



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

Μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Δ. Παντέρη

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2007



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

Μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Δ. Παντέρη

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Σ. Παπαθανασίου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2007

.....
Ειρήνη Δ. Παντέρη
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ειρήνη Δ. Παντέρη, 2007

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 μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναγράφεται 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο ως προς την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αιολική ενέργεια θα παίξει το σημαντικότερο ρόλο. Για το λόγο αυτό, και εξαιτίας των προβλημάτων που αυτή δημιουργεί στην ενσωμάτωση της, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου, αναπτύχθηκαν πολλά μοντέλα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Στόχος της εργασίας αυτής είναι να καταγράψει τα υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης και να προσομοιώσει τη συμπεριφορά δύο απλών τέτοιων μοντέλων, σε MATLAB. Πιο συγκεκριμένα η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες πάνω σε θέματα που αφορούν την αγορά αιολικής ενέργειας. Παρουσιάζεται η εξέλιξη της αιολικής παραγωγής, οι μελλοντικοί στόχοι και τα προβλήματα που δημιουργούνται από την όλο και μεγαλύτερη αιολική διείσδυση και άρα η αναγκαιότητα των μεθόδων πρόβλεψης.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στα υπάρχοντα μοντέλα (state-of-the-art), που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι κατανομές των σφαλμάτων πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος. Στη συνέχεια, ορίζεται το πλαίσιο εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης και παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης των υπαρχουσών μεθόδων.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Ο τρόπος με τον οποίο αυτοί επηρεάζουν την ακρίβεια της πρόβλεψης γίνεται κατανοητός με αποτελέσματα από συγκεκριμένα αιολικά πάρκα, όπως αυτά προέκυψαν από το ANEMOS- Project και εργασίες άλλων ερευνητών.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές αρχές λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων, μέσω των οποίων υλοποιήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής. Αυτό στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε τρία αιολικά πάρκα. Υπολογίζονται τα σφάλματά του συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του μοντέλου Persistence.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται ένα απλό στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης, το γνωστό από τη βιβλιογραφία, Wind Power Prediction Tool – WPPT (στην πρώτη εκδοχή του). Το μοντέλο αυτό υλοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε ένα μόνο αιολικό πάρκο.

Στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα γενικά συμπεράσματα από την εργασία αυτή και κρίνεται η επίδοση των δύο μοντέλων που υλοποιήθηκαν συγκριτικά και με αυτή του Persistence.

Λέξεις κλειδιά

Αιολικό πάρκο, μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης, νευρωνικό δίκτυο συνάρτησης ακτινικής βάσης, αναδρομικό (αυτοπροσδιοριζόμενο) στατιστικό μοντέλο με εξωτερικά δεδομένα εισόδου, ορίζοντας πρόβλεψης, WPPT

Abstract

The main contributor to reach the European and global goals for energy production from renewable energy sources will be wind energy. However, the intermittent character of the wind causes problems in the wind power integration. Due to this volatility a lot of wind power prediction tools have been developed worldwide. The aim of this thesis is to describe the state-of-the-art wind power prediction systems and investigate the performance of two simple models; an autoregressive one with exogenous input and a neural-network based one. The structure of the thesis is given in details below:

Chapter 1 provides with some general information and a historical overview of wind energy production. Issues such as its progress during the last decades, the future goals set and the problems caused by its integration, are discussed and the necessity of wind power prediction systems as pointed out.

Chapter 2 gives an overview of the state-of-the-art models in wind power prediction.

In **chapter 3** the wind speed prediction error distribution and the wind power prediction error distribution are discussed. In addition, a definition of the prediction error is given as well as the framework for evaluating the power prediction tools, proposed provided by the ANEMOS-Project.

Chapter 4 presents the factors affecting the wind power prediction accuracy. A measure-oriented and a distribution-oriented approach are considered.

In **chapter 5** a model based in neural network theory is used to predict the wind power in three wind parks. It uses as inputs past values of the wind power and the time of the day for which the prediction has to be made. Such inputs train a Radial Basis function network. The errors of the model are investigated over a forecasting horizon of 1-12 hours and statistical distributions of the error are calculated.

In **chapter 6** an autoregressive model with exogenous input is applied for predicting the wind power in a wind park. Errors and their distributions for various forecasting horizons are presented.

Chapter 7 summarizes the work done and compares the two models' performance.

Key Words

Wind farm, state-of-the-art wind power prediction tools, forecasting horizon, evaluation protocol, prediction error distribution, neural network, Radial Basis function network, ARX- model, WPPT

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το λέκτορα και υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Σ. Παπαθανασίου, ο οποίος με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση, τη συνεχή και ακούραστη συμπαράσταση, παρακολούθηση και ουσιαστική καθοδήγηση του, με στήριξε και με βοήθησε στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γ. Σιδεράτο, για τη συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Ειρήνη Δ. Παντέρη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1. Αιολική Ενέργεια: Παρελθόν – Παρόν – Μέλλον.....	13
1.1.1. Παρελθόν	13
1.1.2. Παρόν	14
1.1.3. Μέλλον.....	16
1.2. Πρόβλεψη αιολικής παραγωγής	18
1.2.1. Γενικά.....	18
1.2.2. ANEMOS- Project.....	19
1.3. Στόχος της διπλωματικής.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	24
2.1. Περί συστημάτων πρόβλεψης.....	24
2.1.1. Γενικά.....	24
2.1.2. Κατηγορίες συστημάτων πρόβλεψης.....	25
2.2. Σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης αιολικής ισχύος	27
2.2.1. Φυσικά συστήματα	27
2.2.1.1. Persistence.....	27
2.2.1.2. Prediktor.....	27
2.2.1.3. Ewind	29
2.2.1.4. Previento	31
2.2.1.5. HIRPOM.....	33
2.2.2. Στατιστικά συστήματα	34
2.2.2.1. Wind Power Prediction Tool – WPPT.....	34
2.2.2.2. Sipreolico	35
2.2.2.3. Advanced Wind Power Prediction Tool – AWPPT.....	36
2.2.2.4. Armines Wind Power Prediction System – AWPPS	40
2.2.2.5. LocalPred και RegioPred	42
2.2.2.6. Zephyr	44
2.2.2.7. Το μοντέλο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.....	45
2.3. Συμπεράσματα	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ..	53
3.1. Γενικά.....	53
3.1.1. Ορισμός σφάλματος πρόβλεψης	54
3.2. Ορισμός πλαισίου εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης	55
3.2.1. Εκτίμηση σφάλματος βασισμένη στα μέτρα του	55
3.2.2. Εκτίμηση σφάλματος βασισμένη στην κατανομή του	58
3.2.3. Σύγκριση της ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης.....	59
3.3. Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης	60
3.3.1. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου	60
3.3.1.1. Μορφή της κατανομής	60
3.3.1.2. Στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου	61
3.3.2. Κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος	63
3.3.3. Συμπεράσματα για τη μορφή των κατανομών	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ.....	68
4.1. ANEMOS – Project	68
4.1.1. Επιλεγμένα αιολικά πάρκα.....	69
4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν το σφάλμα πρόβλεψης αιολικής ισχύος	70
4.2.1. Ορίζοντας πρόβλεψης	71
4.2.1.1. Επίδραση στα μέτρα του σφάλματος	71
4.2.1.2. Επίδραση στην κατανομή του σφάλματος.....	73
4.2.2. Πολυπλοκότητα του εδάφους	76
4.2.3. Μετεωρολογικές προβλέψεις	78
4.2.4. Μοντέλο μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ	80
4.2.5. Έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και αριθμός των Α/Π	87
4.2.6. Άλλοι παράγοντες	90
4.3. Συμπεράσματα	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΝΕΥΡΩΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	97
5.1. Θεωρία νευρωνικών δικτύων	97
5.2. Δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης -Radial Basis function networks (Rbf)	98

5.3. Νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής	100
5.3.1. Περιγραφή του μοντέλου	100
5.3.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης	102
5.4. Συμπεράσματα	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ	
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	121
6.1. Γενικά	121
6.2. Αυτοπροσδιοριζόμενα μοντέλα με εξωτερικά δεδομένα εισόδου (ARX-Models)	
.....	122
6.3. Υλοποίηση μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος	122
6.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης	124
6.5. Συμπεράσματα	136
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	150
A. Νευρωνικό δίκτυο	150
Π.1.Κατανομή των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης	
.....	150
Π.1.1. Αιολικό πάρκο 1	150
Π.1.2. Αιολικό πάρκο 2.....	154
Π.1.3. Αιολικό πάρκο 3.....	158
Π.2. Κατανομή των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης	
.....	162
Π.2.1. Αιολικό πάρκο 1	162
Π.2.2. Αιολικό πάρκο 2.....	167
Π.2.3. Αιολικό πάρκο 3.....	171
B. Στατιστικό μοντέλο	175
Π.1.Κατανομή των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης	
.....	175
Π.1.1. Αιολικό πάρκο 1	175
Π.2. Κατανομή των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης	
.....	179
Π.2.1 Αιολικό πάρκο 1	179

