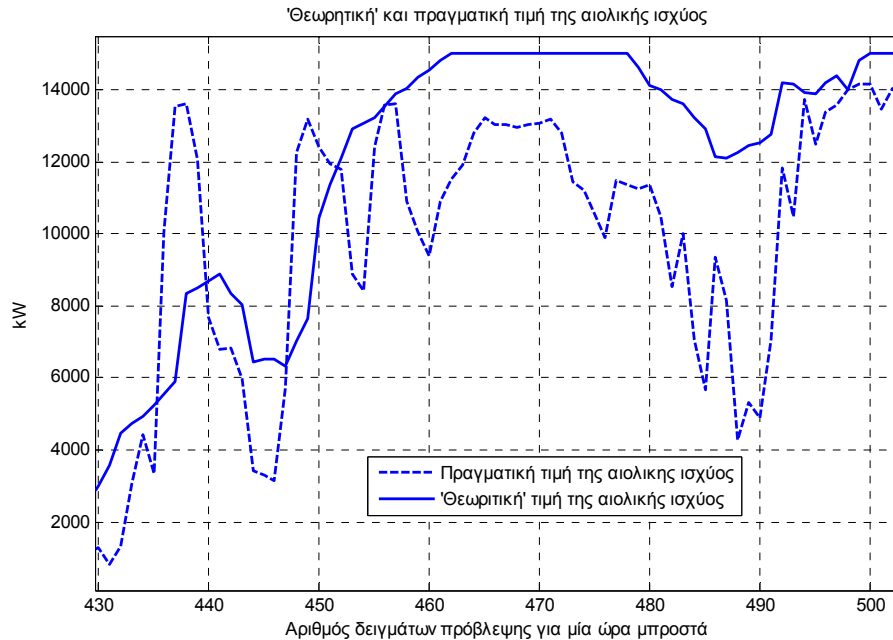
Σχήμα 5.9 Ο λόγος των τιμών των αθροιστικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου που υπολογίστηκε κατά το πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.



Σχήμα 5.10 Η ταχύτητα του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις για το πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

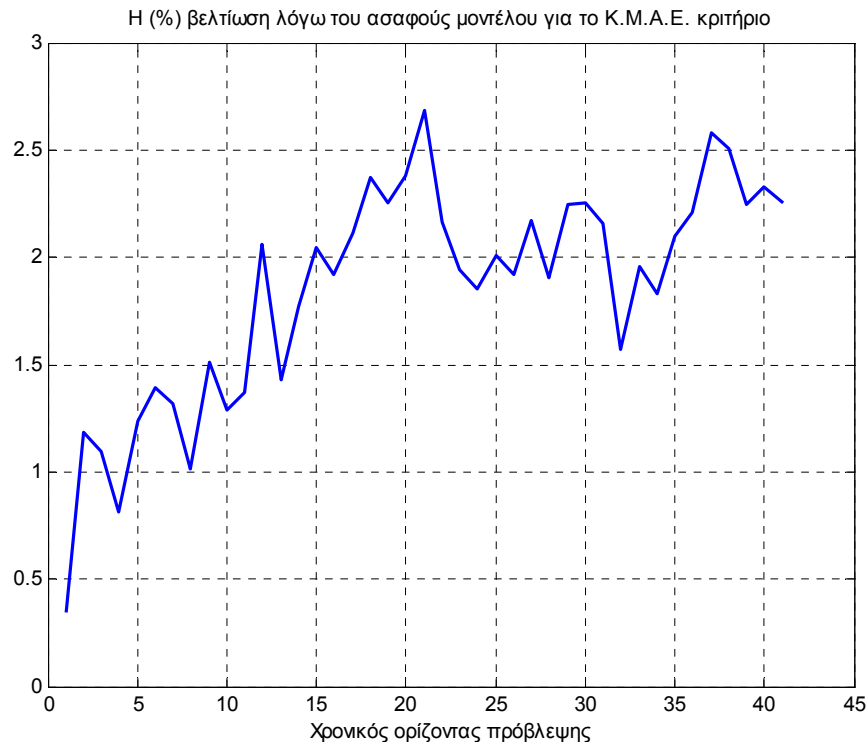


Σχήμα 5.11 Η έξοδος του ασαφούς μοντέλου κατά το πρώτο βήμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.



Σχήμα 5.12 Η αντίστοιχη 'θεωρητική' και η πραγματική τιμή της αιολικής ισχύος.

Συνοψίζοντας, οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού που παρέχουν την απαιτούμενη γνώση για την ατμοσφαιρική κατάσταση στην περιοχή του αιολικού πάρκου, ελέγχονται με σκοπό να αναγνωριστούν οι ανακριβείς προβλέψεις που επηρεάζουν περισσότερο τις προβλέψεις της αιολικής ισχύος. Έτσι λοιπόν, εφαρμόστηκαν τεχνικές ασαφούς λογικής με τέτοιο τρόπο που να εντοπίζονται κυρίως τα χωρικά σφάλματα και τα σφάλματα φάσης του μετεωρολογικού μοντέλου. Η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που δημιουργήθηκε παρέχει έναν αριθμό από 0 μέχρι 1 όπου με τις ακρότατες τιμές χαρακτηρίζει με σιγουριά αν η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου είναι ακριβής ή φτωχή. Παράλληλα, με τις ενδιάμεσες τιμές προειδοποιεί ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προκύψει σφάλμα με την τρέχουσα πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 5.13 Η επί τοις εκατό βελτίωση του μοντέλου εκτίμησης ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού

5.6.5 Η μονάδα πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Η πρόβλεψη του Μοντέλου I βασίζεται στην απόφαση της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Το ασαφές μοντέλο παρέχει πληροφορία σχετικά με την ποιότητα της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου που προέρχεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, δίνοντας έναν αριθμό που κυμαίνεται από μηδέν μέχρι ένα. Με μηδέν χαρακτηρίζει τις ‘καλές’ προβλέψεις και με ένα τις ‘φτωχές’ προβλέψεις. Μπορεί, όμως, η τιμή που θα δώσει να είναι ένας οποιοσδήποτε αριθμός μεταξύ του μηδέν και του ένα. Αυτό συμβαίνει όταν το ασαφές μοντέλο δεν είναι βέβαιο με την απόφασή του. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού κάνει εκτίμηση για την ποιοτική και όχι για την ποσοτική αβεβαιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Αντίθετα, στο επόμενο κεφάλαιο που περιγράφεται ένα διαφορετικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος γίνεται και ποσοτική εκτίμηση της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου. Όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο που παρουσιάζεται η απόδοση των συστημάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, η εκτίμηση της αβεβαιότητας έστω μόνο ποσοτικά, είχε σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια της πρόβλεψης.

Η λογική που ακολουθεί το Μοντέλο I για τον βέλτιστο χειρισμό της υπάρχουσας γνώσης και κυρίως αυτής που προέρχεται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, είναι να διαχωρίσει τις περιπτώσεις που η υπάρχουσα γνώση είναι επαρκής για ακριβείς προβλέψεις με τις περιπτώσεις που η αβεβαιότητα των δεδομένων που χειρίζεται και κατ’ επέκταση της πρόβλεψης που θα προκύψει, είναι μεγάλη. Σκοπός αυτής της λογικής είναι να μην επηρεάζονται οι προβλέψεις με μικρή αβεβαιότητα με αυτές που είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι θα έχουν μεγάλο σφάλμα. Ένα μοντέλο πρόβλεψης, που μπορεί να είναι ένα νευρωνικό δίκτυο, κατά την εκπαίδευση του, προσπαθεί να ‘μάθει’ όλες τις περιπτώσεις του προβλήματος με αποτέλεσμα να μην καταφέρει να αποκτήσει ξεκάθαρη εικόνα για την κάθε

επιμέρους. Για την περίπτωση της αιολικής ισχύος, εφόσον δεν υπάρχει τρόπος να αναγνωριστούν και να διαχωριστούν οι ακριβείς από τις ‘φτωχές’ προβλέψεις καιρού κατ’ ευθείαν μέσω των δεδομένων εισόδου μόνο από ένα νευρωνικό δίκτυο, μία ακριβής πρόβλεψη μπορεί να θεωρηθεί ‘φτωχή’ και το αντίστροφο.

Έτσι λοιπόν, απομονώνονται οι περιπτώσεις που η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου έχει μεγάλη αβεβαιότητα, από το σύνολο δεδομένων. Ο διαχωρισμός του συνόλου των δεδομένων γίνεται με βάση την απόκριση της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Εκτός όμως, από τις περιπτώσεις που η έξοδος της μονάδας αξιολόγησης ισούται με ένα, δηλαδή η πρόβλεψη της ταχύτητας είναι σίγουρα ανακριβής, συμπεριλαμβάνονται στο νέο σύνολο δεδομένων και οι περιπτώσεις που το ασαφές μοντέλο είναι σχεδόν σίγουρο. Δηλαδή, στις ‘φτωχές’ προβλέψεις της ταχύτητας ενσωματώνονται και αυτές, που η αντίστοιχη έξοδος του ασαφούς μοντέλου είναι μεγαλύτερη από 0.5.

Με τα δύο νέα σύνολα δεδομένων που σχηματίζονται με βάση την απόκριση της μονάδας αξιολόγησης, εκπαιδεύονται δύο διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης. Το πρώτο νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει τις περιπτώσεις που η προβλεπόμενη ταχύτητα του ανέμου είναι ακριβής και γι’ αυτό και έχει καλύτερη απόδοση. Αντίθετα, το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο προσπαθεί να χειριστεί με τον καλύτερο τρόπο την μεγάλη αβεβαιότητα που περιέχεται στις ‘φτωχές’ προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου. Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος κάθε φορά που εκτελείται το Μοντέλο I παρέχεται πάντα από ένα από τα δύο νευρωνικά δίκτυα.

Γενικά η διαδικασία εκτέλεσης που ακολουθεί το Μοντέλο I είναι η εξής: Στην αρχή, αποφασίζει η μονάδα αξιολόγησης αν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι καλής ποιότητας ή όχι, τότε το νευρωνικό δίκτυο το οποίο έχει εκπαιδευτεί με τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην ένδειξη της μονάδας αξιολόγησης, αναλαμβάνει να δώσει την τελική πρόβλεψη. Δηλαδή αν η έξοδος της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι μικρότερη ή ίση από 0.5, τότε την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, την παρέχει το νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης που έχει εκπαιδευτεί με ακριβείς προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου. Ειδικά, αν είναι μεγαλύτερη του 0.5, εκτελείται το άλλο νευρωνικό δίκτυο που έχει μάθει από τις ‘φτωχές’ αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Τα δύο νευρωνικά δίκτυα που εφαρμόζονται στο Μοντέλο I, λαμβάνουν στην είσοδο τους τις ίδιες μεταβλητές. Οι μεταβλητές εισόδου I είναι η πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος από την ώρα της πρόβλεψης, οι προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου που αντιστοιχούν στην ώρα της πρόβλεψης $t+h$ και στην επόμενη της $t+h+1$, η πρόβλεψη της διεύθυνσης του ανέμου και η ώρα της πρόβλεψης $t+h$. Η είσοδος τους έχει την παρακάτω μορφή.

$$I(t+h / t) = [P(t+h-1), WS(t+h), WS(t+h+1), WD(t+h), H(t+h)] \quad (5.37)$$

Όπου:

P είναι η παραγωγή της αιολικής ισχύος σε MW,

WS είναι η ταχύτητα του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε m/sec,

WD είναι η διεύθυνση του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σε rad,

H είναι η ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη (1-24) και

h είναι το χρονικό βήμα της πρόβλεψης.

Πρέπει να σημειωθεί και δω, όπως στην περιγραφή της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, ότι για τα μεγαλύτερα από ένα, χρονικά βήματα της πρόβλεψης, λαμβάνεται σαν πιο πρόσφατη τιμή της αιολικής ισχύος η πρόβλεψη του Μοντέλου I της προηγούμενης ώρας.

Για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές της ταχύτητας του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που αντιστοιχούν, η μία στην ώρα της πρόβλεψης και η άλλη στην επόμενη ώρα από αυτή που γίνεται η πρόβλεψη. Η επιλογή αυτή έγινε εμπειρικά και φάνηκε ότι η γνώση της περεταίρω εξέλιξης της ταχύτητας του ανέμου

είναι σημαντική για την εκτίμηση της αιολικής παραγωγής. Στην ουσία, όταν γίνεται γνωστή η τάση του ανέμου να αυξηθεί ή να μειωθεί, παρέχεται περισσότερη πληροφορία για την κατάσταση της ατμόσφαιρας την χρονική στιγμή που γίνεται η πρόβλεψη.

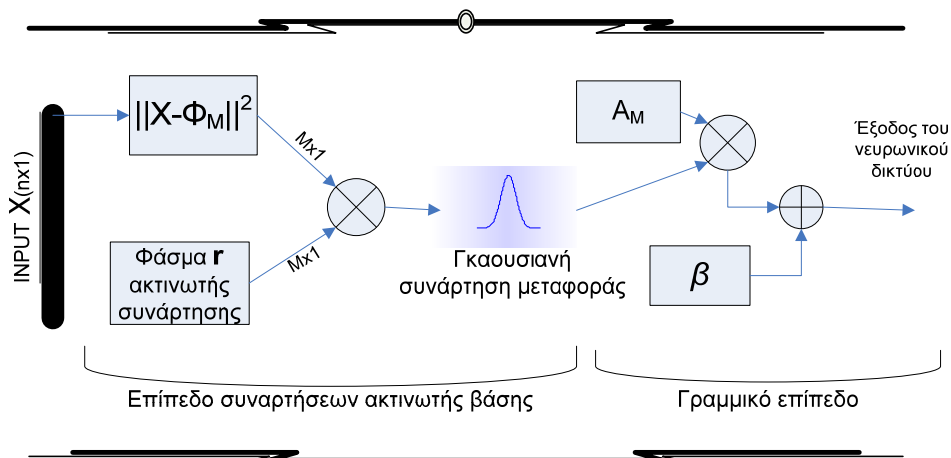
Ένα χαρακτηριστικό ενός δικτύου ακτινωτής βάσης που το κάνει κατάλληλο για μια εφαρμογή πρόβλεψης παραγωγής αιολικής ισχύος, είναι ότι η απόδοση του μπορεί να βελτιωθεί με κανονικοποίηση των μεταβλητών εισόδου. Δηλαδή, θέτοντας έναν συντελεστή σε κάθε μεταβλητή εισόδου κατά την διάρκεια της προεργασίας των δεδομένων, βελτιστοποιείται η απόδοση του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης. Στην πραγματικότητα, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεταβλητές που παρουσιάζουν την υψηλότερη συσχέτιση με την έξοδο του νευρωνικού δικτύου. Η αρχιτεκτονική των δικτύων ακτινωτής βάσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Για κάθε λοιπόν δείγμα που δέχονται για να δώσουν πρόβλεψη, υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση του με τον πίνακα βαρών του πρώτου επιπέδου και το αποτέλεσμα περνάει από την συνάρτηση μεταφοράς f .

$$f(x) = e^{-x^2} \quad (5.38)$$

Και η έξοδος από το πρώτο επίπεδο έχει τη μορφή:

$$a_i = f\left(\sum_{j=1}^n (\Phi_{m,j} - X_j)^2 * r_m\right) \quad (5.39)$$

Όπου $\Phi_{m,j}$ είναι ο πίνακας βαρών του πρώτου επιπέδου (οι συναρτήσεις βάσεις) και r_m η κλίση του που δίνεται από την εξίσωση (5.9), το n ο αριθμός των στοιχείων του πίνακα εισόδου και m είναι ο αριθμός των νευρώνων. Άρα η έξοδος του κρυμμένου στρώματος εξαρτάται από τους νευρώνες του οι οποίοι είναι πλησιέστερα από το δείγμα εκτέλεσης. Τέλος η έξοδος του νευρωνικού προκύπτει από την αντικατάσταση της εξόδου του κρυμμένου στρώματος από την γραμμική εξίσωση του στρώματος εξόδου.



Σχήμα 5.14 Αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο μοντέλο η έξοδος του πρώτου στρώματος ενός νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης αλλάζει αν μεταβάλουμε την τάξη μεγέθους μίας από τις μεταβλητές εισόδου με αποτέλεσμα να αυξάνεται ή να μειώνεται η επίδραση της στη τελική έξοδο του δικτύου ανάλογα τη μεταβολή. Αυτό φαίνεται στο επόμενο παράδειγμα:

Έστω τώρα ότι ο πίνακας βαρών του κρυμμένου επιπέδου έχει δύο διανύσματα (δηλ. το κρυμμένο στρώμα έχει δύο νευρώνες) που αποτελούνται από δύο μεταβλητές, την αιολική παραγωγή ισχύος και την ταχύτητα του ανέμου.

$$\Phi(1) = \{2KW, 7m/sec\}, \quad \Phi(2) = \{6KW, 8m/sec\}$$

As θεωρήσουμε ως δείγμα ελέγχου το παρακάτω

$$\text{Δείγμα} = \{5KW, 7.1m/sec\}$$

Τότε η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου θα είναι

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

Δηλαδή από την αποτίμηση του δείγματος η έξοδος του νευρωνικού δικτύου θα εξαρτάται από το δεύτερο νευρώνα και κατ' επέκταση από την παραγόμενη ισχύ. Έτσι, μεγαλώνοντας την τάξη μεγέθους μίας μεταβλητής εισόδου ενδυναμώνουμε την επίδρασή της στην έξοδο.

Στη παρούσα εφαρμογή η είσοδος I διαμορφώνεται ως εξής:

$$I(t+h/t) = f(P(t+h-1), WS(t+h)*20, WS(t+h+1)*10, WD(t+h), H(t+h)/480) \quad (5.40)$$

Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου έχουν την μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου. Αντίθετα, η ώρα της πρόβλεψης που εισάγεται ως επεξηγηματική μεταβλητή εισόδου, δεν έχει μεγάλη συσχέτιση με την αντίστοιχη τιμή της αιολικής ισχύος και γι' αυτό μειώνεται κατά δύο τάξεις μεγέθους. Η διεύθυνση της ταχύτητας λειτουργεί επίσης ως επεξηγηματική μεταβλητή αλλά επειδή έχει μεγαλύτερη σημαντικότητα από την ώρα που γίνεται η πρόβλεψη παραμένει σε rad. Τέλος ενδιαφέρον έχει σημαντικότητα της τιμής της αιολικής ισχύος που μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το χρονικό βήμα της πρόβλεψης. Στα πρώτα χρονικά βήματα, η τιμή της αιολικής ισχύος είναι μεγάλη επειδή το σφάλμα της πρόβλεψής της είναι πολύ μικρό. Αντίθετα, παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερα χρονικά βήματα πρόβλεψης από το τέταρτο, η ακρίβεια της πρόβλεψης αυξάνεται μειώνοντας την βαρύτητα της αιολικής ισχύος στην είσοδο των νευρωνικών δικτύων. Έτσι, η τιμή της αιολικής ισχύος που εφαρμόζεται στις προβλέψεις πέρα από τέσσερις ώρες μπροστά, προσαρμόζεται σε GW. Στην πραγματικότητα εκπαιδεύτηκαν τα νευρωνικά δίκτυα δύο φορές: τη πρώτη φορά με τις τιμές της αιολικής ισχύος στο σύνολο δεδομένων να είναι σε MW και την δεύτερη να είναι σε GW. Έτσι, για προβλέψεις μέχρι και τέσσερις ώρες μπροστά, εφαρμόζονται τα νευρωνικά δίκτυα που εκπαιδεύτηκαν την πρώτη φορά, ενώ για τα υπόλοιπα χρονικά βήματα, τα νευρωνικά δίκτυα που εκπαιδεύτηκαν την δεύτερη φορά.

Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης έγινε με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ο κατάλληλος αριθμός των συναρτήσεων βάσης παραμένει πολύ κρίσιμος για την απόδοση των αντίστοιχων νευρωνικών δικτύων. Ο αριθμός αυτός καθορίζει την πολυπλοκότητα του δικτύου και παράλληλά την ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης. Ένα νευρωνικό δίκτυο με πολύ λίγες συναρτήσεις βάσεις δίνει προβλέψεις με υψηλή πόλωση στις συναρτήσεις αυτές και με χαμηλή διασπορά, ενώ ο μεγάλος αριθμός συναρτήσεων βάσης αποφέρει προβλέψεις με υψηλή διασπορά αλλά προσαρμοσμένες στα δεδομένα εκπαίδευσης (χαμηλή πόλωση). Έτσι η καλύτερη απόδοση του νευρωνικού δικτύου λαμβάνεται από την εξισορρόπηση των δύο αυτών παραμέτρων έτσι ώστε το δίκτυο να αποδίδει εξίσου καλά τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης όσο και στο σύνολο αποτίμησης. Με σκοπό την βέλτιστη γενίκευση των νευρωνικών δικτύων δημιουργούμε ένα νέο σύνολο δεδομένων (σύνολο επικύρωσης) που προέρχεται από το σύνολο εκπαίδευσης και δημιουργείται με την συλλογή τυχαίων δειγμάτων μέσα από το σύνολο αυτό. Έτσι υπάρχουν διαθέσιμα δύο σύνολα δεδομένων ανεξάρτητα από το σύνολο εκπαίδευσης που το ένα είναι χρονικά συνεχόμενο και το άλλο τυχαίο. Για να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων, εφαρμόστηκαν δύο κριτήρια στα παραπάνω δύο σύνολα: το Μπιασιανό κριτήριο πληροφωρίας [136] και ο αμερόληπτος εκτιμητής ρίσκου του Stein [137]. Το πρώτο κριτήριο περιγράφεται ειδικά για τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινωτής βάσης με την παρακάτω εξίσωση:

$$BIC(M) = (N / 2\sigma^2) [e(M) + \frac{M+1}{N} (\log N)\sigma^2] \quad (5.41)$$

ενώ το δεύτερο από την εξίσωση:

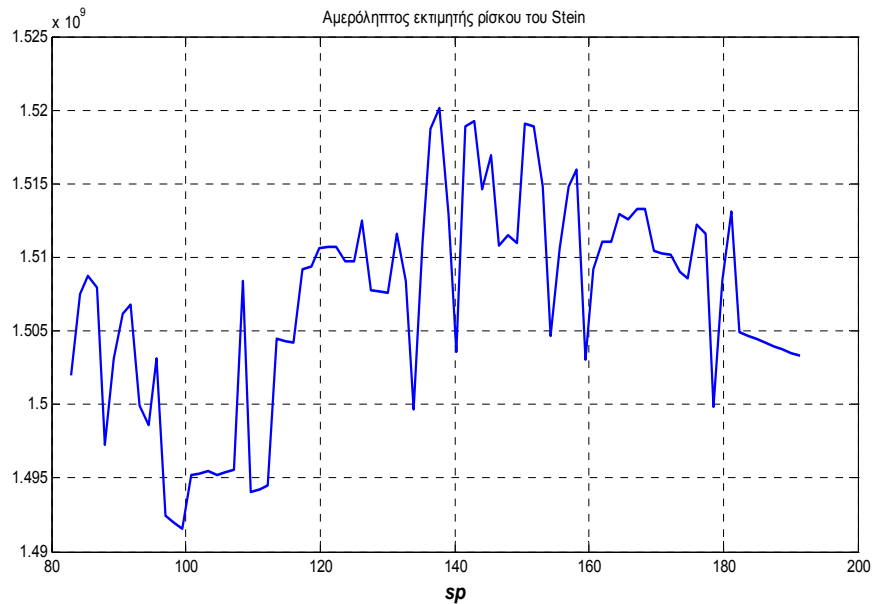
$$SURE(M) = e(M) - N\sigma^2 + 2\sigma^2(M + 1) \quad (5.42)$$

όπου e είναι το τετραγωνικό σφάλμα του νευρωνικού δικτύου που περιέχει M συναρτήσεις βάσης, το N είναι ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων του συνόλου επικύρωσης και αποτίμησης και σ^2 η διασπορά που μπορεί να εκτιμηθεί από το τετραγωνικό σφάλμα του μοντέλου.

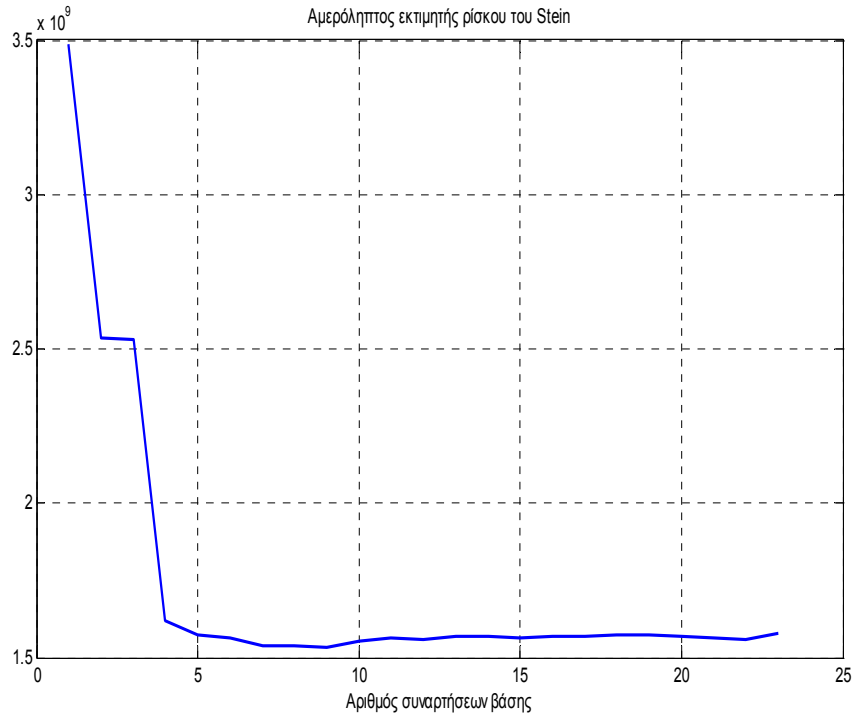
Με κάθε προσθήκη μίας νέας συνάρτησης βάσης στο νευρωνικό δίκτυο υπολογίζονται τα δύο κριτήρια. Ο βέλτιστος αριθμός των συναρτήσεων βάσης προσδιορίζεται όταν και τα δύο κριτήρια εμφανίζουν ταυτόχρονα ελάχιστο.

Μία βοηθητική μέθοδος που εφαρμόστηκε για την γενίκευση του νευρωνικού δικτύου στα σύνολα που δε έχει δει ποτέ, είναι η αποτίμηση του νευρωνικού δικτύου που εκπαιδεύεται, στα σύνολα επικύρωσης και αποτίμησης ξεχωριστά. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνετε η γενίκευση του νευρωνικού δικτύου επιλέγοντας τις συναρτήσεις βάσης που αποδίδουν καλύτερα και στα δύο σύνολα ταυτόχρονα.

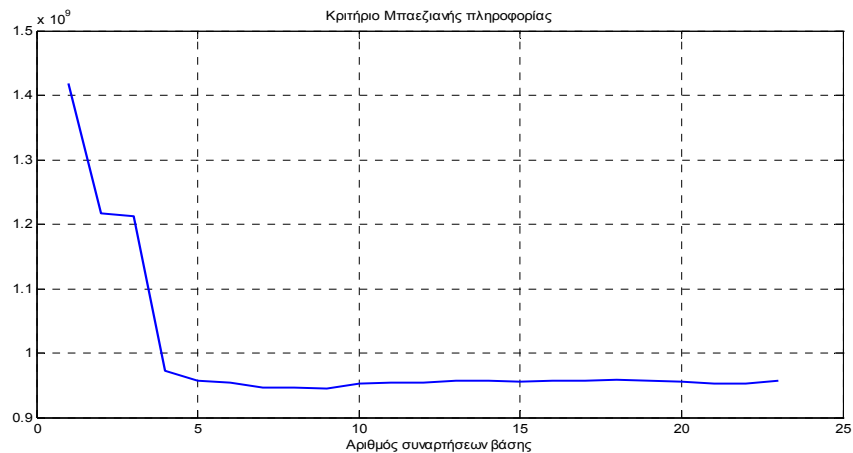
Έτσι, για να εκτιμηθούν οι παράμετροι του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που αντιστοιχεί στα δεδομένα με τις ακριβείς αριθμητικές προβλέψεις καιρού, στην αρχή εκτελέστηκε ο αλγόριθμος εκπαίδευσης για διαφορές τιμές του sp που από την εξίσωση (5.9) καθορίζει το φάσμα των συναρτήσεων βάσεων. Έτσι, επιλέχθηκε το φάσμα που αντιστοιχεί στη μικρότερη τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου του Stein. Στο σχήμα 5.15 φαίνεται η τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου του Stein για κάθε τιμή του sp . Στην συνέχεια και με φάσμα συναρτήσεων βάσης αυτή που καθορίστηκε πριν, εκπαιδεύτηκε το νευρωνικό δίκτυο για ένα μεγάλο αριθμό νευρώνων και επιλέχθηκε σαν βέλτιστος αριθμός εκείνος για τον οποίο συγκλίνουν τα κριτήρια γενίκευσης. Οι τιμές των κριτηρίων γενίκευσης φαίνονται στα σχήματα 5.16 (α) και (β).



Σχήμα 5.15 Η τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου του Stein για διάφορες τιμές του sp της εξίσωσης (5.9)



(α)



(β)

Σχήμα 5.16 α) Η τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου και β) η τιμή του κριτηρίου Μπαεζιανής πληροφορίας συναρτήσει του αριθμού των συναρτήσεων βάσης.

Από το σχήμα 5.15, φαίνεται ότι η τιμή του s_p που ελαχιστοποιείται ο αμερόληπτος εκτιμητής ρίσκου είναι περίπου 100. Ενώ στα σχήματα 5.16, παρατηρείται ότι τα κριτήρια γενίκευσης συμφωνούν στους εννιά νευρώνες.

Με τον ίδιο τρόπο, καθορίστηκαν οι παράμετροι και των άλλων νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και με την αποτίμησή τους αποδείχθηκε ότι σχεδιάστηκαν με τον καλύτερο τρόπο.

5.7 Συμπεράσματα

Το πρώτο διάστημα της διατριβής δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος Μοντέλο I που περιγράφηκε περιέχει μία μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που χαρακτηρίζει τις καιρικές προβλέψεις σε «καλές» ή «ανεπαρκείς». Έτσι η πρόβλεψη του μοντέλου βασίζεται στην ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Το Μοντέλο I είναι ικανό να λειτουργήσει on-line. Το Μοντέλο I έχει την δυνατότητα να λαμβάνει τα δεδομένα εισόδου του μέσω κάποια βάσης δεδομένων ή απ' ευθείας μέσω του διαδικτύου. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί ένα δεύτερο μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, το Μοντέλο II, με διαφορετική και με πιο αποτελεσματική δομή που βασίζεται στην κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε λεπτομερής περιγραφή των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και των ασαφών μοντέλων, εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και για την ανάπτυξη του Μοντέλου II. Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων έγινε με την ορθογώνια μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, με τη βοήθεια δύο κριτηρίων γενίκευσης, τον αμερόληπτο εκτιμητή ρίσκου του Stein και το κριτήριο Μπαεζιανής πληροφορίας. Από την άλλη, η εκπαίδευση των ασαφών μοντέλων έγινε με τον αλγόριθμο εκμάθησης Levenberg-Marquardt. Τέλος, τα βοηθητικά μοντέλα, αυτό της καμπύλης ισχύος και το μοντέλο προεπεξεργασίας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, χρησιμοποιούνται και στη συνέχεια.

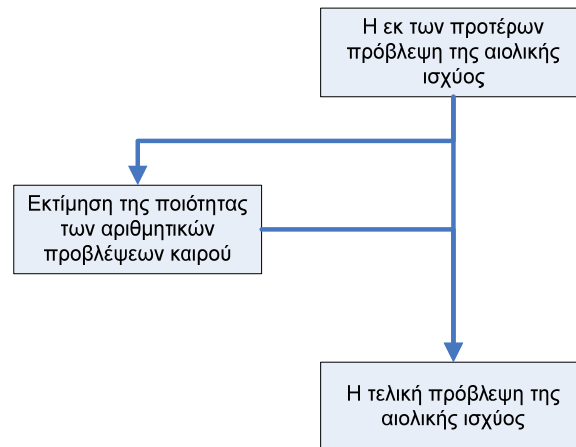
Κεφάλαιο 6

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ, ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΚΟΗΟΝΕΝ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΚΤΙΝΩΤΗΣ ΒΑΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Η μεθοδολογία του Μοντέλου I που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελείται από δύο βήματα: την αξιολόγηση της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και τη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Την ίδια λογική χρησιμοποιεί και το μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που θα περιγραφεί στην παρούσα ενότητα και θα αναφέρεται ως Μοντέλο II. Η μεθοδολογία του Μοντέλου II που θα περιγραφεί στις επόμενες ενότητες, περιέχει μία επιπλέον μονάδα, την εκ των προτέρων πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Στην ουσία, πρώτα γίνεται η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος με βάση την υπάρχουσα γνώση στην τρέχουσα ώρα με μοναδική προεπεξεργασία την διαμόρφωση της ταχύτητας του ανέμου στα όρια διασύνδεσης και αποκοπής από το αντίστοιχο μοντέλο. Στη συνέχεια ακολουθείται η αξιολόγηση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Τέλος, στο τελικό βήμα παράγεται η τελική πρόβλεψη. Το κάθε βήμα του Μοντέλου II εκτελείται από μία ξεχωριστή λειτουργική

μονάδα. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα βήματα που ακολουθούνται στο Μοντέλο II και το πώς συνδέονται μεταξύ τους.



Σχήμα 6.1 Τα βήματα που ακολουθεί το Μοντέλο II

Στο Μοντέλο II λοιπόν, γίνεται μία αρχική εκτίμηση της αιολικής ισχύος από τη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης. Η μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης αποτελείται από ένα συνδυασμό νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και ενός αυτό-οργανούμενου χάρτη και χρησιμοποιεί δεδομένα από την χρονοσειρά της αιολικής ισχύος και από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού από τη μονάδα εκτίμησης ποιότητάς των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, με έναν ευφυή συνδυασμό νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και ασαφούς λογικής. Τέλος, η μονάδα της τελικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος συνδυάζει τα αποτελέσματα των παραπάνω μονάδων και παρέχει την τελική έξοδο του Μοντέλου II με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης.

Ο τρόπος εκτέλεσης του Μοντέλου II είναι ο ίδιος με αυτόν του Μοντέλου I δηλαδή λαμβάνει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM κάθε έξι ώρες, και παράλληλα παρέχει προβλέψεις σε ωριαία βάση για χρονικό ορίζοντα σαράντα ένα ώρες. Η βελτιωμένη απόδοση του Μοντέλου II έναντι τόσο του Μοντέλου I όσο και άλλων μοντέλων τεχνολογίας αιχμής που συμμετείχαν στο ερευνητικό πρόγραμμα ANEMOS θα φανεί στο κεφαλαίο 7.

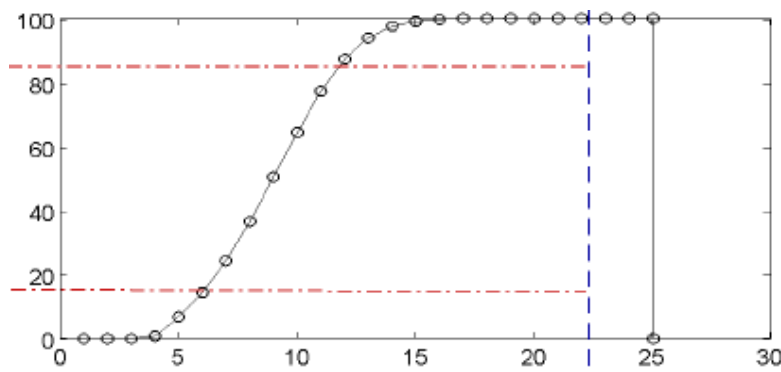
Πριν ξεκινήσει η περιγραφή των μονάδων λειτουργίας του Μοντέλου II θα περιγραφεί η δομή και ο τρόπος εκπαίδευσης ενός αυτό-οργανούμενου χάρτη. Ο αυτό-οργανούμενος χάρτης είναι ένα νευρωνικό δίκτυο τύπου Kohonen που εφαρμόζεται σε προβλήματα ταξινόμησης. Ένα τέτοιο νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση της ατμοσφαιρικής κατάστασης στην οποία στηρίζεται όλη η δομή του Μοντέλου II.

6.2 Αυτό-οργανωμένοι χάρτες

6.2.1 Γενικά

Για να μειωθεί η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος των μοντέλων που αναπτύχθηκαν, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός του συνόλου εκπαίδευσης σε υποσύνολα. Για την μοντελοποίηση του κάθε υποσυνόλου που προέκυψε, χρησιμοποιήθηκε και διαφορετικό νευρωνικό δίκτυο συναρτήσεων ακτινωτής βάσης. Με τον τρόπο αυτό, το κάθε δίκτυο συναρτήσεων ακτινωτής βάσης έχει να συλλάβει μικρότερο αριθμό περιπτώσεων για να περιγράψει το μέρος του μη γραμμικού συστήματος στο οποίο αντιστοιχεί το υποσύνολο εκπαίδευσης. Εφαρμόζοντας λοιπόν περισσότερα τέτοια δίκτυα, αποφεύγουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα δίκτυο με πολλές συναρτήσεις βάσης που θα οδηγήσει σε ελλιπή γενίκευση του μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα στην εφαρμογή της πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας, η καμπύλη ισχύος του πάρκου μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η αιολική ισχύς στην αρχή αυξάνεται εκθετικά, στη συνέχεια σχεδόν γραμμικά, ενώ σε μεγάλες ταχύτητες αυξάνεται πολυωνμικά και σταθεροποιείται στην ονομαστική τιμή του πάρκου. Ταξινομώντας λοιπόν την ταχύτητα του ανέμου σε τρεις κατηγορίες (χαμηλή, μεσαία και υψηλή) και στη συνέχεια εκπαιδεύοντας διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα συναρτήσεων βάσης για κάθε κατηγορία ξεχωριστά, βελτιστοποιούμε την πρόβλεψη. Με σκοπό μια ευέλικτη και αποτελεσματική ταξινόμηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιήθηκαν αυτό-οργανωμένοι χάρτες που είναι μία ειδική κατηγορία νευρωνικών δικτύων βασισμένα στην ανταγωνιστική μάθηση [138].



Σχήμα 6.2 Τα τρία χαρακτηριστικά μέρη μιας καμπύλης ισχύος

Κατά την ανταγωνιστική μάθηση 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 έξοδό του. Ο νευρώνας αυτός ονομάζεται «νικητής» νευρώνας.

Ένας αυτό-οργανωμένος χάρτης αποτελείται από ένα επίπεδο νευρώνων. Οι νευρώνες αυτοί τοποθετούνται πάνω στους κόμβους ενός πλέγματος που μπορεί να είναι μίας ή δύο διαστάσεων. Ο σκοπός της εκπαίδευσης του αυτό-οργανωμένου χάρτη είναι να επεκτείνει το πλέγμα σ' όλο το χώρο που καλύπτει το σύνολο εκπαίδευσης. Το πλέγμα μπορεί να είναι τετραγωνικό ή εξαγωνικό, ή να έχει τυχαία δομή. Αυτό εξαρτάται από το σχήμα της διασποράς του συνόλου των δεδομένων. Έτσι οι νευρώνες τοποθετούνται στα σημεία (συντεταγμένες του πλέγματος) του χώρου των δεδομένων της εκπαίδευσης και εκφράζουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων εισόδου που αντιπροσωπεύουν (γείτονες). Ένας αυτό-οργανωμένος χάρτης λοιπόν αποτελεί έναν τοπογραφικό σχηματισμό των δειγμάτων εισόδου όπου οι συντεταγμένες των νευρώνων καθορίζουν τα στατιστικά γνωρίσματα των δειγμάτων εισόδου. Έτσι η έξοδος του αυτό-οργανωμένου χάρτη είναι στην ουσία οι συντεταγμένες του νικητή νευρώνα πάνω στο πλέγμα.

6.2.2 Αλγόριθμος εκπαίδευσης των αυτό-οργανωμένων χαρτών

Κάθε δείγμα εισόδου x που εισέρχεται σ' έναν αυτό-οργανωμένο χάρτη ενεργοποιεί μία περιοχή του πλέγματος. Το μέγεθος και η τοποθεσία μιας τέτοιας περιοχής εξαρτάται από τη θέση που έχει το δείγμα εισόδου στο πλέγμα. Οι νευρώνες ενεργοποιούνται κατά την είσοδο ενός δείγματος με τη βοήθεια της ευκλείδειας απόστασης και μιας διακριτής συνάρτησης μεταφοράς. Η διακριτή αυτή συνάρτηση εκφράζει την ανταγωνιστικότητα των νευρώνων μεταξύ τους. Έτσι κατά την είσοδο του δείγματος υπολογίζεται η ευκλείδεια απόσταση με κάθε νευρώνα w_j και ο δείκτης $i(x)$ του νικητή νευρώνα που αποτελεί και την έξοδο του αυτό-οργανωμένου χάρτη καθορίζεται από τη σχέση:

$$i(x) = \arg \min_j \|x - w_j\|, \text{ για κάθε } j=1,2, \dots, m \quad (6.1)$$

όπου m είναι ο αριθμός των νευρώνων του αυτό-οργανωμένου χάρτη.

Κατά τη διαδικασία με την οποία γίνεται η βέλτιστη τοποθέτηση των νευρώνων στο χώρο του συνόλου εκπαίδευσης όπως έχει περιγραφεί απ' τον Kohonen, πρώτα γίνεται αρχικοποίηση των νευρώνων και στην συνέχεια εκτελείται επαναληπτικά ο αλγόριθμος εκμάθησης. Η αρχικοποίηση των νευρώνων γίνεται επιλέγοντας τυχαία δείγματα εισόδου από το σύνολο εκπαίδευσης. Αφού γίνει η αρχικοποίηση, ο αλγόριθμος εκμάθησης εκτελείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο καθορίζει την θέση των νευρώνων στο χώρο των δεδομένων και ονομάζεται φάση της διάταξης και στο δεύτερο στάδιο ρυθμίζονται οι νευρώνες όσο το δυνατόν καλύτερα. Το δεύτερο στάδιο ονομάζεται φάση προσαρμογής. Ο αλγόριθμος εκμάθησης εκτελείται διαδοχικά αρκετές φορές (εποχές εκπαίδευσης) ώστε ο κάθε νευρώνας να τοποθετηθεί στη κατάλληλη θέση. Η ρύθμιση των θέσεων των νευρώνων πραγματοποιείται από την παρακάτω σχέση:

$$dw_j(t+1) = dw_j(t) + a(t)h(t)(x - w_j(t)) \quad (6.2)$$

Όπου t είναι ο αριθμός των επαναλήψεων της φάσης της ρύθμισης, $a(t)$ ο ρυθμός εκμάθησης και $h(t)$ που ονομάζεται και συνάρτηση γειτονιάς, εκφράζει την ακτίνα ενεργοποίησης. Η συνάρτηση γειτονιάς συνήθως είναι γκαουσιανή της μορφής (5.1).

Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήσαμε μία απλή διακριτή συνάρτηση όπου παίρνει την τιμή 0.5 αν ο νευρώνας δεν είναι ενεργοποιημένος και 1 αν ο νευρώνας είναι ενεργοποιημένος δηλ. μέσα στην ακτίνα ενεργοποίησης. Κατά τη φάση της διάταξης η ακτίνα της περιοχής nd (γειτονιά ενεργοποίησης) του πλέγματος που ενεργοποιεί κάθε φορά ένα δείγμα μειώνεται γραμμικά με τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας μάθησης.

$$nd = 1 + (nd_{\max} - 1)(1 - t / t_{\max}) \quad (6.3)$$

Όπου το nd_{\max} είναι μία σταθερά που καθορίζεται εμπειρικά εκ των προτέρων και το t_{\max} είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων της διαδικασίας μάθησης. Στη φάση της προσαρμογής η ακτίνα είναι σταθερή και καθορίζεται εμπειρικά.

Παράλληλα ο ρυθμός μάθησης $a(t)$ κατά την φάση της διάταξης των νευρώνων μειώνεται ανάλογα με τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας μάθησης, ενώ στη φάση της προσαρμογής αυξάνεται με τον ίδιο τρόπο. Δηλαδή:

$$a(t) = l_{\text{tune}} + (l_{\text{order}} - l_{\text{tune}})(1 - t / t_{\max}) \quad \text{φάση διάταξης} \quad (6.4)$$

$$a(t) = l_{\text{tune}} t / t_{\max} \quad \text{φάση προσαρμογής} \quad (6.5)$$

Όπου l_{tune} και l_{order} είναι οι ρυθμοί μάθησης προσαρμογής και διάταξης αντίστοιχα που καθορίζονται εμπειρικά.

Σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας της μάθησης, επιλέγεται ένα τυχαίο δείγμα εισόδου από το σύνολο εκπαίδευσης όπου εισέρχεται στον υπό εκπαίδευση αυτό-οργανωμένο χάρτη. Τότε ενεργοποιούνται οι νευρώνες που βρίσκονται κοντά στο τυχαίο δείγμα και βρίσκονται στην γειτονιά ενεργοποίησης nd . Έτσι η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται για τους ενεργοποιημένους νευρώνες που σχετίζονται με το τυχαίο δείγμα. Η διαδικασία μάθησης επαναλαμβάνεται πολλές φορές (πάνω από 1000 φορές) σε κάθε εποχή εκπαίδευσης έτσι ώστε όλα τα δείγματα του συνόλου εκπαίδευσης να συμμετέχουν. Ένας εμπειρικός κανόνας για τον αριθμό των επαναλήψεων της διαδικασίας μάθησης είναι ότι πρέπει να ισούται τουλάχιστον 500 φορές τον αριθμό των νευρώνων για να πετύχουμε μία καλή στατιστική ακρίβεια.