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1. Αιολική ενέργεια: Παρελθόν - Παρόν – Μέλλον

1.1.1. Παρελθόν

“The end of the oil age”

“Το τέλος της εποχής του πετρελαίου” ήταν ο τίτλος του εξώφυλλου του περιοδικού Economist τον Οκτώβριο του 2003. Η άποψη αυτή μπορεί τότε να ήταν ουτοπική, σήμερα όμως αποτελεί κοινό τόπο και είναι χαρακτηριστική της τάσης που επικρατεί στην αγορά ενέργειας και υπαγορεύει την όλο και μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

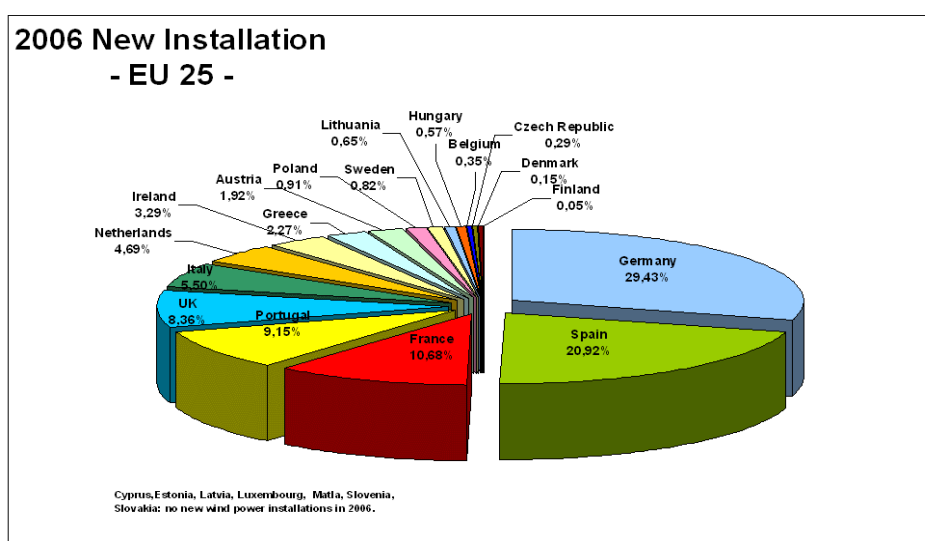
Η αιολική ενέργεια αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και είναι μια σχετικά νέα μορφή ενέργειας. Θεωρείται ως η πιο γρήγορα αναπτυσσόμενη τεχνολογία στο πεδίο των εναλλακτικών μορφών ενέργειας και σε σύγκριση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως π.χ. τα φωτοβολταϊκά, είναι σχετικά φθηνή.

Εξαιτίας των ευνοϊκών ρυθμιστικών πλαισίων, η αιολική ενέργεια γνώρισε μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς το 1992 ήταν 2,5 GW και αυξήθηκε σε 40 GW στο τέλος του 2003. Στην Ευρώπη αντίστοιχα, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν 844 MW το 1992 και 28,44 GW το 2003, αριθμοί που αντιστοιχούν στο 36% και 72% της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Από αυτό φαίνεται ότι η Ευρώπη, έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ανάπτυξη και προώθηση της καθαρής αυτής μορφής ενέργειας. Με κίνητρο το πρωτόκολλο του Κιότο, η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε ως στόχο το διπλασιασμό της κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές από 6% της συνολικά καταναλισκόμενης το 1997 σε 12% μέχρι το 2010. Για να επιτευχθεί αυτό η

εγκατεστημένη αιολική ισχύς στα κράτη –μέλη πρέπει να φτάσει τα 45GW. Η EWEA (European Wind Energy Association) υιοθέτησε ως στόχο τα 45 GW για το 2010, τα οποία όμως αναθεώρησε το 2005 σε 80 GW.

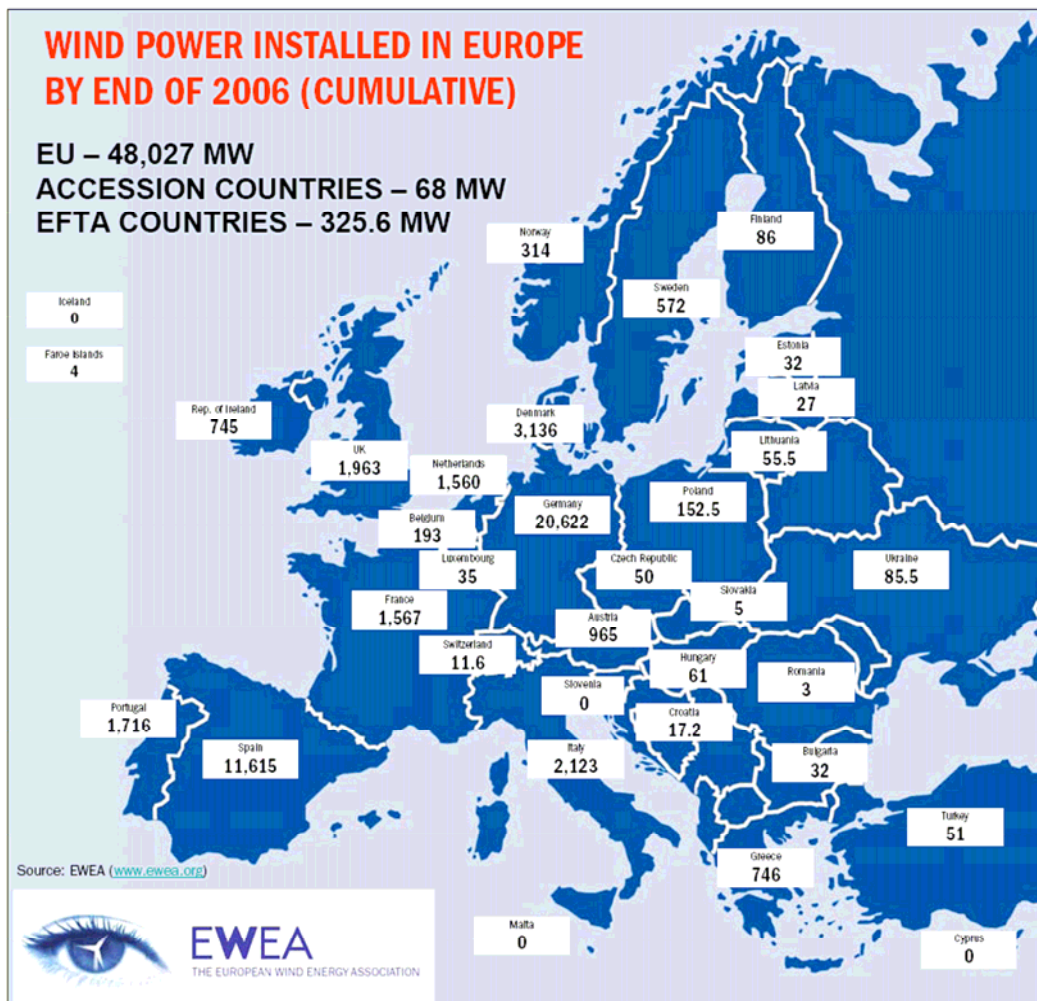
1.1.2. Παρόν

Το 2006 αποτελεί έτος ρεκόρ στην ανάπτυξη και προώθηση της αιολικής ενέργειας τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με στοιχεία της EWEA το 2006 εγκαταστάθηκαν 15 GW αιολικής ισχύος παγκοσμίως, από τα οποία 7,6 GW σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αύξηση που αντιστοιχεί σε 23% σε σύγκριση με το 2005. Έτσι η εγκατεστημένη αιολική ισχύς έφτασε τα 74,2 GW σε παγκόσμιο επίπεδο και τα 48 GW στην Ευρώπη, ποσό που αντιστοιχεί στο 3% της συνολικής κατανάλωσης ισχύος στην Ε.Ε. Αν και η Γερμανία, η Ισπανία και η Δανία εξακολουθούν να κρατούν τα σκήπτρα, αντιπροσωπεύοντας το 50% της συνολικής αύξησης που σημειώθηκε, πολλά κράτη, όπως η Γαλλία, η Πορτογαλία και το Ηνωμένο Βασίλειο έδειξαν μεγάλη ανάπτυξη κατά την περίοδο αυτή. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων στα νέα μέλη της Ε.Ε. τριπλασιάστηκε φθάνοντας τα 183 MW, κυρίως προερχόμενα από την Πολωνία, τη Λιθουανία και την Ουγγαρία. Στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του 2006 εγκαταστάθηκαν 172,5 MW φθάνοντας έτσι τα 746 MW. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η συνεισφορά των μελών της Ε.Ε. στην αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος το 2006.



Σχήμα 1.1. Ποσοστό συνεισφοράς των κρατών στην Ε.Ε. των 25 [1]

Στο σχήμα 1.2. παρουσιάζεται η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά κράτος στην Ευρώπη, καθώς και η αύξηση αυτής από το 2005 στο 2006.



EU CAPACITY (MW)

Countries	Total end 2005	Installed 2006	Total End 2006
Austria	819	145.6	965
Belgium	167.4	26.3	193
Bulgaria*	10	22	32
Cyprus	0	0	0
Czech Republic	28	22	50
Denmark	3,128	11.5	3,136
Estonia	32	0	32
Finland	82	4	86
France	757	810	1,567
Germany	18,414.9	2,233.1	20,622
Greece	573.3	172.5	746
Hungary	17.5	43.40	61
Ireland	495.5	249.9	745
Italy	1,718	417	2,123
Latvia	27	0	27
Lithuania	6.4	49.05	55.5
Luxembourg	35.3	0	35
Malta	0	0	0
Netherlands	1,219	356	1,560
Poland	83	69.3	152.5
Portugal	1,028	694.4	1,716
Romania*	1.69	1.3	3
Slovakia	5	0	5
Slovenia	0	0	0
Spain	10,028	1587.16	11,615
Sweden	509.5	62.15	572
UK	1,332	634.4	1,963
EU-15	40,301	7,404	47,644
EU-10	199.2	183.7	383
EU-25	40,500	7,587.9	48,027
EU-27	40,511	7,611	48,062

Accession countries (MW)

	End 2005	Installed 2006	End 2006
Croatia	6	11.2	17.2
Turkey	20	30.85	51
Total	26	42.05	68.2

EFTA countries (MW)

	End 2005	Installed 2006	End 2006
Iceland	0	0	0
Liechtenstein	0	0	0
Norway	267	47	314
Switzerland	11.6	0	11.6
Total	278.6	47	325.6

Other countries (MW)

	End 2005	Installed 2006	End 2006
Faroe Islands	4	0	4
Ukraine	77.3	8.3	85.6
Total	81.3	8.3	90.6

	End 2005	Installed 2006	End 2006
TOTAL EUROPE	40,898	7,708.4	48,545

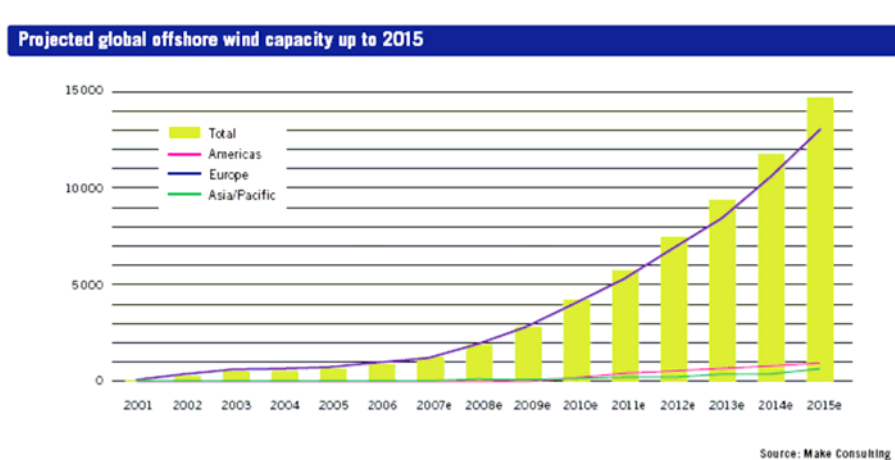
Note: Due to previous-year adjustments, project decommissioning of 61 MW and repowering, and rounding, the 2006 end-of-year cumulative capacity total does not exactly match the year-end 2005 total plus the 2006 additions.

* Bulgaria and Romania are members of the European Union from 01/01/2007

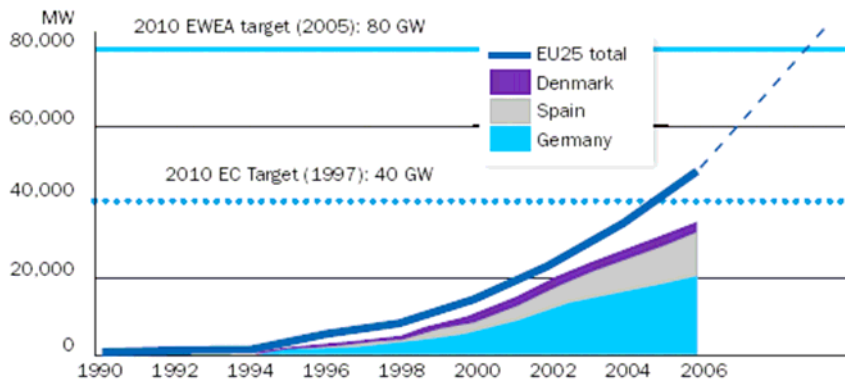
Σχήμα 1.2. Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη στο τέλος του 2006 [1]

1.1.3. Μέλλον

Το Μάρτιο του 2007, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο δεσμεύτηκε το 2012 να καλύπτει το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ε.Ε. από ανανεώσιμες πηγές. Σημειώνεται, ότι το αντίστοιχο ποσοστό σήμερα είναι μόλις 6,5%. Στην επίτευξη του στόχου αυτού καθοριστικό ρόλο θα παίζει η αιολική παραγωγή. Σύμφωνα με εκτιμήσεις η συνεισφορά της αιολικής παραγωγής θα είναι της τάξης του 13%-16%. Για το λόγο αυτό, υιοθετήθηκε από τα 27 κράτη μέλη της Ε.Ε. μια «κοινή ευρωπαϊκή εσωτερική αγορά ενέργειας» για να προωθηθεί ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, μέσω της αποδέσμευσης των διαδικασιών μεταφοράς και παραγωγής και της καθιέρωσης των στόχων εκείνων που αντιστοιχούν στο ενεργειακό δυναμικό του κάθε κράτους-μέλους. Παράλληλα στόχος είναι να προωθηθεί η ανάπτυξη αιολικής ενέργειας στη θάλασσα (offshore). Οι υψηλότεροι και πιο τακτικοί άνεμοι, οι μικρότερης κλίμακας δυσκολίες στην αποδοχή των ανεμογεννητριών από τον τοπικό πληθυσμό, είναι τα βασικά πλεονεκτήματα για την παραγωγή ηλεκτρισμού σε θαλάσσιες ή παράκτιες περιοχές. Σημαντικές έρευνες είναι σε αυτόν τον τομέα σε εξέλιξη, με κυρίαρχη αυτή του Kriegers Flak, που πραγματοποιείται στα χωρικά ύδατα της Γερμανίας, της Σουηδίας και της Δανίας, μια από τις πιο ανεμώδεις περιοχές της Βαλτικής, με συνολική ικανότητα 1600MW. Η πρώτη εγκατάσταση θα γίνει στο γερμανικό χώρο το 2009. Η προγραμματισμένη εγκατάσταση offshore αιολικής ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2015 φαίνεται στο σχήμα 1.3. Στο σχήμα 1.4. φαίνεται η ανάπτυξη της αιολικής ισχύος από το 1990 μέχρι το 2006 καθώς και μια πιθανή εξέλιξη αυτής τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 1.3. Παγκόσμια offshore προγραμματιζόμενη αιολική παραγωγή [2]



Σχήμα 1.4. Ανάπτυξη της αγοράς αιολικής ισχύος [1]

Είτε θαλάσσια είτε ηπειρωτική μια τόσο μεγάλης κλίμακας διείσδυση της αιολικής παραγωγής, αναμένεται να δημιουργήσει δυσκολίες στη διαχείριση του δικτύου, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου από τη φύση του. Η αιολική παραγωγή συχνά χαρακτηρίζεται ως αβέβαιη από τους διαχειριστές του συστήματος: Μεγάλο επίπεδο εφεδρείας προορίζεται για να αντισταθμίσει τον ασυνεχή χαρακτήρα της αιολικής παραγωγής, μειώνοντας έτσι τα οφέλη από τη χρήση της. Τυπικά, ένα αιολικό πάρκο έχει συντελεστή χρησιμοποίησης – λόγος της πραγματικής παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που το πάρκο θα μπορούσε να παράγει αν λειτουργούσε συνεχώς στην ονομαστική του ισχύ κατά τη δεδομένη χρονική περίοδο- μεταξύ 25% και 40%. Μια πρώτη λύση για την άμβλυνση αυτής της ασυνεχούς συμπεριφοράς του ανέμου είναι ο συνδυασμός της παραγωγής πολλών αιολικών πάρκων. Διασπείροντας τους πόρους σε μία ευρεία περιοχή με διαφορετικές ροές ανέμου, η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Μια άλλη λύση θα ήταν η χρήση συσκευών αποθήκευσης, οδηγώντας κυρίως σε κόστη επένδυσης που δεν είναι βιώσιμα τουλάχιστον αυτή τη στιγμή. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό, ότι η χρήση εφεδρείας είναι αυτή τη στιγμή ίσως η μόνη λύση για την βελτίωση της συμπεριφοράς της αιολικής παραγωγής. Ωστόσο η εφεδρεία αυτή συνήθως προέρχεται από συμβατικές πηγές προσθέτοντας σε κόστος και εκπομπές βλαβερών ουσιών. Για το λόγο αυτό, είναι ζωτικής σημασίας η ιδανική διαστασιολόγηση της απαιτούμενης εφεδρείας, έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα οφέλη από τη χρήση καθαρής ενέργειας. Οι πρώτες μεθοδολογίες αναπτύσσονται σήμερα για να περιορίσουν την χρησιμοποιούμενη εφεδρεία λαμβάνοντας υπ' όψη τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Σε χώρες με μεγάλη αιολική διείσδυση, μπορεί να είναι

απαραίτητο να καθοριστούν ανταλλαγές ισχύος μέσω διασυνδέσεων για την αντιστάθμιση των κυρίων αλλαγών στην αιολική παραγωγή.

Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη λαμβάνει χώρα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες στην από 01.07.2007 απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η αιολική παραγωγή θεωρείται ισάξια με τις άλλες μορφές ενέργειας με αποτέλεσμα οι παραγωγοί της να δέχονται κυρώσεις για πιθανές αστάθειες της. Σε αυτό το γενικό πλαίσιο, η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για τις επόμενες ώρες είναι απαραίτητη, τόσο για τη διαχείριση της ενέργειας όσο και για την εμπορευματοποίηση της. Σήμερα υπάρχει πολύ μεγάλη ζήτηση σε λειτουργικά εργαλεία πρόβλεψης, σχεδιασμένα τόσο για τους τελικούς χρήστες, όσο και για τους ανεξάρτητους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, εμπόρους, διαχειριστές δικτύου και παρόχους.

1.2. Πρόβλεψη αιολικής παραγωγής

1.2.1. Γενικά

Η πρόβλεψη χρησιμοποιήθηκε από την ανθρωπότητα από την αρχή σχεδόν της ύπαρξής της. Σήμερα βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς και κυρίως στην οικονομία, τη βιομηχανία και τη μετεωρολογία, όπου χρησιμεύει ως βάση για τη λήψη αποφάσεων και ανάπτυξη στρατηγικών. Ωστόσο, οι προβλέψεις είναι χρήσιμες εφόσον είναι προσανατολισμένες προς τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Μέθοδοι πρόβλεψης πρέπει να αναπτύσσονται με συνεργασία χρηστών και αναλυτών, έτσι ώστε να καθορίζεται ο αντικειμενικός στόχος της εφαρμογής τους.

Σε ότι αφορά την εφαρμογή των βραχυχρόνιων προβλέψεων στο επίπεδο της αιολικής παραγωγής, στόχος τους είναι να συνεισφέρουν στην ασφαλή και οικονομική διαχείριση του συστήματος. Ένα ασφαλές σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει την πλήρη κάλυψη της ζήτησης κάθε στιγμή. Για το λόγο αυτό, ο διαχειριστής του δικτύου κάνει μια πρόβλεψη για τον τρόπο κάλυψης του φορτίου από την προηγούμενη μέρα. Σε μια απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, το φορτίο μπορεί να καλυφθεί είτε από συμβατικές είτε από ανανεώσιμες πηγές. Λόγω του ιδιαίτερου χαρακτήρα του ανέμου, για τον προγραμματισμό της χρήσης της αιολικής παραγωγής στην κάλυψη του φορτίου της επόμενης ημέρας, απαιτείται μια εκτίμηση της αιολικής παραγωγής για τις επόμενες 24-72 ώρες. Το κρίσιμο σημείο στις

μεθόδους πρόβλεψης αιολικής παραγωγής είναι ότι πρέπει να σχεδιάζονται για λειτουργική χρήση σε πραγματικό χρόνο. Έτσι έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος μεθόδων πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, που αν και διαφέρουν μεταξύ τους, μπορούν σε γενικές γραμμές να περιγραφούν με τον ίδιο τρόπο.

Χονδρικά η πρόβλεψη περιλαμβάνει δύο στάδια: το μετεωρολογικό, το οποίο έχει ως στόχο την πρόβλεψη του ανέμου στο συγκεκριμένο σημείο για τις επόμενες μέρες ή ώρες και το στάδιο «μετατροπής σε ενέργεια», το οποίο περιλαμβάνει την μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε ενέργεια. Συνήθως, η πρώτη λειτουργία βασίζεται στη βελτίωση των αριθμητικών προβλέψεων καιρού (NWP), οι οποίες παρέχονται για το χώρο γύρω από το αιολικό πάρκο και σε διαφορετικά ύψη. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως στατιστικός υποβιβασμός (statistical downscaling). Το δεύτερο στάδιο, στην πράξη, αντιστοιχεί στη μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος του αιολικού πάρκου, των χαρακτηριστικών του εδάφους, των φαινομένων σκίασης εντός του αιολικού πάρκου και της επίδρασης μετεωρολογικών παραμέτρων (θερμοκρασία περιβάλλοντος, πυκνότητα αέρα κλπ.) στην παραγωγή. Τα υπάρχοντα μοντέλα πρόβλεψης και ο τρόπος λειτουργίας τους περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Καθένα από τα παραπάνω βήματα στη διαδικασία πρόγνωσης εισάγει ένα σφάλμα, το οποίο επηρεάζει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Με μια πρώτη ματιά φαίνεται ότι ο πιο σημαντικός από τους δύο παράγοντες είναι ο μετεωρολογικός γιατί, όπως μπορεί κανείς εύκολα να φανταστεί, όσο καλύτερα εκτιμούμε τον άνεμο τόσο καλύτερα εκτιμούμε και την αιολική παραγωγή. Τα σφάλματα των μετεωρολογικών προβλέψεων είναι ιδιαίτερα μεταβλητά. Αυτά μπορεί στη συνέχεια να μεγεθυνθούν ή να μειωθούν με τη διαδικασία μετατροπής του ανέμου σε ισχύ. Συμπερασματικά καταλήγει κανείς, ότι η αβεβαιότητα που υπάρχει στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής είναι ένα πολύπλοκο θέμα. Για το λόγο αυτό και με στόχο την αξιολόγηση των υπαρχόντων μοντέλων και την ανάπτυξη νέων, που θα είναι πιο ακριβή χρησιμοποιήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το πρόγραμμα ANEMOS (ANEMOS-Project).

1.2.2. ANEMOS-Project

Με γνώμονα τους γενικότερους στόχους που έχει θέσει η Ε.Ε. στα πλαίσια της αύξησης της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής στο σύστημα, καθώς και της ιδιόμορφης συμπεριφοράς του ανέμου, μια τετράχρονη έρευνα ξεκίνησε τον

Οκτώβριο του 2002 με το όνομα ANEMOS (Development of A NEXt generation wind resource forecasting system for the large-scale integration of Onshore and offshore wind farms). Σε αυτή συμμετέχουν 23 ερευνητικά ιδρύματα από 7 χώρες με στόχο την ανάπτυξη εξελιγμένων λύσεων στον τομέα της βραχυχρόνιας πρόβλεψης αιολικής παραγωγής. Η έρευνα αυτή περιλαμβάνει τα εξής στάδια: 1) Τη συλλογή στοιχείων και την εκτίμηση των αναγκών: Στο πρώτο στάδιο της έρευνας προσδιορίστηκαν οι απαιτήσεις που σχετίζονται με την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, όπως αυτές εκφράστηκαν από διαχειριστές και διανομείς δικτύου, ανεξάρτητους παραγωγούς, παρόχους, ρυθμιστικές αρχές κλπ. 2) Την offline εκτίμηση των τεχνικών πρόβλεψης: Στο στάδιο αυτό έγινε μια πρώτη εκτίμηση της επίδοσης των υπάρχουσών μεθόδων πρόβλεψης (εκτίμηση του σφάλματος) και της εξάρτησής της από διάφορους παράγοντες. 3) Την ανάπτυξη στατιστικών και φυσικών μοντέλων: Διάφορα μοντέλα εξετάστηκαν και βελτιώθηκαν. Άλλα μοντέλα συνδυάστηκαν για να δημιουργήσουν νέα, πιο ακριβή και ανθεκτικά, που θα έχουν καλύτερες επιδόσεις από τα μέχρι σήμερα μοντέλα αιχμής. 4) Την ανάπτυξη τεχνικών για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε αιολικά πάρκα στη θάλασσα: Σε αυτό το πλαίσιο δόθηκε προτεραιότητα στην εξέταση των θαλάσσιων μετεωρολογικών προβλέψεων και των μετεωρολογικών συνθηκών offshore (παράγοντες που επηρεάζουν τον θαλάσσιο άνεμο και συνεπώς και την αιολική παραγωγή) 5) Τη δημιουργία μιας ενιαίας πλατφόρμας λογισμικού: Όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν περιέχονται σε αυτή και ανάλογα με την περίπτωση για την οποία γίνεται η πρόβλεψη (έκταση περιοχής ενδιαφέροντος, ποιότητα εδάφους, ορίζοντας πρόβλεψης) συνδυάζονται, δίνοντας το αποτέλεσμα με το μικρότερο σφάλμα πρόβλεψης. 6) Την εγκατάσταση της πλατφόρμας και χρησιμοποίησή της σε πραγματικό χρόνο: Το νέο λογισμικό εγκαταστάθηκε σε 7 χώρες και 8 τελικούς χρήστες μεταξύ των οποίων διαχειριστές συστήματος, πάροχοι και παραγωγοί αιολικής ισχύος. 7) Την εκτίμηση της χρήσης του λογισμικού σε πραγματικό χρόνο: Τα οφέλη από τη χρήση του λογισμικού εκτιμώνται σε οικονομικό επίπεδο (π.χ. εξοικονόμηση καυσίμου), καθώς και στην επιρροή του στην ασφάλεια του συστήματος. Σε δεύτερο στάδιο, θα εκτιμηθεί η επίδραση του μοντέλου στη σταθερότητα του συστήματος, στον καθορισμό των ορίων διείσδυσης και στην πρόληψη της μόλυνσης. Μια αναλυτικότερη περιγραφή του ANEMOS- Project δίνεται στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