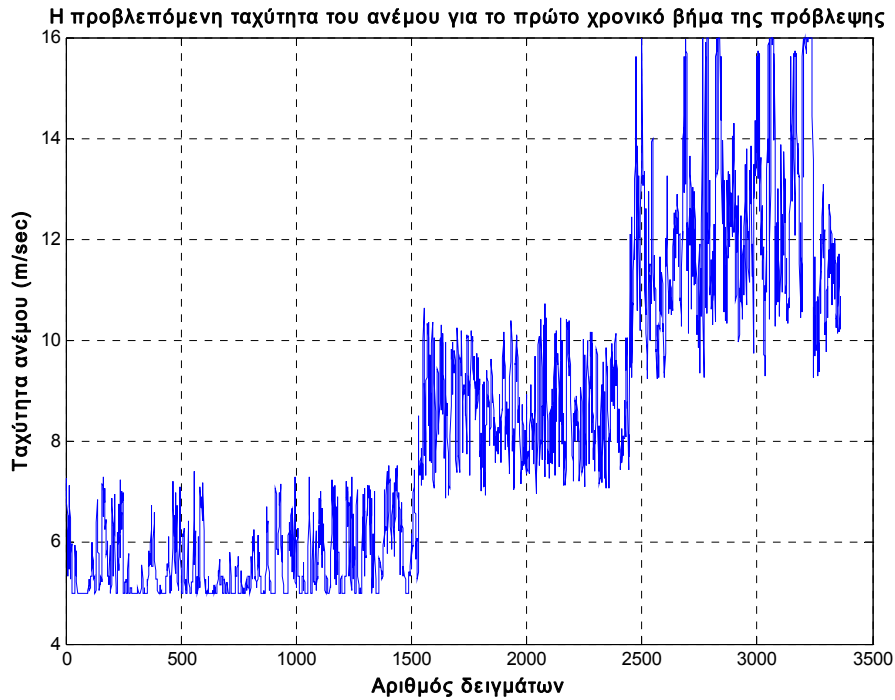
6.3 Η μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του Μοντέλου II

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

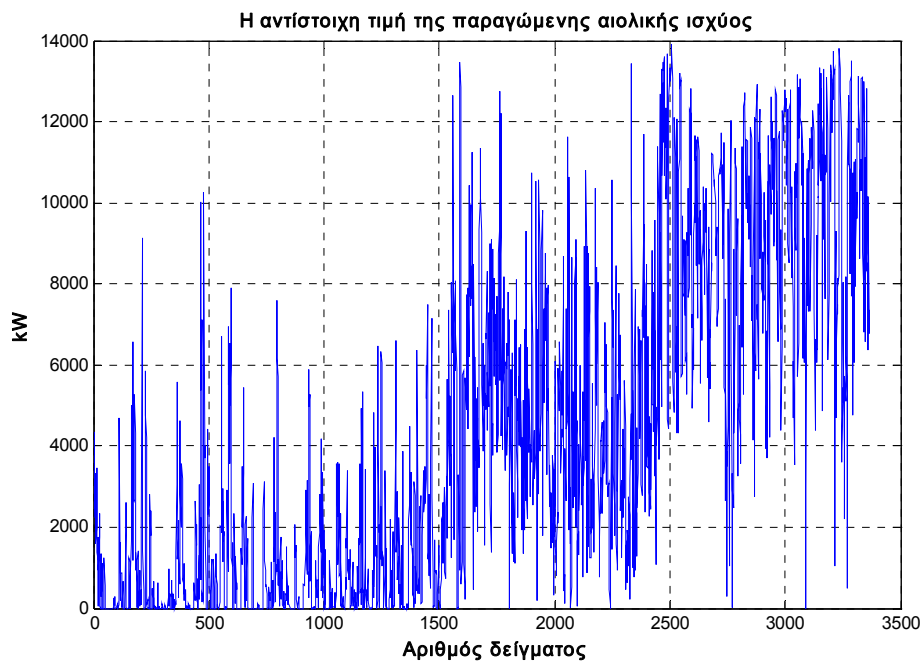
Στην παρούσα προσέγγιση, χωρίστηκε το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε τρία μέρη για την πιο εύκολη αντιμετώπισή του. Στην ουσία, δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες της ατμοσφαιρικής κατάστασης που βασίζονται στις τιμές της προβλεπόμενης ταχύτητας που αντιστοιχούν στις ώρες κοντά στην χρονική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

Οι μεγάλες αποκλίσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού φαίνονται και στα σχήματα 6.3 που εμφανίζονται στο (α) οι προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου για το πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης και στο (β) οι αντίστοιχες τιμές της παραγόμενης αιολικής ισχύος. Οι τιμές της προβλεπόμενης ταχύτητας προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM. Το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρονται, καλύπτει περίπου 3400 ώρες και αντιστοιχεί στο σύνολο εκπαίδευσης του μοντέλου που περιγράφεται. Τέλος, τα δεδομένα που παρουσιάζονται, προέρχονται από το αιολικό πάρκο στη περιοχή Golagh της Ιρλανδίας.

Στο σχήμα 3(β) φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές της παραγωγής της αιολικής ισχύος με αυτές της ταχύτητας του σχήματος 3(α) ταξινομημένες στα τρία υποσύνολα. Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες τιμές στα σχήματα μπορούμε να εντοπίσουμε ότι σε διάφορες περιπτώσεις υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των αναμενόμενων τιμών της παραγωγής ισχύος με βάση της προβλέψεις της ταχύτητας και των αντίστοιχων μετρήσεων της αιολικής παραγωγής. Για παράδειγμα στο πρώτο υποσύνολο που αντιστοιχεί σε χαμηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις που η αντίστοιχη παραγωγή της αιολικής ισχύος είναι προφανές να προέρχεται από ταχύτητες του δεύτερου ή και του τρίτου υποσυνόλου. Η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής γίνεται πολύ δύσκολη σ' αυτές τις περιπτώσεις και η απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης εξαρτάται από το αν μπορεί να προβλέψει την αιολική ισχύ με ακρίβεια σ' αυτές τις περιπτώσεις που οι αριθμητικές προβλέψεις δεν είναι καλές.



(α)

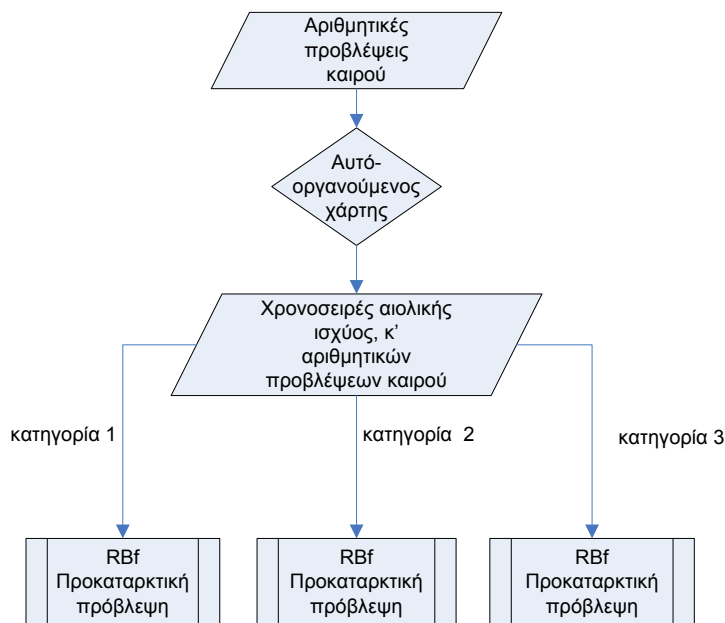


(β)

Σχήματα 6.3. (α) Η ταξινομημένη χρονοσειρά της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου που παρέχεται από το μοντέλο HIRLAM για το πρώτο βήμα της πρόβλεψης, με βάση την έξοδο του αυτό-οργανούμενου χάρτη και (β) η αντίστοιχη παραγωγή της αιολικής ισχύος του αιολικού πάρκου Golagh

Για να μπορεί να συλλάβει το μοντέλο αυτές τις περιπτώσεις και να εκμεταλλευθεί τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού όσο το δυνατόν καλύτερα, διάφορες δοκιμές έδειξαν ότι η πιο αποτελεσματική δομή είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 6.4.

Το μοντέλο της προκαταρκτικής πρόβλεψης όπως φαίνεται, έχει στη είσοδό του ένα αυτό-οργανούμενο χάρτη. Ο αυτό-οργανούμενος χάρτης είναι ένα νευρωνικό δίκτυο τύπου Kohonen [138]. Ένα τέτοιο νευρωνικό δίκτυο είναι κατάλληλο να διαχωρίζει ένα σύνολο δεδομένων σε επιμέρους υποσύνολα με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών εισόδου του. Ο αυτό-οργανούμενος χάρτης εδώ, χρησιμοποιείται για να χωρίζει τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε τρεις κατηγορίες με βάση το μέγεθός τους. Τελικά, την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος την παρέχουν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που το κάθε ένα αντιστοιχεί σε μία κατηγορία της αιολικής ταχύτητας.



Σχήμα 6.4. Δομή της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Αναλυτικά, ο αυτό-οργανωμένος χάρτης δέχεται στην είσοδο του τρεις τιμές της ταχύτητας που προέρχονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και αντιστοιχούν η μία στην ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη και οι άλλες δύο στην προηγούμενη και στην επόμενη ώρα από την ώρα της πρόβλεψης αντίστοιχα. Αυτό το νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από ένα επίπεδο νευρώνων το οποίο περιέχει τόσους νευρώνες όσες είναι και οι κατηγορίες του συνόλου που διαχωρίζει. Οι νευρώνες αυτοί προκύπτουν από μη επιβλεπόμενη μάθηση και στη προκειμένη εφαρμογή είναι τρεις. Δηλαδή η χρονοσειρά της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου διαιρείται σε τρεις κατηγορίες όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.3(α).

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

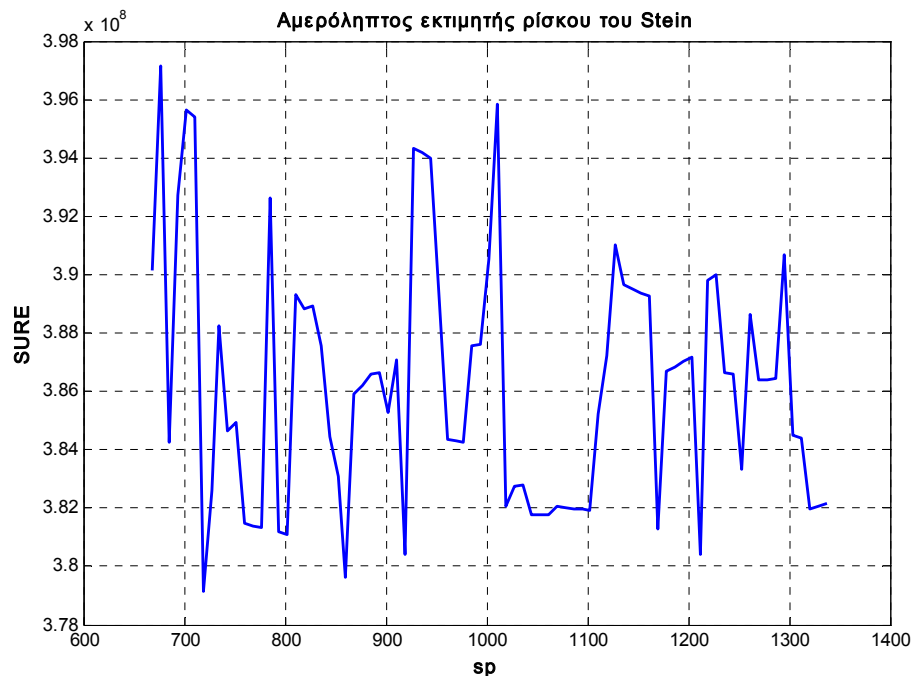
Με τον τρόπο αυτό τα δίκτυα ακτινωτής βάσης μαθαίνουν καλύτερα να χειρίζονται περισσότερες δύσκολες περιπτώσεις πρόβλεψης που οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι ανακριβείς. Επίσης για να γίνει ευκολότερη η εκμάθηση των νευρωνικών δικτύων, οι τιμές της ταχύτητας προσαρμόζονται με το ασαφές μοντέλο που εφαρμόζεται για την προεπεξεργασία των δεδομένων και περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όπως και στα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης του προηγούμενου μοντέλου, έτσι και εδώ λαμβάνουν στην είσοδο τους την τελευταία μέτρηση της αιολικής ισχύος όταν πρόκειται για πρόβλεψη της πρώτης ώρας, ενώ για πρόβλεψη πάνω από δύο ώρες χρησιμοποιείται η προηγούμενη πρόβλεψη ισχύος του μοντέλου. Τέλος, οι τιμές της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην προηγούμενη και στην επόμενη ώρα από αυτή που γίνεται η πρόβλεψη, χρησιμοποιούνται για να αναγνωρισθεί η μελλοντική πρόθεση του ανέμου να αυξηθεί ή να μειωθεί και να περιγραφεί καλύτερα η κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που εφαρμόστηκαν στη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II εκπαιδεύτηκαν με τις ίδιες μεθόδους που εφαρμόστηκαν στο Μοντέλο I. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την επιλογή του αριθμού και του φάσματος των συναρτήσεων ακτινωτής βάσης παρουσιάζονται ενδεικτικά στο παρακάτω παράδειγμα.

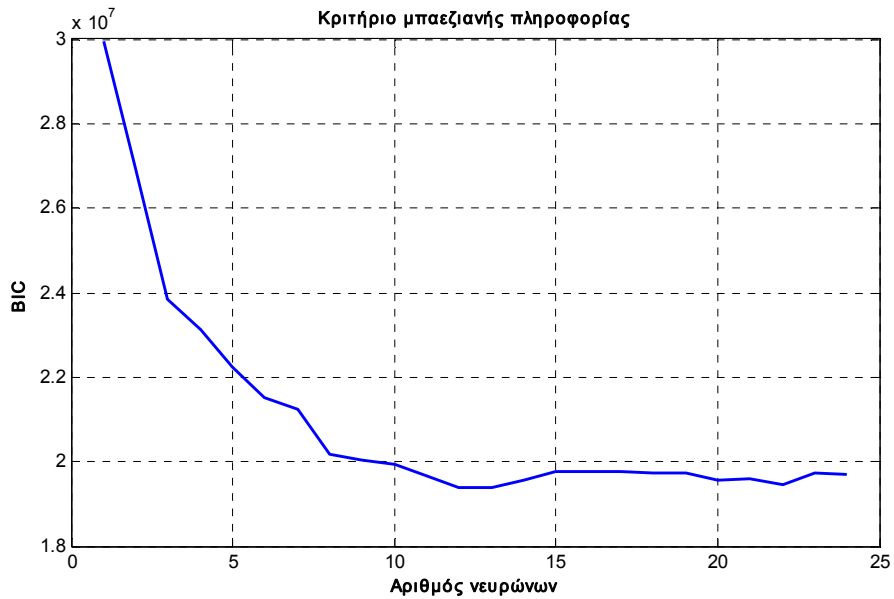
Στο παράδειγμα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν οι παράμετροι του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που αντιστοιχεί στην τρίτη κατηγορία της ταχύτητας του ανέμου δηλαδή σ' αυτήν με τις υψηλές τιμές της ταχύτητας. Πρώτα λοιπόν γίνεται η επιλογή του φάσματος των συναρτήσεων ακτινωτής βάσης εκπαιδεύοντας το νευρωνικό δίκτυο για διάφορες τιμές του sp και για μεγάλο αριθμό νευρώνων. Το sp καθορίζει το φάσμα r των συναρτήσεων ακτινωτής βάσης σύμφωνα με την εξίσωση (5.9).

Στο σχήμα 6.5 φαίνεται η ελάχιστη τιμή που παίρνει ο αμερόληπτος εκτιμητής ρίσκου σε κάθε εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου που αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή του sp . Πρέπει να αναφερθεί ότι η ελάχιστη τιμή του SURE αποκτάται με διαφορετικό αριθμό νευρώνων σε κάθε εκπαίδευση. Παρατηρείται ότι το νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζει βέλτιστη απόδοση με sp να ισούται με 718.

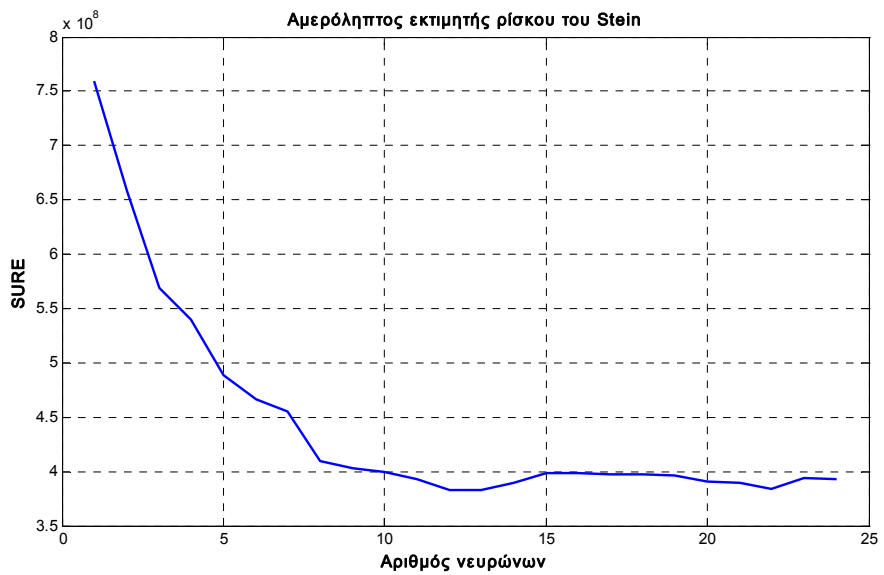


Σχήμα 6.5 Η τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου του Stein για διάφορες τιμές του sp της εξίσωσης (5.9)

Έτσι λοιπόν, εκπαιδεύεται ξανά το συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο μέχρι είκοσι τέσσερις νευρώνες και με το sp να έχει την παραπάνω τιμή. Τότε, εξετάζεται η απόδοση του νευρωνικού δικτύου κάθε φορά που προστίθενται ένας νευρώνας στα σύνολα επικύρωσης και αποτίμησης μέσω των κριτηρίων BIC και SURE. Οι τιμές των κριτηρίων φαίνονται στα σχήματα 6.6 (α) και (β) που ακολουθούν που προκύπτουν σε κάθε κύκλο εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου.



(α)



(β)

Σχήμα 6.6 (α) Η τιμή του κριτηρίου Μπαεζιανής πληροφορίας και (β) η τιμή του αμερόληπτου εκτιμητή ρίσκου συναρτήσει του αριθμού των συναρτήσεων βάσης.

Τα κριτήρια BIC και SURE εμφανίζουν ελάχιστο σε νευρωνικό δίκτυο με 13 συναρτήσεις βάσης όπως φαίνονται και στα παραπάνω σχήματα. Αν και το μέσο απόλυτο σφάλμα που προκύπτει από το σύνολο επικύρωσης, παίρνει τη μικρότερη τιμή στους 22 νευρώνες και αντίστοιχα αυτό του συνόλου αποτίμησης ελαχιστοποιείται στους 12 νευρώνες, τα παραπάνω κριτήρια υποδεικνύουν ότι με 13 νευρώνες το νευρωνικό δίκτυο περιέχει την απαιτούμενη γνώση για να μάθει όλες τις περιπτώσεις.

Τα άλλα δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που περιέχονται στη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης, μετά από την διαδικασία εκπαίδευσης περιέχουν 8 και 16 νευρώνες και αντιστοιχούν στην πρώτη και στη δεύτερη κατηγορία της ταχύτητας του ανέμου αντίστοιχα.

Με την λογική που περιγράφηκε στο Μοντέλο I, παραμετροποιήθηκε και εδώ η είσοδος των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης που εφαρμόστηκαν στη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II. Η κανονικοποίηση έγινε με τον ίδιο τρόπο και στην είσοδο του αυτό-οργανούμενου χάρτη. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην ώρα της πρόβλεψης, αυξάνεται κατά δύο φορές σε σχέση με αυτές που αντιστοιχούν στις γειτονικές ώρες. Η κανονικοποίηση της εισόδου των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζεται στην παρακάτω σχέση:

$$I(t+1)=f(P(t), WS(t-1)*10, WS(t+1)*20, WS(t+2)*10, WD(t+1), H(t+1)/480) \quad (6.6)$$

$P(t)$ είναι η παραγωγή της αιολικής ισχύος σε MW για προβλέψεις μέχρι 12 ώρες μπροστά και μακροπρόθεσμους ορίζοντες σε GW,

WS είναι η ταχύτητα του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού,

WD είναι η διεύθυνση του ανέμου από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και

H είναι η ώρα της πρόβλεψης.

Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι και εδώ, διαφορετικά νευρωνικά δίκτυα εκτελούνται σε βραχυπρόθεσμους (<4 ώρες) και μακροπρόθεσμους ορίζοντες αφού στην είσοδο τους λαμβάνουν σε διαφορετική τάξη μεγέθους την τιμή της αιολικής ισχύος. Ακριβώς ο ίδιος χειρισμός έγινε και στα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης του Μοντέλου I. Δηλαδή, Τα νευρωνικά δίκτυα που αντιστοιχούν στα πρώτα βήματα πρόβλεψης, εκπαιδεύονται με την τιμή της αιολικής ισχύος στην είσοδο τους να είναι σε MW και αντίστοιχα για τον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης δέχονται την τιμή της αιολικής ισχύος σε GW.

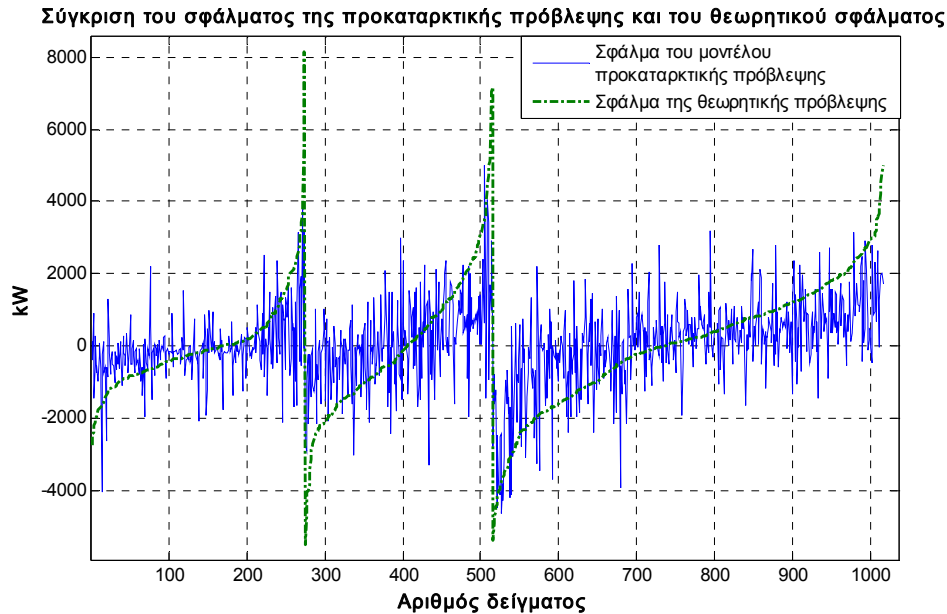
Συνοψίζοντας, στη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος χωρίστηκε σε τρία επιμέρους, με την βοήθεια ενός αυτό-οργανούμενου χάρτη ο οποίος λαμβάνοντας τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου κοντά στην ώρα της πρόβλεψης όρισε τρεις κατηγορίες της ατμοσφαιρικής κατάστασης. Για κάθε επιμέρους πρόβλημα που σχηματίστηκε εφαρμόστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης που δίνει την πρώτη εκτίμηση για την ωριαία αιολική παραγωγή. Η εκτίμηση αυτή χρησιμοποιείται στις μονάδες που θα περιγραφούν στις επόμενες ενότητες, δηλαδή στη μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και στη μονάδα της τελικής πρόβλεψης. Όλες οι μονάδες λειτουργίας που περιέχονται στο Μοντέλο II, διατηρούν αυτόν τον διαχωρισμό του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που γίνεται με βάση την κατάσταση της ατμόσφαιρας.

6.4 Η ασαφής μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού

Η αβεβαιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, όπως αναφέρθηκε, υπεισέρχεται στα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, με αποτέλεσμα η απόδοση τους να εξαρτάται κατά βάση από την ποιότητα των προβλέψεων αυτών και ειδικά της ταχύτητας του ανέμου. Για να εντοπιστούν οι περιπτώσεις που η τιμή της ταχύτητας του ανέμου που παρέχουν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού αποκλίνουν από τις πραγματικές, χρησιμοποιούμε την ‘θεωρητική’ μέθοδο εκτίμησης αιολικής ισχύος. Κατά τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η τιμή της αιολικής ισχύος με τη βοήθεια του μοντέλου της καμπύλης ισχύος της παραγράφου 5.3 από την προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου και συγκρίνεται με την πραγματική τιμή. Οι τιμές αυτές της αιολικής ισχύος θα αναφέρονται ως ‘θεωρητικές προβλέψεις’ και το αντίστοιχο σφάλμα ως ‘θεωρητικό σφάλμα’.

Η εκτίμηση της αβεβαιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού γίνεται μέσω του θεωρητικού σφάλματος, αφού η πρόβλεψη του μοντέλου της καμπύλης ισχύος στηρίζεται αποκλειστικά στην ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου. Στο σχήμα 6.7 φαίνεται καθαρά ότι οι ‘φτωχές’ αριθμητικές προβλέψεις καιρού οδηγούν τις περισσότερες φορές σε μεγάλα σφάλματα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται το

κανονικοποιημένο σφάλμα της πρόβλεψης για μία ώρα μπροστά της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης και το αντίστοιχο θεωρητικό σφάλμα. Οι τιμές των δύο σφαλμάτων εμφανίζονται έτσι, ώστε το θεωρητικό σφάλμα να είναι σε αύξουσα σειρά και παράλληλα να είναι ταξινομημένο με βάση την κατηγορία της ταχύτητας του ανέμου που ορίζει ο αυτό-οργανούμενος χάρτης. Η συσχέτιση των δύο σφαλμάτων φαίνεται καθαρά στο σχήμα. Ο συντελεστής συσχέτισης τους που καθορίζει την γραμμική εξάρτηση μεταξύ τους, ξεπερνάει το 0.5. Δηλαδή, η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση μέσω του σφάλματος της θεωρητικής πρόβλεψης.



Σχήμα 6.7 Το σφάλμα της θεωρητικής πρόβλεψης κατά αύξουσα σειρά και το αντίστοιχο σφάλμα της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης, ταξινομημένα με βάση την κατηγορία της ταχύτητας του ανέμου

Με σκοπό την ακριβής εκτίμηση της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, εξετάζεται το πρόβλημα ξεχωριστά για κάθε κατηγορία της ταχύτητας του ανέμου, η οποία προκύπτει από τον αυτό-οργανούμενο χάρτη του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης. Κατ' αρχήν, γίνεται η θεώρηση ότι η προκαταρκτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος ισούται με την αναμενόμενη παραγωγή του πάρκου την ώρα για την οποία γίνεται η πρόβλεψη. Στη συνέχεια διαιρείται η είσοδος του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης σε δύο μέλη. Το ένα μέλος περιέχει τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου (που αντιστοιχούν στην ώρα της πρόβλεψης, καθώς και στην προηγούμενη και στην επόμενη απ' αυτήν) και το δεύτερο μέλος αποτελείται από την τιμή της αιολικής ισχύος της προηγούμενης ώρας από αυτήν της πρόβλεψης, την τιμή της διεύθυνσης του ανέμου και την ώρα της πρόβλεψης. Η διαίρεση της εισόδου των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης έχει σαν σκοπό να καθορίσει ποια από τις δύο ομάδες μεταβλητών εισόδου έχει οδηγήσει το μοντέλο σε καλή ή κακή πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Στην ουσία με την μέθοδο αυτή καθορίζεται ποια από τις δύο μεταβλητές που προέρχονται από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, έχουν επηρεάσει αρνητικά της πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Επομένως εδώ μελετάται η αβεβαιότητα τόσο της τιμής της προβλεπόμενης ταχύτητας, όσο και η τιμή της προβλεπόμενης διεύθυνσης.

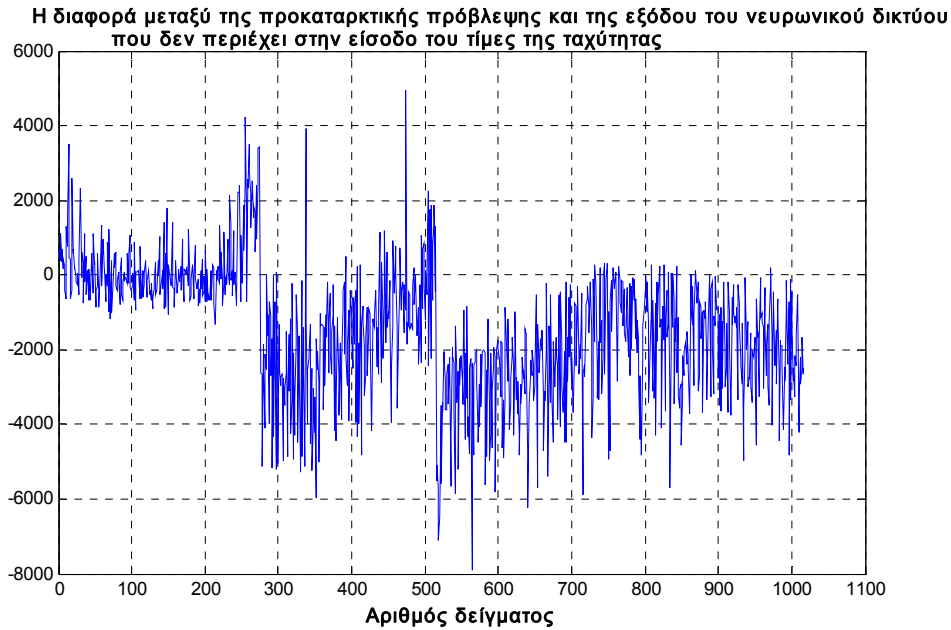
Το επόμενο βήμα της μεθόδου της αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού περιλαμβάνει την εκτίμηση της θεωρητικής τιμής της αιολικής ισχύος με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης. Αφού οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης χωρίζονται σε δύο ομάδες, δημιουργούνται δύο υποσύνολα εκπαίδευσης. Τα υποσύνολα αυτά εφαρμόζονται σε δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης

τα οποία εκπαιδεύονται με σκοπό να προβλέψουν την θεωρητική τιμή της αιολικής ισχύος. Οι εξόδοι των παραπάνω νευρωνικών δικτύων φαίνονται στα σχήματα 6.8 και 6.9 και αντιστοιχούν σε ανεξάρτητο σύνολο δεδομένων από αυτό της εκπαίδευσης. Με αυτά τα δύο νευρωνικά δίκτυα στη πραγματικότητα δημιουργούμε δυο νέα μοντέλα καμπύλης ισχύος. Το ένα χρησιμοποιεί τρεις τιμές της ταχύτητας του ανέμου και τις μετατρέπει σε αιολική ισχύ, δηλαδή βασίζεται στο μέγεθος και στην διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου κοντά στην ώρα της πρόβλεψης. Από την άλλη, το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο μετατρέπει την διεύθυνση του ανέμου σε αιολική ισχύ, με την βοήθεια της παραμένουσας τιμής της αιολικής ισχύος και με κριτήριο την ώρα της πρόβλεψης.

Συγκρίνοντας τις εξόδους των δύο παραπάνω νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης με την προκαταρκτική πρόβλεψη είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι ανεπαρκείς μετεωρολογικές προβλέψεις. Αυτό φαίνεται στα παρακάτω σχήματα που παρουσιάζεται η διαφορά της εξόδου του κάθε νευρωνικού δικτύου με την προκαταρκτική πρόβλεψη. Τα δείγματα στα σχήματα 6.8 και 6.9 αντιστοιχούν με αυτά του σχήματος 6.7.



Σχήμα 6.8 Η διαφορά μεταξύ της προκαταρκτικής πρόβλεψης και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που είναι εκπαιδευμένο με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου.



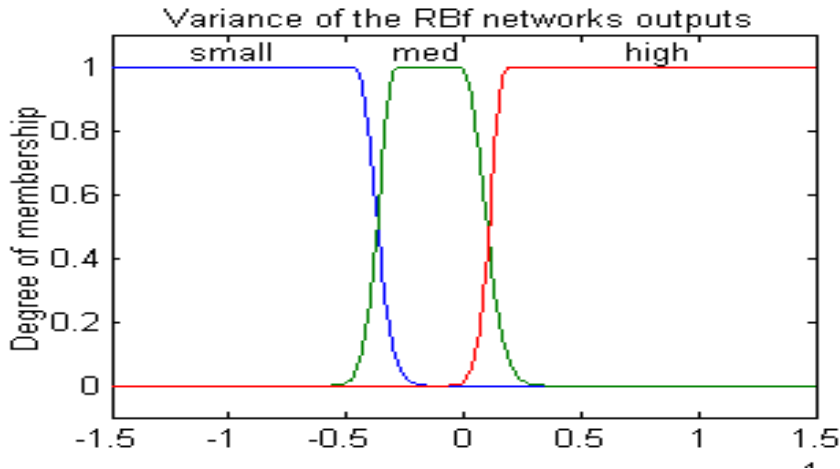
Σχήμα 6.9 Η διαφορά μεταξύ της προκαταρκτικής πρόβλεψης και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που είναι εκπαιδευμένο με τις τιμές της αιολικής ισχύος, της διεύθυνσης του ανέμου και της ώρας για την οποία γίνεται η πρόβλεψη.

Συγκεκριμένα, για την πρώτη περίπτωση, της διαφοράς της εξόδου του νευρωνικού δικτύου που έχει εκπαιδευτεί μόνο με τιμές της ταχύτητας η συσχέτιση ξεπερνάει το 0.45, ενώ στην δεύτερη περίπτωση φτάνει το 0.4. Άρα είναι δυνατόν με την βοήθεια των δύο παραπάνω νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης να εντοπιστούν οι περιπτώσεις που οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού είναι ανακριβείς και επιπλέον την αβεβαιότητα του Μοντέλου II.

Στην ουσία, η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος θεωρείται πρώτα ότι ισούται με την πραγματική τιμή και τότε συγκρίνεται με τις μετεωρολογικές προβλέψεις με την παραπάνω μέθοδο. Ο τελικός σκοπός είναι να εκτιμηθεί το θεωρητικό σφάλμα χρησιμοποιώντας τις διαφορές των εξόδων των νευρωνικών δικτύων με την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος.

Ο συνδυασμός των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με τεχνικές ασαφούς λογικής. Κι αυτό γιατί ενώ στις ακραίες τιμές των διαφορών των εξόδων των νευρωνικών δικτύων φαίνονται να υπάρχουν μεγάλα σφάλματα στις μεσαίες και μικρές τιμές υπάρχει μεγάλη ασάφεια. Έτσι σχεδιάστηκε ένα μοντέλο ασαφούς λογικής που δέχεται στην είσοδό του την διαφορά της πρόβλεψης της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου που έχει εκπαιδευθεί με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου και την διαφορά της προκαταρκτικής πρόβλεψης και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου που έχει εκπαιδευθεί με τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης. Επίσης το ασαφές μοντέλο συνδυάζει τις παραπάνω διαφορές με την διεύθυνση του ανέμου και το χρονικό βήμα της πρόβλεψης. Από τη μία, η τοπολογία του εδάφους παίζει και εδώ σημαντικό ρόλο και από την άλλη, το μέγεθος της αβεβαιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης.

Έτσι η είσοδος του ασαφούς μοντέλου περιέχει τέσσερις γλωσσικές μεταβλητές εισόδου: τις αποστάσεις των εξόδων των παραπάνω νευρωνικών δικτύων με την προκαταρκτική πρόβλεψη, την διεύθυνση του ανέμου και το χρονικό βήμα της πρόβλεψης. Η κάθε μία μεταβλητή περιγράφεται με τρία ασαφή σύνολα. Τα ασαφή σύνολα των γλωσσικών μεταβλητών μοντελοποιούνται με γκαουσιανές συναρτήσεις συμμετοχής όπως φαίνεται στο σχήμα ενώ το πρόβλημα περιγράφεται με ογδόντα ένα κανόνες. Οι παράμετροι του ασαφούς μοντέλου έχουν καθοριστεί με την μέθοδο οπισθοδρομικής διάδοσης σφάλματος Levenberg-Marquardt ο οποίος σταμάτησε στους πέντε κύκλους.



Σχήμα 6.10 Τα ασαφή σύνολα της διαφοράς μεταξύ της προκαταρκτικής πρόβλεψης και της εξόδου του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης που είναι εκπαιδευμένο με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου.

Η έξοδος του ασαφούς μοντέλου κυμαίνεται μεταξύ του μείον ένα και του ένα όπου με ένα χαρακτηρίζονται οι ανεπαρκείς και υπερεκτιμημένες αριθμητικές προβλέψεις καιρού, με μηδέν οι ακριβείς και με μείον ένα οι υποεκτιμημένες προβλέψεις. Δηλαδή, το ασαφές μοντέλο που προτείνεται είναι η ικανό να εκτιμήσει κατά προσέγγιση ποιοτικά και ποσοτικά το αναμενόμενο σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, καθώς και την τάση του.

Στη παρούσα διατριβή η παραπάνω μέθοδος αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού χρησιμοποιήθηκε για δύο σκοπούς. Πρώτα για την βελτίωση της πρόβλεψης της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης ενσωματώνοντας την πληροφορία σχετικά με την ποιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού στα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε και για την πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος από ένα μοντέλο που θα παρουσιαστεί στην ενότητα 6.6, αφού κατά ένα βαθμό η έξοδος του ασαφούς μοντέλου μπορεί να χαρακτηριστεί και ως δείκτης αξιοπιστίας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Τέλος στο κεφάλαιο 7 που παρουσιάζεται η απόδοση του κάθε συστήματος πρόβλεψης σε πραγματικά αιολικά πάρκα, θα φανεί η ικανότητα του ασαφούς μοντέλου που περιγράφηκε.

6.5 Η μονάδα τελικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του Μοντέλου II

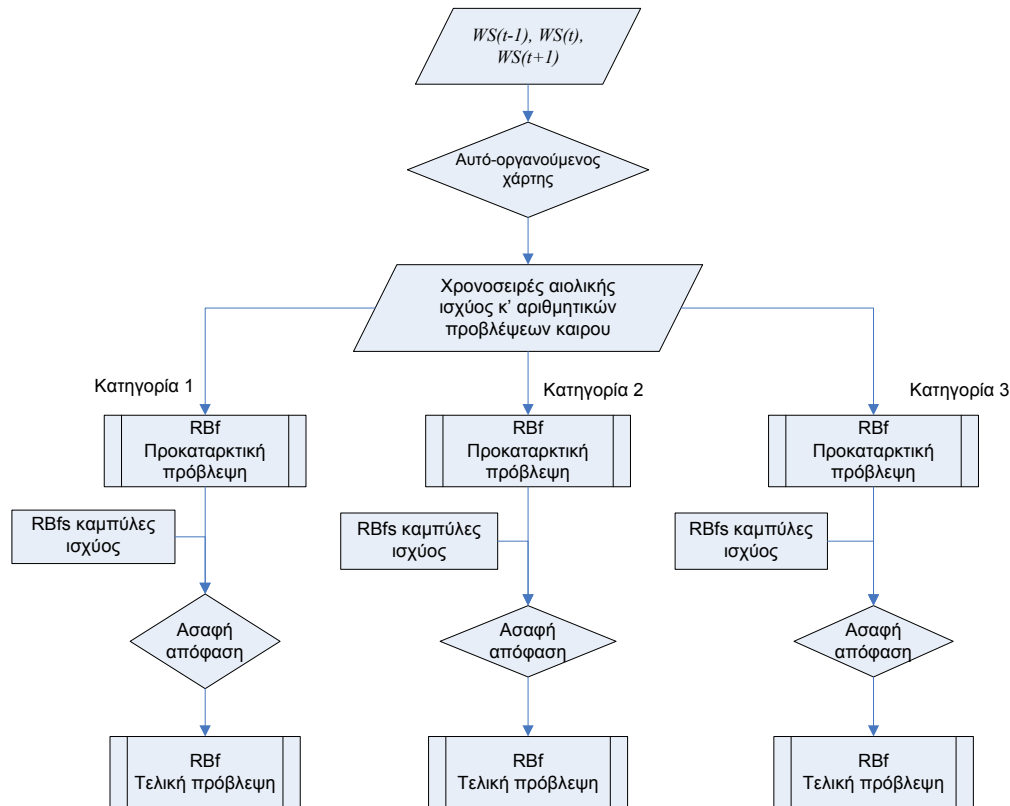
Η μονάδα τελικής πρόβλεψης του συστήματος Μοντέλου II σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συνδυάσει την αρχική εκτίμηση της αιολικής ισχύος που προέρχεται από το μοντέλο προκαταρκτικής πρόβλεψης, με την πληροφορία που παρέχει η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Λαμβάνει έτσι, την προκαταρκτική πρόβλεψη και την διορθώνει με βάση το δείκτη αβεβαιότητας που παράγει το ασαφές μοντέλο, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Σε αντίθεση με τη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης, η συγκεκριμένο μονάδα χρησιμοποιεί μόνο τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού που αναφέρονται στην ώρα που γίνεται η πρόβλεψη. Η είσοδος της μονάδας της τελικής πρόβλεψης περιγράφεται με την παρακάτω σχέση:

$$I(t+h/t) = \{P_{\text{προκ}}(t+h/t), WS(t+h), WD(t+h), F\} \quad (6.7)$$

Όπου $P_{\text{προκ}}$ είναι η έξοδος του μοντέλου προκαταρκτικής πρόβλεψης για την ώρα $t+h$ που γίνεται με την υπάρχουσα γνώση την χρονική στιγμή t . Η τιμή της προκαταρκτικής πρόβλεψης είναι σε MW για τα τέσσερα χρονικά βήματα της πρόβλεψης και σε GW στον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα. Δηλαδή, και σε αυτό το μοντέλο πρόβλεψης εφαρμόζεται η ίδια

μέθοδος παραμετροποίησης της εισόδου. Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης πραγματοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Την μία με τις τιμές της αιολικής ισχύος στην εξίσωση 6.7 να είναι σε MW και την δεύτερη να είναι σε GW.

Έτσι για κάθε κατηγορία που ορίζει ο αυτό-οργανούμενος χάρτης της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης εφαρμόζεται ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης με είσοδο την εξίσωση 6.7. Τα τρία αυτά νευρωνικά δίκτυα παρέχουν και την έξοδο του συστήματος πρόβλεψης Μοντέλου II. Η τελική μορφή του Μοντέλου II φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 6.11 Η δομή του συστήματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος Μοντέλου II

Φαίνεται λοιπόν ότι ο αυτό-οργανούμενος χάρτης στην είσοδο του Μοντέλου II καθορίζει ποια νευρωνικά δίκτυα θα δώσουν την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Επομένως ανάλογα με την κατηγορία της ατμοσφαιρικής κατάστασης, ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης θα δώσει μία πρώτη εκτίμηση της αιολικής ισχύος για την ώρα που γίνεται η πρόβλεψη, στη συνέχεια με την μέθοδο που περιγράφηκε, αξιολογούνται οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και τέλος ένα δεύτερο νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης συνδυάζει την πληροφορία που παρέχουν τα παραπάνω μοντέλα και παρέχει την τελική πρόβλεψη.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού σχεδιάστηκε ακριβώς για αυτόν το λόγο. Δηλαδή, σε ποιες περιπτώσεις οι προβλέψεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου είναι φτωχές. Αλλά επειδή όπως αποδείχθηκε το σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με τις αποκλίσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, η ίδια μεθοδολογία θα χρησιμοποιηθεί για την πιθανοτική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος από ένα κατάλληλα σχεδιασμένο μοντέλο που θα περιγραφεί στη συνέχεια.

6.6 Το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Αν και το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη συστημάτων ντετερμινιστικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, κρίθηκε σημαντικό για την ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος να προταθεί παράλληλα μία μέθοδος πρόβλεψης όλων των πιθανών τιμών της αιολικής ισχύος. Δηλαδή να αναπτυχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης της κατανομής της αιολικής ισχύος για κάθε χρονικό βήμα σε αντίθεση με τα συστήματα πρόβλεψης που ήδη έχουν περιγραφεί που είναι σχεδιασμένα για την πρόβλεψη σημείου της αιολικής ισχύος.