Τα αποτελέσματα της μελέτης αναμένεται να διευκολύνουν την αιολική διείσδυση με δύο τρόπους. Καταρχήν σε λειτουργικό επίπεδο, αφού καθίσταται δυνατή η καλύτερη διαχείριση των Α/Π και η πιο αποτελεσματική συμμετοχή της αιολικής παραγωγής στις αγορές ενέργειας. Δευτερευόντως, αναμένεται να συνεισφέρει στην αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Μια ακριβής πρόβλεψη μειώνει το ρίσκο για τους παραγωγούς, οι οποίοι είναι με τη σειρά τους πιο πρόθυμοι να επιχειρήσουν την εγκατάσταση νέων Α/Π σε μια απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.

1.3. Στόχος της διπλωματικής

Στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι στο πρώτο μέρος της, η εκτενής παρουσίαση των state-of-the-art μοντέλων πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και των παραγόντων που επηρεάζουν την ακρίβεια της πρόβλεψης. Στο δεύτερο μέρος διερευνάται η επίδοση δύο απλών μοντέλων (ενός αναδρομικού με εξωτερικά δεδομένα εισόδου και ενός νευρωνικού) που υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν, για να προβλέψουν την αιολική ισχύ σε τρία αιολικά πάρκα για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα. Το σφάλμα πρόβλεψης των μοντέλων εκτιμάται για διαφορετικούς ορίζοντες πρόβλεψης (1-12 ώρες) και παρουσιάζονται οι κατανομές του. Λόγω έλλειψης μετεωρολογικών δεδομένων, ο ορίζοντας πρόβλεψης περιορίστηκε στις 12 ώρες. Η επίδοση των μοντέλων συγκρίνεται με αυτή του Persistence. Πιο συγκεκριμένα η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 1** ο αναγνώστης αποκτά γενικές γνώσεις πάνω σε θέματα που αφορούν την αγορά αιολικής ενέργειας. Παρουσιάζεται η εξέλιξη της αιολικής παραγωγής, οι μελλοντικοί στόχοι και τα προβλήματα που δημιουργούνται από την όλο και μεγαλύτερη αιολική διείσδυση και άρα η αναγκαιότητα των μεθόδων πρόβλεψης.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στα υπάρχοντα μοντέλα αιχμής (state-of-the-art), που χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Τα μοντέλα διαχωρίζονται σε φυσικά και στατιστικά και παρουσιάζονται τα πιο αντιπροσωπευτικά δείγματα καθεμιάς κατηγορίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** αρχικά παρουσιάζονται οι κατανομές των σφαλμάτων πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος σε επίπεδο αιολικού πάρκου. Στη συνέχεια ορίζεται το πλαίσιο εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων

πρόβλεψης και παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης των υπαρχουσών μεθόδων.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Ο τρόπος με τον οποίο αυτοί επηρεάζουν την ακρίβεια της πρόβλεψης, γίνεται κατανοητός με αποτελέσματα από συγκεκριμένα αιολικά πάρκα, όπως αυτά προέκυψαν από το ANEMOS- Project και εργασίες άλλων ερευνητών.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές αρχές λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων. Πάνω σε αυτές υλοποιήθηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής και χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη αυτής σε τρία αιολικά πάρκα. Υπολογίζονται τα σφάλματα του συναρτήσεως του ορίζοντα πρόβλεψης και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του μοντέλου Persistence.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται ένα απλό στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης γνωστό από τη βιβλιογραφία, το WPPT (στην πρώτη εκδοχή του). Το μοντέλο αυτό υλοποιήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής σε ένα μόνο αιολικό πάρκο.

Στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται τα γενικά συμπεράσματα από την εργασία αυτή και συγκρίνεται η επίδοση των δύο μοντέλων που υλοποιήθηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εργαλεία πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής

2.1. Περί συστημάτων πρόβλεψης

2.1.1. Γενικά

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα ένα μεγάλο μέρος της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας και σε μερικές περιοχές ξεπερνάει ακόμα και το φορτίο βάσης του συστήματος (π.χ. στη Β. Γερμανία και Δανία). Αυτό δείχνει ότι ο άνεμος είναι βασικός παράγοντας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και στην ισοστάθμιση παραγωγής και ζήτησης. Όπως αναφέρθηκε, ένα βασικό εμπόδιο στην ενσωμάτωση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο, είναι η μεταβλητότητα της. Αυτή κάνει το σχεδιασμό δύσκολο. Ακριβείς προβλέψεις της παρεχόμενης στο δίκτυο αιολικής ισχύος κάνουν τις επενδύσεις πιο δελεαστικές και μειώνουν τα προβλήματα διαχείρισης του δικτύου, που δημιουργούνται από τις διακυμάνσεις της αιολικής ισχύος.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε ένας μεγάλος αριθμός συστημάτων που προβλέπουν την παραγόμενη αιολική ισχύ. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν αυτά τα συστήματα διαφοροποιούνται ανάλογα και εξαρτώνται από τη **συγκεκριμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη χωρική διασπορά των αιολικών πάρκων**. Έτσι για παράδειγμα στη Γαλλία, χρειάζεται πρόγνωση τόσο για μία μέρα μετά, όσο και για μια εβδομάδα. Η τιμή που προβλέπεται είναι η μέση τιμή της παραγόμενης αιολικής ισχύος σε 30 λεπτά. Στην Αγγλία, οι απαιτήσεις είναι διαφορετικές. Οι παραγωγοί βρίσκουν χρήσιμες τις προβλέψεις δύο ωρών πριν από την ώρα παράδοσης τους. Στη Γερμανία και στη Δανία οι προβλέψεις χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγορά μιας μέρας μετά, η οποία κλείνει το απόγευμα στη Δανία (36 ώρες πριν την ώρα παράδοσης) και στις 3 π.μ. στη Γερμανία (33 ώρες πριν την ώρα

παράδοσης). Όπως λοιπόν γίνεται κατανοητό, οι απαιτήσεις των συστημάτων πρόβλεψης καθορίζονται συνήθως από περιορισμούς της αγοράς και όχι από τεχνικούς ή φυσικούς περιορισμούς. Το βασισμένο στα υδροηλεκτρικά σύστημα της Σκανδιναβίας, δεν απαιτεί πρόβλεψη 36 ωρών μετά, αφού ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ρυθμίζει τη λειτουργία του σε λίγη μόνο ώρα. Παρόλα αυτά η λειτουργία της αγοράς απαιτεί πρόβλεψη 36 ωρών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης είναι πολύ σημαντικός, διότι υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στις λεγόμενες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, κλίμακας ορισμένων ημερών και στις πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, τάξης 0 έως 3 ωρών. Ενώ μακρύτερες περίοδοι περιγράφονται καλύτερα από αριθμητικά συστήματα πρόβλεψης καιρού, τα οποία μοντελοποιούν λεπτομερώς τη δυναμική της ατμόσφαιρας, πιο περιορισμένα διαστήματα κυριαρχούνται από μόνιμες μετεωρολογικές συνθήκες, όπου απλές στατιστικές προσεγγίσεις οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα πρόβλεψης.

Γενικά, τα περισσότερα συστήματα πρόβλεψης παρέχουν πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος από 0 έως 72 ώρες και με ανάλυση μιας ώρας. Η προβλεπόμενη ποσότητα είναι μέση ωριαία τιμή αιολικής παραγωγής.

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

2.1.2. Κατηγορίες συστημάτων πρόβλεψης

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα συστήματα πρόβλεψης βασίζονται σε αποτελέσματα **αριθμητικών συστημάτων πρόβλεψης καιρού** (Numerical Weather Prediction systems- NWP). Τα μοντέλα πρόβλεψης που χρησιμοποιούν NWP δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που χρησιμοποιούν χρονοσειρές, μετά από 3-6 ώρες. Για το λόγο αυτό όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιούν οι πάροχοι (και έχουν κατ' επέκταση εμπορική σημασία) και που θα καταγραφούν εδώ, έχουν ως είσοδο δεδομένα από NWP. Αυτά τα συστήματα προσομοιώνουν την ατμόσφαιρα, ενσωματώνοντας αριθμητικά τις μη γραμμικές εξισώσεις κίνησης, αρχίζοντας από

την τρέχουσα κατάσταση της ατμόσφαιρας. Η ακρίβεια των αριθμητικών προβλέψεων για τον επιθυμητό χρονικό ορίζοντα, είναι πολύ καλύτερη σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλου είδους στατιστική ή κλιματολογική προσέγγιση.

Το διάνυσμα του ανέμου – η ταχύτητα και η κατεύθυνση – είναι η πιο σημαντική μεταβλητή για το σύστημα πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Είναι καθήκον του συστήματος να μετατρέψει την απλή αυτή πληροφορία, που συνήθως είναι δοσμένη σε σχετικά χαμηλή χωρική ανάλυση από το NWP, σε κατάλληλη πρόβλεψη για την παραγόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου. Υπάρχουν βασικά δύο τρόποι, για να μετατραπεί η πρόβλεψη του ανέμου σε πρόβλεψη ισχύος. Από τη μια πλευρά **φυσικά συστήματα** (physical systems) τροποποιούν κατάλληλα τον άνεμο που προέρχεται από το NWP, με μεθόδους που βασίζονται στη φυσική του κατώτερου ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος. Χρησιμοποιώντας παραμετροποιήσεις του προφίλ του ανέμου ή προσομοιώσεις ροής, υπολογίζεται η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της πλήμνης των ανεμογεννητριών. Αυτή η ταχύτητα του ανέμου χρησιμοποιείται στην καμπύλη ισχύος για να εξαχθεί η τελικά παραγόμενη ισχύς. Μια ακριβής περιγραφή των σταδίων δίνεται στα [4,5]. Από την άλλη πλευρά **στατιστικά συστήματα** (statistical systems) με τον ένα ή με τον άλλο τρόπο «μαθαίνουν» τη σχέση μεταξύ πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου και μετρούμενης ισχύος (learn from experience) και γενικά δεν χρησιμοποιούν προκαθορισμένη καμπύλη ισχύος. Συχνά χρησιμοποιούνται μοντέλα μαύρων κουτιών, όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Τα πιο επιτυχημένα στατιστικά συστήματα χρησιμοποιούν μοντέλα γκρι κουτιών, όπου κάποια γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει («εκπαιδεύσει») τα μοντέλα σε ένα συγκεκριμένο τομέα. Σε αντίθεση με τα φυσικά συστήματα, τα στατιστικά χρειάζεται να έχουν χρησιμοποιήσει ένα ευρύ σύνολο δεδομένων πριν καταφέρουν να λειτουργήσουν κατάλληλα. Ωστόσο οι διαφορές μεταξύ φυσικών και στατιστικών συστημάτων φθίνουν, καθώς εξελιγμένα συστήματα περιλαμβάνουν συνδυασμό και των δύο για καλύτερο αποτέλεσμα. Φυσικές μέθοδοι, όπως μοντέλα μέσης κλίμακας χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση χονδροειδών αποτελεσμάτων από NWP, ενώ οι στατιστικές μέθοδοι είναι πιο αποτελεσματικές για τη διόρθωση συστηματικών σφαλμάτων και για την απόκτηση εμπειρικής γνώσης για τις εκάστοτε καμπύλες ισχύος.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα γίνει μια προσπάθεια να καταγραφούν και να περιγραφούν τα σημαντικότερα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος, καθώς και τα

κύρια χαρακτηριστικά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσίαση των μοντέλων πρόβλεψης δεν στοχεύει στο να συμπεριλάβει όλα τα υπάρχοντα μοντέλα. Πολλά νέα βρίσκονται υπό ανάπτυξη σε ερευνητικά ινστιτούτα και εταιρείες σε όλο τον κόσμο.

2.2. Σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης αιολικής ισχύος

2.2.1. Φυσικά συστήματα

2.2.1.1. Persistence

Το πιο απλό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι το μοντέλο Persistence («Επίμονο» μοντέλο). Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν τη στιγμή της πρόβλεψης, θα επικρατούν και το προβλεπόμενο διάστημα. Αυτό περιγράφεται από την εξίσωση 2.1.

$$P(t+1)=P(t) \quad (2.1.)$$

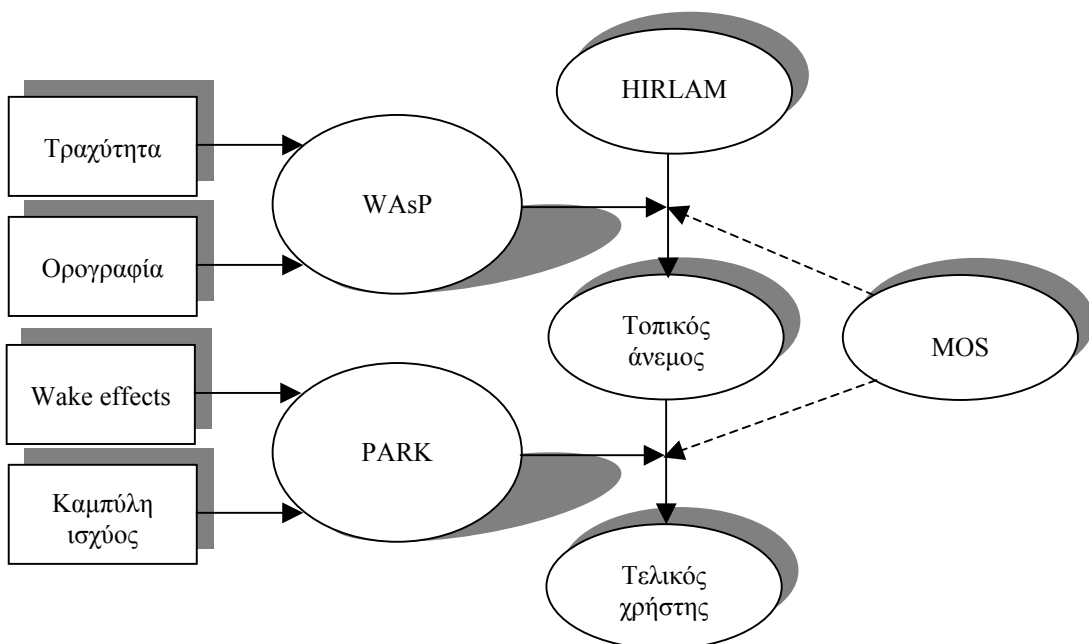
όπου το $P(t)$ είναι η παραγωγή σε χρόνο t και 1 ο χρόνος για τον οποίο θα γίνει η πρόβλεψη.

Παρόλη την εμφανή απλότητα του, το μοντέλο αυτό περιγράφει την ατμοσφαιρική ροή σχετικά καλά εξαιτίας της χαρακτηριστικής χρονικής κλίμακας των καιρικών συστημάτων; ο καιρός το απόγευμα είναι συχνά όμοιος με αυτόν το πρωί. Για σύντομο ορίζοντα πρόβλεψης, μόνο μερικών ωρών, το μοντέλο αυτό είναι δύσκολο να διαψευσθεί. Ωστόσο, επειδή όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο ορίζοντας πρόβλεψης που μας ενδιαφέρει κυμαίνεται από 24 μέχρι 48 ώρες και το μοντέλο παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα για το διάστημα αυτό, χρησιμοποιείται κυρίως ως μέτρο σύγκρισης για τα σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης.