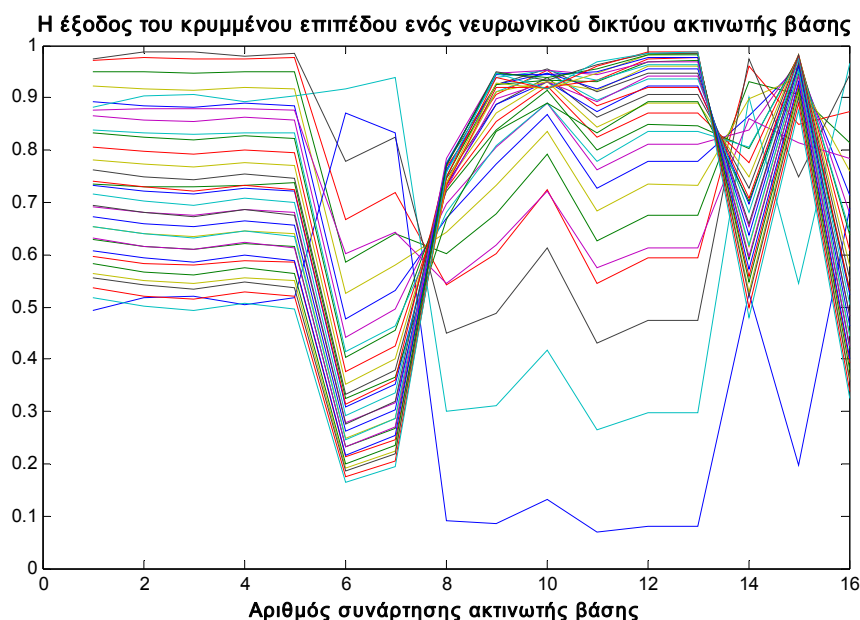
Όπως θα γίνει φανερό στο επόμενο κεφαλαίο, τα συστήματα πρόβλεψης σημείου, παρουσιάζουν όμοια απόδοση με τα πιο σύγχρονα αντίστοιχα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Παρ' όλ' αυτά ο τυπικός μέσος όρος του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι πολύ υψηλός σύμφωνα με τις απαιτήσεις των διαχειριστών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Ιδίως σε γεγονότα που θεωρούνται ακραία όπως όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάνει το όριο αποκοπής, το σφάλμα της πρόβλεψης αναμένεται να είναι πολύ μεγάλο. Επομένως, το κύριο ενδιαφέρον ενός χρήστη των πιθανοτικών προβλέψεων της αιολικής ισχύος είναι η αξιόπιστη προσέγγιση των μεγάλων σφαλμάτων. Οπότε για την δημιουργία του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης που θα περιγραφεί εδώ, έμφαση δίνεται στον αξιόπιστο σχεδιασμό των άκρων της προβλεπόμενης κατανομής της αιολικής ισχύος, δηλαδή την προσέγγιση των πιο απομακρυσμένων σημείων από την ντετερμινιστική πρόβλεψη που είναι όμως πιθανόν να εμφανιστούν.

Τα Μοντέλα I και II όπως φάνηκε προσπαθούν να εντοπίσουν την ασάφεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού για να βελτιώσουν την απόδοσή τους. Αντίθετα, το προτεινόμενο μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος έχει σαν σκοπό να εντοπίσει όλα τα σενάρια που μπορεί να προκύψουν με την υπάρχουσα γνώση. Στην ουσία προσπαθεί να εκτιμήσει όλα τα σφάλματα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που θα προκύψουν από ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και όλες τις πιθανές τιμές της αιολικής ισχύος που προκύπτουν δεδομένου την πρόβλεψη της ατμοσφαιρικής κατάστασης από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Έτσι το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να εντοπίζει τα σφάλματα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αλλά και τις αδυναμίες των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.

Το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης βασίζεται στο σύστημα πρόβλεψης Μοντέλου II. Η μέθοδος δηλαδή που εφαρμόζεται στο μοντέλο αυτό, χρησιμοποιεί τον ίδιο διαχωρισμό του προβλήματος της πρόβλεψης ο οποίος δημιουργείται από τον αυτό-οργανούμενο χάρτη της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης. Επιπλέον, χρησιμοποιεί τη μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, για να εκτιμήσει την αβεβαιότητα που προέρχεται από τις μετεωρολογικές προβλέψεις. Λαμβάνει επίσης, την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος του Μοντέλου II και τέλος χρησιμοποιεί στοιχεία από την δομή των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης της μονάδας τελικής πρόβλεψης για να προσεγγίσει με καλύτερο τρόπο την αβεβαιότητα της. Γενικά, η ιδέα της μεθόδου που ακολουθεί είναι να βρει τις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ της απόδοσης του Μοντέλου II με τους παραμέτρους των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης και με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού.

Η μέθοδος που ακολουθεί το πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης, βασίζεται στη δομή των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφηκε η δομή ενός τέτοιου νευρωνικού δικτύου. Όπως αναφέρθηκε ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης στο πρώτο επίπεδο περιέχει τις συναρτήσεις ακτινωτής βάσης. Οι συναρτήσεις αυτές περιγράφουν όλες τις περιπτώσεις που αποτελούν το πρόβλημα της πρόβλεψης. Η έξοδος του πρώτου επιπέδου δείχνει στην ουσία πόσο κοντά είναι η τρέχουσα περίπτωση που μελετάται η αβεβαιότητα της, με τις βάσεις των συναρτήσεων. Έτσι ανάλογα με την έξοδο της κάθε συνάρτησης βάσης υπολογίζεται η τιμή της αιολικής ισχύος. Μάλιστα όσο πιο κοντά είναι το υπό μελέτη δείγμα με κάποιον από τους πυρήνες του πρώτου επιπέδου τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα να είναι ακριβής η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος που θα προκύψει. Στο σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η έξοδος του πρώτου επιπέδου του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης της μονάδας τελικής

πρόβλεψης του Μοντέλου II για διάφορες περιπτώσεις που αντιστοιχούν στη τρίτη κατηγορία.



Σχήμα 6.12 Η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης της μονάδας της τελικής πρόβλεψης του Μοντέλου II που αντιστοιχεί στην τρίτη κατηγορία, σε διάφορες περιπτώσεις πρόβλεψης.

Απ' το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι είναι δυνατόν να ομαδοποιηθούν οι αποκρίσεις του κρυμμένου επιπέδου με βάση τα κοινά στατιστικά τους χαρακτηριστικά. Αποδείχθηκε ότι η κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος έχει συγκεκριμένες ιδιότητες αν ληφθεί υπ' όψη η μορφή που έχει η έξοδος του πρώτου επιπέδου. Έτσι ταξινομώντας την κυματομορφή της εξόδου με βάση τα στατιστικά της χαρακτηριστικά είναι δυνατόν να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το σφάλμα της τελικής πρόβλεψης.

Ένα κατάλληλο εργαλείο για την ομαδοποίηση ενός συνόλου δεδομένων που αποδείχθηκε και στην κατηγοριοποίηση της ατμοσφαιρικής κατάστασης στο Μοντέλου II, είναι ο αυτό-οργανούμενος χάρτης. Γι' αυτό το λόγο εφαρμόστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο σαν κι αυτό να οργανώσει σε διαφορετικές κατηγορίες την έξοδο του πρώτου επιπέδου των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης. Για κάθε νευρωνικό δίκτυο της μονάδας της τελικής πρόβλεψης του Μοντέλου II ξεχωριστά, εφαρμόστηκε ένας αυτό-οργανούμενος χάρτης. Ο κάθε χάρτης λαμβάνει την έξοδο του κρυμμένου επιπέδου και την χωρίζει σε πολλαπλές ομάδες. Για την πρώτη κατηγορία της ατμοσφαιρικής κατάστασης δημιουργήθηκαν τριάντα δύο ομάδες, για την δεύτερη δέκα έξι και για την τρίτη είκοσι τέσσερις ομάδες.

Με βάση λοιπόν την κυματομορφή της εξόδου του πρώτου επιπέδου, συγκεντρώνονται όλοι οι παράμετροι από τους οποίους μπορεί να ανακτηθεί πληροφορία σχετικά με την κατανομή του σφάλματος της αιολικής ισχύος. Τέτοιοι παράμετροι είναι οι αποκρίσεις των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης του μοντέλου αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Στη πραγματικότητα και εδώ χρησιμοποιούνται οι αποστάσεις των αποκρίσεων αυτών με την πρόβλεψη της μονάδας προκαταρκτικής πρόβλεψης.

Μία άλλη παράμετρος που έχει σχέση με την αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, είναι ο 'νικητής' νευρώνας. Ο 'νικητής' νευρώνας είναι η συνάρτηση ακτινωτής βάσης η οποία έχει την μικρότερη απόσταση από το υπό μελέτη δείγμα. Ο 'νικητής' νευρώνας είναι εκείνη η συνάρτηση βάσης που διαμορφώνει περισσότερο την τελική έξοδο του νευρωνικού δικτύου ακτινωτής βάσης. Παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις που υπάρχει

μεγάλη αβεβαιότητα, κάποιιοι συγκεκριμένοι νευρώνες ενεργοποιούνται περισσότερο και προκύπτουν σαν ‘νικητές’.

Ένας άλλος τρόπος για να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αβεβαιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, είναι να ληφθούν υπ’ όψιν οι παλαιότερες προβλέψεις του μετεωρολογικού μοντέλου. Όπως έχει αναφερθεί τα περισσότερα μετεωρολογικά μοντέλα αναβαθμίζουν τις προβλέψεις τους κάθε έξι ώρες, ενώ ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης ξεπερνάει τις σαράντα οχτώ ώρες. Συνεπώς, για ένα ορισμένο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης υπάρχουν παραπάνω από μία εκτιμήσεις της ατμοσφαιρικής κατάστασης. Δηλαδή για κάποια χρονικά βήματα μπροστά είναι διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού από διαφορετικές αναβαθμίσεις. Έτσι αν οι αναβαθμίσεις του μετεωρολογικού μοντέλου συμφωνούν μεταξύ τους για τις συγκεκριμένες ώρες, τότε μπορεί να δοθεί εμπιστοσύνη στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού, αντίθετα η ατμοσφαιρική κατάσταση χαρακτηρίζεται ασταθής και συνεπώς η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος αναμένεται μεγάλη. Στη παρούσα εφαρμογή σαν μέτρο σύγκρισης των αναβαθμίσεων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού χρησιμοποιήθηκε από τη μία η τυπική απόκλιση των τιμών της ταχύτητας του ανέμου και από την άλλη η τυπική απόκλιση των τιμών της διεύθυνσης που αντιστοιχούν στην ώρα της πρόβλεψης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της διεύθυνσης του ανέμου ανάγονται πρώτα σε πολικές συντεταγμένες.

Για την παρούσα περίπτωση λαμβάνονται υπ’ όψιν οι τελευταίες τέσσερις αναβαθμίσεις του μοντέλου HIRLAM. Ο χρονικός ορίζοντας του HIRLAM είναι σαράντα οχτώ ώρες, ενώ οι αναβαθμίσεις του λαμβάνονται κάθε έξι ώρες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επειδή η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος γίνεται ανά ώρα και χρησιμοποιείται και η τιμή της ταχύτητας του ανέμου που αντιστοιχεί στην επόμενη ώρα από αυτήν της πρόβλεψης, ο χρονικός ορίζοντας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος διαμορφώνεται στις σαράντα ένα ώρες. Τώρα όμως που η απαίτηση είναι να υπάρχουν διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού από τέσσερις παλαιότερες αναβαθμίσεις, ο χρονικός ορίζοντας της πιθανοτικής πρόβλεψης μειώνεται στις είκοσι τέσσερις ώρες.

Συνοψίζοντας οι παράμετροι που συνδυάζονται για τον προσδιορισμό της αβεβαιότητας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και για τον σχηματισμό της προβλεπόμενης κατανομής της, είναι η τελική πρόβλεψη του Μοντέλου II $\hat{p}_{t+h/t}$, οι αποστάσεις R_W και R_D των εξόδων των νευρωνικών δικτύων της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού με την προκαταρκτική πρόβλεψη του Μοντέλου II, ο ‘νικητής’ νευρώνας I_{RBF} , οι τυπικές αποκλίσεις STD_W και STD_D των τιμών της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αντίστοιχα που προέρχονται από τις τέσσερις τελευταίες αναβαθμίσεις του μετεωρολογικού μοντέλου και τέλος το χρονικό βήμα της πρόβλεψης.

Όλοι οι παραπάνω παράμετροι συνδυάζονται από νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης σύμφωνα με την ομάδα που ανήκει η έξοδος του κρυμμένου επιπέδου την οποία καθορίζει ο αυτό-οργανούμενος χάρτης. Έτσι λοιπόν εφαρμόστηκαν τριάντα δύο νευρωνικά δίκτυα για την πρώτη κατηγορία της ατμοσφαιρικής κατάστασης, δεκαέξι νευρωνικά δίκτυα για τη δεύτερη κατηγορία και τέλος για την τρίτη κατηγορία είκοσι τέσσερα. Κάθε νευρωνικό δίκτυο λαμβάνει στην είσοδο του τους παραπάνω παραμέτρους. Οι τιμές των παραμέτρων στην είσοδο των νευρωνικών δικτύων είναι προσαρμοσμένες να έχουν την ίδια τάξη μεγέθους, δηλαδή όλοι οι παράμετροι έχουν την ίδια βαρύτητα στην πρόβλεψη. Η είσοδος των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης του μοντέλου της πιθανοτικής πρόβλεψης έχει την παρακάτω μορφή.

$$I(t+h/t) = f(\hat{p}_{t+h/t}, R_W, R_D, I_{RBF}, STD_W, STD_D, k) \quad (6.8)$$

Όπου $\hat{p}_{t+h/t}$ είναι η πρόβλεψη του Μοντέλου II,

R_W είναι η απόσταση της προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II από την έξοδο του νευρωνικού δικτύου της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που είναι εκπαιδευμένο με τις τιμές της ταχύτητας,

R_D είναι η απόσταση της προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II από την έξοδο του νευρωνικού δικτύου της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που είναι εκπαιδευμένο με την τιμή της αιολικής ισχύος, της διεύθυνσης του ανέμου και την ώρα της πρόβλεψης,

I_{Rbf} είναι ο 'νικητής' νευρώνας

STD_W και STD_D είναι οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου αντίστοιχα από τις τέσσερις αναβαθμίσεις του μετεωρολογικού μοντέλου

k είναι το χρονικό βήμα της πρόβλεψης.

Τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που συνδυάζουν τους παραπάνω παραμέτρους είναι σχεδιασμένα να προβλέπουν την κατανομή της αιολικής ισχύος με την μορφή εκατοστημορίων. Δηλαδή, η έξοδος των νευρωνικών δικτύων αποτελείται από οχτώ τιμές οι οποίες αντιστοιχούν σε ένα εκατοστημόριο της προβλεπόμενης κατανομής της αιολικής ισχύος. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν να προβλέπονται κάθε φορά τα 5, 10, 25, 40, 60, 75, 90 και 95 εκατοστημόρια για την εκτίμηση της κατανομής. Ενώ, σαν 50 εκατοστημόριο θεωρείται η πρόβλεψη του συστήματος Μοντέλου II.

Αν και, η ανάπτυξη του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης που παρουσιάστηκε, είναι επίπονη λόγω του μεγάλου αριθμού των νευρωνικών δικτύων που περιέχει, η απόδοση του μοντέλου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική για έναν διαχειριστή δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Το προτεινόμενο μοντέλο έχει την δυνατότητα να προβλέπει με εξαιρετική ακρίβεια ακραία φαινόμενα όπως θα φανεί στο επόμενο κεφάλαιο.

6.7 Συμπεράσματα

Κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν δύο συστήματα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος βασισμένα σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης και ασαφής λογικής. Τα συστήματα πρόβλεψης που ονομάστηκαν Μοντέλου I και Μοντέλου II χρησιμοποιούν την χρονοσειρά της αιολικής ισχύος και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Και τα δύο μοντέλα πρόβλεψης προσεγγίζουν το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος αξιολογώντας πρώτα τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού και στη συνέχεια εφαρμόζουν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης για κάνουν την πρόβλεψη. Για τον εντοπισμό των 'φτωχών' μετεωρολογικών προβλέψεων χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ασαφούς λογικής, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις που κρίθηκε σκόπιμο να διαιρεθεί το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος εφαρμόστηκαν αυτό-οργανούμενοι χάρτες.

Συγκεκριμένα, το Μοντέλο I ελέγχει πρώτα τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού μέσω ενός μοντέλου βασισμένο με ασαφή λογική που χρησιμοποιεί συνδυαστικά τις αθροιστικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου και της αιολικής ισχύος. Η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος του Μοντέλου I προκύπτει μέσω νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης που είναι εκπαιδευμένα με βάση την έξοδο της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού.

Από την άλλη, το Μοντέλο II αποτελείται από τρία μοντέλα. Πρώτα γίνεται μία πρώτη εκτίμηση της αιολικής ισχύος από τη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης. Η μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης είναι πολύ σημαντική γιατί καθορίζει τη δομή του υπόλοιπου μοντέλου. Περιέχει έναν αυτό-οργανούμενο χάρτη που χωρίζει το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε τρεις κατηγορίες με βάση την πρόβλεψη της ατμοσφαιρικής κατάστασης. Παράλληλα, η προκαταρκτική πρόβλεψη χρησιμοποιείται για να αξιολογηθούν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού από την αντίστοιχη μονάδα. Η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού συνδυάζει με ασαφή λογική την προκαταρκτική πρόβλεψη και τις εξόδους δύο νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης που έχουν σχεδιαστεί με τρόπο που η λειτουργία να μοιάζει με αυτήν ενός μοντέλου καμπύλης ισχύος. Τέλος, τα αποτελέσματα των παραπάνω δύο μονάδων συνδυάζονται με νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που παρέχουν και την τελική πρόβλεψη της αιολικής ισχύος.

Τα μοντέλα πρόβλεψης Μοντέλο I και Μοντέλο II σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να λειτουργούν on-line. Η εκτίμηση των παραμέτρων τους μπορεί να γίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ χρειάζονται λίγα δευτερόλεπτα για να εκτελεστούν σε κανονική λειτουργία. Το Μοντέλο II, μάλιστα, ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα του ANEMOS [146] και εκτελέστηκε με επιτυχία on-line για διάφορα αιολικά πάρκα της Ευρώπης. Αποτελέσματα από την παραπάνω λειτουργία του Μοντέλου II παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος η μελέτη πάνω στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος έκλεισε με την δημιουργία ενός μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος το οποίο εκτιμώντας κατά προσέγγιση την αβεβαιότητα του Μοντέλου II προβλέπει όλες τις πιθανές τιμές της αιολικής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό δόθηκε λύση στην εκτίμηση της αιολικής ισχύος στις ακραίες καταστάσεις που τα μοντέλα πρόβλεψης αδυνατούσαν να προσεγγίσουν.

Κεφάλαιο 7

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

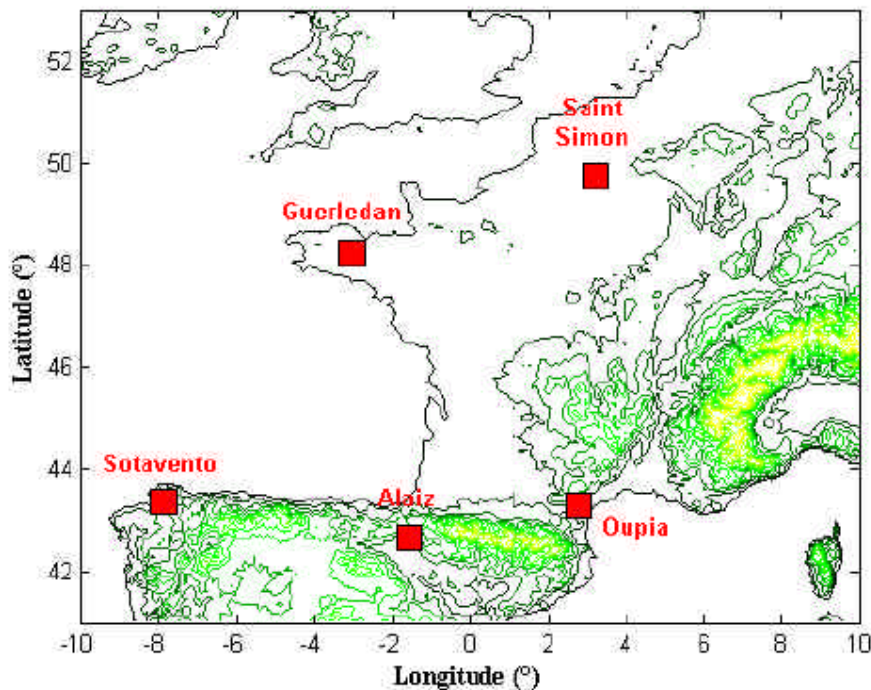
7.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκαν τα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος το Μοντέλο I και το Μοντέλο II που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, καθώς και οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για την βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Η επικύρωση της απόδοσης τους πραγματοποιήθηκε σε τρία αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε λειτουργία και είναι τοποθετημένα σε έδαφος με διαφορετικό περιβάλλον. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να πιστοποιηθεί η λειτουργία των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος τόσο off-line, όσο και on-line και παράλληλα, να αποτιμηθούν σε διαφορετικές συνθήκες.

Τα αιολικά πάρκα επιλέχθηκαν έτσι ώστε τα μοντέλα πρόβλεψης να επικυρωθούν σε όλες τις περιπτώσεις των παραμέτρων που επηρεάζουν την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος. Έτσι, το κάθε αιολικό πάρκο είναι τοποθετημένο σε διαφορετικό τύπο εδάφους και με διαφορετική ονομαστική αιολική ισχύ. Παράλληλα, σε κάθε αιολικό πάρκο επικρατούν

διαφορετικά φαινόμενα της ροής του ανέμου που οφείλονται στη επίδραση τοπολογίας του εδάφους της περιοχής που είναι τοποθετημένα. Συγκεκριμένα, το αιολικό πάρκο του Golagh βρίσκεται στην Ιρλανδία τοποθετημένο σε πολύπλοκο έδαφος. Εκεί, το φαινόμενο της γέφυρας όρους-κοιλάδας είναι ιδιαίτερα έντονο. Επίσης, τα μέτωπα έρχονται απ' ευθείας από τον ωκεανό και είναι πολλές φορές ακραία. Αντίθετα, το αιολικό πάρκο Klim που βρίσκεται στη Δανία είναι τοποθετημένο πάνω σε ακτογραμμή που χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο γέφυρας στεριάς-θάλασσας. Τέλος, τα προτεινόμενα μοντέλα πρόβλεψης εφαρμόστηκαν και στο αιολικό πάρκο Tunoe-Knob το οποίο είναι χαμηλής ονομαστικής ισχύος και βρίσκεται πάνω στην θάλασσα ανατολικά της Δανίας. Στα θαλάσσια πάρκα ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μεταβλητότητα της τραχύτητας της θάλασσας, αλλά και οι αλληλεπιδράσεις της ακτής στη ροή του ανέμου.

Εκτός από την αποτίμηση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II σε off-line εκτέλεση στα παραπάνω αιολικά πάρκα, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα του Μοντέλου II που εκτελέστηκε on-line μέσω της πλατφόρμας του ANEMOS σε πέντε αιολικά πάρκα της Ευρώπης του Alaiz, του Sotavento, της Ουρία, του Saint Simon και του Guerledan. Η τοποθεσία του κάθε αιολικού πάρκου φαίνεται στον παρακάτω χάρτη. Τα αιολικά πάρκα και σε αυτήν την περίπτωση είναι κατάλληλα επιλεγμένα ώστε το Μοντέλο II να αποτιμηθεί σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών κλιματολογίας και τοπογραφίας. Παράλληλα, η απόδοση του Μοντέλου II συγκρίνεται με αυτή δύο διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που ήταν ενσωματωμένα στην πλατφόρμα του ANEMOS ταυτόχρονα. Γενικά, η αποτίμηση και η εκτέλεση των μοντέλων που εγκατασταθήκαν στην πλατφόρμα του ANEMOS [146] έγινε από τον Ignacio Marti και τον Vincent Guenard και παρουσιάστηκαν στα [147] και [148].



Σχήμα 7.1 Οι τοποθεσίες των αιολικών πάρκων στα οποία εφαρμόστηκε on-line το Μοντέλο II.

Η αποτίμηση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II βασίστηκε στο πρωτόκολλο αποτίμησης του Madsen που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 4. Το πρωτόκολλο αποτίμησης δημιουργήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ANEMOS [122] με σκοπό να υπάρξει μία κοινή μέθοδος αποτίμησης των μοντέλων πρόβλεψης που συμμετείχαν. Σήμερα πλέον, έχει γίνει αποδεκτό από όλους ως μέθοδος αποτίμησης στην αγορά ενέργειας, καθώς

επίσης, η μέθοδος της παραμένουσας τιμής (persistence) έχει επικρατήσει σαν μοντέλο αναφοράς.

Τέλος, στο κεφάλαιο αυτό θα αξιολογηθεί η απόδοση του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης μέσω των κριτηρίων της αξιοπιστίας και της αιχμηρότητας. Η αποτίμηση έγινε ενδεικτικά για το αιολικό πάρκο Klim. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι λόγω της πολυπλοκότητας αυτού του μοντέλου, η εκπαίδευση του απαιτεί η χρονοσειρά της αιολικής ισχύος να είναι μακροχρόνια. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται μόνο για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο.

7.2 Off-line αποτίμηση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος του Μοντέλου I και του Μοντέλου II για τρία αιολικά πάρκα ξεχωριστά. Θα αναλυθούν στιγμιότυπα της πρόβλεψης του κάθε μοντέλου σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες και θα εκτιμηθεί η απόδοση με βάση τις κατηγορίες σφαλμάτων. Ακόμη, θα παρουσιαστεί η κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Σαν μέθοδο επικύρωσης κάθε φορά εφαρμόζεται η μέθοδος της παραμένουσας τιμής και υπολογίζεται η επί τοις εκατό βελτίωση της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση τη μέθοδο αυτή. Τέλος, παρουσιάζεται η ικανότητα των μονάδων αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού του Μοντέλου I και του Μοντέλου II.

Η αποτίμηση των μοντέλων πρόβλεψης έγινε στο 20% περίπου της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος κάθε πάρκου, ενώ η υπόλοιπη χρονοσειρά χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των μονάδων που αποτελούνται. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και στις τρεις περιπτώσεις προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM και παρέχονται όπως έχει αναφερθεί κάθε έξι ώρες.

Τα κριτήρια αξιολόγησης που εφαρμόστηκαν στην αποτίμηση των μοντέλων πρόβλεψης είναι το μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) που περιγράφεται από την εξίσωση 4.9 και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) που δίνεται από την εξίσωση 4.8, κανονικοποιημένα με την ονομαστική τιμή του κάθε πάρκου. Τέλος, η απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης συγκρίνεται με την μέθοδο της παραμένουσας τιμής Persistence και παρουσιάζεται η επί τοις εκατό βελτίωση των μοντέλων πρόβλεψης σε αντιστοιχία με την μέθοδο αυτή.

7.2.1 Αποτίμηση σε αιολικό πάρκο με πολύπλοκο έδαφος

Η παρουσίαση της απόδοσης του Μοντέλου I και του Μοντέλου II ξεκινάει με το αιολικό πάρκο Golagh. Το αιολικό πάρκο Golagh βρίσκεται στο Donegal Country στην βορειοδυτική Ιρλανδία σε υψόμετρο 370m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πάρκο αυτό έχει ονομαστική τιμή ισχύος 15 MW και αποτελείται από 25 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V42 600 kW. Η περιοχή είναι λοφώδης και δασική. Το έδαφος θεωρείται πολύπλοκο με δείκτη ανωμαλίας (RIX) 7.3 [96].

Η χρονοσειρά της αιολικής ισχύος για το αιολικό πάρκο Golagh καλύπτει την περίοδο από 01/08/2002 έως 31/03/2003. Σαν χρονικές περιόδους εκπαίδευσης και αποτίμησης ορίστηκαν η περίοδος από την 01/08/2002 μέχρι 31/01/2003 και η περίοδος από 01/02/2003 - 31/03/2003 αντίστοιχα.

7.2.1.(α) Αποτίμηση του Μοντέλου I

Για την αποτίμηση του Μοντέλου I υπολογίστηκε το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) και η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE), όπως ορίζονται από το πρωτόκολλο αποτίμησης του Madsen και περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Στον πίνακα I φαίνεται η τιμή του NMAE σε όλον τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης του Μοντέλου I και η αντίστοιχη τιμή της παραμένουσας τιμής (Persistence). Παράλληλα, στον πίνακα II παρουσιάζονται η τιμή του NRMSE και για τις δύο μεθόδους για κάθε χρονικό βήμα της πρόβλεψης. Οι τιμές των κριτηρίων NMAE και NRMSE

παρουσιάζονται σχηματικά στα σχήματα 7.2 και 7.3 αντίστοιχα. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η ρίζα του τετραγωνικού σφάλματος είναι κανονικοποιημένα με την ονομαστική τιμή της ισχύος του αιολικού πάρκου που είναι 15MW.

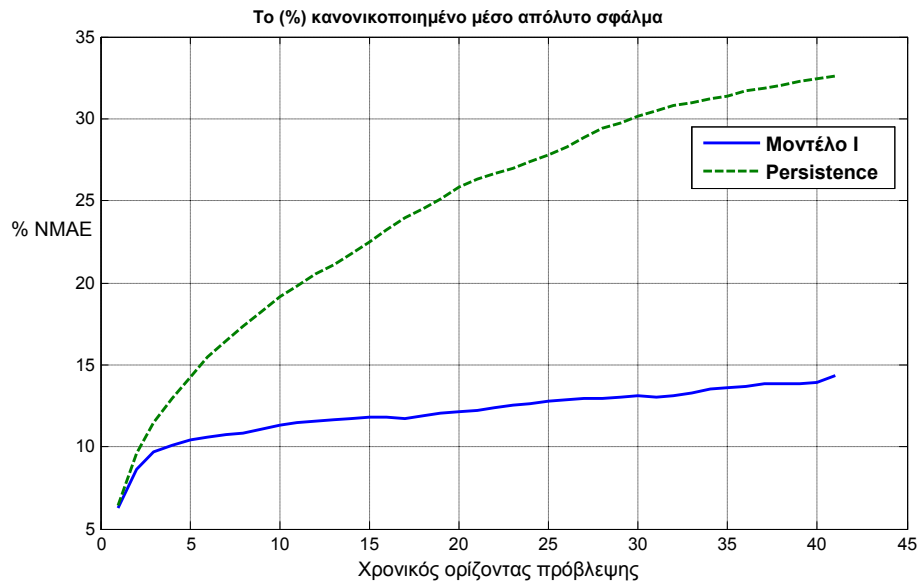
Πινάκας Ι
Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου Ι και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου Ι	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου Ι	(%) NMAE Persistence
1	6.27	6.46	22	12.34	26.66
2	8.63	9.51	23	12.50	27.01
3	9.65	11.48	24	12.58	27.39
4	10.09	12.93	25	12.76	27.80
5	10.3	14.25	26	12.89	28.31
6	10.61	15.45	27	12.92	28.87
7	10.71	16.43	28	12.93	29.40
8	10.85	17.37	29	13.02	29.73
9	11.06	18.24	30	13.08	30.13
10	11.28	19.18	31	13.06	30.46
11	11.44	19.81	32	13.13	30.77
12	11.52	20.51	33	13.30	30.98
13	11.63	21.13	34	13.48	31.20
14	11.75	21.73	35	13.58	31.37
15	11.82	22.47	36	13.71	31.71
16	11.78	23.21	37	13.83	31.87
17	11.75	23.91	38	13.86	32.03
18	11.86	24.51	39	13.86	32.26
19	12.04	25.12	40	13.91	32.44
20	12.13	25.83	41	14.31	32.56
21	12.20	26.33			

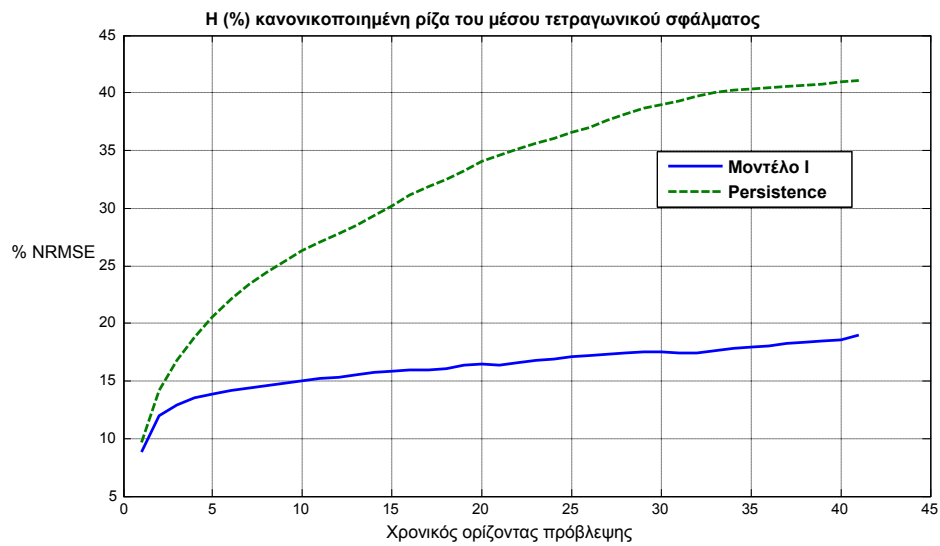
Πινάκας ΙΙ
Η (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου Ι και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου Ι	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου Ι	(%) NMAE Persistence
1	8.81	9.63	22	16.54	35.09
2	11.93	14.18	23	16.72	35.59
3	12.94	16.81	24	16.90	36.06
4	13.50	18.79	25	17.07	36.52
5	13.86	20.55	26	17.21	37.01
6	14.17	22.12	27	17.35	37.59
7	14.36	23.40	28	17.44	38.17
8	14.54	24.46	29	17.51	38.65
9	14.79	25.32	30	17.53	39.00
10	15.02	26.25	31	17.40	39.31
11	15.21	27.07	32	17.45	39.72
12	15.34	27.79	33	17.64	40.05
13	15.50	28.51	34	17.81	40.21
14	15.69	29.32	35	17.94	40.28
15	15.85	30.23	36	18.08	40.44
16	15.91	31.10	37	18.24	40.54

17	15.95	31.81	38	18.36	40.63
18	16.05	32.48	39	18.44	40.77
19	16.31	33.24	40	18.51	40.93
20	16.40	34.03	41	18.94	41.11
21	16.41	34.59			



Σχήμα 7.2 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Golagh

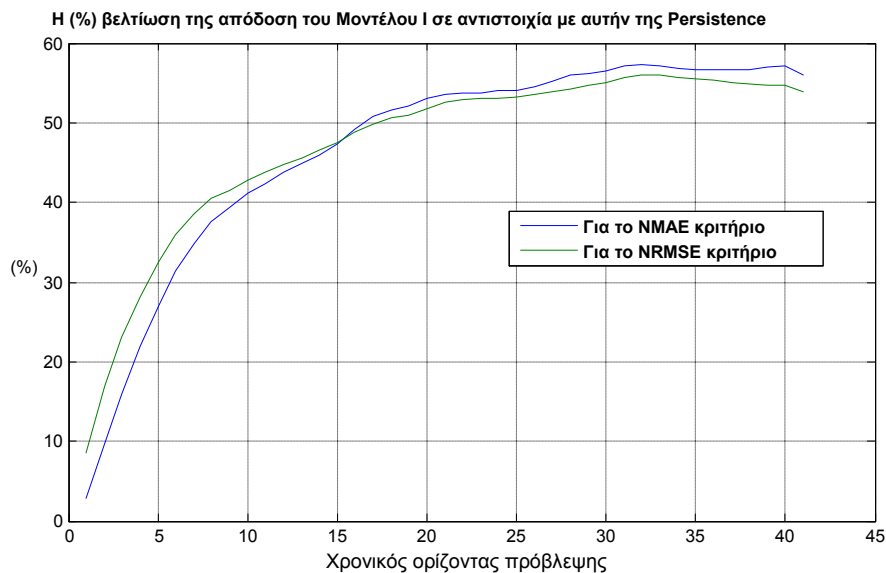


Σχήμα 7.3 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Golagh

Από τους πίνακες I και II φαίνεται ότι η απόδοση του Μοντέλου I είναι καλύτερη από αυτή της μεθόδου της παραμένουσας τιμής (Persistence) για κάθε χρονικό βήμα της πρόβλεψης. Ιδίως στα πρώτα χρονικά βήματα πρόβλεψης όπου η μέθοδος Persistence συνήθως ξεπερνάει την απόδοση ακόμα και των πιο προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης, η απόδοση του Μοντέλου I φαίνεται ότι είναι καλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόδοση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι μειωμένη στα πρώτα έξι βήματα πρόβλεψης και ιδιαίτερα όταν αναφέρονται σε περιοχές με πολύπλοκο έδαφος. Παρ' όλ' αυτά, το Μοντέλο I δεν φαίνεται να επηρεάζεται τόσο πολύ από τις 'φτωχές' αριθμητικές προβλέψεις καιρού, λόγω της μονάδας αξιοπιστίας της ποιότητας των μετεωρολογικών προβλέψεων που περιέχει.

Πρέπει να σημειωθεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι η τιμή του NMAE κριτηρίου δεν ξεπερνάει το 15%, ενώ παράλληλα η τιμή του NRMSE κριτηρίου δεν υπερβαίνει το 20%. Δηλαδή η απόδοση του Μοντέλου I είναι πολύ καλή, συγκρίνοντας την με την αντίστοιχη άλλων μοντέλων που συμμετείχαν στο πρόγραμμα ANEMOS, που θεωρούνται τα πιο προηγμένα σήμερα, για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο και για το ίδιο χρονικό διάστημα αποτίμησης. Έτσι, το Μοντέλο I φαίνεται να προβλέπει σωστά το ποσό της αιολικής ισχύος που παράγεται μέσω του NMAE κριτηρίου, αλλά και τις μεταβολές της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος για κάθε χρονικό βήμα μέσω του NRMSE κριτηρίου.

Συγκεκριμένα, για χρονικό ορίζοντα μέχρι έξι ώρες μπροστά η μέση τιμή του NMAE είναι μόλις 9.27% και η αντίστοιχη τιμή του NRMSE κριτηρίου είναι 12.51%. Επίσης, η τιμή του NMAE υπερβαίνει το 10% από το πέμπτο χρονικό βήμα και έπειτα. Παράλληλα, η απόδοση για το NMAE κριτήριο του Μοντέλου I είναι 11.12% στο πρώτο εικοσιτετράωρο, ενώ για το δεύτερο εικοσιτετράωρο για τα βήματα πρόβλεψης δηλαδή από είκοσι τέσσερα μέχρι σαράντα ένα, είναι 13.41%. Η πολύ καλή απόδοση του Μοντέλου I φαίνεται ακόμη συγκρίνοντας την με τις τιμές του NMAE της μεθόδου Persistence που για το πρώτο εικοσιτετράωρο είναι 19.87% και για το δεύτερο 30.7. Δηλαδή, το Μοντέλο I αποδίδει πάνω από δυο φορές καλύτερα από την μέθοδο Persistence. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 7.4 που παρουσιάζεται η επί τοις εκατό βελτίωση της απόδοσης του Μοντέλου I έναντι της μεθόδου Persistence.



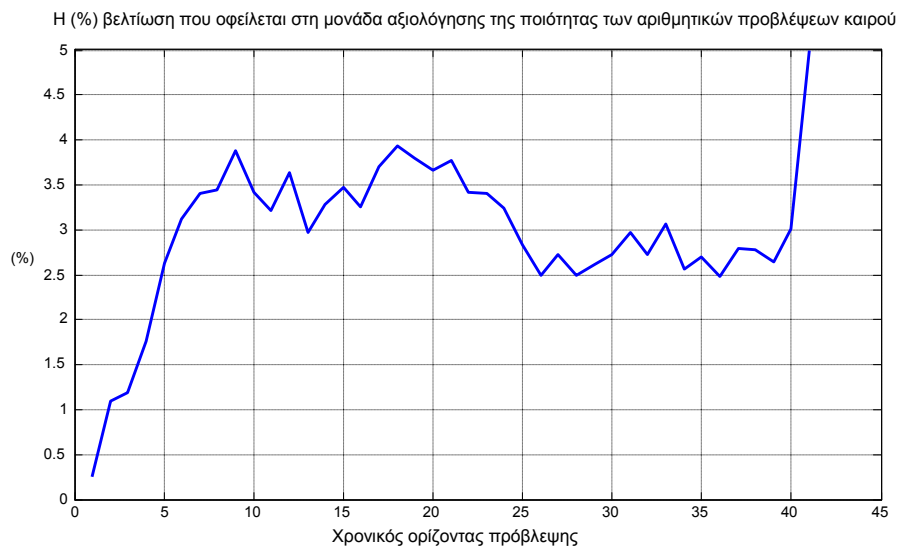
Σχήμα 7.4 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Golagh

Κατ' αρχήν, φαίνεται και εδώ ότι η απόδοση του Μοντέλου I είναι πάντα καλύτερη από αυτήν της Persistence και για τα δύο κριτήρια NMAE και NRMSE, αφού η βελτίωση που

πετυχαίνεται σε αντιστοιχία με την Persistence είναι πάντα θετική. Παράλληλα, φαίνεται ότι η βελτίωση και στα δύο κριτήρια αυξάνεται απότομα στα πρώτα χρονικά βήματα και μάλιστα, ξεπερνάει το 30% για χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης πάνω από έξι ώρες. Επίσης, στα μακροχρόνια βήματα πρόβλεψης πάνω από δέκα οχτώ ώρες, η βελτίωση και για τα δύο κριτήρια είναι σταθερά πάνω από 50%. Δηλαδή, στα τελευταία είκοσι τρία βήματα, η απόδοση του Μοντέλου I είναι δύο φορές καλύτερη από αυτήν της Persistence και μάλιστα, η βελτίωση φτάνει το 57.3% για το NMAE κριτήριο στο τριακοστό δεύτερο χρονικό βήμα της πρόβλεψης.

Από την συνολική απόδοση του Μοντέλου I που παρουσιάστηκε παραπάνω, φάνηκε η καταλληλότητα των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης που επιλέχθηκαν για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, αλλά και η αποδοτικότητα των μεθόδων που ακολουθήθηκαν για την εκτίμηση των παραμέτρων τους. Εδώ τώρα, θα παρουσιαστεί η απόδοση της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στην συνολική απόδοση του Μοντέλου I με την παρακάτω μέθοδο.

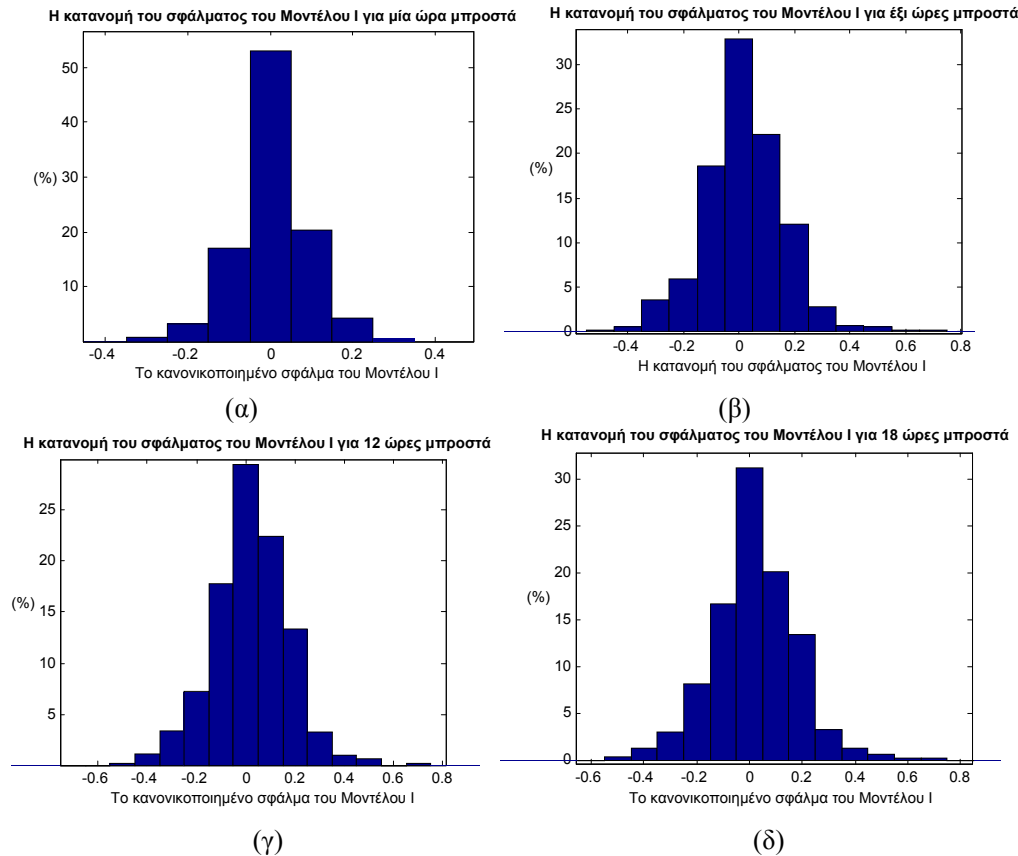
Από την περιγραφή της δομής του Μοντέλου I, ο ρόλος της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι να εντοπίζει τις φτωχές αριθμητικές προβλέψεις καιρού και να δίνει εντολή να εκτελεστεί το νευρωνικό δίκτυο ακτινωτής βάσης που έχει μάθει να προβλέπει αυτές τις περιπτώσεις. Για να επικυρωθεί η σημαντικότητα αυτής της μονάδας, δημιουργήθηκε ένα παρόμοιο μοντέλο πρόβλεψης με το Μοντέλο I. Αυτό αποτελείται από δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που έχουν εκπαιδευθεί με διαφορετικά σύνολα δεδομένων τα οποία έχουν διαμορφωθεί με τυχαίο τρόπο από το συνολικό σύνολο εκμάθησης του Μοντέλου I. Έτσι, κατά την εκτέλεση του παραπάνω μοντέλου πρόβλεψης, κάθε φορά επιλέγεται να εκτελεστεί τυχαία ένα από τα δύο νευρωνικά δίκτυα και με τον τρόπο αυτό παρέχεται η πρόβλεψη. Εκτελέστηκαν λοιπόν το Μοντέλο I και το βοηθητικό μοντέλο πρόβλεψης για την ίδια χρονική περίοδο και υπολογίστηκε η βελτίωση της απόδοσης που προκύπτει από τη μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5. Η μέση βελτίωση του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με το βοηθητικό μοντέλο πρόβλεψης είναι περίπου 3% για όλον τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης. Όπως δείχνει το σχήμα, η βελτίωση αυτή είναι σχεδόν σταθερή γύρω στο 3%, εκτός μόνο από τα πρώτα τέσσερα βήματα που ξεκινάει από το 0.5% την πρώτη ώρα και φτάνει στο 2.5% την τέταρτη. Αν και η βελτίωση έχει μικρή τιμή στα πρώτα βήματα της πρόβλεψης είναι όμως αρκετή για το Μοντέλο I να ξεπεράσει την απόδοση της Persistence. Ακόμη πρέπει να σημειωθεί ότι η βελτίωση δεν θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη γιατί το μοντέλο πρόβλεψης όταν εκτελείται σε αυτά τα βήματα στηρίζεται περισσότερο στην αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της αιολικής ισχύος από ότι στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού.