2.2.1.2. Prediktor

Το 1994 ο Landberg σε συνεργασία με το ινστιτούτο Risö, παρουσίασε στη διδακτορική διατριβή του [6] την πρώτη εκδοχή του μοντέλου Prediktor. Το Prediktor

χρησιμοποιεί όσο είναι δυνατόν φυσική λογική, όμοια με αυτή που αναπτύχθηκε για τον ευρωπαϊκό χάρτη ανέμου. Η βασική ιδέα, είναι η προσομοίωση της μεγάλης ροής δεδομένων μέσω αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού (NWP). Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιείται το αριθμητικό μετεωρολογικό μοντέλο HIRLAM. Αυτό παρέχει στοιχεία για το μέτρο και την κατεύθυνση του ανέμου συνήθως σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στη συνέχεια, ο άνεμος μετατρέπεται στο επίπεδο της πλήμνης, χρησιμοποιώντας το γεωστροφικό νόμο της τριβής και το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου. Για τη μετατροπή αυτή, είναι απαραίτητα και άλλα στοιχεία, όπως πχ. η τραχύτητα του εδάφους. Τέτοια στοιχεία παρέχονται από το πρόγραμμα WasP του ινστιτούτου Risø, το οποίο παρέχει πληροφορίες για τη μέση τραχύτητα στο ύψος της πλήμνης. Το WasP λαμβάνει υπόψη του τους τοπικούς παράγοντες (μείωση του ανέμου εξαιτίας εμποδίων, επίδραση της τραχύτητας του εδάφους και τις αλλαγές της, αυξομειώσεις εξαιτίας βουνών και κοιλάδων). Εάν ο άνεμος που παρέχεται από το NWP είναι ήδη αυτός που αντιστοιχεί σε ύψος 10 m, το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα. Το πρόγραμμα Risø PARK χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει τους παράγοντες σκίασης των Α/Γ σε ένα Α/Π. Τελικά δύο MOS (Model Output Statistics) χρησιμοποιούνται για να λάβουν υπόψη τους παράγοντες που πιθανώς δεν έχουν μοντελοποιηθεί από τα φυσικά μοντέλα και τα γενικά σφάλματα της μεθόδου. Ένα διάγραμμα του Prediktor φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2. 1. Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου Prediktor

Το μοντέλο εφαρμόζεται ήδη στην Ισπανία, τη Δανία, την Ιρλανδία, τη Γερμανία και την Αμερική. Επίσης χρησιμοποιείται στο σύστημα SCADA CleverFarm για προγραμματισμό συντήρησης [9]. Τρέχει δυο φορές τη μέρα κάνοντας προβλέψεις 36 ωρών για κάποια Α/Π στην χρησιμοποιούμενη περιοχή. Οι προβλέψεις μπορούν να επεκταθούν για να αντιστοιχούν σε όλη την περιοχή αντί για ένα μόνο Α/Π.

Για να γίνει η αξιολόγηση του μοντέλου, οι προβλέψεις του συγκρίνονται με τις αντίστοιχες του μοντέλου Persistence. Από τη σύγκριση των δύο μοντέλων προκύπτει ότι: α) Το Prediktor δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με το Persistence μετά από 6 ώρες.

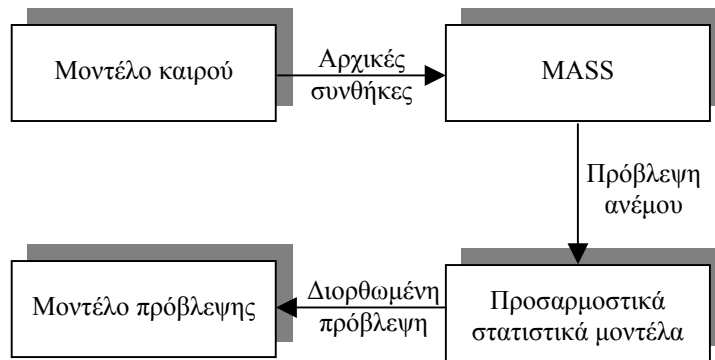
β) Το μέσο απόλυτο σφάλμα του Prediktor είναι περίπου 15% της ονομαστικής ισχύος. Ένα καλά εκτιμημένο Α/Π έχει διασπορά 10% και ένα λιγότερο καλά εκτιμημένο έχει διασπορά μέχρι 20%.

γ) Η απόδοση της πρόβλεψης του Prediktor συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης χειροτερεύει ελαφρά- μέσα σε διάστημα 36 ωρών το σφάλμα αυξάνει λιγότερο από 10%.

2.2.1.3. EWind

Το μοντέλο EWind αναπτύχθηκε από την True Wind Solutions [10], USA, και χρησιμοποιείται τώρα στην εταιρεία Southern California Edison. Το σύστημα EWind χρησιμοποιεί εξελιγμένα, βασισμένα στη φυσική, αριθμητικά ατμοσφαιρικά μοντέλα και προσαρμοστικές στατιστικές τεχνικές, οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν έτσι, ώστε να παράγουν την πιο ακριβή πρόβλεψη ανέμου. Το σύστημα προβλέπει την ταχύτητα και 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 σύστημα της True Wind αντίθετα με τα περισσότερα μοντέλα, έχει δυνατότητα παγκόσμιας πρόβλεψης. Αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία (σχήμα 2.2.) :

- α) ένα σύνολο από υψηλής ανάλυσης, τρισδιάστατα βασισμένα στη φυσική ατμοσφαιρικά αριθμητικά μοντέλα
- β) προσαρμοστικά στατιστικά μοντέλα
- γ) μοντέλα παραγόμενης ισχύος
- δ) ένα σύστημα μεταφοράς πρόβλεψης



Σχήμα 2.2. Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου EWind

Τα ατμοσφαιρικά αριθμητικά μοντέλα είναι βασισμένα σε ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν τις βασικές αρχές της φυσικής: τη διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας και την εξίσωση της κατάστασης του υγρού αέρα. Γενικά τα μοντέλα της True Wind τρέχουν σε υψηλότερη ανάλυση από ότι τα συνηθισμένα μοντέλα και η φυσική και τα ενσωματωμένα στα μοντέλα δεδομένα, είναι ειδικά σχεδιασμένα για υψηλής ανάλυσης προσομοιώσεις της πρόβλεψης του ανέμου. Η αρχική διαμόρφωση του EWind χρησιμοποιεί ένα μέση κλίμακας μοντέλο MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System Model) για να κάνει προβλέψεις (η τρέχουσα έκδοση του είναι ένα μη υδροστατικό μοντέλο, παρόμοιο με το MM5). Ωστόσο χρησιμοποιούνται και άλλα μέσης κλίμακας μοντέλα, όπως τα ForeWind, MM5, WRF, COAMPS, workstation-ETA και OMEGA (το μοντέλο αυτό έχει ένα μοναδικό, αδόμητο δίκτυο με μεταβλητή ανάλυση, η οποία επιτρέπει υψηλότερη ανάλυση σε σημεία ενδιαφέροντος, όπως βουνά και ακτογραμμές καθώς και σε γύρω από κινούμενα καιρικά συστήματα). Οι προβλέψεις των ατμοσφαιρικών μοντέλων τροφοδοτούν τα προσαρμοστικά στατιστικά μοντέλα.

Τα στατιστικά μοντέλα είναι ένα σύνολο εμπειρικών σχέσεων μεταξύ της εξόδου των βασισμένων στη φυσική ατμοσφαιρικών μοντέλων και συγκεκριμένων παραμέτρων, που προβλέπονται σε μια τοποθεσία όπως πχ. η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και η πυκνότητα του αέρα στην θέση των Α/Γ. Ο ρόλος των στατιστικών μοντέλων είναι να εναρμονίσουν την έξοδο των βασισμένων στη φυσική μοντέλων, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν σε κλίμακα υποδικτύου και σε άλλες διαδικασίες που δεν μπορούν αλλιώς να λυθούν ή διαφορετικά να προσομοιωθούν επαρκώς σε δίκτυα που χρησιμοποιούν φυσικά μοντέλα. Τα στατιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο EWind είναι πολυμεταβλητή γραμμική αναδρομή και νευρωνικά δίκτυα. Το

πρώτο είδος στατιστικών μοντέλων επιλέγει αυτόματα τις καλύτερες προγνωστικές μεταβλητές από το ατμοσφαιρικό μοντέλο και υπολογίζει τέτοιες σταθερές απόκλισης, ώστε να μετατρέπονται σε πρόβλεψη με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση και σφάλμα. Επιπλέον της πρόβλεψης ανέμου, οι μεταβλητές εισόδου μπορεί να περιλαμβάνουν θερμοκρασία, μεταβλητότητα, συννεφιά, και άλλες παραμέτρους. Τα νευρωνικά δίκτυα (μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης) καθορίζουν ένα σύνολο από σταθερές, που μετατρέπουν τις μεταβλητές του μοντέλου σε πρόγνωση. Το νευρωνικό δίκτυο του EWind χρησιμοποιεί αλυσίδες Markov [10].

Το τρίτο στοιχείο είναι το μοντέλο παραγόμενης ισχύος της Α/Γ. Αυτό είναι η σχέση των ατμοσφαιρικών μεταβλητών και της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ. Η ισχύς αυτή μπορεί να είναι είτε μια σταθερή σχέση που χρησιμοποιείται σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση Α/Γ, είτε μια εμπειρική στατιστική σχέση που προέρχεται από πρόσφατα (π.χ προ 30 ημερών) ατμοσφαιρικά δεδομένα και δεδομένα παραγόμενης ισχύος της Α/Γ.

Το τελευταίο κομμάτι είναι η μεταφορά της πρόβλεψης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει την πρόβλεψη μέσω email, fax ή web site.