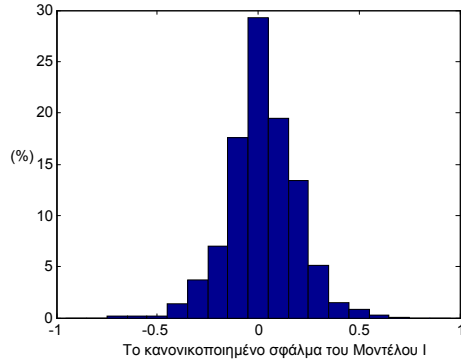
Σχήμα 7.5 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με το ένα αντίστοιχο μοντέλο πρόβλεψης που περιέχει δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης που εκτελούνται με τυχαίο τρόπο

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κατανομές του σφάλματος του Μοντέλου I για διάφορους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 7.6(α) φαίνεται ότι πάνω από το 50% των προβλέψεων στο χρονικό διάστημα αποτίμησης, είναι μεταξύ του $\pm 5\%$, ενώ μόνο το 10% των προβλέψεων είναι μεγαλύτερο του $\pm 25\%$. Επίσης, τα όρια της κατανομής δεν υπερβαίνουν $\pm 45\%$ της ονομαστικής τιμής του αιολικού πάρκου. Παράλληλα, από την κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης για έξι ώρες μπροστά (σχήμα 7.6(β)) το 50% των σφαλμάτων είναι μεταξύ του $\pm 15\%$ και περίπου το 30% των σφαλμάτων είναι στο διάστημα του $\pm 5\%$. Παρόμοια μορφή έχουν οι κατανομές των σφαλμάτων της πρόβλεψης σε πιο μακροχρόνιους ορίζοντες. Δηλαδή η κεντρική τιμή της κατανομής των σφαλμάτων για προβλέψεις πάνω από δώδεκα ώρες μπροστά κυμαίνεται μεταξύ του 25% και 30% ενώ τα άκρα των κατανομών μεγαλώνουν ανάλογα με το βήμα της πρόβλεψης. Επίσης, σε όλες τις κατανομές των σφαλμάτων της πρόβλεψης παρατηρείται σκέδαση προς τα δεξιά που οφείλεται στην μεγάλη αβεβαιότητα που υπάρχει όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στο όριο αποκοπής. Στις περιπτώσεις αυτές το σύστημα πρόβλεψης έχει την τάση να υποεκτιμά την αιολική παραγωγή σε ποσοστό που μπορεί να φτάνει και το 80% της ονομαστικής τιμής του αιολικού πάρκου.

Τέλος, στα σχήματα 7.7 παρουσιάζονται τρία στιγμιότυπα από την αποτίμηση του Μοντέλου I για 12, 24 και 36 ώρες μπροστά. Φαίνεται λοιπόν ότι και στους μακροχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης το προτεινόμενο σύστημα πρόβλεψης προβλέπει σωστά τις έντονες διακυμάνσεις και το μέγεθος της αιολικής παραγωγής.

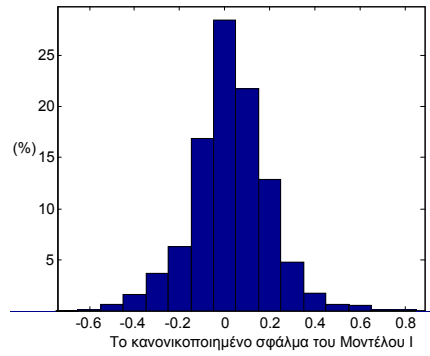


Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου I για 24 ώρες μπροστά



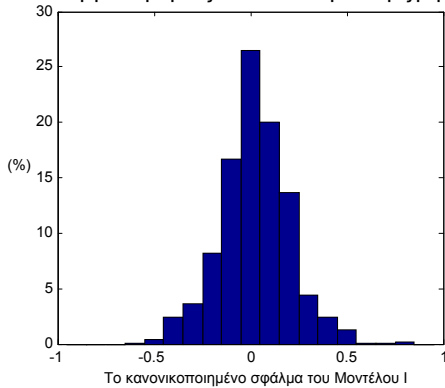
(ε)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου I για 28 ώρες μπροστά



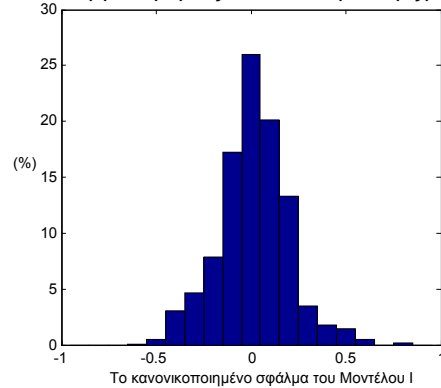
(στ)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου I για 36 ώρες μπροστά



(ζ)

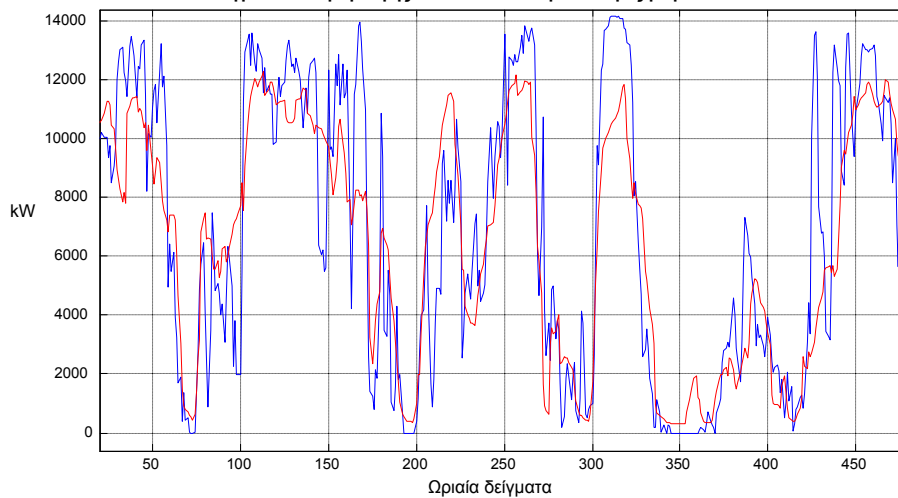
Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου I για 40 ώρες μπροστά

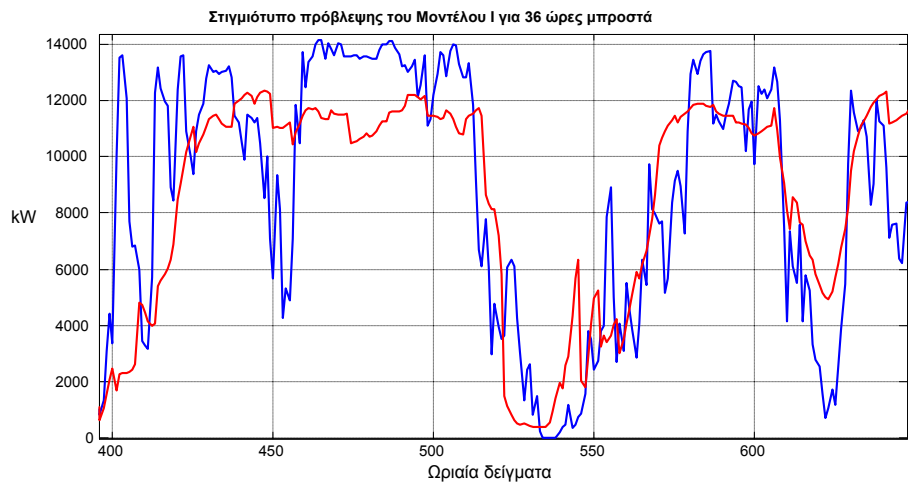
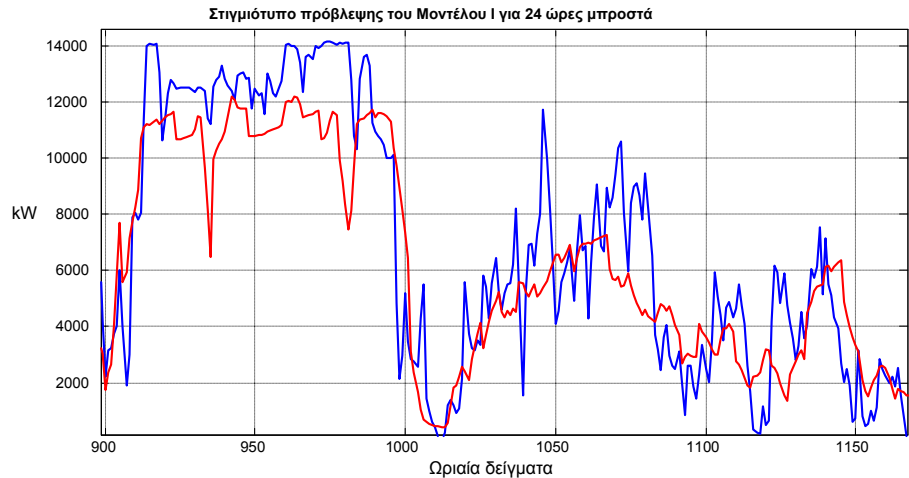


(η)

Σχήματα 7.6 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου I σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά

Στιγμιότυπο πρόβλεψης του Μοντέλου I για 12 ώρες μπροστά





Σχήμα 7.7 Τρία στιγμιότυπα από την αποτίμηση του Μοντέλου I για 12, 24 και 36 ώρες μπροστά για το αιολικό πάρκο Golagh

7.2.1.β Αποτίμηση του Μοντέλου II

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται η απόδοση του δεύτερου μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, του Μοντέλου II, μετά από την εκτέλεση του για το αιολικό πάρκο Golagh στην ίδια χρονική περίοδο που έγινε και η αποτίμηση του Μοντέλου I. Η μέθοδος αποτίμησης που ακολουθείται και εδώ, περιλαμβάνει τα NMAE και NRMSE κριτήρια, καθώς και τις κατανομές του κανονικοποιημένου σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για διάφορα χρονικά βήματα. Ακόμη, γίνεται σύγκριση με την μέθοδο Persistence μέσω του κριτηρίου της βελτίωσης της απόδοσης του Μοντέλου II που αναφέρεται στα κριτήρια NMAE και NRMSE.

Οι πίνακες III και IV περιέχουν τις τιμές των κριτηρίων NMAE και NRMSE αντίστοιχα, για το Μοντέλο II και την Persistence και για κάθε βήμα της πρόβλεψης, ενώ οι αντίστοιχες τιμές των παρουσιάζονται στα σχήματα 7.8 και 7.9. Παρατηρείται και για τα δύο κριτήρια μία σημαντική βελτίωση στην απόδοση του Μοντέλου II σε σχέση με αυτήν του Μοντέλου I.

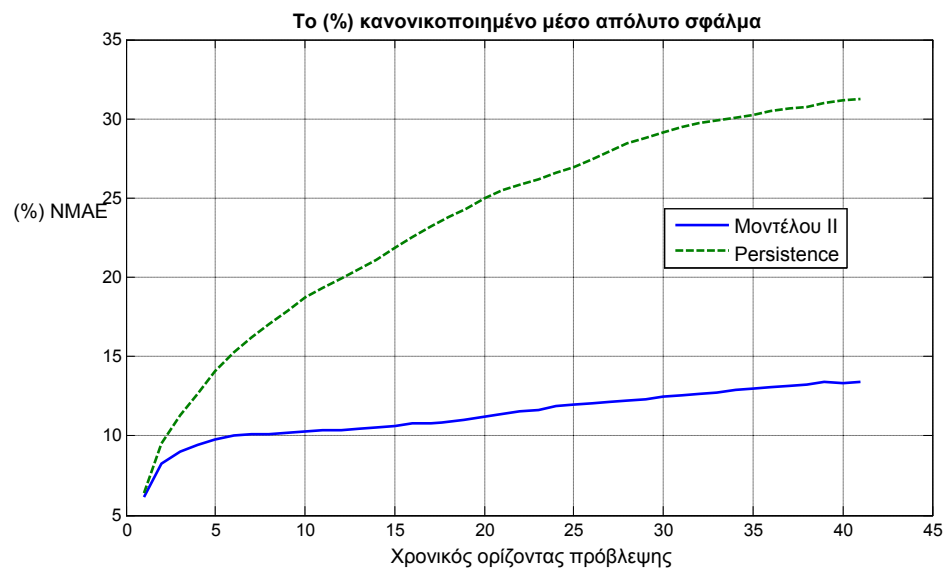
Πινάκας III
Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου II και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου II	(%) NMAE Persistence
1	6.11	6.46	22	11.51	26.66
2	8.23	9.51	23	11.66	27.01
3	9.02	11.48	24	11.86	27.39
4	9.39	12.93	25	11.93	27.80
5	9.76	14.25	26	12.04	28.31
6	10.00	15.45	27	12.13	28.87
7	10.07	16.43	28	12.19	29.40
8	10.12	17.37	29	12.30	29.73
9	10.19	18.24	30	12.43	30.13
10	10.27	19.18	31	12.56	30.46
11	10.35	19.81	32	12.62	30.77
12	10.38	20.51	33	12.70	30.98
13	10.45	21.13	34	12.87	31.20
14	10.55	21.73	35	13.02	31.37
15	10.66	22.47	36	13.08	31.71
16	10.78	23.21	37	13.13	31.87
17	10.77	23.91	38	13.27	32.03
18	10.85	24.51	39	13.37	32.26
19	11.02	25.12	40	13.34	32.44
20	11.24	25.83	41	13.43	32.56
21	11.38	26.33			

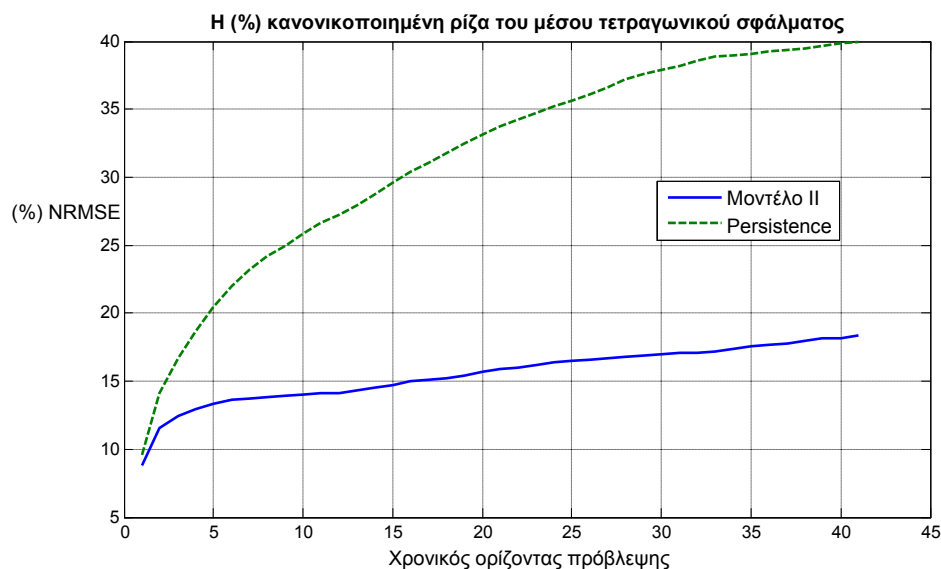
Πινάκας IV
Η (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου II και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου II	(%) NMAE Persistence
1	8.8	9.63	22	15.94	35.09
2	11.57	14.18	23	16.14	35.59
3	12.42	16.81	24	16.34	36.06
4	12.90	18.79	25	16.45	36.52
5	13.33	20.55	26	16.56	37.01
6	13.58	22.12	27	16.66	37.59
7	13.76	23.40	28	16.78	38.17
8	13.81	24.46	29	16.92	38.65
9	13.88	25.32	30	17.02	39.00
10	13.99	26.25	31	17.09	39.31

11	14.07	27.07	32	17.08	39.72
12	14.14	27.79	33	17.17	40.05
13	14.27	28.51	34	17.40	40.21
14	14.50	29.32	35	17.56	40.28
15	14.75	30.23	36	17.68	40.44
16	14.98	31.10	37	17.78	40.54
17	15.08	31.81	38	17.95	40.63
18	15.21	32.48	39	18.13	40.77
19	15.44	33.24	40	18.19	40.93
20	15.73	34.03	41	18.40	41.11
21	15.91	34.59			



Σχήμα 7.8 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του Μοντέλου II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Golagh



Σχήμα 7.9 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλου II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Golagh

Συγκεκριμένα, η τιμή του NMAE κριτηρίου για το Μοντέλο I δεν ξεπερνάει το 14% σε όλους τους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Αντίστοιχα, η τιμή του NRMSE κριτηρίου φτάνει το 18.4% στο τελευταίο χρονικό βήμα. Το μέσο απόλυτο σφάλμα εδώ ξεπερνάει το 10% μετά από το έκτο χρονικό βήμα και το 11% μετά από το δέκατο όγδοο βήμα της πρόβλεψης. Από την άλλη, η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος φαίνεται και αυτή σημαντικά μειωμένη. Εδώ παραμένει κάτω από το 16% μέχρι και για είκοσι δύο ώρες μπροστά.

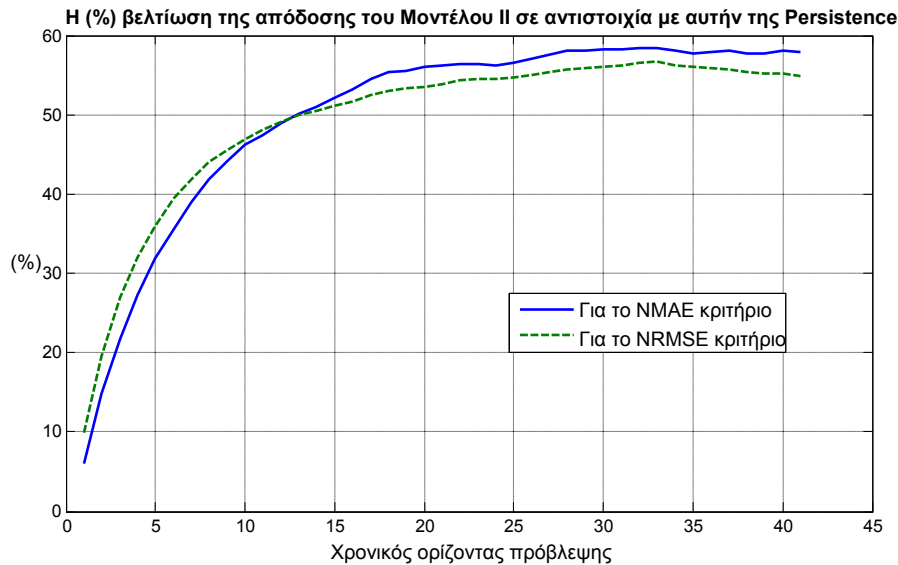
Η μέση τιμή του NMAE της πρόβλεψης του Μοντέλου II για τα πρώτα έξι χρονικά βήματα είναι μόλις 8.75%, για τα επόμενα δεκαοχτώ βήματα είναι 10.78%, ενώ για ορίζοντες πρόβλεψης από είκοσι πέντε μέχρι σαράντα ένα ώρες μπροστά είναι 12.73%. Οι αντίστοιχες τιμές για το NRMSE κριτήριο είναι 12.1% στις βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, 14.89% στις μεσοπρόθεσμες προβλέψεις και στις μακροχρόνιες προβλέψεις είναι 17.34%. Υπενθυμίζεται ότι οι τιμές του NMAE για την Persistence είναι 11.68%, 22.6% και 30.7% αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι και εδώ, το Μοντέλο II ξεπερνάει την απόδοση της Persistence σε όλο τον ορίζοντα πρόβλεψης. Έτσι, με το Μοντέλο II πετυχαίνεται ακόμα μεγαλύτερη βελτίωση σε αντιστοιχία με την Persistence. Η βελτίωση και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Η βελτίωση που πετυχαίνεται με το Μοντέλο II σε αντιστοιχία με την Persistence στο πρώτο χρονικό βήμα της πρόβλεψης είναι 6% για το NMAE κριτήριο και 10% περίπου για το NRMSE κριτήριο. Επίσης, η βελτίωση ξεπερνάει το 30% μόλις στο τέταρτο βήμα για το NRMSE κριτήριο και στο πέμπτο για το NMAE κριτήριο. Η βελτίωση και για τα δύο κριτήρια είναι πάνω από 50% σε ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από δεκαοχτώ ώρες μπροστά ενώ την μέγιστη τιμή στο τριακοστό τρίτο βήμα της πρόβλεψης που είναι ίση με 58.38% για το NMAE και 56.72% για το NRMSE.

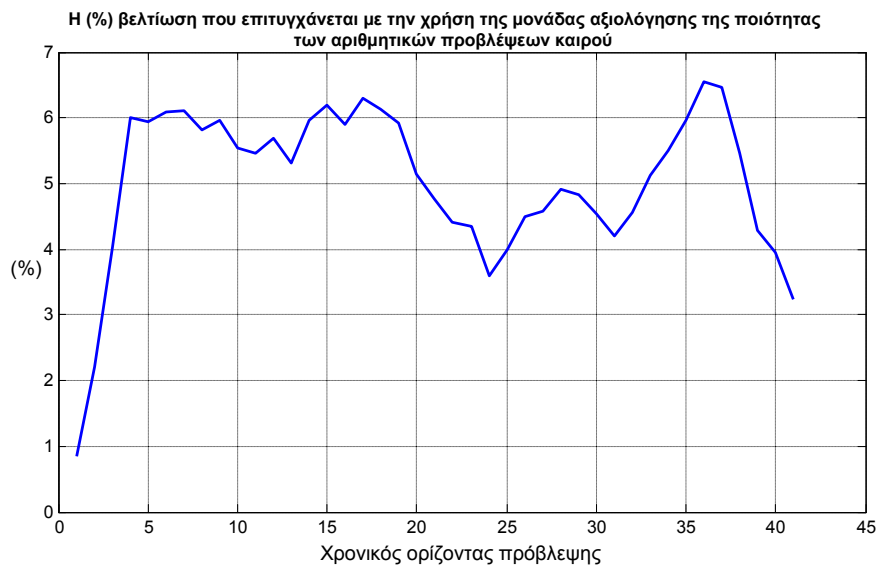
Σύμφωνα το [147], το Μοντέλο II φαίνεται να έχει παρόμοια απόδοση ή και να ξεπερνάει πολλές φορές την απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης που συμμετείχαν στο πρόγραμμα ANEMOS που αναφέρεται στο συγκεκριμένο πάρκο. Η βελτιωμένη αποδοτικότητα του οφείλεται, από την μια, στο ότι χωρίζει το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε τρία επιμέρους προβλήματα που τα επεξεργάζεται ξεχωριστά και από την άλλη, στο γεγονός ότι προσεγγίζει την αβεβαιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού ποιοτικά και ποσοτικά. Η βελτίωση που πετυχαίνεται με την χρήση της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού φαίνεται στο σχήμα 7.11. Στο σχήμα αυτό

φαίνεται η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας τελικής πρόβλεψης σε αντιστοιχία με τη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II για το NMAE κριτήριο.

Φαίνεται λοιπόν, ότι στους περισσότερους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης η τελική πρόβλεψη είναι πάνω από 5% πιο ακριβής από την προκαταρκτική πρόβλεψη, κάτι που οφείλεται αποκλειστικά στη μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Βέβαια, η απόδοση της μονάδας αυτής φαίνεται να έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη μονάδα του Μοντέλου I. Δηλαδή, η απόδοση και των δύο, είναι αρκετά μειωμένη στα πρώτα βήματα της πρόβλεψης και αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε και για το Μοντέλο I, στο ότι και τα δύο μοντέλα πρόβλεψης βασίζονται περισσότερο στην αυτό-παλινδρομικότητα της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος από ότι στις αριθμητικές προβλέψεις καιρού.



Σχήμα 7.10 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Golagh



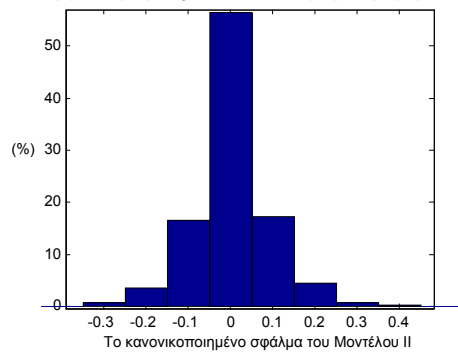
Σχήμα 7.11 Η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας τελικής πρόβλεψης του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με τη μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II για το NMAE κριτήριο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι κατανομές του κανονικοποιημένου σφάλματος των προβλέψεων του Μοντέλου II σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Από τα παρακάτω σχήματα φαίνεται η σαφώς βελτιωμένη απόδοση του Μοντέλου II σε σχέση με αυτήν του Μοντέλου I. Από την μία, οι κεντρικές τιμές των κατανομών που ακολουθούν, είναι αρκετά μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές των αντίστοιχων κατανομών του σφάλματος του Μοντέλου I. Ενώ, από την άλλη, φαίνεται το Μοντέλο II να μην παρουσιάζει τόσο μεγάλα σφάλματα όσο το Μοντέλο I. Από τις κατανομές ακόμη φαίνεται ότι η σκέδαση που παρατηρήθηκε στις κατανομές των σφαλμάτων του Μοντέλου I έχει μειωθεί σημαντικά.

Πιο συγκεκριμένα, από την κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης του Μοντέλου II για μία ώρα μπροστά παρατηρείται ότι η τιμή του σφάλματος είναι πάντα μεταξύ του $\pm 45\%$, ενώ πάνω από το 56% των ωριαίων δειγμάτων του συνόλου αποτίμησης είναι μεταξύ του $\pm 5\%$. Η πολύ καλή απόδοση του Μοντέλου II φαίνεται και από τις κατανομές που ακολουθούν, όπου το ποσοστό των περιπτώσεων που το σφάλμα είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ υπερβαίνει το 30%. Παράλληλα, το σφάλμα της πρόβλεψης του Μοντέλου II δεν πέφτει ποτέ κάτω από το -65% της ονομαστικής τιμής του αιολικού πάρκου.

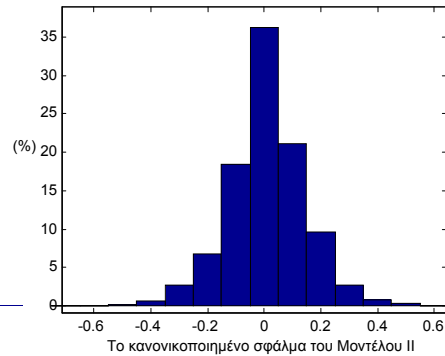
Γενικά, οι κατανομές του σφάλματος μεταβάλλονται ελάχιστα σε συνάρτηση με το χρονικό βήμα της πρόβλεψης σε ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από έξι ώρες. Ενδιαφέρον όμως έχει η σύγκριση των κατανομών του σφάλματος που αντιστοιχούν στο έκτο, στο δωδέκατο και στο δέκατο όγδοο βήμα της πρόβλεψης (σχήματα 7.12(β), 7.12 (γ) και 7.12 (δ) αντίστοιχα). Παρατηρείται στα σχήματα 7.12(β) και 7.12 (γ) πρώτα ότι το Μοντέλο II εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα στην πρόβλεψη για έξι ώρες μπροστά σε αντιστοιχία με την πρόβλεψη για δώδεκα ώρες μπροστά. Επίσης, η κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης για δεκαοχτώ ώρες μπροστά έχει μεγαλύτερη κεντρική τιμή και μεγαλύτερα όμως άκρα από την αντίστοιχη του σφάλματος για δώδεκα ώρες μπροστά. Φαίνεται λοιπόν πώς επηρεάζεται η απόδοση του Μοντέλου II από την απόδοση του μετεωρολογικού μοντέλου HIRLAM η οποία είναι χειρότερη στα πρώτα βήματα της πρόβλεψης [50].

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για μία ώρα μπροστά



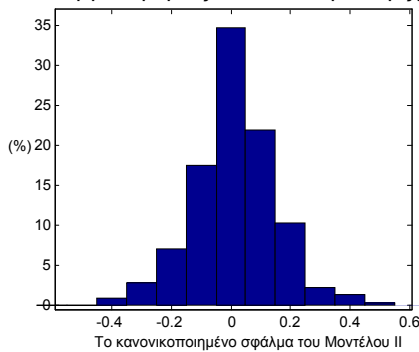
(α)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 6 ώρες μπροστά



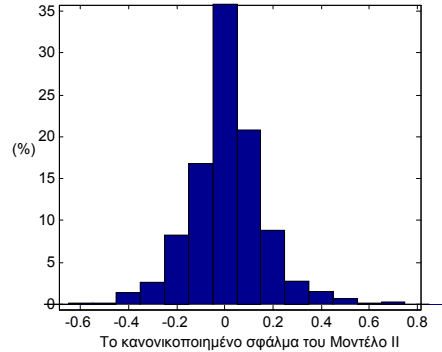
(β)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 12 ώρες μπροστά



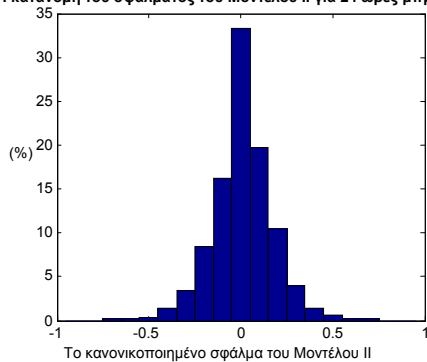
(γ)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 18 ώρες μπροστά



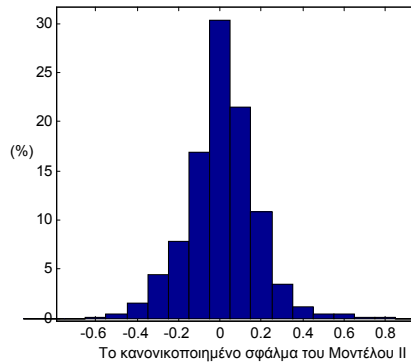
(δ)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 24 ώρες μπροστά



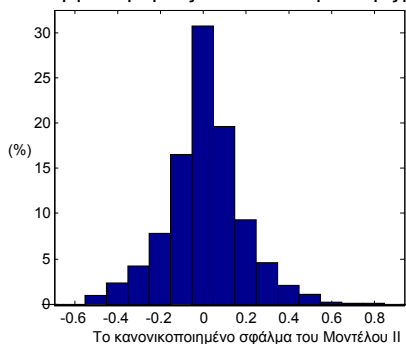
(ε)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 28 ώρες μπροστά



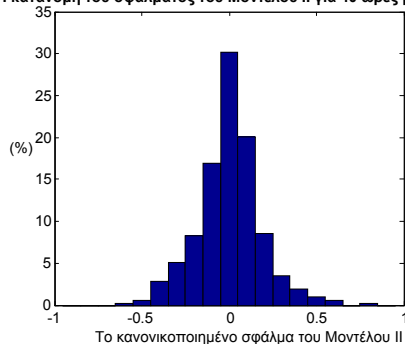
(στ)

Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 36 ώρες μπροστά



(η)

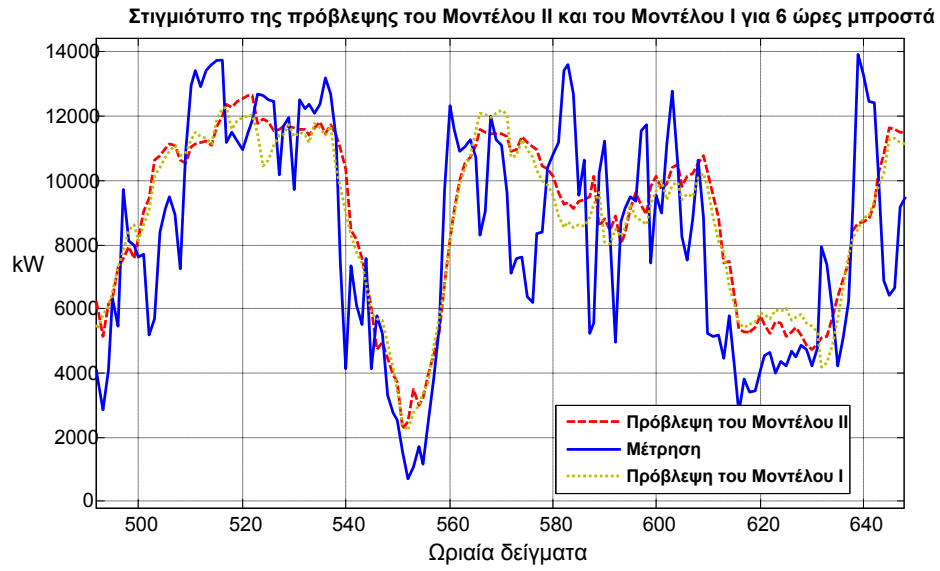
Η κατανομή του σφάλματος του Μοντέλου II για 40 ώρες μπροστά



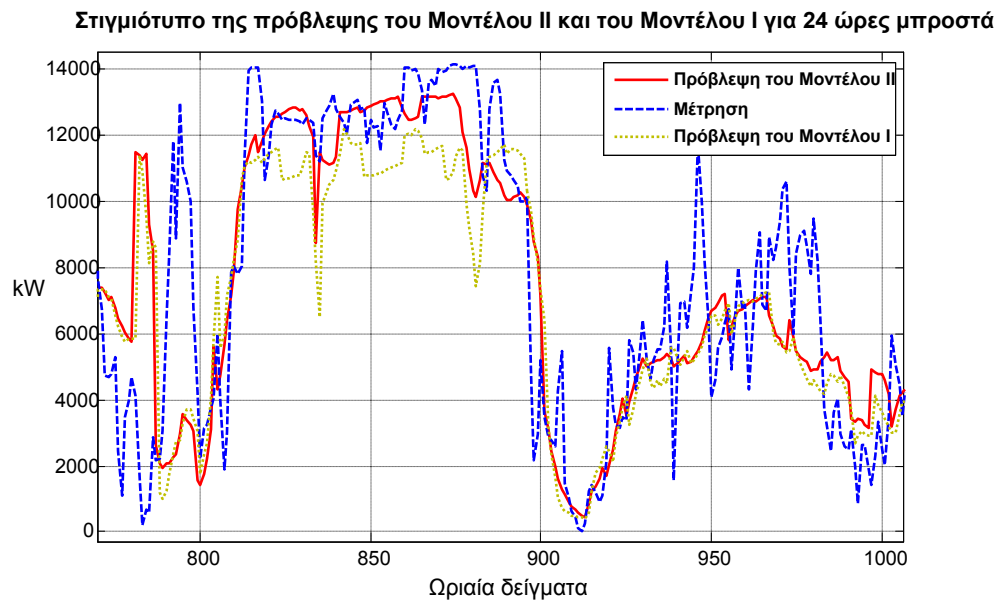
(ζ)

Σχήματα 7.12 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου II σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά

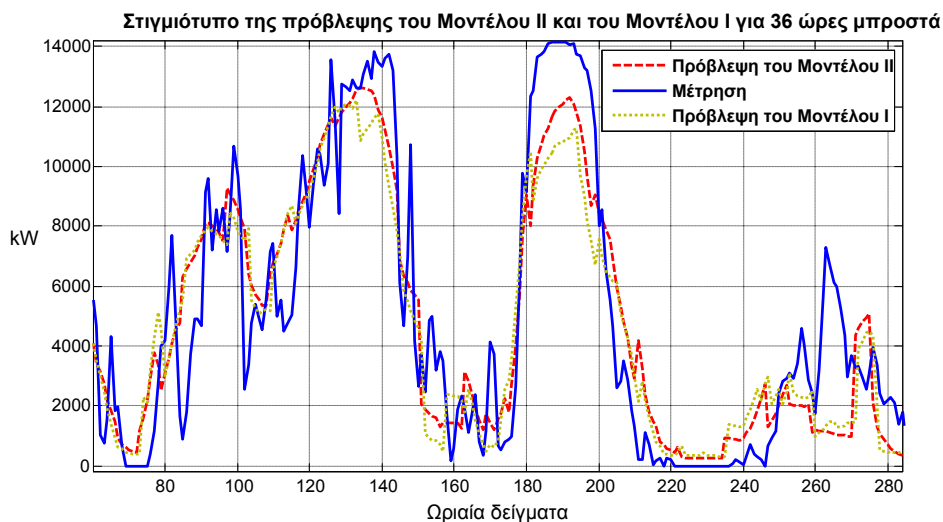
Τέλος, στα σχήματα 7.13 παρουσιάζονται τρία διαφορετικά στιγμιότυπα της πρόβλεψης του Μοντέλου II που αντιστοιχούν στις έξι, στις είκοσι τέσσερις και στις τριάντα έξι ώρες μπροστά που προέρχονται από τη περίοδο αποτίμησης. Παράλληλα εμφανίζεται και η αντίστοιχη πρόβλεψη του Μοντέλου I. Από τα σχήματα, φαίνεται ότι το Μοντέλου II έχει καλύτερη απόδοση στις περισσότερες περιπτώσεις. Παρ' όλ' αυτά, ένα ενδιαφέρον θέμα προς έρευνα είναι ο συνδυασμός των δύο μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.



(α)



(β)



Σχήμα 7.13 Τρία στιγμιότυπα από την αποτίμηση του Μοντέλου II και του Μοντέλου I για 6, 24 και 36 ώρες μπροστά για το αιολικό πάρκο Golagh.

7.2.1.γ Συμπεράσματα από την αποτίμηση στο αιολικό πάρκο Golagh

Από τις παραπάνω δύο ενότητες, φάνηκε ότι τα συστήματα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που προτείνονται, παρουσιάζουν πολύ καλή απόδοση, και μάλιστα σε ένα αιολικό πάρκο που αναμένεται χαμηλή απόδοση λόγω της πολυπλοκότητας του εδάφους. Οι δυσκολίες που παρουσιάζει η τοπολογία του αιολικού πάρκου φαίνεται να μην επηρεάζει τα συστήματα πρόβλεψης, ιδίως το Μοντέλο II. Αυτό θα φανεί καλύτερα κατά την περιγραφή της on-line αποτίμησης του σε αιολικά πάρκα με διαφορετικό δείκτη ανωμαλίας RIX που πραγματοποιείται στην επόμενη παράγραφο.

Έτσι λοιπόν παρά τις έντονες διακυμάνσεις της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος που προκαλούνται από την πολυπλοκότητα του εδάφους και το μεγάλο μέγεθος της αιολικής ισχύος που παράγεται από τα έντονα μέτωπα τα οποία έρχονται απ' ευθείας από τον Ατλαντικό ωκεανό, τα στατιστικά μέτρα του σφάλματος παρέμειναν σε χαμηλά επίπεδα.

7.2.2 Αποτίμηση σε αιολικό πάρκο με επίπεδο έδαφος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος του Μοντέλου I και του Μοντέλου II για ένα αιολικό πάρκο που ο συντελεστής ανωμαλίας του εδάφους είναι μηδέν, δηλαδή δεν υπάρχει περιοχή που να έχει κλίση μεγαλύτερη από την αναφερόμενη τιμή (<30%). Το αιολικό πάρκο αυτό ονομάζεται Klim και είναι τοποθετημένο στο βορειοδυτικό τμήμα του Jutland της Δανίας. Συγκεκριμένα, είναι περίπου 8 Km από την βόρεια ακτή και 10 km δυτικά από την πόλη Aalborg. Το αιολικό πάρκο Klim αποτελείται από 35 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V44 των 600 kW. Δηλαδή, η ονομαστική ισχύ του πάρκου είναι 21 MW [96].

Τα διαθέσιμα δεδομένα για το πάρκο αυτό ξεκινάν από την 18/03/2002 και τελειώνουν στις 30/04/2003, όπου οι τελευταίοι τέσσερις μήνες χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την αποτίμηση των μοντέλων πρόβλεψης. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού που εφαρμόστηκαν προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM και έχουν διάρκεια σαράντα οχτώ ώρες.

Εξαιτίας της ομαλής επιφάνειας του εδάφους, αναμένεται η απόδοση των συστημάτων πρόβλεψης να είναι καλύτερη. Φαινόμενα που επηρεάζουν την αιολική παραγωγή και πρέπει να αναγνωριστούν από τα μοντέλα πρόβλεψης είναι η γέφυρα στεριάς-θάλασσας, αφού το αιολικό πάρκο είναι κοντά στην ακτή. Πρέπει να σημειώσουμε ότι στην Δανία λόγω της τοποθεσίας της στην Βαλτική θάλασσα, τα μέτωπα που έρχονται από τον Ατλαντικό έχουν

ασαφή πορεία που είναι δύσκολο να προβλεφθεί [149]. Δηλαδή, οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού αναμένεται να είναι φτωχές σε πολλές περιπτώσεις με πολλά χωρικά σφάλματα.

7.2.2.α Αποτίμηση του Μοντέλου I

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν στην αποτίμηση των συστημάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος για την περίπτωση του αιολικού πάρκου Golagh, εκτελέστηκαν και στην αποτίμηση για το πάρκο του Klim. Στους πίνακες V και VI εμφανίζονται οι τιμές των κριτηρίων NMAE και NRMSE αντίστοιχα για το Μοντέλο I και για την μέθοδο Persistence για κάθε βήμα της πρόβλεψης. Στην συνέχεια οι τιμές των πινάκων V και VI παρουσιάζονται σχηματικά στα σχήματα 7.14 και 7.15.

Πινάκας V

Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου I και της Persistence

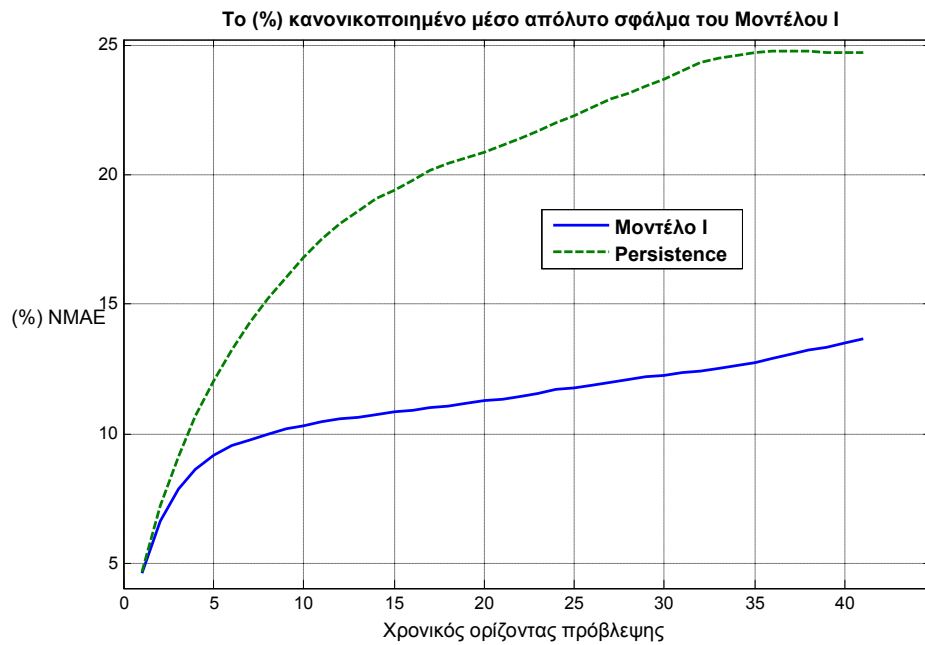
Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο I	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο I	(%) NMAE Persistence
1	4.63	4.64	22	11.47	21.11
2	6.62	7.21	23	11.57	21.39
3	7.87	9.12	24	11.69	21.69
4	8.60	10.67	25	11.78	21.99
5	9.15	12.37	26	11.87	22.29
6	9.53	13.25	27	11.98	22.59
7	9.79	14.31	28	12.08	22.90
8	10.01	15.24	29	12.19	23.14
9	10.18	16.04	30	12.27	23.39
10	10.32	16.81	31	12.34	23.68
11	10.45	17.51	32	12.43	24.01
12	10.58	18.11	33	12.53	24.30
13	10.66	18.62	34	12.63	24.49
14	10.74	19.06	35	12.76	24.60
15	10.83	19.42	36	12.90	24.69
16	10.92	19.78	37	13.07	24.74
17	10.99	20.14	38	13.22	24.77
18	11.05	20.44	39	13.36	24.76
19	11.16	20.65	40	13.51	24.72
20	11.27	20.87	41	13.66	24.69
21	11.36	21.11			

Πινάκας VI

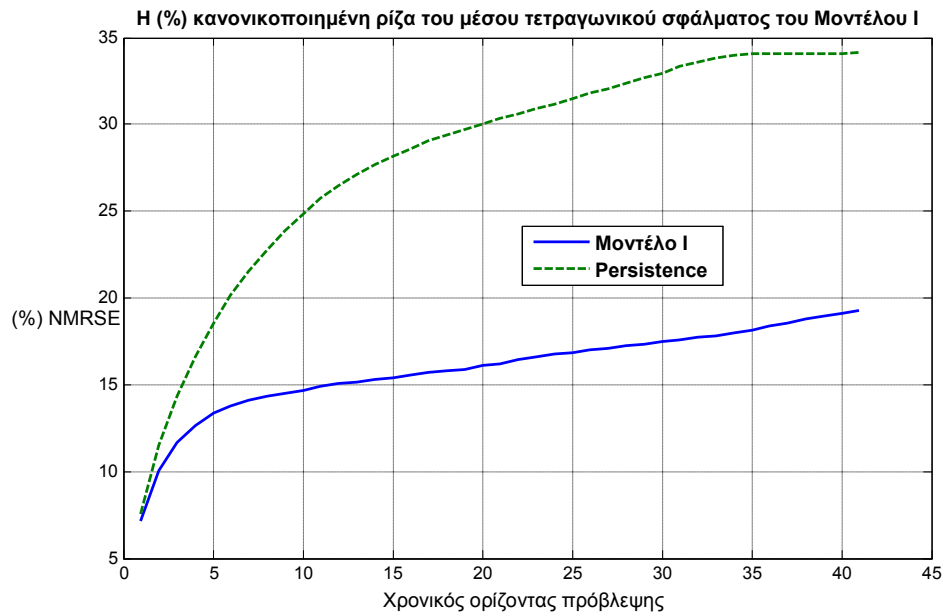
Η (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου I και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο I	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο I	(%) NMAE Persistence
1	7.12	8.03	22	16.40	28.75
2	10.04	11.92	23	16.57	29.10
3	11.66	14.31	24	16.73	29.36
4	12.64	16.18	25	16.87	29.59
5	13.34	17.97	26	16.99	29.87
6	13.79	19.52	27	17.12	30.17
7	14.10	20.83	28	17.23	30.48
8	14.31	21.89	29	17.34	30.77
9	14.52	22.83	30	17.46	31.11

10	14.7	23.67	31	17.58	31.46
11	14.88	24.44	32	17.70	31.73
12	15.03	25.15	33	17.80	32.01
13	15.15	25.80	34	17.95	32.24
14	15.27	26.35	35	18.16	32.43
15	15.40	26.81	36	18.35	32.58
16	15.56	27.19	37	18.56	32.71
17	15.67	27.57	38	18.77	32.88
18	15.77	27.88	39	18.96	33.03
19	15.90	28.09	40	19.13	33.23
20	16.08	28.29	41	19.28	33.42
21	16.22	28.49			



Σχήμα 7.13 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του συστήματος Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Klim

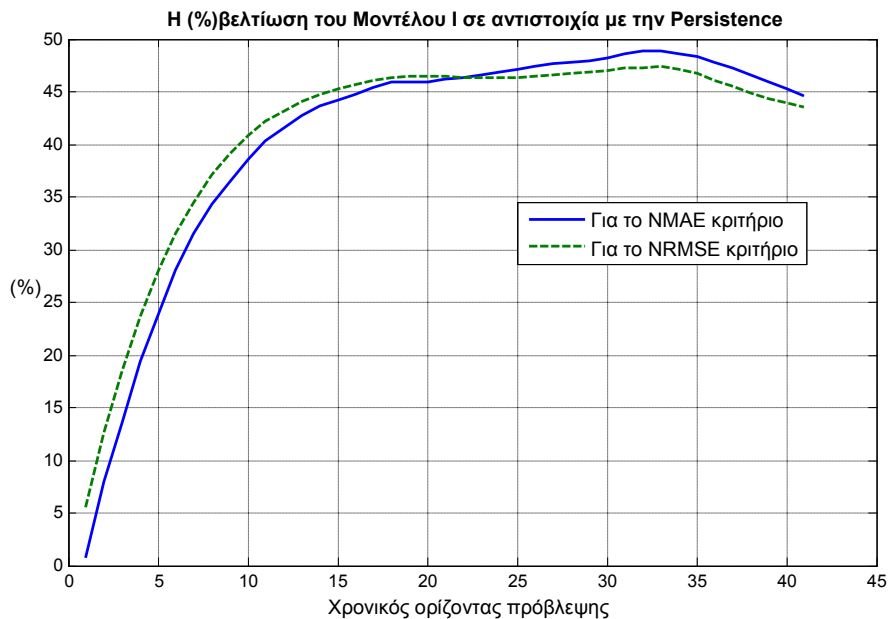


Σχήμα 7.14 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Klim

Από τις τιμές των κριτηρίων NMAE και NRMSE του Μοντέλου I φαίνεται η καλύτερη απόδοση του μοντέλου εξαιτίας του επίπεδου εδάφους. Παρ' όλ' αυτά η ομαλότητα του εδάφους επηρεάζει θετικά και την απόδοση της Persistence που φαίνεται σαφώς βελτιωμένη με την αντίστοιχη σε αιολικό πάρκο με πολύπλοκο έδαφος. Έτσι, η τιμή του NMAE του Μοντέλου I είναι πάντα μικρότερη από 13% και μάλιστα υπερβαίνει το 10% της ονομαστικής τιμής του πάρκου μετά από το όγδοο βήμα της πρόβλεψης. Όμως στο πρώτο βήμα της πρόβλεψης η τιμή του NMAE κριτηρίου είναι σχεδόν ίδια με αυτήν της Persistence η οποία είναι πολύ χαμηλή και γι αυτό δύσκολο να νικηθεί. Παρ' όλ' αυτά, η μέση τιμή του NMAE για προβλέψεις μέχρι και έξι ώρες μπροστά ισούται με 7.7% ενώ η αντίστοιχη της Persistence είναι 9.5%. Επίσης, για είκοσι τέσσερις ώρες μπροστά, το μέση τιμή του NMAE του Μοντέλου I και της Persistence είναι 10% και 16.7% αντίστοιχα. Τέλος, στο δεύτερο εικοσιτετράωρο της πρόβλεψης, το Μοντέλο I δίνει μόλις 12.5% σε αντίθεση με την Persistence που φτάνει το 23.9%.

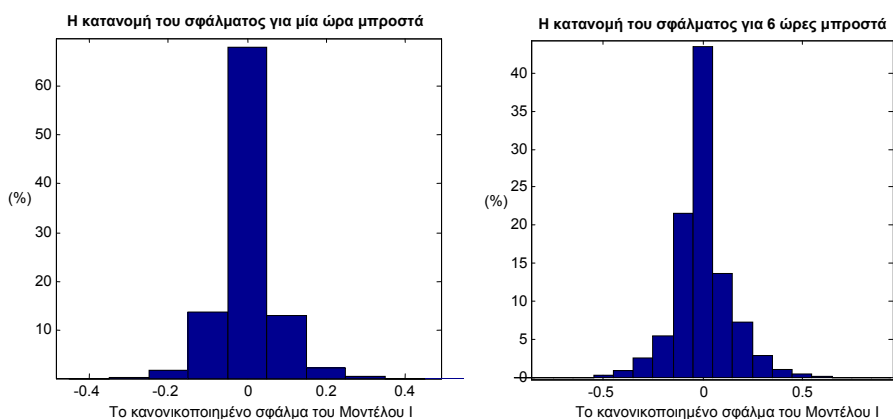
Όσον αφορά το NRMSE κριτήριο, η τιμή του δεν υπερβαίνει σε κανένα χρονικό βήμα της πρόβλεψης το 20% της ονομαστικής τιμής του πάρκου, ενώ παράλληλα είναι πάντα μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της Persistence. Μάλιστα, η τιμή του NRMSE της Persistence είναι πάνω από το 30% για χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης πάνω από είκοσι ώρες μπροστά. Η μέγιστη τιμή του κριτηρίου αυτού είναι για το Μοντέλο I 19.3% και για την Persistence 33.4%. Οι μέσες τιμές του NRMSE κριτηρίου σε διαφορετικούς ορίζοντες πρόβλεψης είναι για το Μοντέλο I σε βραχυπρόθεσμες προβλέψεις 11.4% σε μεσοπρόθεσμες προβλέψεις 14.4% και για μακροπρόθεσμες προβλέψεις 17.9%, και αντίστοιχα για την Persistence είναι 14.67%, 23.3% και 31.62%.

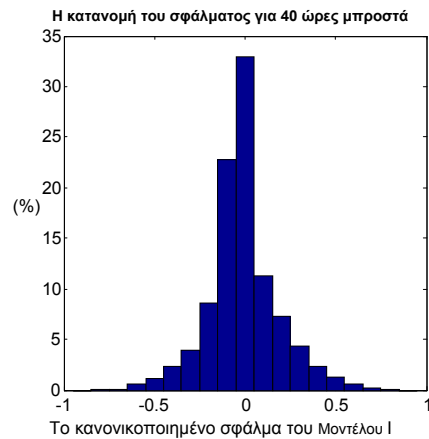
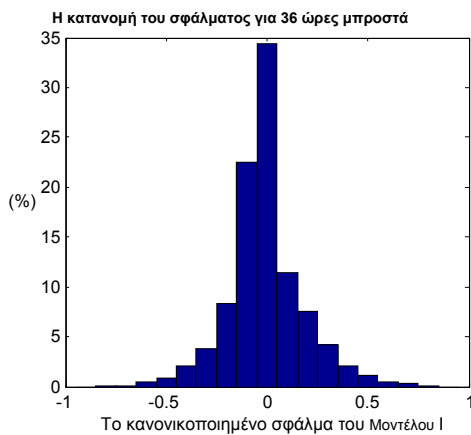
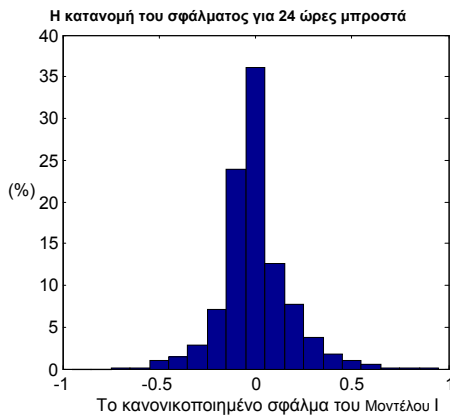
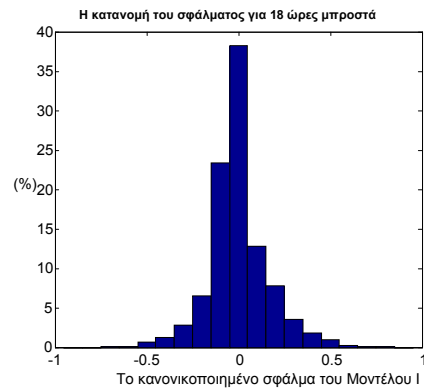
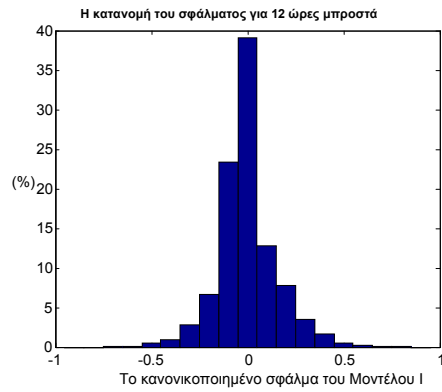
Η καλή απόδοση του Μοντέλου I φαίνεται και από το κριτήριο της βελτίωσης και στα δύο κριτήρια αξιολόγησης σε σχέση με την Persistence που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.15. Φαίνεται εδώ βέβαια ότι η βελτίωση δεν υπερβαίνει το 50% για κανένα από τα δύο κριτήρια λόγω της πολύ καλής απόδοσης της Persistence. Παρ' όλ' αυτά, είναι πάντα πάνω από το 40% σε χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης πάνω από δέκα ώρες όσον αφορά το NRMSE κριτήριο και πάνω από έντεκα ώρες όσον αφορά το NMAE κριτήριο.



Σχήμα 7.15 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Klim

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κατανομές του κανονικοποιημένου σφάλματος της πρόβλεψης του Μοντέλου I σε διάφορα χρονικά βήματα. Αν και η τιμή του NMAE του Μοντέλου I όπως ειπώθηκε παραπάνω είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη της Persistence στο πρώτο βήμα, τα σφάλματα της πρόβλεψης για μία ώρα μπροστά που είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ ξεπερνάνε το 60% των περιπτώσεων που μελετήθηκαν, ενώ στο 90% περίπου των περιπτώσεων, το σφάλμα είναι μεταξύ του $\pm 15\%$. Ακόμη, τα άκρα της κατανομής του σφάλματος στις προβλέψεις για μία ώρα μπροστά δεν υπερβαίνουν το $\pm 40\%$. Η καλή απόδοση του Μοντέλου I παραμένει και στις προβλέψεις για έξι ώρες μπροστά όπως φαίνεται στο σχήμα 7.16(β). Τα σφάλματα των προβλέψεων σε αυτό το βήμα της πρόβλεψης δεν ξεπερνάν το $\pm 60\%$, ενώ αυτά που είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ πλησιάζουν το 45% των περιπτώσεων. Γενικά, τα σφάλματα των προβλέψεων που είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ είναι πάνω από το 30% των περιπτώσεων που αποτιμήθηκαν, για κάθε χρονικό βήμα της πρόβλεψης και μάλιστα πέφτουν κάτω από το 35% των περιπτώσεων σε ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από είκοσι οχτώ ώρες μπροστά. Τέλος, οι κατανομές των σφαλμάτων πρόβλεψης του Μοντέλου I φαίνεται να είναι ισοσταθμισμένες και να ακολουθούν την κανονική κατανομή.





Σχήματα 7.16 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου I σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο Klim: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά

7.2.2.β Αποτίμηση του Μοντέλου II

Για το αιολικό πάρκο Klim και για την ίδια χρονική περίοδο, εκτελέστηκε το Μοντέλο II. Οι τιμές του NMAE και της NRMSE που προέκυψαν από την εκτέλεση φαίνονται στους πίνακες VII και VIII. Παράλληλα, εμφανίζονται οι αντίστοιχες τιμές της μεθόδου Persistence. Το Μοντέλο II φαίνεται και εδώ, ότι απέδωσε σε γενικές γραμμές καλύτερα από το Μοντέλο I, ιδίως στον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης του πρώτου εικοσιτετραώρου. Στο τέλος της ενότητας, παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την εκτέλεση και των δύο συστημάτων πρόβλεψης.

Πινάκας VI

Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου II και της Persistence

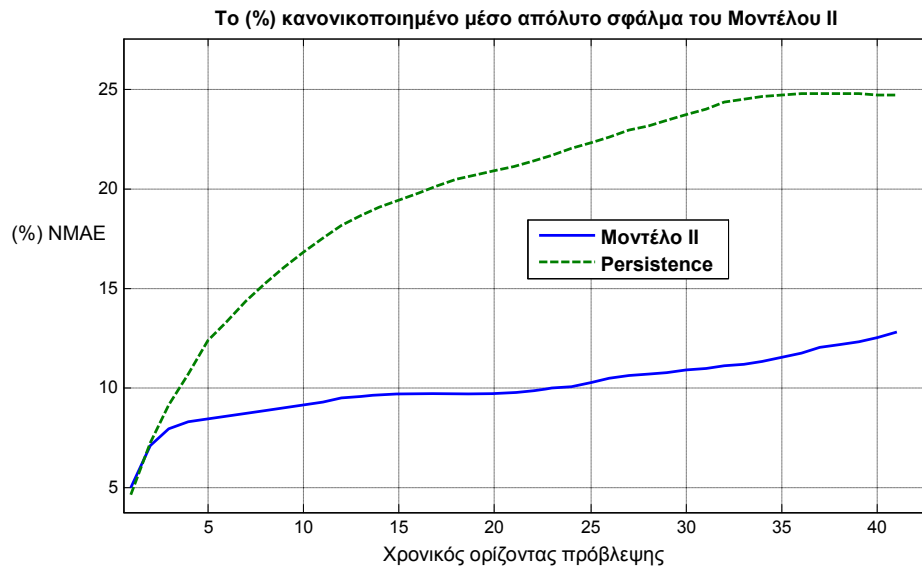
Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence
1	4.94	4.64	22	9.85	21.11
2	7.09	7.21	23	9.96	21.39
3	7.89	9.12	24	10.05	21.69
4	8.24	10.67	25	10.27	21.99
5	8.44	12.37	26	10.44	22.29
6	8.57	13.25	27	10.58	22.59
7	8.70	14.31	28	10.67	22.90
8	8.81	15.24	29	10.76	23.14
9	8.96	16.04	30	10.86	23.39
10	9.12	16.81	31	10.92	23.68
11	9.26	17.51	32	11.06	24.01
12	9.45	18.11	33	11.19	24.30
13	9.55	18.62	34	11.33	24.49
14	9.64	19.06	35	11.51	24.60
15	9.69	19.42	36	11.72	24.69
16	9.69	19.78	37	11.98	24.74
17	9.71	20.14	38	12.15	24.77
18	9.70	20.44	39	12.30	24.76
19	9.66	20.65	40	12.51	24.72
20	9.67	20.87	41	12.76	24.69
21	9.76	21.11			

Πινάκας VIII

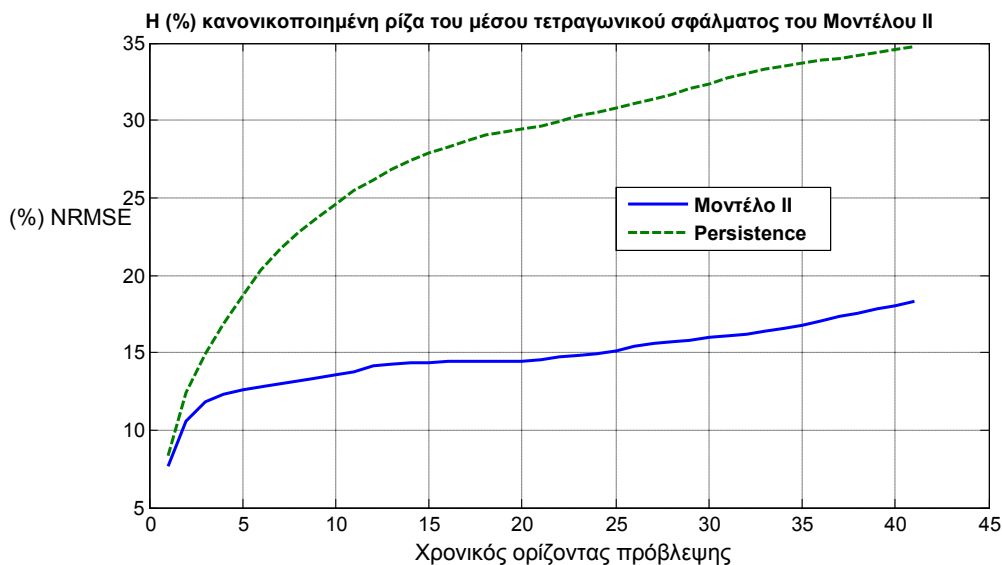
Η (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου II και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence
1	7.64	8.03	22	14.68	28.75
2	10.59	11.92	23	14.81	29.10
3	11.84	14.31	24	14.87	29.36

4	12.32	16.18	25	15.13	29.59
5	12.63	17.97	26	15.41	29.87
6	12.81	19.52	27	15.58	30.17
7	13.02	20.83	28	15.68	30.48
8	13.17	21.89	29	15.79	30.77
9	13.35	22.83	30	15.97	31.11
10	13.57	23.67	31	16.08	31.46
11	13.76	24.44	32	16.18	31.73
12	14.10	25.15	33	16.33	32.01
13	14.25	25.80	34	16.54	32.24
14	14.31	26.35	35	16.80	32.43
15	14.35	26.81	36	17.08	32.58
16	14.40	27.19	37	17.36	32.71
17	14.47	27.57	38	17.55	32.88
18	14.43	27.88	39	17.79	33.03
19	14.41	28.09	40	18.06	33.23
20	14.42	28.29	41	18.32	33.42
21	14.55	28.49			



Σχήμα 7.17 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του Μοντέλου II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Klim

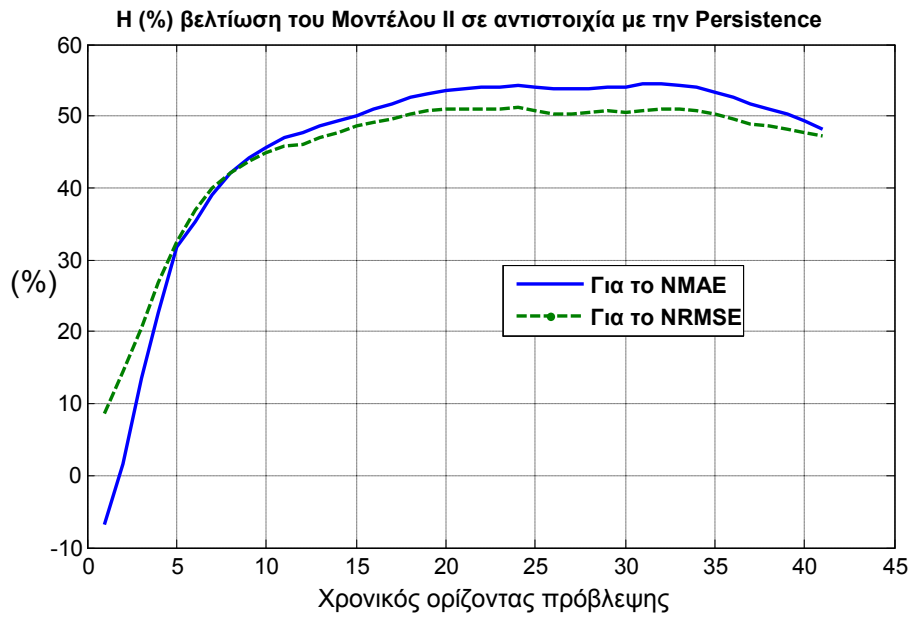


Σχήμα 7.18 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλο II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Klim

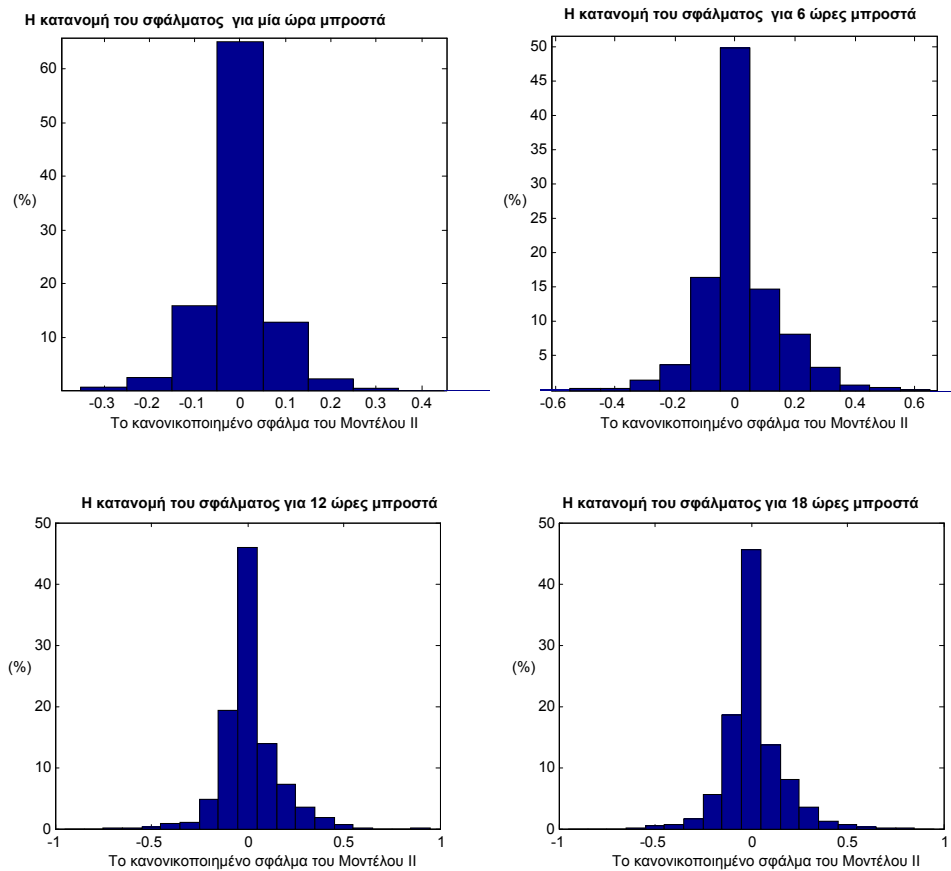
Η καλή απόδοση του Μοντέλου II φαίνεται στα σχήματα 7.16 και 7.17 όπου παρουσιάζονται οι τιμές των NMAE και NRMSE κριτηρίων για κάθε χρονικό βήμα μπροστά. Ιδίως για το NMAE κριτήριο, η τιμή του δεν ξεπερνάει το 10% στις προβλέψεις του πρώτου εικοσιτετραώρου. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή του NMAE στα πρώτα είκοσι τέσσερα βήματα είναι 9%, ενώ σε ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι και έξι ώρες μπροστά, η μέση τιμή του είναι 7.5%. Παρατηρείται ότι η τιμή του NMAE στα πρώτα δέκα βήματα αυξάνεται σταδιακά και στα επόμενα δεκατέσσερα βήματα παραμένει μεταξύ του 9% και 10%. Η τιμή του NMAE αυξάνεται σημαντικά στον ορίζοντα πρόβλεψης του δεύτερου εικοσιτετραώρου άλλα δεν ξεπερνά το 13%. Η μέση τιμή του σε αυτό το διάστημα πρόβλεψης είναι μόλις 11.3%. Από τις αντίστοιχες τιμές της μεθόδου Persistence που αναφέρθηκαν στην αποτίμηση του Μοντέλου I φαίνεται ότι η απόδοση του Μοντέλου II είναι στον μεγαλύτερο ορίζοντα πρόβλεψης διπλάσια από αυτήν της Persistence. Παρ' όλ' αυτά στο πρώτο βήμα της πρόβλεψης, η μέθοδος Persistence νικάει την απόδοση του Μοντέλου II. Παράλληλα, το Μοντέλο I αποδίδει καλύτερα από το Μοντέλο II στα πρώτα τρία βήματα της πρόβλεψης.

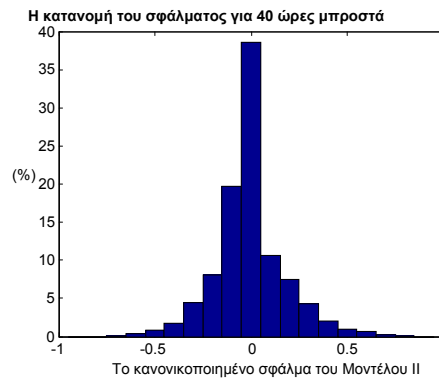
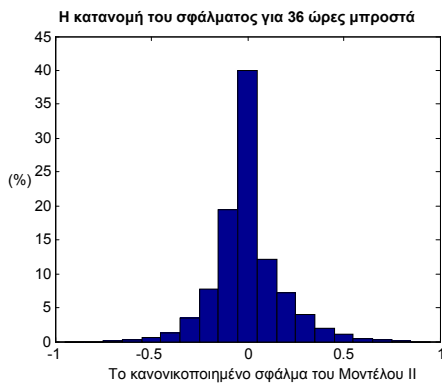
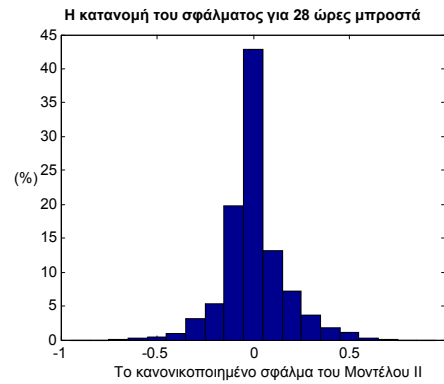
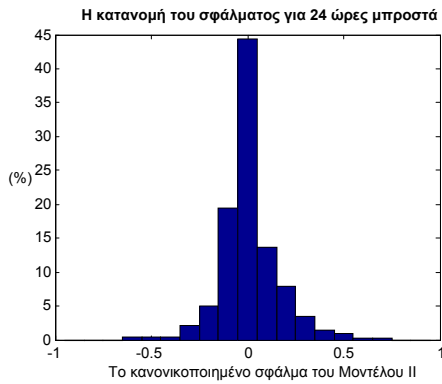
Η ιδιαίτερα καλή απόδοση του Μοντέλου II στους χρονικούς ορίζοντες πάνω από τρεις ώρες μπροστά φαίνεται και από τις τιμές του NRMSE κριτηρίου. Εδώ, φαίνεται ότι στα πρώτα είκοσι τέσσερα βήματα, η τιμή του NRMSE είναι κάτω από 15% και μάλιστα παραμένει σχεδόν σταθερή και ίση με 14.4% από το δέκατο πέμπτο μέχρι το εικοστό βήμα της πρόβλεψης. Η τιμή του NRMSE αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό στις προβλέψεις του δεύτερου εικοσιτετραώρου και φτάνει το 18.3% στο τεσσαρακοστό πρώτο βήμα. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι για το NRMSE κριτήριο, το Μοντέλο II νικάει την Persistence σε όλον τον ορίζοντα πρόβλεψης.

Στο σχήμα 7.19 παρουσιάζεται η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την Persistence για τα κριτήρια NMAE και NRMSE. Παρατηρείται και εδώ ότι στα πρώτα τέσσερα χρονικά βήματα της πρόβλεψης, ενώ η βελτίωση για το NRMSE κριτήριο είναι η αναμενόμενη, για το NMAE κριτήριο είναι αρκετά μικρή και μάλιστα έχει αρνητική τιμή στο πρώτο χρονικό βήμα. Παρ' όλ' αυτά η βελτίωση που πετυχαίνεται στα επόμενα έξι βήματα, δηλαδή μέχρι δέκα ώρες μπροστά, είναι και για τα δύο κριτήρια περίπου η ίδια και φτάνει το 45% στο δέκατο βήμα της πρόβλεψης. Για το NMAE κριτήριο, η βελτίωση είναι πάνω από 50% σε ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από δέκα έξι ώρες μπροστά και ξεπερνάει το 54.5% στο τριακοστό πρώτο βήμα. Παράλληλα, η βελτίωση για το NRMSE κριτήριο κυμαίνεται γύρω απ' το 50% στα τελευταία είκοσι τέσσερα βήματα της πρόβλεψης.



Σχήμα 7.19 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Klim





(η)

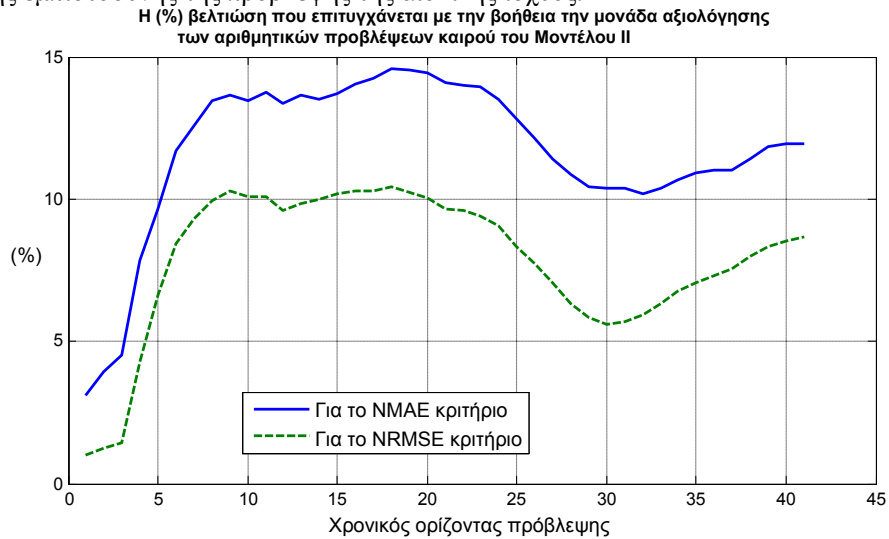
(ζ)

Σχήματα 7.20 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου II σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο Klim: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά

Οι κατανομές των σφαλμάτων πρόβλεψης του Μοντέλου II παρουσιάζονται στα σχήματα 7.20. Φαίνεται καθαρά και εδώ ότι η απόδοση του Μοντέλου II υπερτερεί απ' την αντίστοιχη του Μοντέλου I αλλά είναι και σαφώς πολύ καλύτερη από την αντίστοιχη για το αιολικό πάρκο Golagh λόγω της ομαλότητας του εδάφους που είναι τοποθετημένο το πάρκο Klim. Έτσι, για το πρώτο βήμα της πρόβλεψης, τα σφάλματα δεν υπερβαίνουν το $\pm 40\%$ και παράλληλα το σφάλμα των 65% περίπου των περιπτώσεων που αποτιμήθηκαν βρίσκεται μεταξύ του $\pm 5\%$. Στην περίπτωση του Μοντέλου II ότι οι κεντρικές τιμές των κατανομών δηλαδή το ποσοστό των περιπτώσεων που είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ είναι πάντα πάνω από το 35% και μάλιστα μέχρι και το τριακοστό έκτο βήμα της πρόβλεψης είναι πάνω από τη τιμή του 40%. Συγκεκριμένα, η κατανομή του σφάλματος της πρόβλεψης για έξι ώρες μπροστά είναι μεγαλύτερη από 50%, ενώ στα χρονικά βήματα δώδεκα, δέκα οχτώ και εικοσιτέσσερα κυμαίνεται γύρω στο 45%.

Παρακάτω, φαίνεται η σημαντικότητα της μονάδας αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού του Μοντέλου II στην απόδοση του. Για την ακρίβεια, στο σχήμα 7.21 παρουσιάζεται η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας τελικής πρόβλεψης σε αντιστοιχία την μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II. Φαίνεται λοιπόν, ότι η μονάδα της αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην τελική απόδοση του Μοντέλου II. Άρα εκτιμάει σωστά την ποιότητα

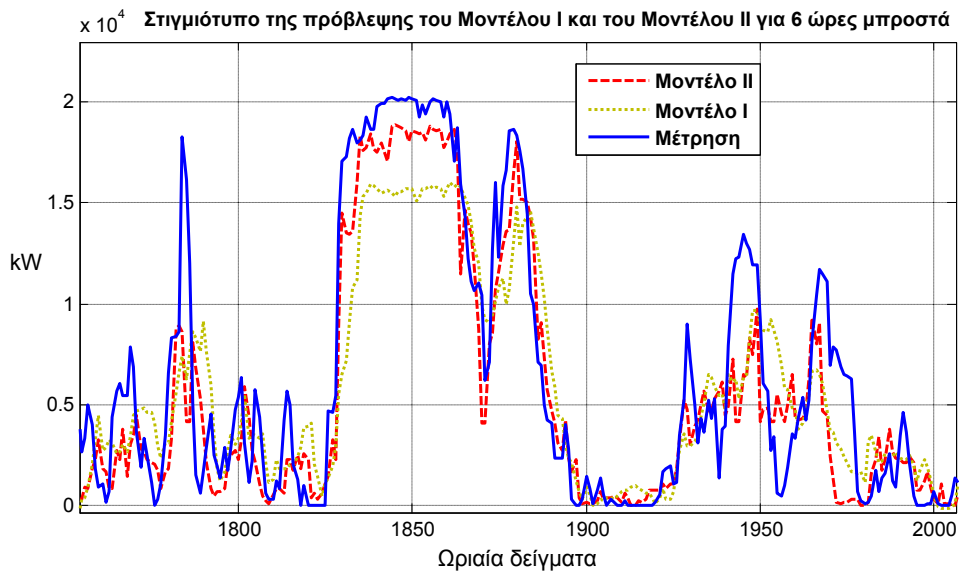
των μετεωρολογικών προβλέψεων και έτσι η έξοδος του μπορεί και να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης εμπιστοσύνης της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος.



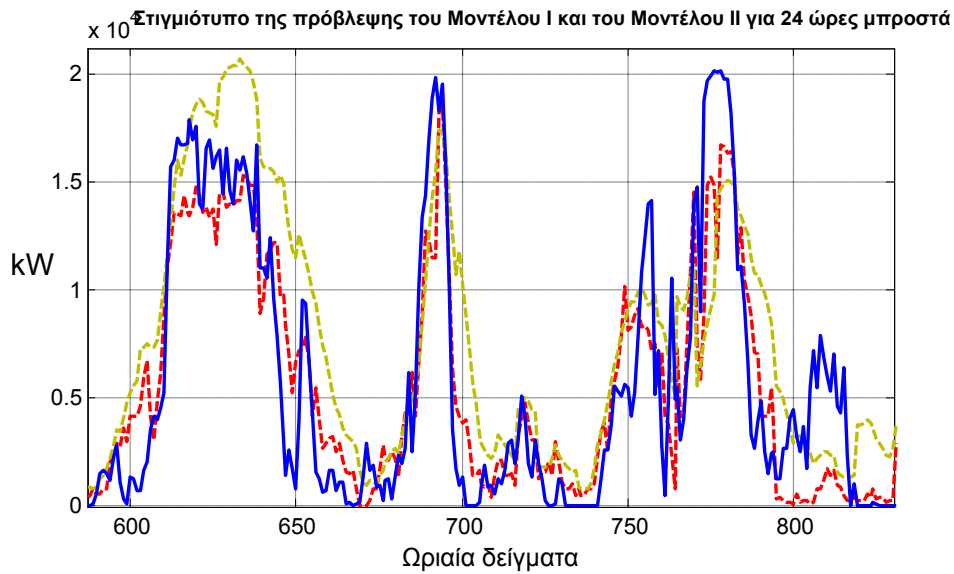
Σχήμα 7.21 Η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας τελικής πρόβλεψης του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την μονάδα προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II για το NMAE κριτήριο.

Στο σχήμα 7.21 λοιπόν φαίνεται ότι η βελτίωση στην πρόβλεψη του Μοντέλου II που πετυχαίνεται με το μοντέλο αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού για το NMAE κριτήριο είναι πάνω από 10% στον μεγαλύτερο ορίζοντα της πρόβλεψης. Μάλιστα, στο δέκατο όγδοο βήμα πλησιάζει το 15%. Μεγάλη βελτίωση δείχνει να πετυχαίνεται και με το NRMSE κριτήριο που στις μεσοπρόθεσμες προβλέψεις κυμαίνεται κοντά στο 10%.

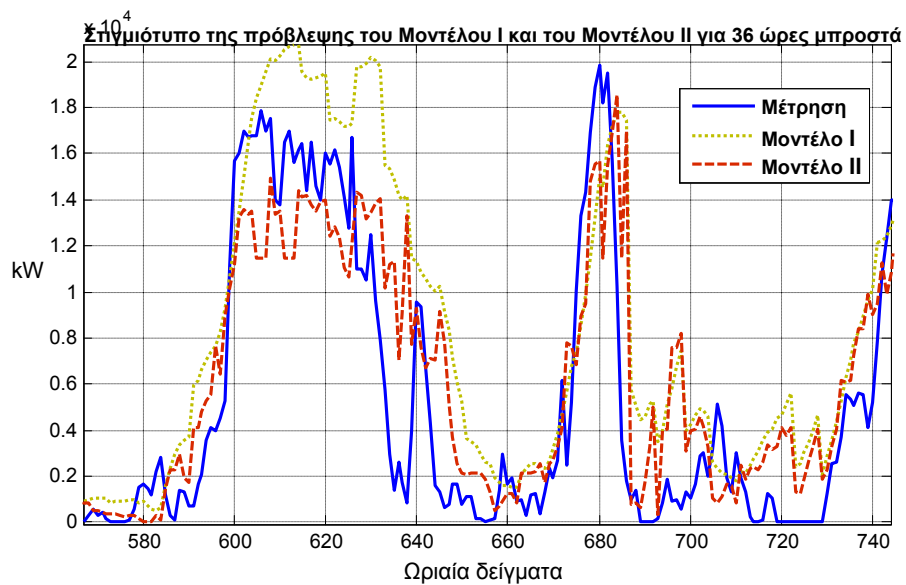
Τελειώνοντας την περιγραφή της απόδοσης του Μοντέλου II για την περίπτωση του αιολικού πάρκου Klím, παρουσιάζονται τρία στιγμιότυπα των προβλέψεων του Μοντέλου I και του Μοντέλου II για την ίδια χρονική περίοδο. Στα σχήματα φαίνεται η καλύτερη απόδοση του Μοντέλου II σε σχέση με αυτήν του Μοντέλου I.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 7.30 Τρία στιγμιότυπα από την αποτίμηση του Μοντέλου II και του Μοντέλου I για 6, 24 και 36 ώρες μπροστά στο αιολικό πάρκο Klim

7.2.2.γ Συμπεράσματα για το αιολικό πάρκο Klim

Από τα αποτελέσματα της αποτίμησης των μοντέλων πρόβλεψης Μοντέλου I και Μοντέλου II στο αιολικό πάρκο Klim φάνηκε ότι παρ' ότι το σφάλμα της πρόβλεψης ήταν σε χαμηλά επίπεδα η βελτίωση που προέκυψε σε αντιστοιχία με την Persistence ήταν χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του αιολικού πάρκου Golagh. Η ομαλότητα του εδάφους του πάρκου Klim λοιπόν επηρέασε θετικά τόσο την απόδοση των συστημάτων πρόβλεψης όσο και την απόδοση Persistence.

7.2.3 Αποτίμηση σε παράκτιο αιολικό πάρκο

Η off-line αποτίμηση των συστημάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, ολοκληρώνεται με την εφαρμογή τους σε ένα παράκτιο αιολικό πάρκο που ονομάζεται Tunoe Knob. Το αιολικό πάρκο Tunoe Knob είναι τοποθετημένο στην θάλασσα 6 Km ανατολικά από την ακτή του Juthland και 10 Km δυτικά από το νησί Samsø. Το Tunoe Knob είναι από τα πρώτα αιολικά πάρκα που εγκαταστάθηκαν σε θαλάσσια περιοχή και αποτελείται από 10 Vestas V39 των 500kW με συνολική ονομαστική ισχύ 5MW [96].

Σ' ένα παράκτιο αιολικό πάρκο, το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες. Για παράδειγμα, η τραχύτητα της επιφάνειας της θάλασσας είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη και λαμβάνει υψηλή τιμή όταν η αιολική παραγωγή είναι μεγάλη. Επίσης, οι στροβιλισμοί που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του ανέμου με την ακτή επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγή του πάρκου. Παράλληλα, οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού στα παράκτια πάρκα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αβεβαιότητα από ότι στα χερσαία, επειδή υπάρχουν λίγοι συνοπτικοί σταθμοί στην θάλασσα που πραγματοποιούν μετρήσεις με αποτέλεσμα τα μετεωρολογικά μοντέλα να μην μπορούν να περιγράψουν με τόσο μεγάλη ακρίβεια την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Τέλος, η πορεία που ακολουθούν και η ταχύτητα που κινούνται τα μέτωπα πάνω από την θάλασσα μεταβάλλεται με ακαθόριστο τρόπο, έτσι ώστε να εμφανίζονται συχνά στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου χωρικά σφάλματα και σφάλματα φάσης.

Πέρα από τις παραπάνω δυσκολίες που οφείλονται στην τοπολογία του Tunoe Knob, ένα άλλο πρόβλημα που αναμένεται να επηρεάσει την απόδοση των συστημάτων πρόβλεψης είναι η μικρή ονομαστική τιμή του πάρκου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής να είναι μεγάλες και απότομες.

Η χρονική περίοδος που υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob ξεκινάει από την 18/03/2002 και τελειώνει στις 30/04/2003. Η περίοδος εκπαίδευσης των μοντέλων πρόβλεψης αντιστοιχεί στην περίοδο από 18/03/2002 μέχρι 15/12/2002, ενώ για την αποτίμηση των χρησιμοποιήθηκαν οι υπόλοιπες τρεις χιλιάδες ώρες. Και στην περίπτωση του Tunoe Knob οι διαθέσιμες αριθμητικές προβλέψεις καιρού προέρχονται από το μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM που τρέχει στο δανέζικο μετεωρολογικό ινστιτούτο και παρέχει προβλέψεις για τις επόμενες δύο μέρες αναβαθμίζοντας τις προβλέψεις του τέσσερις φορές την ημέρα.

7.2.3.a Αποτίμηση του Μοντέλου I

Από τους πίνακες IX και X και τα αντίστοιχα σχήματα 7.23 και 7.24 που παρουσιάζονται οι τιμές του NMAE και οι τιμές του NRMSE αντίστοιχα για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob, φαίνεται η μειωμένη ακρίβεια της πρόβλεψης λόγω των δυσκολιών του συγκεκριμένου αιολικού πάρκου. Γενικά, η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος σε παράκτια πάρκα έχει αρχίσει να αντιμετωπίζεται σαν ξεχωριστό κομμάτι του προβλήματος κυρίως από τον τομέα της μετεωρολογίας.

Έτσι σε αυτήν την περίπτωση, το Μοντέλο I ξεπερνάει το 15% στα τελευταία χρονικά βήματα της πρόβλεψης για το NMAE κριτήριο, ενώ για το NMRSE κριτήριο είναι πάνω από το 20% σε χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από τριάντα δύο ώρες μπροστά. Παρ' όλ' αυτά για το NMAE κριτήριο, ξεπερνάει την απόδοση της Persistence σε όλα τα βήματα της πρόβλεψης εκτός από το πρώτο, αλλά όσον αφορά το NMRSE κριτήριο, η απόδοση του Μοντέλου I είναι πάντα καλύτερη. Επομένως, το Μοντέλο I στους πρώτους χρονικούς ορίζοντες πετυχαίνει να εκτιμήσει με καλή απόδοση τις έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος. Η μέση τιμή του NRMSE του Μοντέλου I για τις πρώτες έξι ώρες είναι 14.6% έναντι της αντίστοιχης τιμής για την Persistence που είναι 18.3%. Στο δεύτερο εικοσιτετράωρο της πρόβλεψης η τιμή του NRMSE είναι περίπου 20% ενώ αντίστοιχα της Persistence είναι πάνω από 40%.

Η καλή απόδοση του Μοντέλου I φαίνεται και από το NMAE κριτήριο. Η τιμή του NMAE για το Μοντέλο I είναι κάτω από 12% στα πρώτα οχτώ βήματα. Για την ακρίβεια, η

μέση τιμή του NMAE για αυτά τα βήματα είναι 10.73% για το Μοντέλο I και 13.61% για την Persistence. Το πρώτο εικοσιτετράωρο για το Μοντέλο I η μέση τιμή του NMAE είναι 12% και στο δεύτερο, είναι 14.3%. Όμως, οι τιμές του NMAE για την Persistence για τους ίδιους ορίζοντες πρόβλεψης είναι 21.6% και 31.2% αντίστοιχα.

Πινάκας IX

Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου I και της Persistence

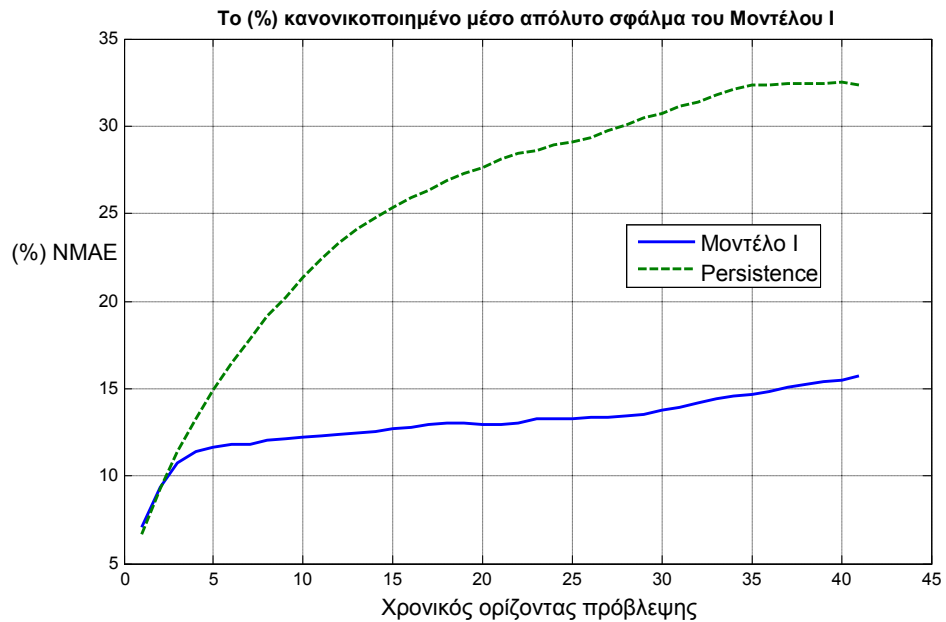
Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου I	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου I	(%) NMAE Persistence
1	7.1	6.66	22	13.04	28.40
2	9.34	9.26	23	13.30	28.58
3	10.71	11.38	24	13.23	28.90
4	11.39	13.24	25	13.30	29.08
5	11.62	14.89	26	13.38	29.36
6	11.77	16.42	27	13.38	29.74
7	11.84	17.85	28	13.47	30.03
8	12.02	19.12	29	13.54	30.48
9	12.12	20.22	30	13.74	30.70
10	12.19	21.37	31	13.89	31.10
11	12.29	22.37	32	14.16	31.37
12	12.36	23.27	33	14.44	31.76
13	12.44	24.10	34	14.59	32.13
14	12.53	24.73	35	14.63	32.32
15	12.67	25.30	36	14.84	32.37
16	12.78	25.87	37	15.08	32.40
17	12.92	26.32	38	15.19	32.47
18	13.04	26.89	39	15.38	32.43
19	13.02	27.26	40	15.50	32.47
20	12.96	27.65	41	15.75	32.37
21	12.95	28.11			

Πινάκας X

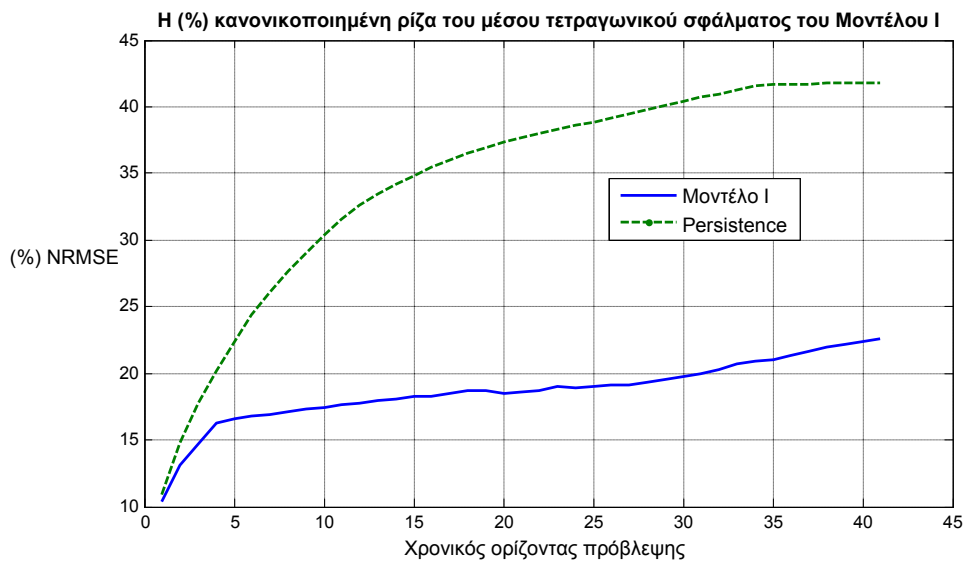
Η (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου I και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου I	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλου I	(%) NMAE Persistence
1	10.35	10.88	22	18.70	38.03
2	13.09	14.81	23	19	38.29
3	14.68	17.71	24	18.91	38.59
4	16.28	20.17	25	18.99	38.86
5	16.56	22.34	26	19.11	39.17
6	16.77	24.33	27	19.14	39.44
7	16.88	26.09	28	19.34	39.73
8	17.11	27.68	29	19.49	40.11
9	17.29	29.02	30	19.76	40.37
10	17.47	30.42	31	19.94	40.68
11	17.67	31.58	32	20.28	40.97
12	17.75	32.59	33	20.66	41.26
13	17.91	33.47	34	20.89	41.53
14	18.06	34.23	35	20.98	41.69
15	18.24	34.86	36	21.33	41.68
16	18.28	35.47	37	21.70	41.70
17	18.52	36.02	38	21.99	41.78

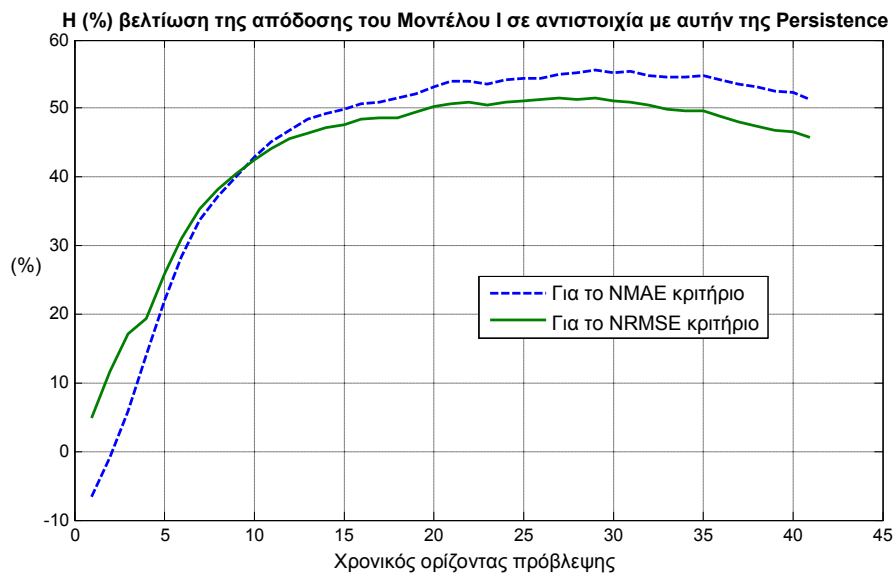
18	18.74	36.53	39	22.20	41.74
19	18.69	36.97	40	22.34	41.79
20	18.53	37.35	41	22.65	41.79
21	18.57	37.71			



Σχήμα 7.23 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob



Σχήμα 7.24 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλου I και της Persistence για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob

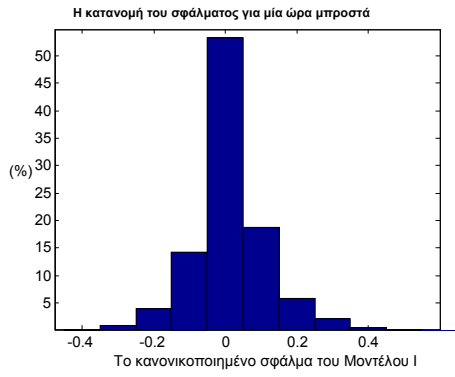


Σχήμα 7.25 Η επί τοις εκατό βελτίωση του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob

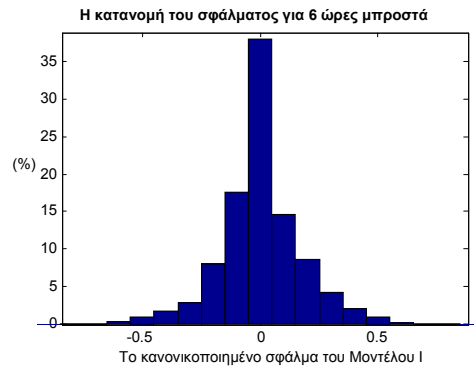
Στο σχήμα 7.25 φαίνεται το ποσοστό βελτίωσης του Μοντέλου I σε αντιστοιχία με την Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης και για όλον τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης. Παρατηρείται ότι μόνο για NMAE κριτήριο και μόνο για το πρώτο βήμα η βελτίωση έχει αρνητική τιμή που σημαίνει ότι η μέθοδος Persistence αποδίδει καλύτερα από το Μοντέλο I. Για προβλέψεις όμως πάνω από οχτώ ώρες μπροστά, η βελτίωση που πετυχαίνεται είναι πάνω από 30% και επιπλέον στους ορίζοντες πρόβλεψης πάνω από δέκα έξι ώρες μπροστά και για το NMAE κριτήριο είναι σταθερά πάνω από 50%. Αντίθετα, για το NRMSE κριτήριο, βελτίωση είναι πάνω από 50% δηλαδή η απόδοση του Μοντέλου I είναι διπλάσια από αυτήν της Persistence στα χρονικά βήματα πρόβλεψης μεταξύ του εικοστού και του τριακοστού τρίτου. Η μέγιστη τιμή της βελτίωσης για το NMAE κριτήριο πετυχαίνεται στο εικοστό ένατο βήμα και είναι 55.5%. Για το NRMSE κριτήριο η μέγιστη τιμή της βελτίωσης είναι 51.4 και εμφανίζεται στο εικοστό έβδομο βήμα της πρόβλεψης.

Παρακάτω παρουσιάζονται και η κατανομές του κανονικοποιημένου σφάλματος του Μοντέλου I σε διάφορους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Από τις κατανομές στα διάφορα βήματα της πρόβλεψης φαίνεται ότι στην περίπτωση του αιολικού πάρκου Tunoe Knob, τα σφάλματα μπορούν να ξεπεράσουν ακόμα και το $\pm 90\%$ της ονομαστικής τιμής του πάρκου. Τέτοια σφάλματα ανήκουν σε προβλέψεις που η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στο όριο αποκοπής, ή μπορεί να προέρχονται από σφάλματα φάσης ή μπορεί να είναι ακόμα και από μία απότομη πτώση της αιολικής παραγωγής μέσα σε μία ώρα.

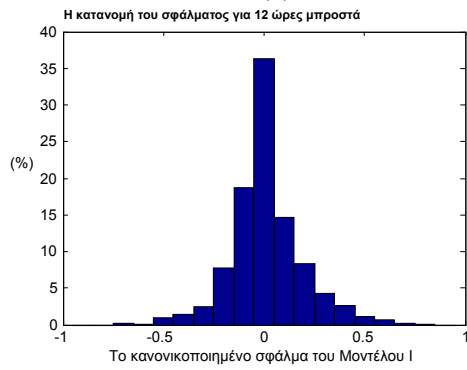
Αντίθετα, τα σφάλματα της πρόβλεψης μεταξύ του $\pm 5\%$ είναι πάντα πάνω από το 30% των περιπτώσεων που αποτιμήθηκαν και μάλιστα μέχρι τα πρώτα είκοσι οχτώ βήματα της πρόβλεψης είναι πάνω από 35%. Πρέπει να σημειωθεί ότι και σε αυτό το αιολικό πάρκο, τα σφάλματα του Μοντέλου I στις προβλέψεις για μία ώρα μπροστά είναι μεταξύ του $\pm 45\%$ και αυτά που είναι μεταξύ του $\pm 5\%$ υπερβαίνουν το 50% των περιπτώσεων αποτίμησης.



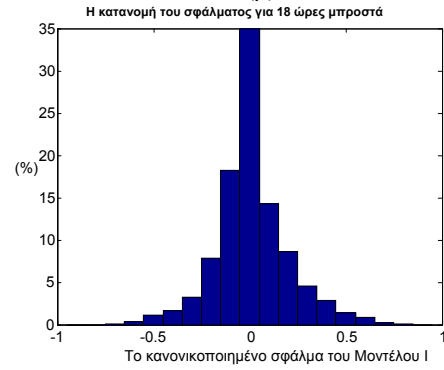
(α)



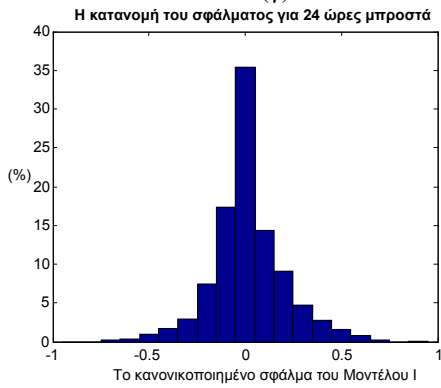
(β)



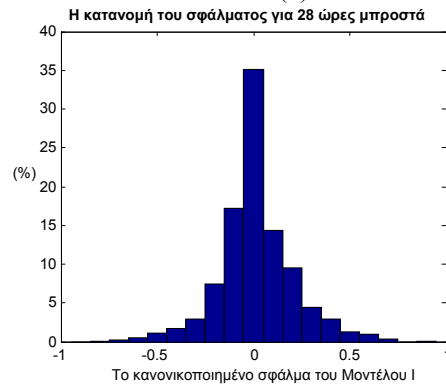
(γ)



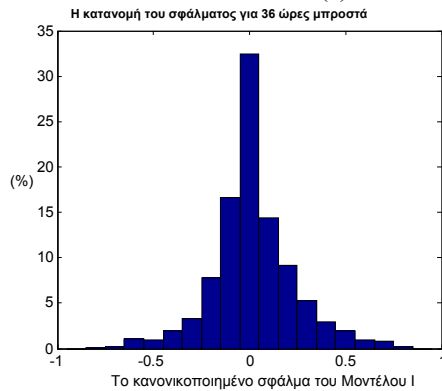
(δ)



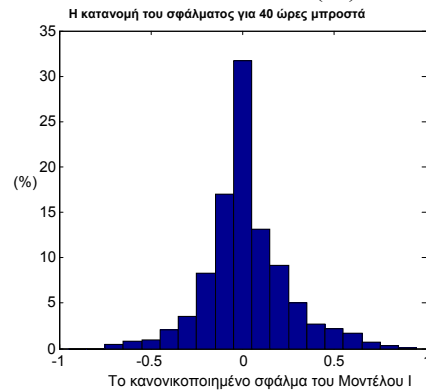
(ε)



(στ)



(η)



(ζ)

Σχήματα 7.26 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου I σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο Τυποε Κνοβ: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά

7.2.3.β Αποτίμηση του Μοντέλου II

Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί απόδοση του Μοντέλου II μετά από την εκτέλεση του για το αιολικό πάρκο Τυποε Κνοβ στην ίδια χρονική περίοδο αποτίμησης με το Μοντέλο I έτσι ώστε να μπορεί να γίνει και σύγκριση της απόδοσης των δύο προτεινόμενων μεθοδολογιών. Το Μοντέλο II όπως θα φανεί σε γενικές γραμμές αποδίδει καλύτερα από το Μοντέλο I και σε παράκτια αιολικά πάρκα. Η ανάλυση της απόδοσης του Μοντέλου II θα κλείσει με τρία στιγμιότυπα που περιέχουν τις προβλέψεις και των δύο μοντέλων πρόβλεψης για να μπορεί γίνει σύγκριση.

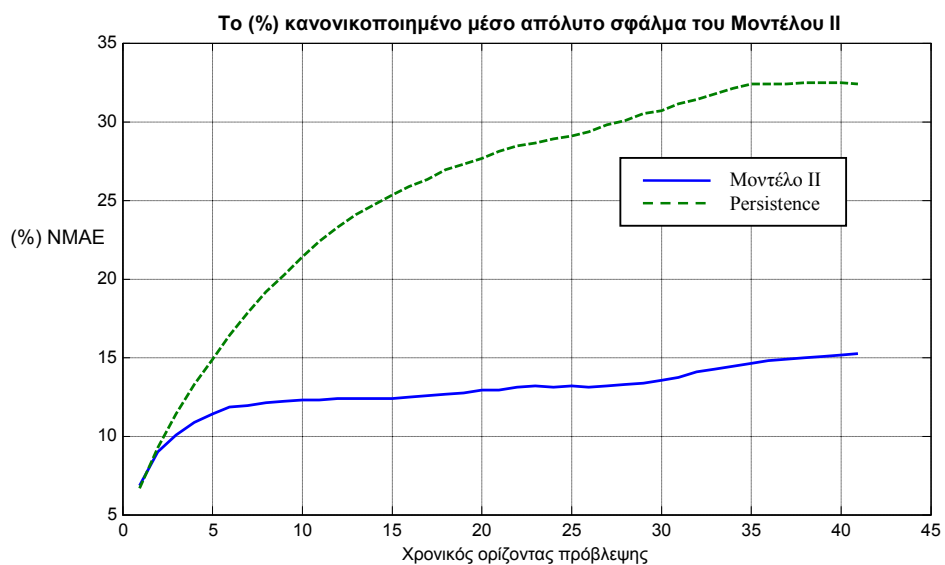
Πινάκας XI

Το (%) κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα του Μοντέλου II και της Persistence

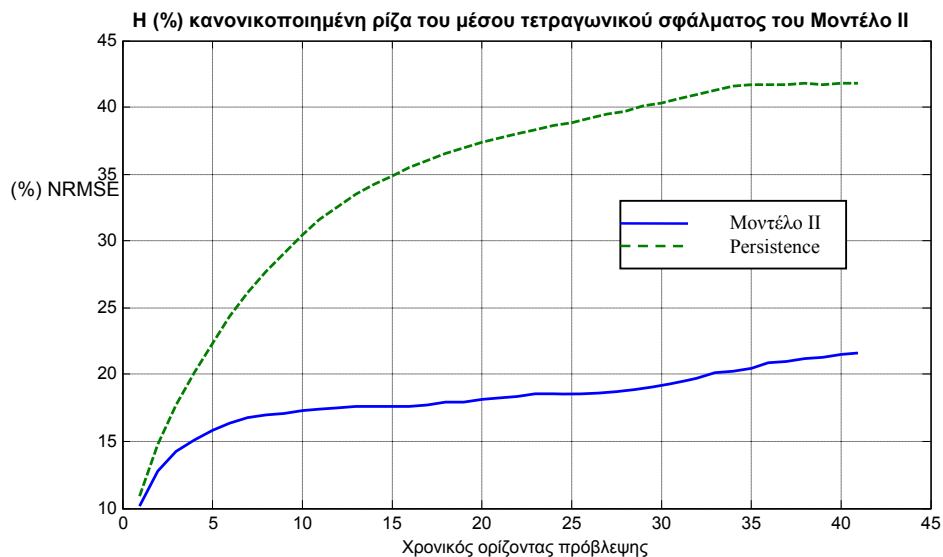
Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence
1	6.86	6.66	22	13.05	28.40
2	8.93	9.26	23	13.13	28.58
3	10.08	11.38	24	13.10	28.90
4	10.86	13.24	25	13.14	29.08
5	11.42	14.89	26	13.09	29.36
6	11.90	16.42	27	13.20	29.74
7	11.95	17.85	28	13.28	30.03
8	12.09	19.12	29	13.38	30.48
9	12.21	20.22	30	13.55	30.70
10	12.26	21.37	31	13.74	31.10
11	12.28	22.37	32	14.03	31.37
12	12.33	23.27	33	14.27	31.76
13	12.36	24.10	34	14.44	32.13
14	12.33	24.73	35	14.58	32.32
15	12.36	25.30	36	14.79	32.37
16	12.41	25.87	37	14.84	32.40
17	12.54	26.32	38	14.93	32.47
18	12.64	26.89	39	15.00	32.43
19	12.72	27.26	40	15.12	32.47
20	12.88	27.65	41	15.26	32.37
21	12.93	28.11			

Πινάκας XII
H (%) κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος του Μοντέλου II και της Persistence

Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence	Χρονικό βήμα πρόβλεψης	(%) NMAE Μοντέλο II	(%) NMAE Persistence
1	10.18	10.88	22	18.39	38.03
2	12.81	14.81	23	18.53	38.29
3	14.21	17.71	24	18.51	38.59
4	15.15	20.17	25	18.55	38.86
5	15.85	22.34	26	18.53	39.17
6	16.70	24.33	27	18.68	39.44
7	16.80	26.09	28	18.82	39.73
8	16.95	27.68	29	18.97	40.11
9	17.12	29.02	30	19.19	40.37
10	17.28	30.42	31	19.39	40.68
11	17.43	31.58	32	19.76	40.97
12	17.51	32.59	33	20.09	41.26
13	17.58	33.47	34	20.29	41.53
14	17.61	34.23	35	20.49	41.69
15	17.63	34.86	36	20.84	41.68
16	17.63	35.47	37	21.01	41.70
17	17.76	36.02	38	21.17	41.78
18	17.89	36.53	39	21.24	41.74
19	17.98	36.97	40	21.45	41.79
20	18.10	37.35	41	21.66	41.79
21	18.21	37.71			



Σχήμα 7.27 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) του Μοντέλου II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob

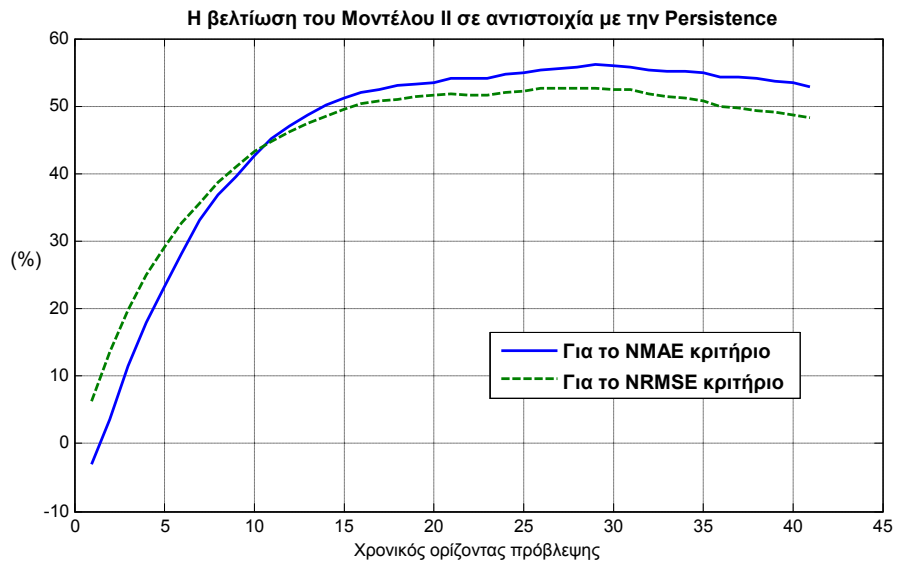


Σχήμα 7.28 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) του Μοντέλου II και της Persistence για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob

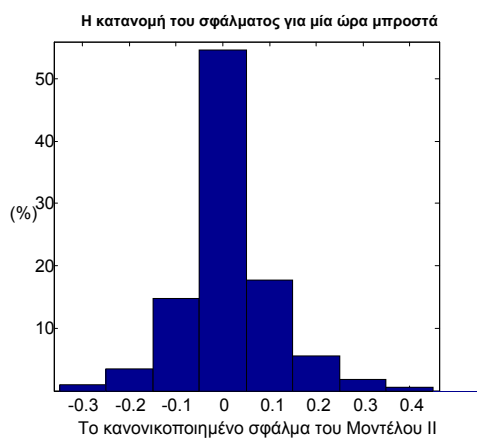
Από τις τιμές των κριτηρίων NMAE και NRMSE που προέκυψαν από την αποτίμηση του Μοντέλου II στο αιολικό πάρκο Tunoe Knob και παρουσιάζονται στους πίνακες XI και XII και στα σχήματα 7.27 και 7.28 αντίστοιχα, φαίνεται μία μικρή βελτίωση σε σχέση με το Μοντέλο I. Δηλαδή, όπως φαίνεται το Μοντέλο II συναντάει τις ίδιες δυσκολίες που αφορούν την τοπολογία και την ονομαστική ισχύ του πάρκου που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στην περίπτωση του Μοντέλου II, η μέση τιμή του NMAE στις πρώτες οχτώ ώρες είναι 10.5%, στο πρώτο εικοσιτετράωρο είναι 11.9% και στο δεύτερο εικοσιτετράωρο είναι 14%. Επιπλέον, η τιμή του NMAE παραμένει κάτω από το 15% της ονομαστικής τιμής του πάρκου μέχρι και το τριακοστό όγδοο βήμα.

Για το NMAE κριτήριο το Μοντέλο II ξεπερνάει την απόδοση της Persistence εκτός από το πρώτο βήμα της πρόβλεψης. Αντίθετα, για το NRMSE κριτήριο νικάει την Persistence σε όλον τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης. Εν τω μεταξύ, η τιμή του NRMSE είναι κάτω από το 20% μέχρι και για τριάντα τρεις ώρες μπροστά και ξεπερνάει το 15% της ονομαστικής τιμής του πάρκου μετά το τέταρτο βήμα της πρόβλεψης. Ειδικά η μέγιστη τιμή του NRMSE στο πρώτο εικοσιτετράωρο είναι 18.5%.

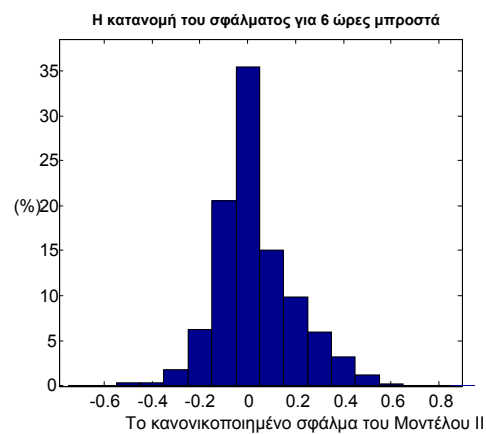
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η βελτίωση που επιτυγχάνεται και στα δύο κριτήρια αξιολόγησης σε αντιστοιχία με την Persistence. Εδώ, η βελτίωση που πετυχαίνει το Μοντέλο II σε σχέση με την Persistence ξεπερνάει το 30% μετά από τα έξι πρώτα βήματα και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης. Παράλληλα, η βελτίωση για το NMAE κριτήριο παραμένει πάνω από το 50% έπειτα από το δέκατο τρίτο βήμα της πρόβλεψης και μεγιστοποιείται στο εικοστό ένατο βήμα με τιμή που ξεπερνάει το 56%. Σε αντιστοιχία, η βελτίωση για το NRMSE υπερβαίνει το 50% από το δέκατο έκτο βήμα και μετά, άλλα πέφτει ξανά κάτω από το μισό της απόδοσης της Persistence μετά το τριακοστό έκτο βήμα της πρόβλεψης. Παρ' όλ' αυτά, η μέγιστη τιμή που λαμβάνει την εικοστή ένατη ώρα, είναι 52.7% που θεωρείται πολύ μεγάλη σε ένα παράκτιο πάρκο.



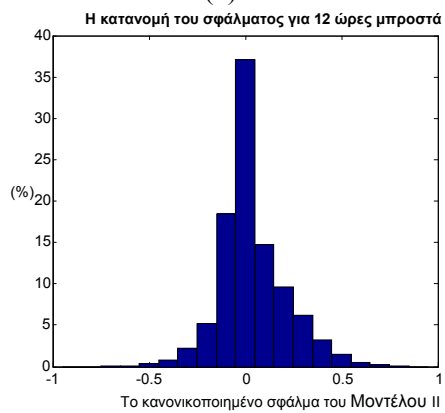
Σχήμα 7.28 Η επί τοις εκατό βελτίωση Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την μέθοδο Persistence και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob



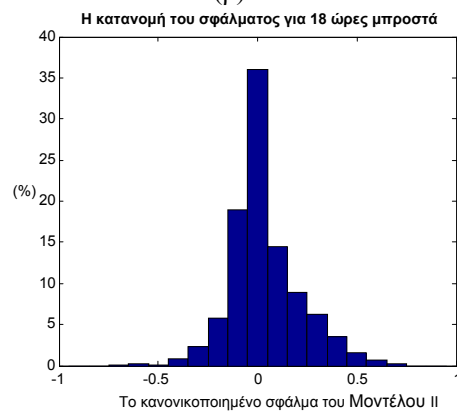
(α)



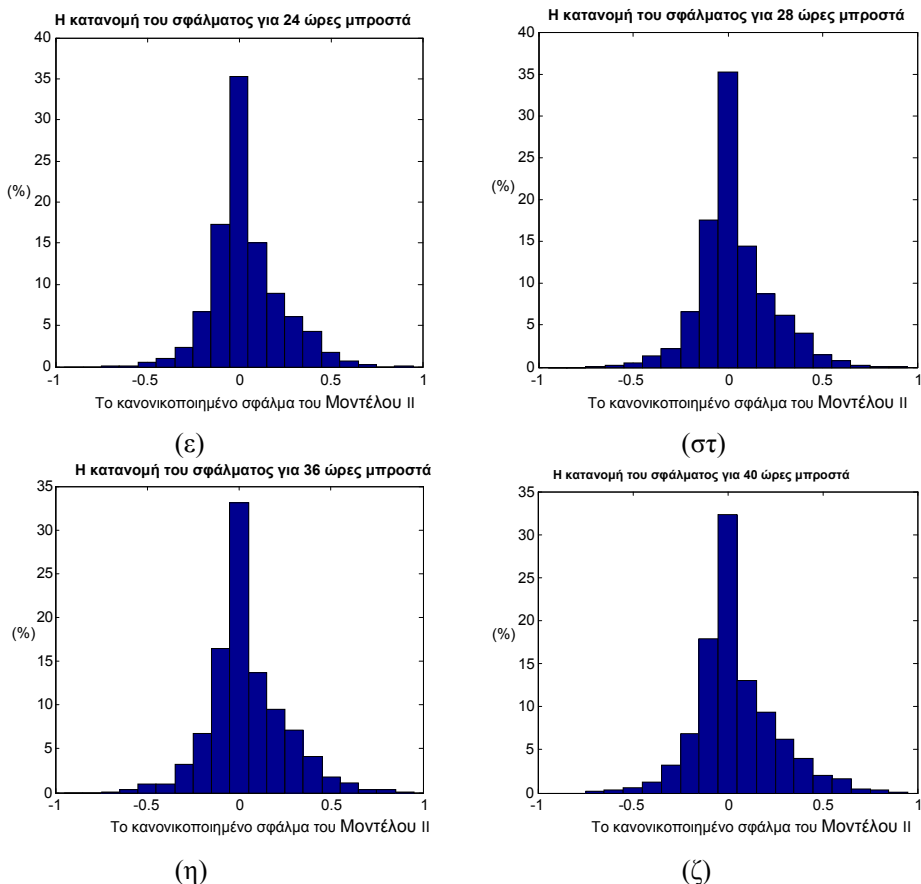
(β)



(γ)



(δ)

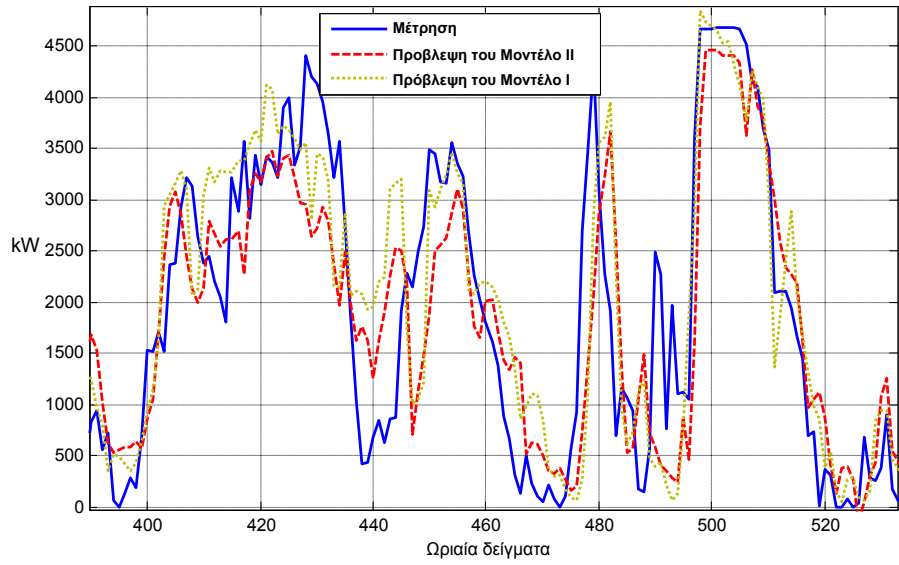


Σχήματα 7.29 Οι κατανομές των κανονικοποιημένων σφαλμάτων της πρόβλεψης του Μοντέλου II σε διάφορα βήματα της πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob: (α) για μία ώρα μπροστά (β) για 6 ώρες μπροστά (γ) για 12 ώρες μπροστά (δ) για 18 ώρες μπροστά (ε) για 24 ώρες μπροστά (στ) για 28 ώρες μπροστά (η) για 36 ώρες μπροστά και (ζ) για 40 ώρες μπροστά.

Η καλύτερη απόδοση του Μοντέλου II σε σχέση με το Μοντέλο I φαίνεται και στις κατανομές του κανονικοποιημένου σφάλματος των σχημάτων 7.29. Παρατηρείται αισθητή μείωση του αριθμού των σφαλμάτων πάνω από $\pm 50\%$ κυρίως από την μεριά της υποεκτίμησης (>0). Οι κατανομές των σφαλμάτων του Μοντέλου II φαίνεται να μοιάζουν περισσότερο με τις αντίστοιχες κατανομές που αναφέρονται σε χερσαία αιολικά πάρκα, σε αντίθεση με τις κατανομές των σφαλμάτων του Μοντέλου I που πλησιάζουν την μορφή της γκαουσιανής κατανομής. Από αυτό συμπεραίνεται, ότι κάποιες από τις δυσκολίες που εμφανίζει ένα παράκτιο αιολικό πάρκο έχουν αντιμετωπιστεί επιτυχώς με την δομή του Μοντέλου II. Πάντως, οι κεντρικές τιμές των κατανομών των σφαλμάτων του Μοντέλου I και του Μοντέλου II είναι περίπου οι ίδιες στα αντίστοιχα βήματα της πρόβλεψης.

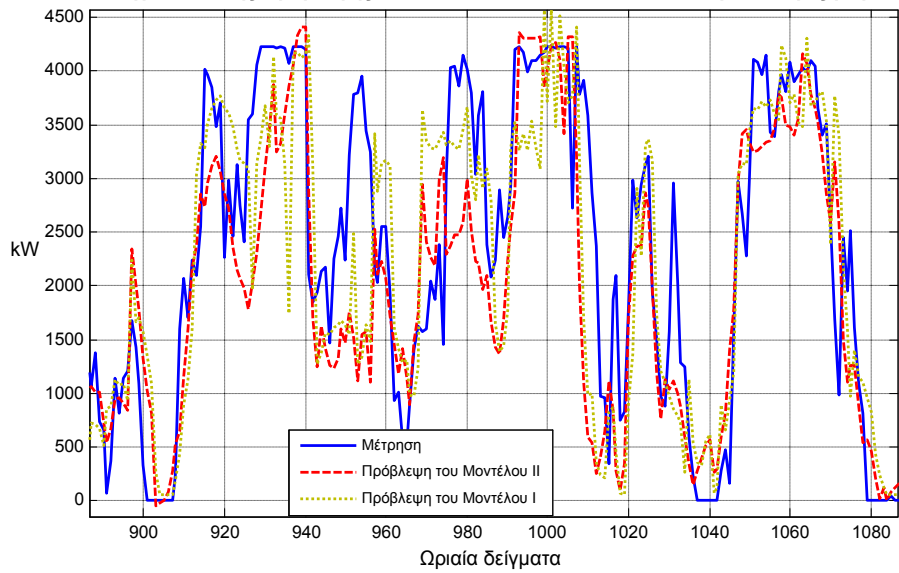
Μία καλύτερη σύγκριση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II μπορεί να γίνει με τα ακόλουθα σχήματα που εμφανίζονται τρία στιγμιότυπα των προβλέψεων τους για τρία διαφορετικά βήματα πρόβλεψης. Στα σχήματα 7.30 φαίνεται η σημαντικότητα και των δύο συστημάτων πρόβλεψης, αφού υπάρχουν περιπτώσεις που το ένα δίνει ακριβέστερες προβλέψεις από το άλλο και αντίστροφα. Πάντως, τα σχήματα 7.30 δείχνουν καθαρά τις έντονες διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος όπου μέσα σε μία ώρα η παραγωγή μπορεί να μειωθεί πάνω από το 80% της ονομαστικής τιμής του πάρκου. Επίσης, φαίνονται χαρακτηριστικά τα χωρικά σφάλματα και τα σφάλματα φάσης της ταχύτητας του ανέμου. Τα χωρικά σφάλματα εντοπίζονται εκεί που η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής είναι πολύ πιο χαμηλή από την μέτρηση της ισχύος, ενώ τα σφάλματα φάσης φαίνονται εκεί που η αιολική παραγωγή είναι μεγάλη μερικές ώρες πριν ότι δείχνει η πρόβλεψη.

Στιγμιότυπο της πρόβλεψης του Μοντέλου II και του Μοντέλου I για 6 ώρες μπροστά

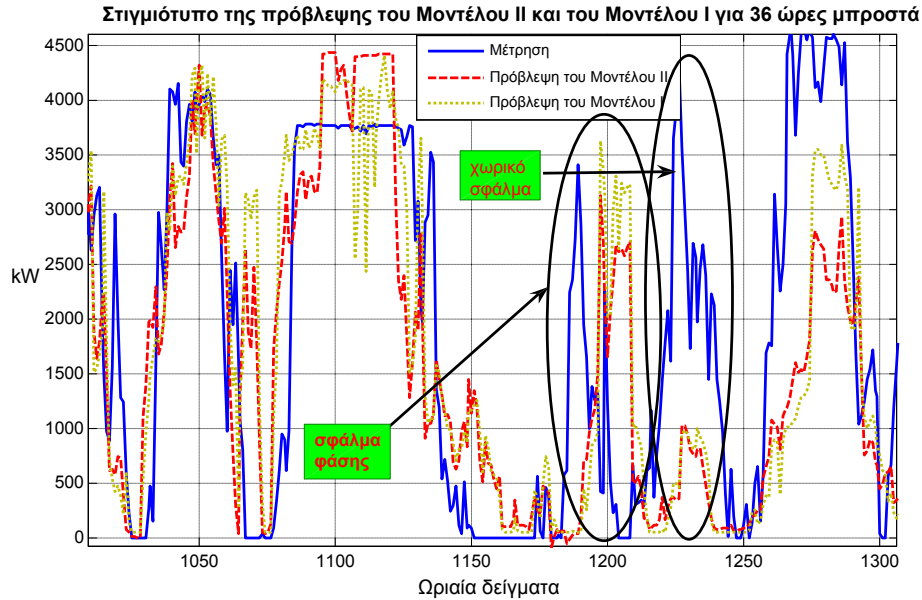


(α)

Στιγμιότυπο της πρόβλεψης του Μοντέλου II και του Μοντέλου I για 24 ώρες μπροστά



(β)



(γ)

Σχήμα 7.30 Τρία στιγμιότυπα από την αποτίμηση του Μοντέλου II και του Μοντέλου I για 6, 24 και 36 ώρες μπροστά στο αιολικό πάρκο Tunoe Knob.

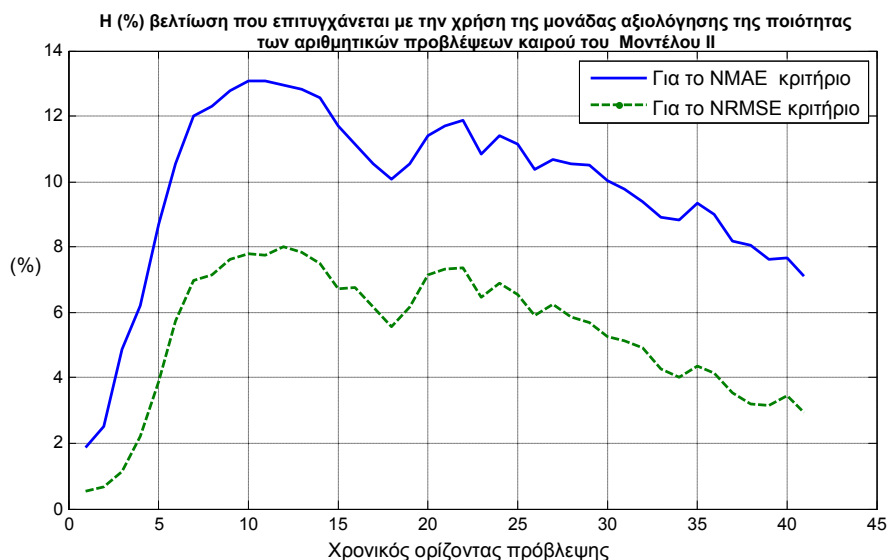
Σημαντικό ρόλο στην απόδοση του Μοντέλου II παίζει και σε αυτήν την περίπτωση η μονάδα αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Στο σχήμα 7.31 φαίνεται η βελτίωση που πετυχαίνεται με αυτήν την μονάδα, δηλαδή η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας της τελικής πρόβλεψης σε αντιστοιχία με την μονάδα της προκαταρκτικής πρόβλεψης του Μοντέλου II. Παρατηρείται σημαντική βελτίωση κυρίως για το NMAE κριτήριο που φτάνει το 13% στο δέκατο χρονικό βήμα και επίσης παραμένει πάνω από 10% από το έκτο μέχρι το τριακοστό βήμα δηλαδή για είκοσι τέσσερα χρονικά βήματα. Βελτίωση εμφανίζει και για το NRMSE κριτήριο και μάλιστα πλησιάζει το 8% στο δωδέκατο βήμα τη πρόβλεψης. Παράλληλα, είναι πάνω από 4% στο μεγαλύτερο διάστημα του ορίζοντα πρόβλεψης. Έτσι το μοντέλο αξιολόγησης της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού διορθώνει κυρίως ποσοτικά την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για ένα αιολικό πάρκο με μικρή ονομαστική τιμή.

7.2.3.γ Συμπεράσματα για το αιολικό πάρκο Tunoe Knob

Όπως αναφέρθηκε το αιολικό πάρκο Tunoe Knob είναι τοποθετημένο στην θάλασσα. Μία τέτοια περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στην ροή του ανέμου τα οποία ακόμη είναι σε επίπεδο έρευνας. Γι' αυτό και η πρόβλεψη στα παράκτια αιολικά πάρκα παραμένει θέμα της μετεωρολογίας του οριακού ατμοσφαιρικού επιπέδου. Παρ' όλ' αυτά προσαρμόστηκαν και εκτελέστηκαν τα συστήματα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που προτείνονται σε αυτή την διατριβή στο παράκτιο αιολικό πάρκο Tunoe Knob με απόδοση όχι πολύ χειρότερη με την αντίστοιχη απόδοση σε χερσαία πάρκα. Μπορεί άλλωστε να πιστοποιηθεί η απόδοση που έδειξαν τα συστήματα πρόβλεψης με την αντίστοιχη απόδοση μοντέλων πρόβλεψης με φυσική προσέγγιση που συμμετείχαν στο πρόγραμμα ANEMOS [96, 147].

Η βελτίωση που επετεύχθη σε αντιστοιχία με την Persistence παρέμεινε και για αυτό το πάρκο σε υψηλά επίπεδα. Ιδίως για το NRMSE κριτήριο που δηλώνει πόσο καλά εκτιμώνται οι διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής [37] που σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ έντονες. Τέλος, αν και παρουσιάστηκαν πολύ μεγάλα σφάλματα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος λόγω των χωρικών σφαλμάτων και των σφαλμάτων φάσης των αριθμητικών

προβλέψεων καιρού, το μέσο απόλυτο σφάλμα έμεινε σε χαμηλά επίπεδα, αφού αυξήθηκαν οι περιπτώσεις που η ακρίβεια της πρόβλεψης ήταν ιδιαίτερα καλή.



Σχήμα 7.31 Η επί τοις εκατό βελτίωση της μονάδας της τελικής πρόβλεψης του Μοντέλου II σε αντιστοιχία με την μονάδα της προκαταρκτικής πρόβλεψης.

7.3 Η On-line αποτίμηση του Μοντέλου II

7.3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ANEMOS, πραγματοποιήθηκε μία ευρεία έρευνα πάνω σε διάφορα θέματα που αφορούν την πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας όπως ο φυσικός και στατιστικός μοντελισμός, η εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης και άλλα. Στα πρώτα στάδια του προγράμματος, κρίθηκε αναγκαία μία λεπτομερής επισκόπηση των ήδη υπάρχων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος όσον αφορά τόσο τον σχεδιασμό τους όσο και την απόδοσή τους. Τα αποτελέσματα της off-line εκτέλεσης των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος τεχνολογίας αιχμής παρουσιάζονται στο [147]. Σκοπός της παραπάνω εργασίας ήταν να συγκριθούν τα πιο προηγμένα μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος διαφορετικής προσέγγισης σε διάφορα αιολικά πάρκα. Οι υπό μελέτη περιπτώσεις για τις οποίες εκτελέστηκαν τα μοντέλα, καθορίστηκαν με τρόπο που να περιλαμβάνονται όλες οι επιδράσεις της τοπολογίας του εδάφους στο πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος όπως είναι η απόσταση από την ακτή, πάρκα σε διαφορετικό υψόμετρο, διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Η εργασία αυτή έδωσε ανεκτίμητη πληροφορία στους χρήστες των μοντέλων πρόβλεψης σχετικά με τα επίπεδα του σφάλματος της πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, έδειξε ότι η ακρίβεια της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι άμεσα εξαρτώμενη με τα χαρακτηριστικά τόσο του υπό μελέτη αιολικού πάρκου όσο και του μοντέλου που την παρέχει.

Στην συνέχεια του προγράμματος ANEMOS αναπτύχθηκε μία πλατφόρμα [146] στην οποία ενσωματώθηκαν έντεκα μοντέλα πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής με σκοπό να εκτελούνται ταυτόχρονα. Παράλληλα, δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων για να τροφοδοτεί τα μοντέλα πρόβλεψης με τα στατικά και τα δυναμικά δεδομένα των αιολικών πάρκων. Ακόμη, μία διεπαφή ανθρώπου-μηχανής όπου επικοινωνεί τόσο με την βάση δεδομένων όσο και με την πλατφόρμα εκτέλεσης των μοντέλων πρόβλεψης, αναπτύχθηκε για να δίνει τις προβλέψεις και τις μετρήσεις της αιολικής ισχύος γραφικά στους τελικούς χρήστες για τα διάφορα αιολικά πάρκα. Το σύστημα ANEMOS σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο

ώστε να μπορεί να λειτουργήσει τόσο τοπικά όσο και απομακρυσμένα όπου η μεταφορά των δεδομένων και των προβλέψεων πραγματοποιείται μέσω του διαδικτύου.

Με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε στην off-line αποτίμηση των πιο προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, έγινε και για την on-line εκτέλεση της πλατφόρμας του ANEMOS. Δηλαδή, τα μοντέλα πρόβλεψης εκτελέστηκαν ταυτόχρονα σε αιολικά πάρκα με τέτοια χαρακτηριστικά που να καλύπτουν όλα τα είδη τοπολογίας και κλιματικών περιπτώσεων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα NMAE και NRMSE ως κριτήρια αποτίμησης.

Παρακάτω θα παρουσιαστεί ένα μέρος από την on-line αποτίμηση της πλατφόρμας του ANEMOS όπου περιλαμβάνει αποτελέσματα τριών μοντέλων από πέντε αιολικά πάρκα. Ένα από τα τρία μοντέλα πρόβλεψης είναι το Μοντέλο II. Για λόγους εμπιστευτικότητας, τα μοντέλα πρόβλεψης θα ονομάζονται M1, M2 και M3, όπου στο M2 αντιστοιχεί στο Μοντέλο II. Το M1 είναι ένα στατιστικό μοντέλο σχεδιασμένο να λειτουργεί για πάρκα με πολύπλοκο έδαφος και ικανό να χρησιμοποιεί το πλήρες πλέγμα του μετεωρολογικού μοντέλου αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Από την άλλη το M3 είναι και αυτό ένα στατιστικό μοντέλο βασισμένο σε αυτό-παλινδρομικές τεχνικές. Ως μοντέλα αναφοράς εφαρμόζονται η μέθοδος της παραμένουσας τιμής (Persistence) και ένα απλό μοντέλο που βασίζεται στην μετατροπή των αριθμητικών προβλέψεων καιρού σε αιολικής ισχύ με την βοήθεια των θεωρητικών καμπύλων ισχύος των ανεμογεννητριών των υπό μελέτη πάρκων. Το τελευταίο μοντέλο αναφοράς αναφέρεται ως PC.

Τα μοντέλα πρόβλεψης που συγκρίνονται σε αυτό το κεφάλαιο εκτελέστηκαν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού του μετεωρολογικού μοντέλου SKIRON που καλύπτουν τις επόμενες 72 ώρες. Το M2 και το M3 παρείχαν προβλέψεις κάθε ώρα, ενώ το M1 και το μοντέλο PC έτρεχαν μόνο όταν έφτανε μία καινούργια αναβάθμιση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού. Τέλος, όλα τα μοντέλα εκτελέστηκαν τοπικά, εκτός από το M3 που λειτουργούσε σε απομακρυσμένο υπολογιστή [148].

7.3.2 Περιγραφή των αιολικών πάρκων στα οποία έγινε η on-line αποτίμηση

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα αιολικά πάρκα που επιλέχθηκαν για να παρουσιαστεί η απόδοση τριών μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος συμπεριλαμβανομένου και του Μοντέλου II σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες και διαφορετικά προφίλ του εδάφους. Ο δείκτης ανωμαλίας RIX του καθενός από τα πέντε αιολικά πάρκα που επιλέχθηκαν φαίνεται στον πίνακα XIII και έχει εκτιμηθεί σε μία ακτίνα των 10 Km που περιβάλλει τα αιολικά πάρκα. Όπως έχει αναφερθεί όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης RIX τόσο μεγαλώνει η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Στη συνέχεια περιγράφονται τα στοιχεία του κάθε αιολικού πάρκου ξεχωριστά.

Πίνακας XIII
Τα υπό μελέτη αιολικά πάρκα της on-line αποτίμησης

Αιολικό πάρκο	Κατηγορία εδάφους	RIX (%)
Alaiz	Πολύ πολύπλοκο	36.0
Sotavento	Μέτρια πολύπλοκο	23.5

Oupria	Μέτρια πολύπλοκο	20.9
Guerledan	Ελάχιστα πολύπλοκο	3.8
Saint Simon	Ελάχιστα πολύπλοκο	1.7

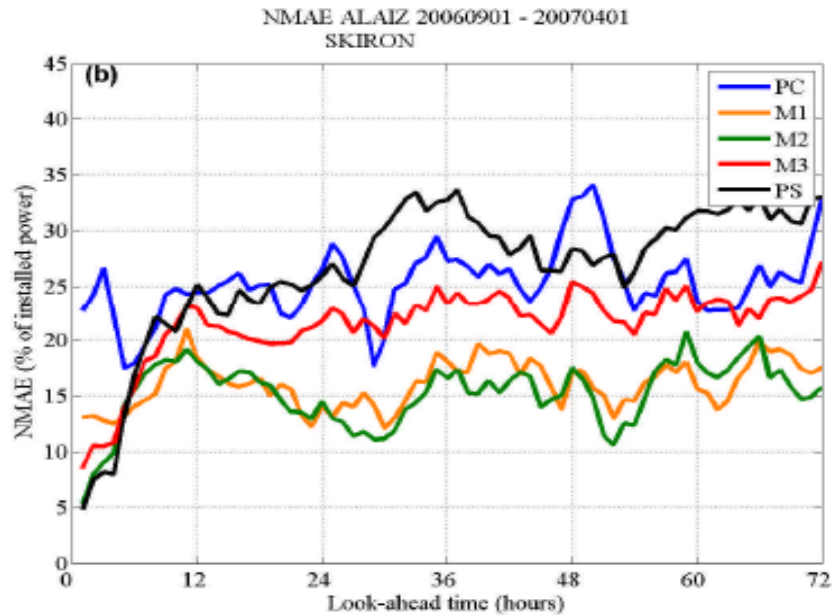
- Το αιολικό πάρκο Alaiz βρίσκεται 15 km νότια της Pamplona στην περιοχή Navarra της Ισπανίας. Το έδαφος στο οποίο είναι τοποθετημένο, θεωρείται ιδιαίτερα πολύπλοκο με το υψόμετρο να κυμαίνεται από 900 μέχρι 1200 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Το Alaiz είναι ένα μεγάλο πάρκο με ονομαστική τιμή 33.09 MW και αποτελείται από τριάντα εννιά Α/Γ του τύπου GAMESA G47 660 kW και μία του τύπου NEC-MICON LW50 των 750 kW.
- Το αιολικό πάρκο Sotavento βρίσκεται στην περιοχή Galicia της βορειοδυτικής Ισπανίας 40 km από τον Ατλαντικό ωκεανό στα 592 μέτρα υψόμετρο σε ημί-πολύπλοκο έδαφος. Η ονομαστική του ισχύς είναι 17.56 MW και αποτελείται από ανεμογεννήτριες διαφορετικού τύπου, όπως για παράδειγμα NEC-MICON NM52/900, Bonus 1300, MADE AE61/1320 κ.τ.λ.
- Το αιολικό πάρκο Oupria είναι βρίσκεται στην περιοχή Languedoc-Roussillon που βρέχεται από την μεσόγειο θάλασσα στην νότια Γαλλία. Το Oupria είναι τοποθετημένο σε ένα χαμηλό λόφο με υψόμετρο 273 m που το έδαφος θεωρείται ημί-πολύπλοκο λόγω των ιδιαίτερων ορειογραφικών ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Το αιολικό πάρκο αποτελείται από 9 NEC-MICON 52/900 και έχει ονομαστική ισχύ 8.1 MW.
- Το αιολικό πάρκο Guerledan είναι τοποθετημένο σε μία περιοχή με χαμηλό υψόμετρο (290m) στην Βρετάνη της Δυτικής Γαλλίας. Περιέχει 5 VESTAS 52/850 και έχει ονομαστική ισχύ 4.25 MW.
- Τέλος, το αιολικό πάρκο Saint Simon βρίσκεται στην περιοχή Nord-pas de Calais σε επίπεδο έδαφος με 89 m υψόμετρο. Αποτελείται από 4 NEC-MICON 92/2750 και έχει ονομαστική ισχύ 11 MW.

7.3.3 Τα αποτελέσματα από την on-line αποτίμηση του Μοντέλου II

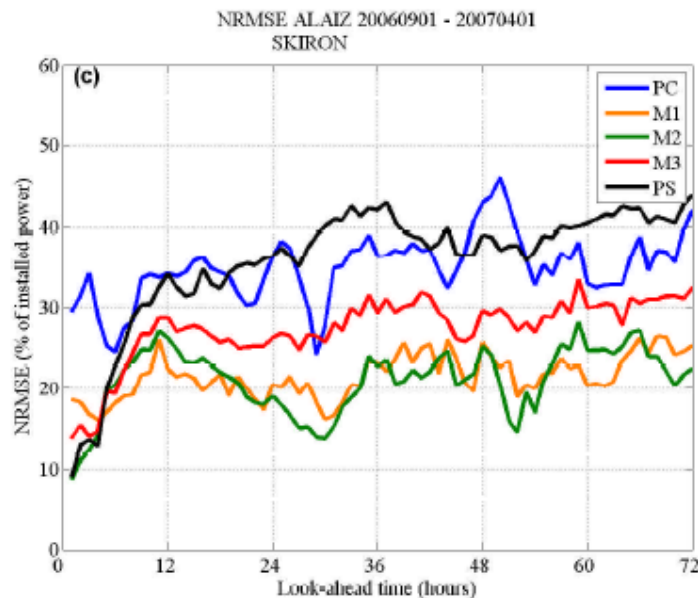
Σ' αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την on-line λειτουργία τριών μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος όπου το ένα από αυτά είναι το Μοντέλο II και συμβολίζεται ως M2. Η αποτίμηση των μοντέλων M1, M2 και M3 έγινε για την χρονική περίοδο του Σεπτεμβρίου του 2006 μέχρι τον Απρίλιο του 2007 στα παραπάνω αιολικά πάρκα. Αν και η περίοδος αποτίμησης είναι μικρότερη από ένα έτος, περιλαμβάνει τους μήνες που έχουν χαμηλή προβλεψιμότητα. Γενικά στην Ευρώπη η προβλεψιμότητα του ανέμου είναι υψηλότερη τους καλοκαιρινούς μήνες με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν να θεωρούνται περισσότερο απαισιόδοξα από ότι αν ήταν για ολόκληρο έτος.

Η παρουσίαση της on-line αποτίμησης ξεκινάει με το υπό μελέτη αιολικό πάρκο Alaiz. Τα μοντέλα πρόβλεψης M1, M2 και M3 όπως και το μοντέλο αναφοράς PC χρησιμοποιούν τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού από το SKIRON. Μετά από την εκτέλεση των μοντέλων

στην χρονική περίοδο των έξι μηνών, υπολογίστηκαν τα κριτήρια NMAE και NRMSE. Οι τιμές των δύο κριτηρίων για τα τρία μοντέλα πρόβλεψης, για το PC και για την Persistence φαίνονται στα σχήματα 7.32 και 7.33.



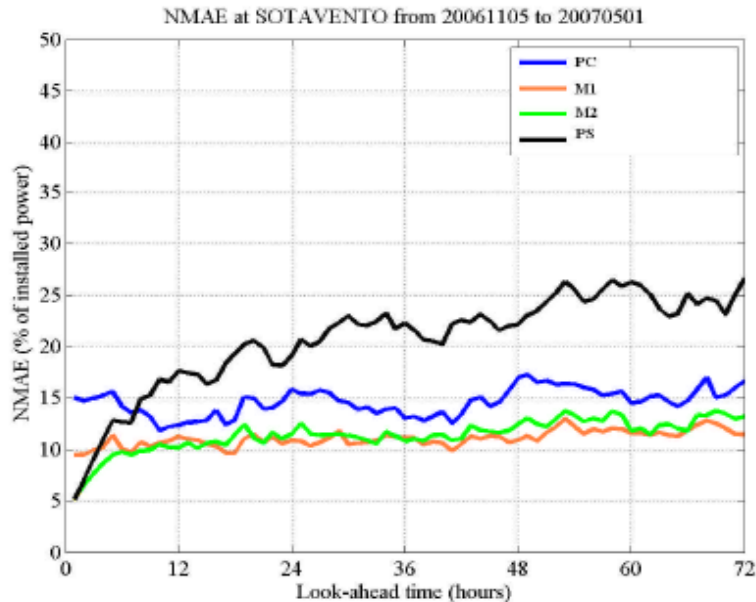
Σχήμα 7.32 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) για το αιολικό πάρκο Alaiz



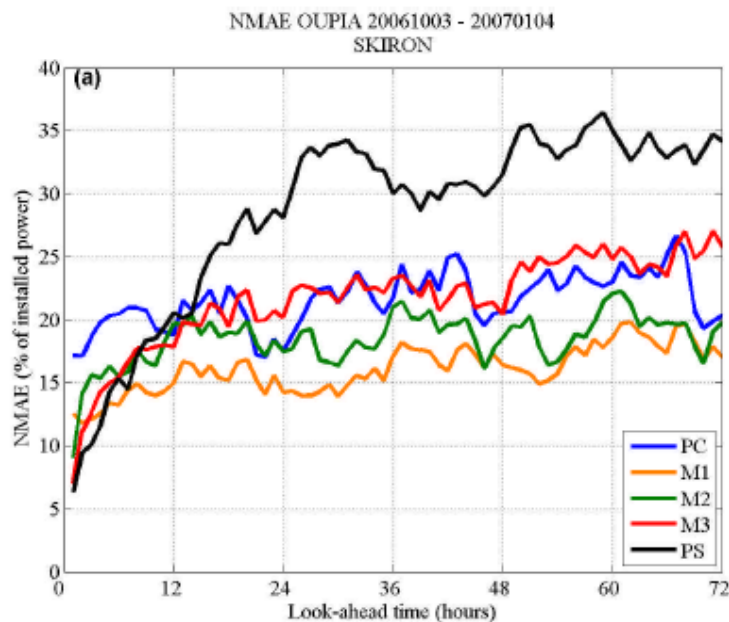
Σχήμα 7.33 Η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE) για το αιολικό πάρκο Alaiz

Παρατηρείται ότι στα πρώτα έξι χρονικά βήματα, η απόδοση του M2 (Μοντέλο II) ξεπερνάει την αντίστοιχη των M1, M3 και PC και για τα δύο κριτήρια αξιολόγησης, αλλά κανένα μοντέλο δεν καταφέρνει να νικήσει την Persistence σε αυτόν τον ορίζοντα πρόβλεψης. Μόνο η τιμή του NRMSE για το M2 είναι μικρότερη για κάποια χρονικά βήματα από αυτήν της Persistence. Στον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης, καλύτερη απόδοση έχουν τα M1 και M2 όπου σε μία τόσο δύσκολη υπό μελέτη περίπτωση βελτιώνουν σημαντικά το σφάλμα της πρόβλεψης του απλού μοντέλου PC γύρω στο 10%.

Για την περίπτωση του αιολικού πάρκου Sotavento παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το NMAE κριτήριο για τα μοντέλα M1, M2 και PC, καθώς και για την Persistence. Η περίοδος αποτίμησης, εδώ, ξεκινάει από το Νοέμβριο του 2006 και τελειώνει τον Απρίλη του 2007. Φαίνεται καθαρά ότι το M2 έχει καλύτερη απόδοση στα πρώτα έξι χρονικά βήματα της πρόβλεψης, αφού ξεπερνάει ακόμα και αυτήν της Persistence. Επίσης και εδώ, τα μοντέλα M1 και M2 έχουν παρόμοια απόδοση για τον ορίζοντα πρόβλεψης πάνω από έξι ώρες μπροστά και αποδίδουν πάντα καλύτερα από το μοντέλο PC.



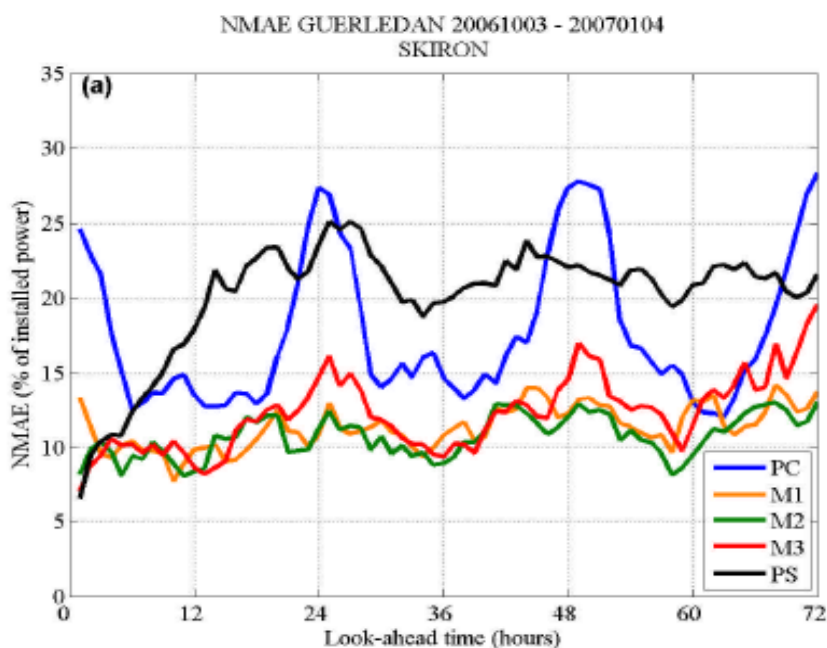
Σχήμα 7.34 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) για το αιολικό πάρκο Sotavento



Σχήμα 7.35 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) για το αιολικό πάρκο Ουρία

Για την περίπτωση του αιολικού πάρκου Ουρία η περίοδος αποτίμησης ήταν από τον Οκτώβριο του 2006 μέχρι τον Απρίλιο του 2007. Σ' αυτήν την περίπτωση, το M3 είναι εκείνο

που αποδίδει καλύτερα στα πρώτα έξι βήματα αλλά όμως δεν ξεπερνάει και την απόδοση της Persistence. Αντίθετα, στον υπόλοιπο ορίζοντα πρόβλεψης, το M1 δίνει τις καλύτερες προβλέψεις. Το μοντέλο M2 έχει σχεδόν σταθερή απόδοση που γίνεται ανταγωνιστική στους οριζόντες πρόβλεψης πάνω από 36 ώρες μπροστά.

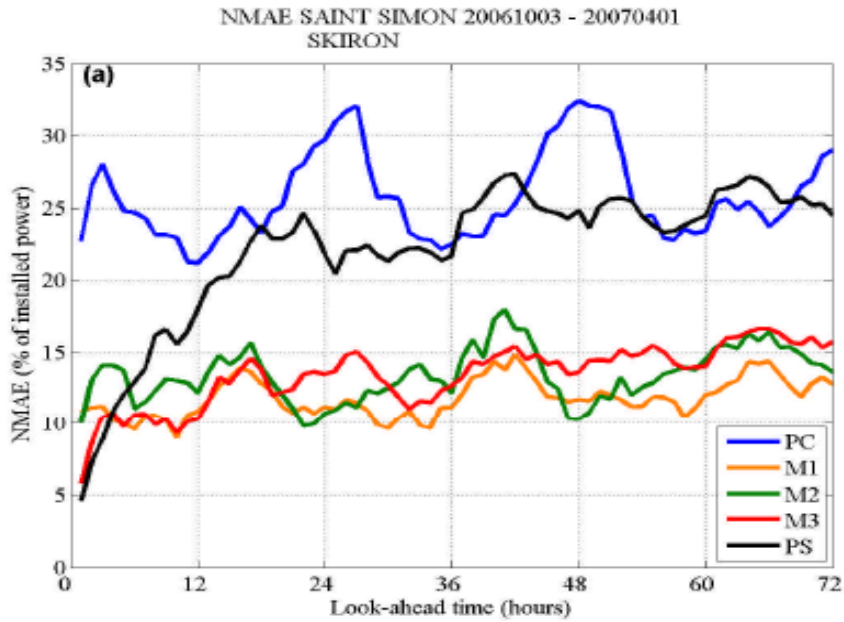


Σχήμα 7.36 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) για το αιολικό πάρκο Guerledan.

Η αποτίμηση των μοντέλων πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο Guerledan έγινε από τον Οκτώβριο του 2006 και διήρκησε μέχρι τον Απρίλιο του 2007. Στο σχήμα 7.36 φαίνεται η τιμή του NMAE κριτηρίου για κάθε μοντέλο. Οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού που προέρχονται και σε αυτήν την περίπτωση από το μοντέλο SKIRON φαίνεται να έχουν χαμηλή ακρίβεια ειδικά σε ορισμένα χρονικά βήματα της πρόβλεψης. Αυτό φαίνεται από την απόδοση του μοντέλου PC. Παρ' όλ' αυτά φαίνεται να μην επηρεάζονται από την χαμηλή απόδοση του SKIRON τα μοντέλα M1 και M2. Κυρίως το M2 φαίνεται να αποδίδει καλύτερα στα περισσότερα βήματα της πρόβλεψης.

Τέλος, στην περίπτωση του πάρκου Saint Simon παρατηρείται η χαμηλή απόδοση του μετεωρολογικού μοντέλου SKIRON μέσω της απόδοσης του μοντέλου PC που είναι χειρότερη από την Persistence στα περισσότερα χρονικά βήματα. Παράλληλα, τα μοντέλα M1, M2 και M3 αποδίδουν καλύτερα είτε το ένα είτε το άλλο σε διαφορετικούς οριζόντες πρόβλεψης. Οι τιμές του NMAE των μοντέλων για το πάρκο Saint Simon παρουσιάζονται στο σχήμα 7.37.

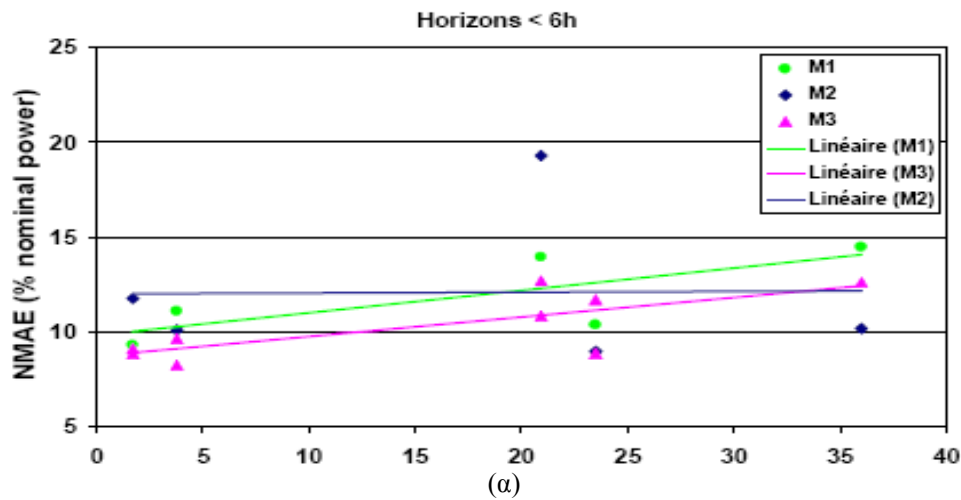
Συμπερασματικά, το μοντέλο M2 που αντιπροσωπεύει το Μοντέλο II φαίνεται να αποδίδει καλύτερα από τα μοντέλα αναφοράς PC και Persistence. Επίσης η απόδοση του είναι τις περισσότερες φορές καλύτερη από την απόδοση των δύο προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης. Από την αποτίμηση του Μοντέλου II φαίνεται ότι μπορεί να μοντελοποιήσει την ροή του ανέμου σε οποιαδήποτε τύπο εδάφους. Αυτό θα φανεί και στην επόμενη παράγραφο που θα συγκριθεί η απόδοση του σε συνάρτηση με τον δείκτη ανωμαλίας. Τέλος, φάνηκε ότι η απόδοση του Μοντέλου II δεν επηρεάζεται τόσο από την χαμηλή ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού, αλλά και από το μετεωρολογικό μοντέλο που προέρχονται.

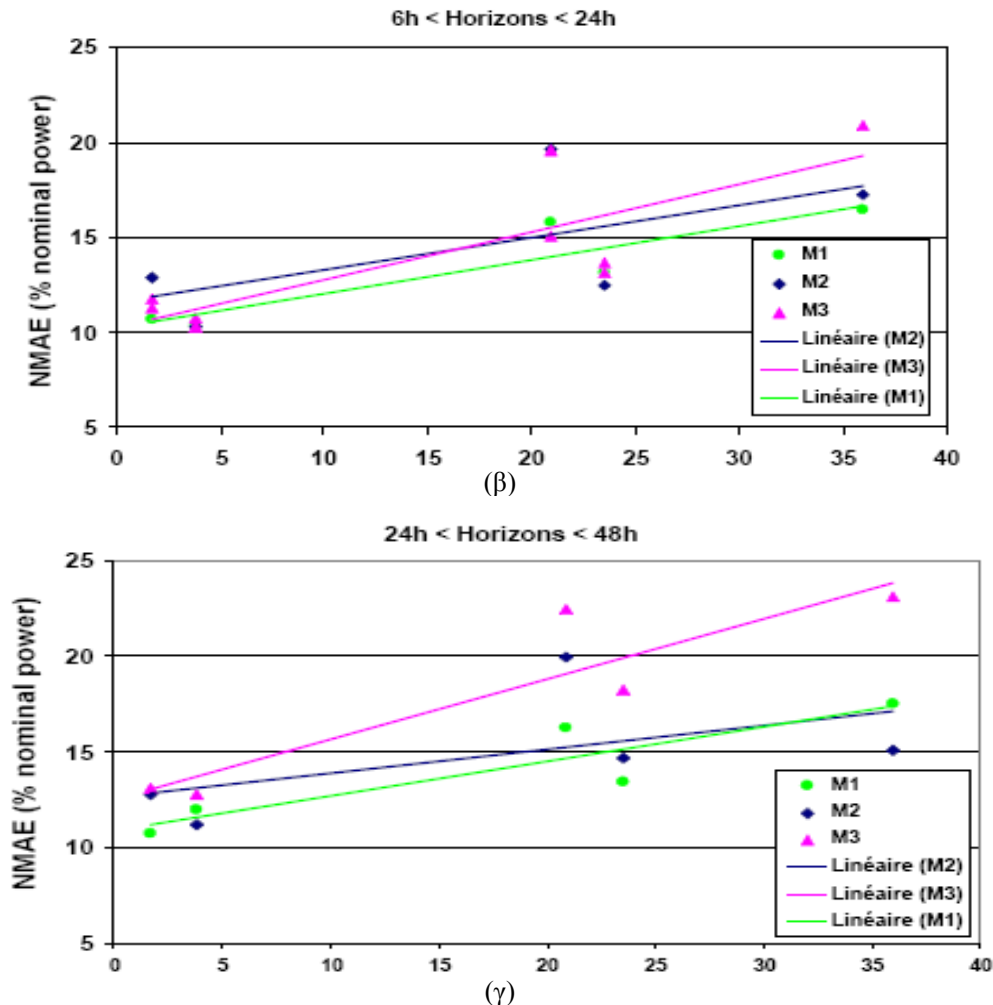


Σχήμα 7.36 Το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) για το αιολικό πάρκο Saint Simon

7.3.4 Η απόδοση του Μοντέλου II σε συνάρτηση με τη πολυπλοκότητα του εδάφους

Για να δοθεί μία πιο ουσιαστικότερη επίδειξη των δυνατοτήτων των μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος M1, M2 και M3 χωρίστηκε ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης σε βραχυπρόθεσμο (<6 ώρες), μεσοπρόθεσμο (6 ώρες <ορίζοντας<24 ώρες) και μακροπρόθεσμο (>24 ώρες). Τα παρακάτω σχήματα προέρχονται από την εργασία του Guenard [148].





Σχήματα 7.37 Οι μέσες τιμές του NMAE κριτηρίου για τα τρία μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε (α) βραχυπρόθεσμους (β) μεσοπρόθεσμους και (γ) μακροπρόθεσμους ορίζοντες πρόβλεψης σε συνάρτηση με το δείκτη ανωμαλίας RIX.

Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι η απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης εξαρτάται από τον δείκτη ανωμαλίας RIX. Όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του εδάφους, αυξάνεται από τη μία αναμενόμενη αβεβαιότητα των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και από την άλλη ο αριθμός και η ιδιαιτερότητα των φαινομένων της ροής του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης.

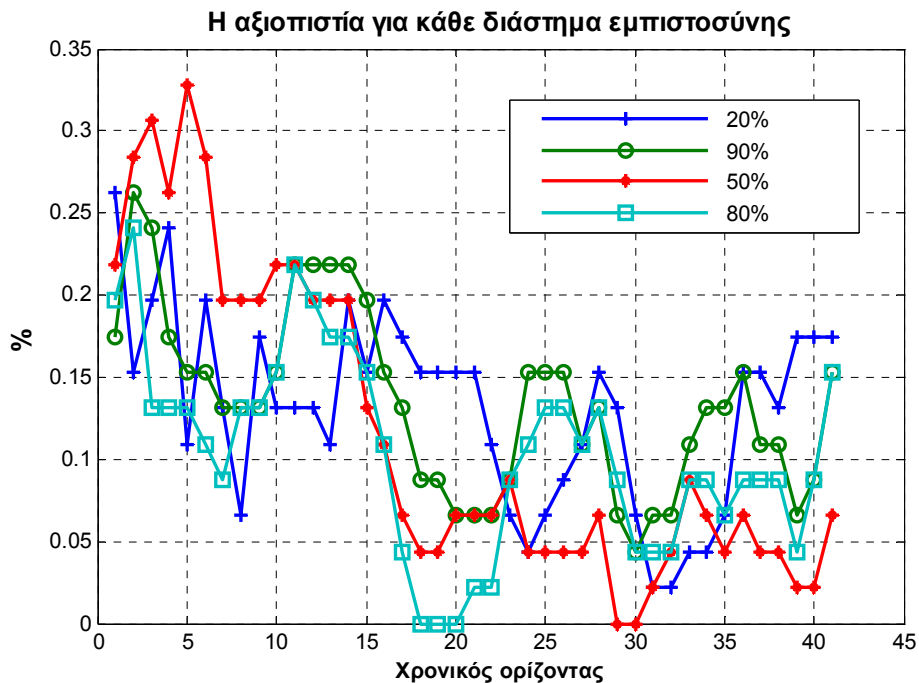
Παρ' όλ' αυτά, στα σχήματα φαίνεται ότι το M2, δηλαδή το Μοντέλο II, έχει την μικρότερη ευαισθησία στην πολυπλοκότητα του εδάφους. Γι αυτό και η κλίση των γραμμικών εξισώσεων στα σχήματα παρουσιάζεται μικρότερη για το M2.

Γενικά η σχέση μεταξύ του σφάλματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και της πολυπλοκότητας του εδάφους είναι λιγότερο εμφανής στους βραχυπρόθεσμους ορίζοντες από ότι σε μακρύτερους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση το γεγονός ότι οι προβλέψεις σε αυτούς τους ορίζοντες βασίζονται περισσότερο στην αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος. Παράλληλα, επειδή η απόδοση των μοντέλων των αριθμητικών προβλέψεων καιρού έχει πιο άμεση σχέση με την πολυπλοκότητα του εδάφους, η σχέση αυτή επηρεάζει και τις προβλέψεις της αιολικής ισχύος.

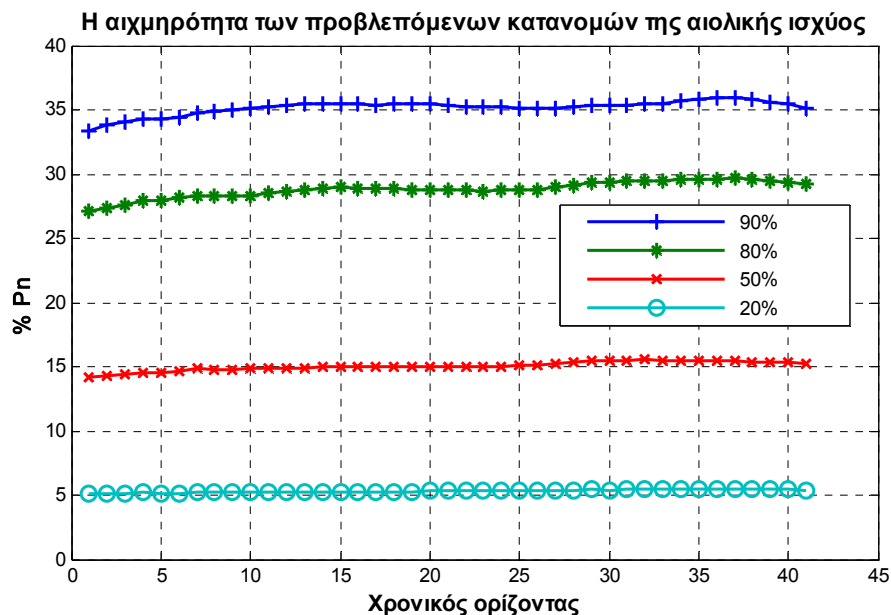
7.4 Αξιολόγηση του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Στο κεφάλαιο 4 περιγράφηκε συνοπτικά ο τρόπος που γενικά προσεγγίζεται η αβεβαιότητα της πρόβλεψης στο τομέα της μετεωρολογίας της αιολικής ισχύος και στη συνέχεια το πώς διαμορφώνονται οι προβλεπόμενες κατανομές της αιολικής ισχύος. Αναλύθηκαν επίσης οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές για την αξιολόγηση των πιθανοτικών μοντέλων τους. Πρωταρχικό ενδιαφέρον έχει η προβλεπόμενες κατανομές της αιολικής ισχύος να καλύπτονται από τις παρατηρούμενες κατανομές. Αυτή η μέθοδος αποτελεί τον βαθμό αξιοπιστίας του μοντέλου της πιθανοτικής πρόβλεψης. Οι παρατηρούμενες κατανομές της αιολικής ισχύος σχηματίζονται από τις χρονοσειρές της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου και την χρονοσειρά της ισχύος. Μια δεύτερη μέθοδος που χαρακτηρίζει την ποιότητα των προβλεπόμενων κατανομών είναι η αιχμηρότητα. Δηλαδή, το πλάτος των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας καθορίζει συμπαγείς προβλέψεις γύρω από μία κεντρική τιμή [150].

Σαν κριτήρια αξιολόγησης για το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης που προτείνεται στην διατριβή, επιλέχθηκαν η αξιοπιστία και η αιχμηρότητα. Και τα δύο κριτήρια εφαρμόστηκαν για κάθε χρονικό βήμα πρόβλεψης ξεχωριστά και διαφορετικά ζευγάρια εκατοστημορίων $a/2$ και $1-a/2$. Το μοντέλο πιθανοτικής πρόβλεψης παράγει οχτώ διαφορετικά εκατοστημόρια που αντιστοιχούν στις πιθανότητες 5%, 10%, 25%, 40%, 60%, 75%, 90% και 95%. Οπότε τα διαστήματα εμπιστοσύνης στα οποία υπολογίζονται η αξιοπιστία και η αιχμηρότητα είναι το 20%, το 50%, το 80% και το 90%. Στο σχήμα 7.38 εμφανίζεται η αξιοπιστία του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης σε συνάρτηση με τον ορίζοντα πρόβλεψης για κάθε διάστημα εμπιστοσύνης ξεχωριστά. Αντίστοιχα, τα σχήματα 7.39 παρουσιάζουν την αιχμηρότητα.



Σχήμα 7.38 Η αξιοπιστία του μοντέλου πιθανοτικής πρόβλεψης σε κάθε χρονικό βήμα της πρόβλεψης σε διαφορετικά διαστήματα εμπιστοσύνης



Σχήμα 7.39 Η αιχμηρότητα των προβλεπόμενων κατανομών που αντιστοιχεί σε τέσσερα διαφορετικά διαστήματα εμπιστοσύνης σε συνάρτηση με τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης

Αν συνδυαστούν τα αποτελέσματα της αξιοπιστίας και της αιχμηρότητας που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα φαίνεται η ιδιαίτερα καλή απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου. Από το διάγραμμα της αξιοπιστίας φαίνεται ότι ένα πολύ μικρό ποσοστό των περιπτώσεων (μικρότερο του 0.5%) η προβλεπόμενη κατανομή είναι φαρδύτερη από την πραγματική. Από την άλλη η αιχμηρότητα δείχνει το μικρό εύρος των τιμών που περιλαμβάνει η κάθε προβλεπόμενη κατανομή. Ειδικά το 20% διάστημα εμπιστοσύνης κυμαίνεται γύρω στο 5% της ονομαστικής τιμής του πάρκου. Παράλληλα, το 90% διάστημα εμπιστοσύνης έχει μέση τιμή ίση με το 35% της ονομαστικής ισχύος αρκετά μικρό αν ληφθούν υπ' όψιν οι επιδράσεις του ορίου αποκοπής στην έξοδο του πάρκου.

7.5 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η απόδοση των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή σε αιολικά πάρκα με διαφορετικά τοπολογικά χαρακτηριστικά και σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες. Στην αρχή, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της off-line εκτέλεση των συστημάτων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε τρία αιολικά πάρκα που αντιστοιχούσαν σε ένα παράκτιο και σε δύο χερσαία με διαφορετικό δείκτη ανωμαλίας του εδάφους. Η απόδοση όμως ενός μοντέλου πρόβλεψης είναι καλύτερη σε off-line λειτουργία αφού οι χρονοσειρές της περιόδου αποτίμησης είναι γνωστές κατά τον συντονισμό των παραμέτρων του. Έτσι λοιπόν, παρουσιάστηκε παράλληλα η on-line απόδοση του ενός από τα δύο συστήματα πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν σε αυτή την διατριβή και μάλιστα αυτού που δημιουργήθηκε μεταγενέστερα. Η on-line εκτέλεση του συστήματος πρόβλεψης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της πλατφόρμας του ANEMOS σε πέντε αιολικά πάρκα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και με διαφορετική προβλεψιμότητα της παραγωγής τους.

Τόσο η off-line, όσο και η on-line απόδοση των δύο μοντέλων πρόβλεψης που ονομάστηκαν Μοντέλο I και Μοντέλο II έδειξε την ανταγωνιστικότητα τους έναντι αντίστοιχων μοντέλων τεχνολογίας αιχμής που κάποια απ' αυτά βρίσκονται σε εφαρμογή σήμερα από διαχειριστές ηλεκτρικών δικτύων στην Ευρώπη. Το μέγεθος της ακρίβειας των προβλέψεων και των δύο συστημάτων πρόβλεψης κυμαίνεται στα επίπεδα των μοντέλων που συμμετείχαν στο ερευνητικό πρόγραμμα ANEMOS και μάλιστα η σύγκριση που έγινε στα

πλαίσια αυτού του προγράμματος έδειξε ότι είναι πιο στιβαρά τα προτεινόμενα συστήματα πρόβλεψης τόσο σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες όσο και στα τοπολογικά χαρακτηριστικά των πάρκων.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα-Μελλοντικές προοπτικές

8.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή εστιάζεται στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την πρόβλεψη της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου. Κατά το ξεκίνημα της εργασίας που αποτελεί αυτήν την διατριβή ήταν λίγες οι ανταγωνιστικές προσεγγίσεις του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος από τις οποίες οι περισσότερες βασίζονταν σε φυσικές παραμετροποιήσεις [78]. Σήμερα έχουν δημοσιευτεί αρκετά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος στατιστικής προσέγγισης που κάποια βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης [107-114] όπως οι μέθοδοι πρόβλεψης που προτάθηκαν εδώ, αλλά λίγα είναι αυτά που είχαν την τύχη να αποτιμηθούν σε διαφορετικά αιολικά πάρκα και να συγκριθούν με τα προγενέστερα μοντέλα τεχνολογίας αιχμής.

Για να αναπτυχθούν όμως οι μέθοδοι πρόβλεψης που παρουσιάστηκαν στην διατριβή, εξετάστηκαν όλοι οι παράγοντες στους οποίους βασίζεται το πρόβλημα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Ακόμη, διαμορφώθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, ενσωματώνοντας διαφορετικές μεθόδους εκπαίδευσης για τα μοντέλα ασαφούς λογικής και βελτιστοποίησης για τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης.

Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τα κοινά στατιστικά αιολικού δυναμικού για οποιαδήποτε υπό μελέτη περιοχή. Εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης που διέπει την ταχύτητα του ανέμου με την έξοδο μιας ανεμογεννήτριας αλλά και όλους τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα φαινόμενα που παρουσιάζει η ροή του ανέμου στο οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα και την σημαντικότητα της διεύθυνσης του ανέμου στην εκτίμηση της αιολικής παραγωγής. Όπως έχει αναφερθεί, ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος αναλαμβάνει να προσομοιώσει τις σχέσεις των αριθμητικών προβλέψεων καιρού με την έξοδο ενός αιολικού πάρκου. Έτσι λοιπόν, αναλύθηκε το κάθε κομμάτι του πάζλ του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, τόσο από την στατιστική του όψη, όσο και από την φυσική του προσέγγιση. Η μελέτη του προβλήματος δεν σταμάτησε εδώ. Οι βασικές λειτουργίες ενός μετεωρολογικού μοντέλου που παράγει τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού παρουσιάστηκαν με σκοπό να γίνουν εμφανή τα μειονεκτήματα που έχει ένα τέτοιο μοντέλο και καλείται να αντιμετωπίσει ένας μελλοντικός δημιουργός ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Παράλληλα, περιγράφηκαν τα πιο γνωστά μοντέλα

αριθμητικών προβλέψεων καιρού που συμμετέχουν στην αγορά, αλλά και τα μοντέλα με υψηλότερη ανάλυση που παρέχουν πιο λεπτομερείς μετεωρολογικές προβλέψεις.

Διάφορες μεθοδολογίες περιγράφηκαν αναλυτικά που αντιστοιχούν σε μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής ισχύος τεχνολογίας αιχμής σαν παραδείγματα, έτσι ώστε από τη μία να φανεί η δυσκολία του προβλήματος και από την άλλη σαν ιδέες για έναν καλύτερο σχεδιασμό ενός μοντέλου πρόβλεψης στατιστικής ή φυσικής προσέγγισης. Γενικά, αναφέρθηκαν οι σημαντικότερες μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα. Παράλληλα, περιγράφηκε η μέθοδος αποτίμησης ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος που έχει καθοριστεί από τους σημαντικότερους ερευνητές του τομέα. Αναφέρθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του σφάλματος που αναμένεται από ένα μοντέλο πρόβλεψης και τέλος, κάποιες απλές μεθόδους εκτίμησης της αβεβαιότητας της πρόβλεψης.

Δύο νέες μεθοδολογίες πρόβλεψης της αιολικής ισχύος αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή [151,152]. Και στις δύο γίνεται εκτίμηση της ποιότητας των αριθμητικών προβλέψεων καιρού με την βοήθεια της ασαφούς λογικής, ενώ την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος την πραγματοποιούν νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης. Η αποτίμηση των μεθοδολογιών σε διάφορα αιολικά πάρκα έδειξε ότι έχουν την κατάλληλη απόδοση να εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες. Ενώ δείχνουν να έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με μοντέλα τεχνολογίας αιχμής. Αποδείχθηκε λοιπόν και η καταλληλότητα των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης σε ένα τέτοιο πρόβλημα που παρουσιάζει διαφορετικές πτυχές σε κάθε υπό μελέτη περίπτωση. Βέβαια, εφαρμόστηκαν και οι κατάλληλες μέθοδοι που βελτιστοποίησαν την απόδοσή τους. Η πιο σημαντική μέθοδος που οδήγησε σε σημαντική βελτίωση στην απόδοση των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης είναι η παραμετροποίηση της εισόδου που βασίζεται στην σημαντικότητα των μεταβλητών εισόδου που έχουν στην έξοδο του προβλήματος.

Με την ανάπτυξη των παραπάνω μεθοδολογιών πρόβλεψης, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα τα οποία είναι απαραίτητα να τα γνωρίζει ένας δημιουργός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Στην διατριβή, αποδείχθηκε η ασθενής αυτό-παλινδρομική συμπεριφορά της χρονοσειράς της αιολικής ισχύος, κάτι που δηλώνει την ασαφώς μεταβλητή συμπεριφορά του ανέμου. Έτσι, είναι αδύνατον να προκύψει ακριβή πρόβλεψη της αιολικής ισχύος χωρίς την βοήθεια της μετεωρολογίας. Από την άλλη η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων καιρού είναι χαμηλή στα πρώτα χρονικά βήματα της πρόβλεψης και γι' αυτό η χρήση παλαιότερων τιμών της αιολικής ισχύος είναι απαραίτητη τουλάχιστον γι' αυτούς τους ορίζοντες πρόβλεψης. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να δηλώνεται η ώρα της ημέρας που γίνεται η πρόβλεψη, ώστε να λαμβάνονται υπ' όψιν η κατεύθυνση των κυκλικών φαινομένων της ροής του ανέμου. Παρ' όλ' αυτά, η πιο σημαντική παράμετρος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι η ταχύτητα του ανέμου. Τέλος, αποδείχθηκε ότι η ακρίβεια της πρόβλεψης βελτιώνεται αν διαχωρίζεται το πρόβλημα σε διαφορετικές κατηγορίες με βάση την κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Επομένως, η διατριβή αυτή παρέχει όλες τις βασικές γνώσεις που πρέπει να έχει κάποιος που σκοπεύει να δημιουργήσει ένα εργαλείο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Παράλληλα, περιέχει την απαιτούμενη γνώση των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης ώστε να εφαρμοστούν στην πρόβλεψη οποιαδήποτε άλλου μεγέθους. Ακόμη, δείχνει πώς ένα μοντέλο ασαφούς λογικής μπορεί να πάρει στιβαρές αποφάσεις. Γενικά, παρουσιάζει τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ένας δημιουργός ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού μέχρι την μοντελοποίηση του σφάλματος πρόβλεψης του μοντέλου. Αναφέρει τους παραμέτρους που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, όπως τα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου ανάμεσα σε όρη ή το φαινόμενο σκίασης των ανεμογεννητριών. Απαντάει με παραδείγματα στα ζητήματα της πρόβλεψης όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στο όριο διασύνδεσης και αποκοπής και πώς είναι δυνατόν να προβλεφθεί η αιολική ισχύ με ένα απλό μοντέλο καμπύλης ισχύος. Τι περιέχουν οι αριθμητικές προβλέψεις καιρού και πώς εφαρμόζονται στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος.

Τέλος, μέσω των συστημάτων πρόβλεψης που προτείνονται ικανοποιούνται και οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Εκτός του ότι η απόδοση των Μοντέλο I και Μοντέλο II είναι τέτοια που μπορεί να επιφέρει οφέλη στο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σημαντική μείωση των ρύπων από τις

συμβατικές μονάδες παραγωγής, παρέχεται και ο βαθμός αβεβαιότητας της πρόβλεψης των προτεινόμενων εργαλείων για πιο ευέλικτη και σίγουρη διαχείριση της αιολικής ενέργειας. Γενικά, από μερικούς τελικούς χρήστες η αβεβαιότητα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι το ίδιο σημαντική με την ίδια την πρόβλεψη. Έτσι, δίνοντας μία ολοκληρωμένη πληροφορία για την μελλοντική αιολική παραγωγή στους τελικούς χρήστες, θα αυξηθεί το ποσό της αιολικής ενέργειας που ενσωματώνεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

8.2 Συμβολή της διατριβής

Η εφαρμογή ενός μοντέλου πρόβλεψης της αιολικής ισχύος είναι απαραίτητη τόσο για έναν διαχειριστή δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για έναν παραγωγό αιολικής ενέργειας. Για έναν διαχειριστή δικτύου, η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος μειώνει το κόστος της παραγωγής ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες και αυξάνει την ασφάλεια του δικτύου. Από την άλλη για έναν παραγωγό αιολικής ενέργειας, ένα μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να μειώσει τις ποινές της υποεκτιμημένης ή της υπερεκτιμημένης παράγωγής σε μία αγορά ενέργειας βελτιώνοντας τις προσφορές της παραγωγής. Η ακρίβεια των προβλέψεων της αιολικής ισχύος είναι ανάλογη με τα οφέλη που παρέχουν στους τελικούς χρήστες.

Τα μοντέλα πρόβλεψης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή αποδείχθηκε ότι αποδίδουν παρόμοια με τα μοντέλα πρόβλεψης που είναι ήδη σήμερα σε λειτουργία από τελικούς χρήστες. Παράλληλα αποδείχθηκε ότι τα προτεινόμενα μοντέλα πρόβλεψης δεν επηρεάζονται τόσο από την τοπολογία του εδάφους όσο άλλα μοντέλα πρόβλεψης τεχνολογίας αιχμής με αποτέλεσμα να μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε περιοχή ενδιαφέροντος. Τα μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να λειτουργήσουν on-line παρέχοντας προβλέψεις για οποιοδήποτε χρονικό ορίζοντα και χρησιμοποιώντας αριθμητικές προβλέψεις καιρού από οποιοδήποτε μετεωρολογικό μοντέλο.

Έκτος την πολύ καλή απόδοση που παρουσιάζουν τα προτεινόμενα μοντέλα πρόβλεψης, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν και στα δύο ενσωματωθεί μία μονάδα αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού που παρέχει για κάθε μοντέλο την αβεβαιότητα της τελικής πρόβλεψης. Ιδιαίτερα η αντίστοιχη μονάδα αξιολόγησης του μοντέλου που βασίζεται στην κατάσταση της ατμόσφαιρας, δηλαδή του Μοντέλου II, παρέχει ακριβής εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Έτσι το Μοντέλο I και το Μοντέλο II εκτός από την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, παρέχουν ταυτόχρονα ένα δείκτη αξιοπιστίας της πρόβλεψης. Παράλληλα στο Μοντέλο II, έχει ενσωματωθεί και το μοντέλο της πιθανοτικής πρόβλεψης που μετατρέπει την πρόβλεψη σημείου και τον δείκτη αβεβαιότητας σε μία κατανομή όλων των πιθανών τιμών της αιολικής ισχύος που είναι σχεδόν ίδια με τις αντίστοιχες κατανομές που προκύπτουν από τις μετρήσεις. Για πρώτη φορά λοιπόν ένα μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος κάνει εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψής του.

Στην παρούσα διατριβή αποδείχθηκε η ιδιαίτερα μεγάλη ικανότητα των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης στον τομέα της πρόβλεψης γενικά και συγκεκριμένα της αιολικής ισχύος. Το πρόβλημα της εκτίμησης της αιολικής ισχύος όπως φάνηκε είναι κάτι παραπάνω από περίπλοκο. Παρ' όλ' αυτά και με τις κατάλληλες δομές που επιλέχθηκαν, τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα με άλλες προηγμένες στατιστικές μεθόδους. Βέβαια, η εφαρμογή της παραμετροποίησης της εισόδου των νευρωνικών δικτύων ακτινωτής βάσης δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στις μεταβλητές με την υψηλότερη συσχέτιση με την έξοδο βελτίωσε σημαντικά την απόδοσή τους.

Τέλος, για πρώτη φορά στον τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος εφαρμόστηκε η ασαφή λογική για την εκτίμηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Πρέπει να σημειωθεί ξανά η αποδοτικότητα της δομής της μονάδας αξιολόγησης των αριθμητικών προβλέψεων καιρού του Μοντέλου II. Η εφαρμογή της 'θεωρητικής' τιμής της αιολικής ισχύος στην εκτίμηση του σφάλματος των αριθμητικών προβλέψεων καιρού αποδείχθηκε αποτελεσματική.

8.3 Μελλοντικές προοπτικές

Στην παρούσα διατριβή, επιλύθηκαν όλα τα βασικά ζητήματα του προβλήματος της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος. Υπάρχουν όμως διάφορα θέματα που πρέπει να ερευνηθούν για να οδηγήσουν σε μοντέλα πρόβλεψης με ακόμα καλύτερη απόδοση. Όμως η εργασία που περιγράφηκε εδώ, διαμορφώθηκε με σκοπό να δοθεί η βάση για οποιαδήποτε επέκταση.

Ένα βασικό αντικείμενο που πρέπει να ερευνηθεί είναι η δυνατότητα των συστημάτων πρόβλεψης που προτείνονται εδώ, να προσαρμόζονται σε τυχόν καινούριες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ήδη έχουν παρατηρηθεί μεταβολές στα καιρικά φαινόμενα και κυρίως στις ακραίες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Από την άλλη, υπάρχουν υπό μελέτη περιπτώσεις αιολικών πάρκων που τα διαθέσιμα δεδομένα δεν καλύπτουν ούτε ένα ημερολογιακό έτος. Έτσι λοιπόν είναι αναγκαίο, να ενσωματωθεί κάποιος αλγόριθμος που να προσαρμόζει τους παραμέτρους του Μοντέλου I και του Μοντέλου II μετά από κάθε εκτέλεση τους με τα πιο πρόσφατα δεδομένα. Προσαρμοστικοί αλγόριθμοι για τα νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης έχουν προταθεί στα [153,154]. Αυτοί η αλγόριθμοι προσθέτουν ή αφαιρούν νευρώνες στο κρυμμένο επίπεδο των νευρωνικών δικτύων και προσαρμόζουν τους υπόλοιπους παραμέτρους με φίλτρα Kalman. Παράλληλα, η προσαρμογή των μοντέλων ασαφούς λογικής μπορεί να γίνει με την βοήθεια των επεκταμένων φίλτρων Kalman ή με την αναδρομική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Τέλος, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης των αυτό-οργανούμενων χαρτών είναι από την φύση του προσαρμοστικός.

Εκτός από τις καθιερωμένες μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί στον τομέα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, αξίζει να διερευνηθούν και διαφορετικές μέθοδοι πρόβλεψης όπως η μεταγωγή καθεστώτος (regime switching modelling). Κατά την μέθοδο αυτή, μοντέλα πρόβλεψης που οι παράμετροι τους έχουν προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες συνδέονται με μία μαρκοβιανή αλυσίδα. Το κάθε μοντέλο αποτελεί μία κατάσταση στην μαρκοβιανή αλυσίδα η οποία αποφασίζει ποιο μοντέλο θα δώσει την πρόβλεψη. Αν λοιπόν τα μοντέλα είναι νευρωνικά δίκτυα ακτινωτής βάσης, τότε αυτά θα εκπαιδεύονται με βάση τον πίνακα μεταφοράς των πιθανοτήτων που συνδέουν τους κρίκους τις αλυσίδας.

Από το τυπικό σφάλμα της πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, φαίνεται ότι μεγάλα σφάλματα εμφανίζονται όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στο όριο αποκοπής των ανεμογεννητριών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μοντέλα πρόβλεψης είναι δύσκολο να εκτιμήσουν τον ακριβή αριθμό των ανεμογεννητριών που διακόπτεται η λειτουργία τους. Αξίζει λοιπόν να ερευνηθεί σαν ξεχωριστό πρόβλημα η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος όταν αναμένεται η ταχύτητα του ανέμου να είναι κοντά σ' αυτό το όριο.

Τα τελευταία χρόνια κάποια μετεωρολογικά μοντέλα έχουν αρχίσει να παρέχουν πιθανοτικές προβλέψεις καιρού με την μορφή σεναρίων [155]. Οι προβλέψεις αυτές ονομάζονται προβλέψεις συνόλου και αποτελούνται από ένα καθορισμένο αριθμό μελών. Τέτοιες προβλέψεις περιέχουν περισσότερη πληροφορία, αφού ο μέσος όρος των μελών δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οπότε η ενσωμάτωση τέτοιων μεταβλητών στα συστήματα πρόβλεψης προμηνύουν περαιτέρω μείωση του σφάλματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον μπορεί να έχει η αυτόματη επιλογή του καλύτερου μέλους.

Τέλος, όπως είδαμε τόσο στην σύγκριση του Μοντέλου I και του Μοντέλου II, όσο και στην on-line αποτίμηση του Μοντέλου II, κάθε εργαλείο πρόβλεψης έχει διαφορετικές δυνατότητες από τα υπόλοιπα. Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν να συνδυαστούν οι προβλέψεις αυτές όχι μόνο επιλέγοντας πάντα το εργαλείο με την καλύτερη απόδοση αλλά το αποτέλεσμα που θα προκύψει να είναι ακόμα πιο ακριβές. Μια τέτοια μέθοδος συνδυασμού προβλέψεων που αξίζει να διερευνηθεί στηρίζεται στο Μπαεζιανό μοντελισμό και έχει εφαρμοστεί στην πρόβλεψη ζήτησης φορτίου [156].

Βιβλιογραφία

- [1] J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguera, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, 'Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change', International Panel on Climate Change, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,; Cambridge University Press, 2001.
- [2] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2008*. IEA PUBLICATIONS, 2008. [online] http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_english.pdf
- [3] Eric Martinot, 'Global Renewable Energy Markets and Policies', *New Academy Review* special edition on climate change, Spring 2004
- [4] 'Directive 2001/77/ec of the european parliament and of the council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market,' Official Journal of the European Commission, vol. L 283, pp. 33–40, 2001.
- [5] L. Bird, M. Bolinger, T. Gagliano, R. Wiser, M. Brown, and B. Parsons, 'Policies and market factors driving wind power development in the United States' ,Energy Policy, vol. 33, no. 11, pp. 1397–1407, July 2005.
- [6] Anoop Singh, 'A market for renewable energy credits in the Indian power sector', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp 643–652, 2009
- [7] Global Wind Energy Council, 'Global wind 2006 report' , Brussels, Belgium, Tech. Rep., 2006.
- [8] M. Hoogwijk, B. de Vries, and W. Turkenburg, 'Assessment of the global and regional geographical, technical and economic potential of onshore wind energy', *Energy Economics*, vol. 26, no. 5, pp. 889–919, Sept. 2004.
- [9] Global Wind Energy Council, "Global wind 2005 report," Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium, Tech. Rep., 2005.
- [10] N. Hatziargyriou, A. Tsikalakis, A. Dimeas, D. Georgiadis, A. Gigantidou, J. Stefanakis, & E. Thalassinakis, 'Security and economic impacts of high wind power penetration in island systems', Cigre Session, Paris, August 2004
- [11] N. Hatziargyriou & A. Zervos, 'Wind power development in Europe', *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no 12, pp 1765–1782, 2001
- [12] Emmanouil M. Voumvoulakis, Nikos D. Hatziargyriou, 'Dynamic Security Assessment and Load Shedding Schemes Using Self Organized Maps and Decision Trees', SETN 2006 pp. 411-420
- [13] Zbigniew Gontar, George Sideratos, Nikos D. Hatziargyriou, 'Short-Term Load Forecasting Using Radial Basis Function Networks', SETN 2004 pp. 432-438
- [14] Aris L. Dimeas and Nikos D. Hatziargyriou, 'Operation of a multiagent system for MicroGrid control', *IEEE Trans Power System* vol. 20 pp. 1447–1455 (2005)
- [15] E. Fagan, S. Grimes, J. McArdle, P. Smith, and M. Stronge, 'Grid code provisions for wind generators in ireland', in *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE, 2005, pp. 1241–1247 Vol. 2.
- [16] Voumvoulakis, E.M. Markou, G.S. Hatziargyriou, N.D., 'Large scale integration of wind power in the greek interconnected power system', *Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, 20-24 July 2008
- [17] R. Kimura, 'Numerical weather prediction', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, no. 12-15, pp. 1403–1414, Dec. 2002.
- [18] S. Salam, 'Unit commitment solution methods', *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 26, pp. 600–605, December 2007, ISSN: 1307-6884.
- [18] H. S. Hippert, C. E. Pedreira, R. C. Souza, 'Neural networks for short-term load forecasting: a review and evaluation', *IEEE Transactions on Power Systems* In *Power Systems*, IEEE Transactions on, Vol. 16, No. 1. (2001), pp. 44-55
- [19] P. Pinson, C. Chevallier, G. Kariniotakis, 'Trading wind generation with short-term probabilistic forecasts of wind power', **IEEE Trans. on Power Systems** 22 (3), pp. 1148-1156, 2007
- [20] S. Haanpää, S. Lehtonen, L. Peltonen, and E. Talockaite, 'Impacts of winter storm Gudrun of 7th "U 9th January 2005 and measures taken in Baltic Sea Region'. Astra Project, 2006, report.
- [21] M. R. Milligan, A. H. Miller, and F. Chapman, 'Estimating the economic value of wind forecasting to utilities', National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado (U.S.), Research Report NREL/TP-441-7803, May 1995.
- [22] G. Giebel, J. Badger, L. Landberg, H. A. Nielsen, T. S. Nielsen, H. Madsen, H. Sattler, K. Feddersen, H. Vedel, J. Tøfting, L. Kruse, and L. Voulund, 'Wind power prediction using

- Ensembles*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Research Report Risø-R-1527(EN), Sept. 2005.
- [23] B. Sørensen and P. Meibom, 'Can wind power be sold in a deregulated electricity market?' in Proceedings of the 1999 European Wind Energy Conference, EWEC'99, Nice, France, Mar. 1999, pp. 375–378.
- [24] A. Fabbri, T. Gomez San Roman, J. Rivier Abbad, and V. Mendez Quezada, 'Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market', Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 3, pp. 1440–1446, 2005.
- [25] A. Luig, S. Bofinger, and H. Beyer, 'Analysis of confidence intervals for the prediction of regional wind power output', in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC'01, Copenhagen, Denmark, June 2001, pp. 725–728.
- [26] S. Bofinger, A. Luig, and H. G. Beyer, 'Qualification of wind power forecasts', in CD Proceedings of the Global Wind Power Conference, Paris, France, Apr. 2002.
- [27] U. Focken, M. Lange, K. Mönnich, H. G. Waldl, H.-P. and Beyer, and A. Luig, 'Short-term prediction of the aggregated power output of wind farms - a statistical analysis of the reduction of the prediction error by spatial smoothing effects', Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 90, no. 3, pp. 231–246, Mar. 2002.
- [28] P. Pinson, "Estimation of the uncertainty in wind power forecasting," Ph.D. dissertation, Ecole des Mines de Paris, Center for Energy and Processes, Rue Claude Daunesse, Sophia Antipolis, 2006.
- [29] P. Pinson, C. Chevallier, and G. Kariniotakis, 'Optimizing benefits from wind power participation in electricity markets using advanced tools for wind power forecasting and uncertainty assessment', in Proceedings of the 2004 European Wind Energy Conference
- [30] Usaola, O. Sánchez, I., J. Ravelo, C. Velasco, J. Domínguez, M.G. Lobo, G. González, F. Soto, B. Díaz-Guerra, M. Alonso, 'Sipreólico - A wind power prediction system based on flexible combination of dynamic models. Application to the Spanish power system'. Proceedings of the First IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques, Norrköping, Sweden, December 2002, pp.197-214. Published by FOI - Swedish Defence Research Agency.
- [31] Sánchez, I., J. Usaola, O. Ravelo, C. Velasco, J. Domínguez, M.G. Lobo, G. González, F. Soto, 'SIPREÓLICO - A Wind Power Prediction System Based on Flexible Combination of Dynamic Models. Application to the Spanish Power System', poster on the World Wind Energy Conference in Berlin, Germany, June 2002
- [32] Petersen, E.L., N.G. Mortensen, L. Landberg, J. Højstrup and H.P. Frank 'Wind Power Meteorology'. Risø-I-1206(EN). Risø National Laboratory, Roskilde. 46 pp.
- [33] Jørgensen, B.H.; Ott, S.; Sørensen, N.N.; Mann, J.; Badger, J., 'Computational methods in wind power meteorology'. Risø -R-1560(EN) (2007) 28 p
- [34] Παπαδόπουλος Μ., 'Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές', εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [35] I.Y.F. Lun , Lam KC. 'A study of Weibull parameters using long term wind observations'. Renewable Energy **20** (2000), pp. 145–253
- [36] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, and D. Graber. 'Methods for estimating wind speed frequency distribution'. J. App.Met., 17(3):350–353, 1978.
- [37] J.P. Hennessey, 'Some aspects of wind power statistics'. Journal of Applied Meteorology **16** 2 (1977), pp. 119–128
- [38] Conradsen K., L. B. Nielsen, and L. P. Prahm, 'Review of Weibull statistics for estimation of wind speed distributions', J. Climate Appl. Meteor., **23**, 1178–1183
- [39] I. Troen and E. L. Petersen, 'European Wind Atlas', Risø National Laboratory, 1989.
- [40] G. Giebel. 'On the benefits of distributed generation of wind energy in Europe'. PhDthesis, University Carl von Ossietzky, Oldenburg, Germany, 2000.
- [41] A. Yamaguchi, T. Ishihara, and Y. Fujino, 'Experimental study of the wind flow in a coastal region of Japan', J. of Wind Eng. & Ind. Aerodyn., 91:247–264, 2003
- [42] B. Lange, S. E. Larsen, J. Højstrup, and R. J. Barthelmie. 'Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment', J. of Wind Eng. & Ind. Aerodyn., 92:959–988, 2004.
- [43] Anahua E., Lange M., Boettcher F., Barth St., Peinke J., 'Stochastic analysis of the power output for a wind turbine', Proceedings of the European Wind Energy Conference-EWEC in London, 2004
- [44] H. G. Beyer, T. Pahlke, W. Schmidt, H.-P. Waldl, and U. de Witt. 'Wake effects in a linear wind farm'. J. of Wind Eng. & Ind. Aerodyn., 51:303–318, 1994

- [45] A. Crespo, J. Hern´andez, and S. Frandsen. ‘*Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms*’. Wind Energy, 2(1):1–24, 1999
- [46] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, and A. Crespo, ‘*Wind turbine wake aerodynamics*’, Progress in Aerospace Sciences, 39:467–510, 2003
- [47] Chan SM, Cresap RL, Curtice DM (1984), "Wind Turbine Cluster Model". IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No.7
- [48] Dimitris Al. Katsaprakakis, Nikos Papadakis, Dimitris G. Christakis, Arthouros Zervos, ‘On the wind power rejection in the islands of Crete and Rhodes’, Wind Energy Journal, Accepted: Mar 23 2007, Published Online: May 14 2007 6:21AM
- [49] I.Martí, D. Cabezón, J. Villanueva, M. J. Sanisidro, Y. Loureiro, E. Cantero, and J. Sanz, ‘*Localpred and Regiopred. Advanced tools for wind energy prediction in complex terrain*’, in Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC’03, Madrid, Spain, 16-19 June 2003
- [50] C. Mohrle, ‘*Uncertainty in wind energy forecasting*’, PhD thesis, University College Cork, National University of Ireland, Cork, Ireland, 2004.
- [51] G. Giebel (ed.), J. Badger, P. Louka, G. Kallos, C. Lac, G. Descombes, A-M Palomares, I. Martí Perez, ‘*Description of NWP, Mesoscale and CFD models*’, Anemos project Deliverable 4.1a, 2005.
- [52] E. N. Lorenz, ‘*A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model*’. Tellus, 17:321–333, 1965.
- [53] E. Kalnay, S. Lord and R. McPherson, ‘*Maturity of Numerical Weather Prediction: the medium range*’, Bull. Am. Met. Soc., 2753-2769, 1998.
- [54] Haltiner and Williams, ‘*Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*’, New York: Wiley and Sons, 1980
- [55] Pielke, ‘*Mesoscale Meteorological Modeling*’, Academic Press, 2002
- [56] ANEMOS deliverable 4.1 ‘*Description of NWP, Mesoscale and CFD models*’
- [57] Lange, M., Focken, U.: Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction, Springer 2006
- [58] Grell et al., ‘*A description of the 5th generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)*’, NCAR Tech Note TN-398+STR, 1994
- [59] Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland, ‘*A comprehensive meteorological modeling system – RAMS*’, Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91, 1992
- [60] Adrian, G. and F. Fiedler, ‘*Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations*’, Beitr. Phys. Atmosph. 64, 27-48, 1991
- [61] Lafore, J.-P. et al., ‘*The Meso-NH atmospheric simulation system. Part 1 : Adiabatic formulation and control simulations*’, Ann.Geophysicae, 16, 209-228, 1998
- [62] N. G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen, E. L. Petersen, ‘*Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP)*’, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Risø, 1998
- [63] Geylein, E. Bazile, P. Bougeault, M. Déqué, V. Ivanovici, A. Joly, L. Labbé, JP. Piédelièvre, JM. Piriou and JF. Royer, ‘*Atmospheric parametrization schemes in Meteo-France’s ARPEGE NWP model*’, Proceedings of the 1994 ECMWF Seminar, Reading, 5-9 September 1994, 385-402 , 1994
- [64] Noilhan, J., and S. Planton, 1989 , ‘*A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*’, Mon. Wea. Rev., 117, 536-549.
- [65] Kallos, G., S. Nickovic, D. Jovic, O. Kakaliagou, A. Papadopoulos, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, ‘*The ETA model operational forecasting system and its parallel implementation*’, Proceedings of the 1st Workshop on Large-Scale Scientific Computations, 7-11 June, Varna, Bulgaria, pp 15 , 1997
- [66] Janjic, Z.I., 1994, ‘*The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes*’, Mon. Wea. Rev., 122, 927-945.
- [67] Janjic, Z.I., J. P. Gerrity Jr., and S. Nickovic, 2001, ‘*An Alternative Approach to Nonhydrostatic Modeling*’, Mon. Wea. Rev., 129, 1164-1178
- [68] Masson, V., 2000 , ‘*A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*’, Boundary Layer Meteorol., 94, 357-397.
- [69] Manuals prepared for the SKIRON system at the framework of the project EPET-II ‘*An integrated forecasting system on parallel computer platforms*’. ISBN 960-8468-14-0
- [70] Ivarsson, K.-I., ‘*Recent developments of the Rasch-Kristjansson scheme in HIRLAM*’, HIRLAM Newsletter 54, p. 107-112, 2008

- [71] Sass, B.H., N.W. Nielsen, J.U. Jørgensen, B. Amstrup, M. Kmit, and K.S. Mogensén, ‘*The operational DMI-HIRLAM system 2002-version*’, DMI Tech. Rep. 02-05
- [72] Kaimal, J. C., and J. J. Finnigan, ‘*Atmospheric Boundary Layer Flows—Their Structure and Measurement*’, Oxford University Press, 289 pp, 1994
- [73] Charnock, H., ‘Wind stress on a water surface. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 81, 639–640., 1955
- [74] Jackson, P.S. and J.C.R., ‘*Hunt Turbulent wind flow over a low hill*’, Quart. J. Roy. Met. Soc. 101, 929-955, 1975
- [75] Mason, P. J., ‘*Diurnal Variations in Flow over a Succession of Ridges and Valleys*’, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 113, 1117–1140, 1987
- [76] Busuoli, M., Trombetti, F. and Tampieri, F., ‘*Data Sets for Studies of Flow and Dispersion in Complex Terrain, The ^{RS}RUSVALTM Wind Tunnel Experiment*’, CNR Technical Report No.3, FISBAT-RT-93/3, 129 pp, 1993
- [77] <http://anemos.cma.fr>
- [78] G. Kariniotakis, P. Pinson, N. Siebert, G. Giebel, and R. Barthelmie, ‘*The state of the art in short-term prediction of wind power - from an offshore perspective*’, in Proceeding of the 2004 SeaTechWeek, Brest, France, 20-21 October 2004
- [79] G. Giebel, G. Kariniotakis, and R. Brownsword, ‘*The state-of-the-art in short-term prediction of wind power - from a Danish perspective*’, in Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, 21-23 October 2003
- [80] Landberg, L., and S.J. Watson, ‘*Short-term Prediction of Local Wind Conditions. Boundary-Layer Meteorology*’, p. 171, 1994
- [81] Landberg, L., ‘*A Mathematical Look at a Physical Power Prediction Model*’, Wind Energy, pp. 23-28, 1998
- [82] G. Giebel, L. Landberg, T. S. Nielsen, and H. Madsen, ‘*The zephyr-project : The next generation prediction system*’, in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC’01, Copenhagen, Denmark, July 2001, pp. 777–780
- [83] Beyer, H.G., D. Heinemann, H. Mellinghoff, K. Mönnich, and H.-P. Waldl, ‘*Forecast of Regional Power Output of Wind Turbines*’, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Nice, France, pp. 1070-1073, 1999
- [84] U. Focken, M. Lange, and H.-P. Waldl, ‘*Previento: a wind power prediction system with an innovative upscaling algorithm*’, in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Association Conference EWEC’01, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001, pp. 826–829
- [85] M. Lange, ‘*On the uncertainty of wind power predictions: analysis of the forecast accuracy and statistical distribution of errors*’, Journal of Solar Energy Engineering- Transactions of the ASME, vol. 127, no. 2, pp. 177–184, 2005
- [86] U. Focken, M. Lange, K. Mönnich, H. G. Waldl, H.-P. and Beyer, ‘*Short-term prediction of the aggregated power output of wind farms - a statistical analysis of the reduction of the prediction error by spatial smoothing effects*’, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 90, no. 3, pp. 231–246, Mar. 2002.
- [87] Focken, U., Lange, L., Tambke, J., Waldl, H-P, ‘*Predicting Offshore Wind Power*’, CD-Rom Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind farms, Billund, Denmark, 2003
- [88] Tambke, J., Bye, J.A.T., Lange, M., Focken, U., Wolff, J.-O., ‘*Wind Profiles over the North Sea - Measurements compared to an Air-Sea-Interaction Model*’, CD-Rom Proceedings of the German Wind Energy Conference DEWEK’04, Wilhelmshaven, Germany, 2004
- [89] B. Bailey, M. C. Brower, and J. Zack, ‘*Short-term wind forecasting, development and application of a meso-scale model*’, in Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC’99, Nice, France, pp. 1062–1065 , 1999
- [90] Zack, J.W., M.C. Brower, B.H. Bailey, ‘*Validating of the Forewind Model in Wind Forecasting Applications*’, Talk on the EWEC Special Topic Conference Wind Power for the 21st Century, Kassel, Germany, 2000
- [91] Marti, I., et al, ‘*LocalPred and RegioPred. Advanced tools for wind energy prediction in complex terrain*’, CD-Rom Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2003, Madrid, Spain, June 16-19, 2003
- [92] Marti, I., San Isidro, M.J., Cabezón, D., Loureiro, Y., Villanueva, J., Cantero, E., Pérez, I., ‘*Wind Power Prediction in Complex Terrain: From the Synoptic Scale to the Local Scale*’, CD-Rom Proceedings of the Conference: The Science of making Torque from Wind, Delft, The Netherlands, 2004

- [93] M. Magnusson and L. Wern, 'Wind energy predictions using CFD and HIRLAM forecasts', in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC'01, Copenhagen, Denmark, pp. 861–863, 2001
- [94] Jørgensen, J., C. Moehrlen, B. Ó Gallaghoir, K. Sattler and E. McKeogh, 'HIRPOM: Description of an operational numerical wind power prediction model for large scale integration of on- and offshore wind power in Denmark', Poster on the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, 2002
- [95] G. E. P. Box and G. M. Jenkins, 'Time Series Analysis forecasting and control', revised ed. Oakland, California, 1976
- [96] G. Kariniotakis, I. Martí, D. Casas, P. Pinson, T. S. Nielsen, H. Madsen, J. Giebel, G. and Usaola, I. Sanchez, A. M. Palomares, R. Brownsword, J. Tambke, U. Focken, P. Lange, M. and Louka, G. Kallos, C. Lac, G. Sideratos, and G. Descombes, 'What performance can be expected by short-term wind power prediction models depending on site characteristics?'. in Proceedings of the 2004 European Wind Energy Association Conference EWEC'04, London, UK., Nov. 2004
- [97] T. S. Nielsen, H. Madsen, H. A. Nielsen, P. Pinson, G. Kariniotakis, N. Siebert, I. Martí, M. Lange, U. Focken, L. von Bremen, P. Louka, G. Kallos, and G. Galanis, 'Short-term wind power forecasting using advanced statistical methods', in Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC'06, Athens, Greece, 2006
- [98] M. Milligan, M. N. Schwartz, and Y. Wan, 'Statistical wind power forecasting for U.S. wind Farms', National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado, Research Report NREL/CP-500-35087, Nov. 2003
- [99] Makarov, Y., et al, 'California ISO Wind Generation Forecasting Service Design and Experience', Proceedings of American Wind Energy Association Conference, 2003
- [100] M. J. Durán, D. Cros, and J. Riquelme, 'Short-term wind power prediction based on ar Models', in Proceedings of the 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, 2005
- [101] T. S. Nielsen, H. Madsen, and J. Tøfting, 'Experiences with statistical methods for wind power prediction', in Proceedings of the 1999 European Wind Energy Conference, EWEC'99, Nice, France, pp. 1066–1069, 1999
- [102] T. S. Nielsen and H. Madsen, 'Statistical methods for predicting wind power', in Proceedings of the 1997 European Wind Energy Conference, EWEC'97, Dublin, Ireland, pp. 755–758, 1997
- [103] William S. Cleveland and Susan J. Devlin, 'Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting', Journal of the American Statistical Association, 83:596–610, 1988
- [104] T. S. Nielsen, 'Online prediction and control in nonlinear stochastic systems', Ph.D. dissertation, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2002
- [105] I. Sanchez and J. Usaola, 'Sipreólico - a wind power prediction system based on flexible combination of dynamic models. Application to the Spanish power system', in Proceedings of the World Wind Energy Conference, Berlin, Germany, 2002
- [106] I. Sánchez, 'Short-term prediction of wind energy production', International Journal of Forecasting, vol. 22, no. 1, pp. 43–56, 2006.
- [107] K. Methaprayoon, C. Yingvivanapong, W.J. Lee, J. Liao, 'An Integration of ANN Wind Power Estimation into UC Considering the Forecasting Uncertainty', IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 116-124, 2005
- [108] S. Li, D. C. Wunsch, E. A. O'Shair, and M. G. Giesselmann, 'Using neural networks to estimate wind turbine power generation', IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 3, pp. 276–282, 2001
- [109] Shunhui Li, 'Wind power prediction using recurrent multilayer perceptron neural networks', Power Engineering Society General Meeting, vol. 4, pp. 2325–2330, 2003
- [110] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, 'Decoupled extended Kalman filter training of feedforward layered networks', in International Joint Conference on Neural Networks. Seattle 1991 pp. 771-777
- [111] T.G. Barbounis and J.B. Theocharis, 'Locally recurrent neural networks for long-term wind speed and power prediction', Neurocomputing 69, pp. 466–496, 2006
- [112] K. Rohrig, B. Ernst, M. Hoppe-Kilpper, and F. Schlögl, 'Online-monitoring and prediction of wind power in German transmission system operation centres', in Proceeding of World Wind Energy Conference, Cape Town, South Africa, 2003
- [113] B. Ernst, K. Rohrig, P. Schorn, and H. Regber, 'Managing 3000 mw wind power in a transmission system operation centres', in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Association Conference EWEC'01, Copenhagen, Denmark, pp. 890–893, 2001

- [114] Kariniotakis G., G.S. Stavrakakis, E.F. Nogaret, 'Wind power forecasting using advanced neural network models', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, pp. 762-767, 1996
- [115] Kariniotakis, G., 'Forecasting of Wind Parks Production by Dynamic Fuzzy Models with Optimal Generalisation Capacity', Proc. of the 12th ISAP 03, ISAP 03/032, Lemnos 2003
- [116] Kariniotakis, G., Mayer, D., Halliday, J.A., Dutton, A.G., Irving, A.D., Brownsword, R.A., Dokopoulos, P.S., Alexiadis, M.C., 'Load, Wind and Hydro Power Forecasting Functions the More-Care EMS System', Proc. of MedPower, 2002
- [117] Kariniotakis G., Nogaret E., Stavrakakis G., 'A fuzzy logic and a neural network based wind power forecasting model', Proc. of the 1996 European Union Wind Energy Conference, EUWEC'96, Göteborg, Sweden, pp. 596-599, 1996
- [118] Pinson, P., Kariniotakis, G., 'Uncertainty and Prediction Risk Assessment of Short-term Wind Power Forecasts', Conference The Science of making Torque from Wind, European Wind Energy Academy, Delft, 2004
- [119] Kariniotakis, G., 'Towards Next Generation Short-term Forecasting of Wind Power - The ANEMOS Project', CD-Rom Proceedings of the Global WindPower 2004 Conference, Chicago, USA, 28-31 March, 2004
- [120] G. Giebel, L. Landberg, T. S. Nielsen, and H. Madsen, 'The zephyr-project : The next generation prediction system', in Proceedings of the 2001 European Wind Energy Conference, EWEC'01, Copenhagen, Denmark, July 2001, pp. 777-780
- [121] ANEMOS Deliverable 1.1 'The State-Of-The-Art in Short-Term Prediction of Wind Power: A Literature Overview', 2003
- [122] H. Madsen, P. Pinson, H. Aa. Nielsen, T. S. Nielsen, and G. Kariniotakis, 'Standardizing the performance evaluation of short-term wind power prediction models', Wind Engineering, 29(6), 475-489, 2005
- [123] T. S. Nielsen, A. Joensen, H. Madsen, L. Landberg, and G. Giebel, 'A new reference model for wind power forecasting', Wind Energy, 1:29-34, 1998
- [124] J. B. Bremnes, 'Probabilistic wind power forecasts using local quantile regression', Wind Energy, 7(1):47-54, 2004
- [125] P. Pinson and G. Kariniotakis, 'On-line adaptation of confidence intervals based on weather stability for wind power forecasting', In CD-Proc. of the 2004 Global Windpower Conference, Chicago, Illinois (USA), 2004
- [126] P. Pinson, H.Aa. Nielsen, H.Madsen, 'Methods for the Estimation of the Uncertainty of Wind Power Forecasts', ANEMOS deliverable
- [127] G. J. Hahn and W. Q. Meeker, 'Statistical Intervals - A Guide for Practitioners', John Wiley & Sons, 1991
- [128] A. B. Koehler, 'An inappropriate prediction interval', Int. J. Forecasting, 6(4):557-558, 1990
- [129] Granger, C. W. J. and Teräsvirta, T., 'Modelling Nonlinear Economic Relationships', Oxford University Press, Oxford, 2003
- [130] Simon Haykins, 'Neural networks', Pearson-Prentice Hall, second edition, 2005
- [131] Kuan, C.-M. and H. White, 'Artificial neural networks: An econometric perspective', Econometric Reviews, 13, 1-91 and 139-143, 1994
- [132] G. Zhang, Patuwo B. E., and M. Y. Hu, 'Forecasting with artificial neural networks: the state of the art', Int. J. Forecasting, 14(1):35-62, 1998
- [133] L. Marquez, T. Hill, W. Remus and R. Worthley, 'Neural Network Models as an Alternative to Regression', In: E. Turban and R. Trippi, Editors, Neural Network Applications in Investment and Finance Services, Probus Publishing, New York, pp. 145-161(1991)
- [134] Chen, S., Cowan, C.F.N. and Grant, P.M., 'Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks', IEEE Trans. Neural Networks, pp. 302-309, 1995
- [135] M. J. Orr, 'Regularisation in the selection of RBF centres', Neural Computation, vol. 7, no. 3, pp. 606-623, 1995
- [136] Schwarz, G., 'Estimating the dimension of a model', Annals of Statistics, 6, 461-464, 1978
- [137] Stein, M. C., 'Estimation of the mean of a multivariate normal distribution', Annals of Statistics, 9(6), 1135-1151, 1981
- [138] Kohonen T, 'Self-Organizing Maps', Springer, 2001 Berlin
- [139] L. Zadeh, 'Fuzzy sets, Information and Control', vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965
- [140] Takagi T, Sugeno M., 'Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control', IEEE Trans Systems Man Cybernet, 15(1), 116-132, 1985
- [141] Mamdani, E.H. and S. Assilian, 'An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller', International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13, 1975

- [142] Billings, S. A., Jamaluddin, H. B. and Chen, S., '*A Comparison of the Backpropagation and Recursive Prediction Error Algorithms for Training Neural Networks*', Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 233 – 255, 1990
- [143] J. Botzheim, L. T. Kóczy, and A. E. Ruano, '*Extension of the Levenberg- Marquardt algorithm for the extraction of trapezoidal and general piecewise linear fuzzy rules*', In Proceedings of the 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence, pages 815–819, Honolulu, Hawaii , 2002
- [144] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Kóczy, and A. E. Ruano, '*Estimating fuzzy membership functions parameters by the Levenberg-Marquardt algorithm*', In Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2004, pages 1667–1672, Budapest, Hungary, July 2004.
- [145] Box, G. E. P. and Pierce, D. A., '*Distribution of the Autocorrelations in Autoregressive Moving Average Time Series Models*', Journal of American Statistical Association, pp. 1509–1526, 1970
- [146] Waldl, I., et al, '*The ANEMOS Wind Power Forecasting Platform*', In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Greece, 2006
- [147] Marti, I., et al, '*Evaluation of Advanced Wind Power Forecasting Models - The Results of the Anemos Project*', In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Athens, Greece, 27/2-2/3 2006
- [148] Guénard, V., Kariniotakis, G., Marti, I., '*ANEMOS Advanced Wind Power Forecasting. Operational Challenges and On-line Performance*', in CD-Rom Proc. of EWEC'07, European Wind Energy Conference 2007, Milan, Italy, 2007
- [149] Tambke, J. T., Bye, J. A., Claveri, L., Bremen, L. v., Lange, B., Wolff, J.-O., '*Wind Speeds and Momentum Fluxes in the Marine Boundary Layer of the North Sea - Predictions and 1 Year Measurements up to 100m Height*', Fifth Annual Meeting of the European Meteorological Society, ISSN 1812-7053, Utrecht, 2005
- [150] Pinson, P., Nielsen, H.Aa., Nielsen, T.S., Madsen, H., Kariniotakis. G., '*Properties of interval and quantile forecasts of wind generation and their evaluation*', In Proc. of the European Wind Energy Conference 2006, Scientific Track, Athens, Greece, 2006
- [151] G. Sideratos, N. Hatziargyriou, '*An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting*', IEEE Transaction on Power System, Vol. 22, Issue 1, pp. 258-265, February 2007.
- [152] G. N. Sideratos and Hatziargyriou, '*An Advanced Radial Base Structure for Wind Power Forecasting*' International journal on Power and Energy Systems, ACTA Press, Vol. 12, November 2008
- [153] N. Sundararajan, P. Saratchandran, and L. Yingwei, '*Radial basis function neural networks with sequential learning: MRAN and its applications*', River Edge, Singapore, World Scientific, NJ, 1999
- [154] B. Todorovi'c and M. Stankovi'c, '*Sequential growing and pruning of radial basis function network*', in Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1954—1959, 2001
- [155] R. Buizza, '*Potential Forecast Skill of Ensemble Prediction and Spread and Skill Distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System*', Monthly Weather Review, vol. 125, no. 1, pp. 99–119, 1997.
- [156] Vassilios Petridis, Athanasios Kehagias, Loukas Petrou, A. G. Bakirtzis, S. Kiartzis, H. Panagiotou, N. Maslaris, '*A Bayesian Multiple Models Combination Method for Time Series Prediction*', Journal of Intelligent and Robotic Systems 31, pp. 69-89, 2001