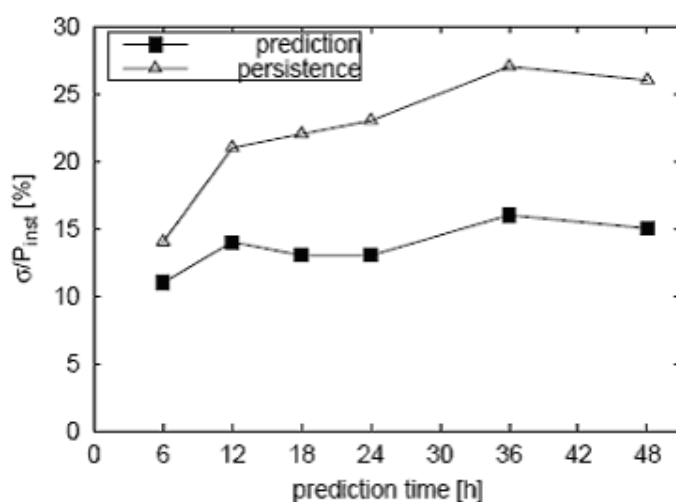
Για τη νότια Καλιφόρνια όπου το σύστημα λειτουργεί, είναι ρυθμισμένο να κάνει δύο προβλέψεις την ημέρα. Κάθε κύκλος αποτελείται από τα παρακάτω τρία τμήματα:

- Εκτέλεση του φυσικού μοντέλου
- Αναπροσαρμογή των εξισώσεων του στατιστικού μοντέλου, με βάση τα αποτελέσματα των προγνώσεων του φυσικού μοντέλου και των μετρούμενων τιμών των προηγούμενων 30 ημερών
- Υπολογισμός εκείνων των στατιστικών εξισώσεων για κάθε ώρα πρόβλεψης, που αντιστοιχούν στον εκάστοτε κύκλο.

2.2.1.4. Previento

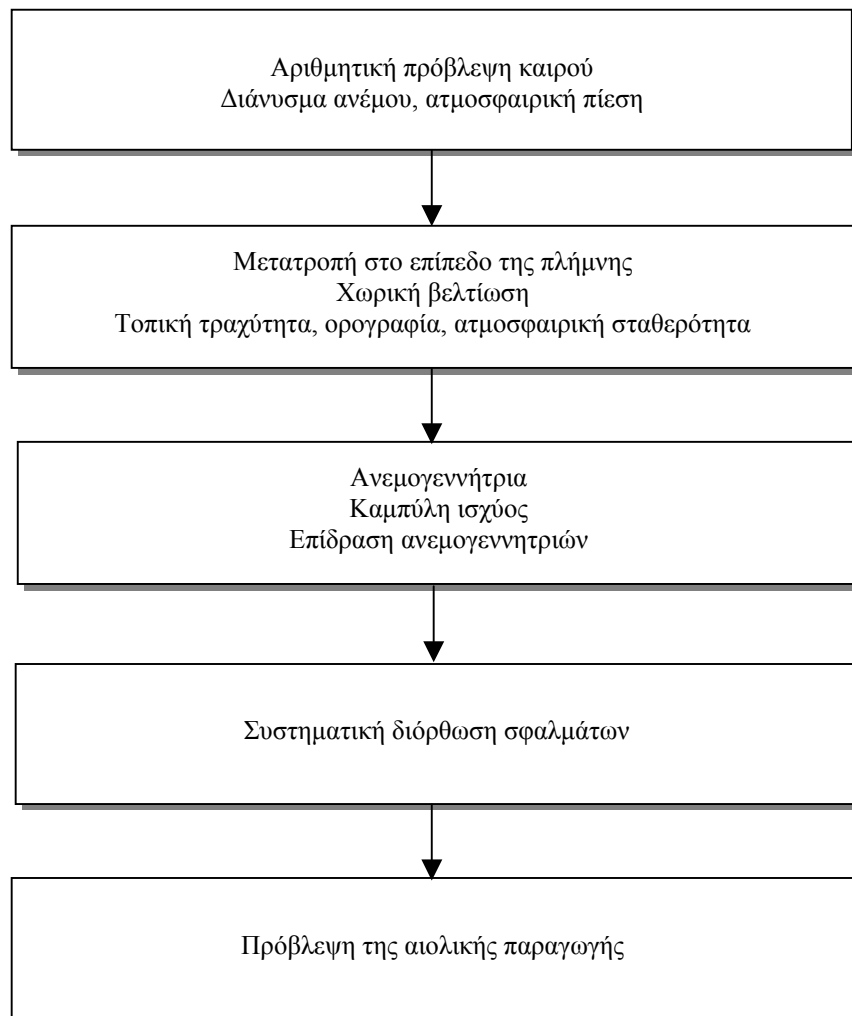
Το Previento είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Oldenburg και χρησιμοποιείται στην Γερμανία. Παρόλα αυτά μπορεί να κάνει προβλέψεις τόσο για μεμονωμένα αιολικά πάρκα όσο και για ευρύτερες περιοχές σε όλο τον κόσμο [11]. Βασίζεται σε φυσική προσέγγιση και παρέχει προβλέψεις για χρονικό ορίζοντα μέχρι και 96 ωρών, με χρονική ανάλυση από 1 ώρα μέχρι 15 λεπτά. Πιο συγκεκριμένα, η λογική του ως προς τη βελτίωση της πρόβλεψης της ταχύτητας

και κατεύθυνσης ανέμου, που προέρχεται από το NWP, είναι παρόμοια με αυτή του Prediktor. Συγκεκριμένα το Previento χρησιμοποιεί δεδομένα από όλες τις διαθέσιμες μετεωρολογικές υπηρεσίες (DWD, ECMWF, UKMet, MeteoFrance και NOAA), αφού γνωρίζει τις ικανότητες του κάθε μοντέλου, και τις χρησιμοποιεί αναλόγως. Με μια διαδικασία συνδυάζονται οι διαφορετικές προβλέψεις καιρού για κάθε κατάσταση. Η γερμανική εκδοχή χρησιμοποιεί δεδομένα από το Lokalmodell του German Weather Service (DWD) αντί για δεδομένα από το Hirlam. Οι τοπικές συνθήκες διαμορφώνονται, θεωρώντας τις επιδράσεις της τραχύτητας της επιφάνειας ανάλογα με την κατεύθυνση, τις ορογραφικές συνθήκες και γενικά την ατμοσφαιρική σταθερότητα. Επίσης λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των Α/Γ. Χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μιας Α/Γ, υπολογίζεται η αναμενόμενη σε μια μεμονωμένη περιοχή παραγωγή αιολικής ισχύος. Ωστόσο επειδή στην πράξη μας ενδιαφέρει η συνολική ισχύς των Α/Π που είναι διασπαρμένα σε μια ευρύτερη περιοχή, το Previento περιλαμβάνει έναν εξελιγμένο αλγόριθμο αναβάθμισης (up-scaling algorithm) [12], ο οποίος βασίζεται σε αντιπροσωπευτικά Α/Π στην επιθυμητή περιοχή για να εξάγει αποτελέσματα για ευρύτερες περιοχές και ακόμα και για ολόκληρη τη χώρα. Εάν είναι διαθέσιμα μετρήσιμα δεδομένα από τα Α/Π εφαρμόζεται μια συστηματική στατιστική διόρθωση του λάθους πρόβλεψης συναρτήσει των καιρικών συνθηκών. Επιπρόσθετα το Previento παρέχει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας (estimate of uncertainty) της συγκεκριμένης προβλεπόμενης τιμής [13]. Το σχήμα 2.3. δείχνει τον αλγόριθμο λειτουργίας του συστήματος. Στο διάγραμμα 2.1. συνοψίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ του μοντέλου Previento και του Persistence για μεμονωμένα αιολικά πάρκα.



Διάγραμμα 2.1. Σύγκριση του μοντέλου Previento και Persistence [12]

Η δεδομένη διασπορά αυξάνεται από 11% για πρόβλεψη 6 ωρών σε 15% για πρόβλεψη 48 ωρών. Η αύξηση του σφάλματος πρόβλεψης με την αύξηση του χρονικού ορίζοντα μπορεί να οφείλεται σε αύξηση του συστηματικού σφάλματος στα NWP's για μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες.



Σχήμα 2.3. Σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου Previento

2.2.1.5. HIRPOM

Μια άλλη προσέγγιση στην πρόβλεψη δόθηκε από το HIRPOM. Σε αυτό το μοντέλο, η μονάδα πρόβλεψης της ισχύος είναι ενσωματωμένη στο ίδιο το αριθμητικό σύστημα πρόβλεψης καιρού (NWP) [14]. Επιστήμονες κατέληξαν σε αυτή τη διαμόρφωση ύστερα από πειράματα που αποδεικνύουν ότι τα NWP's δίνουν μη ακριβή αποτελέσματα των ταχυτήτων του ανέμου στην επιφάνεια και ότι το μεγαλύτερο σφάλμα στα μοντέλα πρόβλεψης οφείλεται σε αυτά. Επισημάνθηκε ακόμα, ότι αύξηση της ανάλυσης βελτιώνει ελάχιστα τα σφάλματα. Κάνοντας την

πρόβλεψη μέσα στο ίδιο το μοντέλο, χρειάζεται μικρότερο χρονικό βήμα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η χρήση συνολικών προβλέψεων δίνει μια εκτίμηση της αβεβαιότητας των προβλέψεων [15].

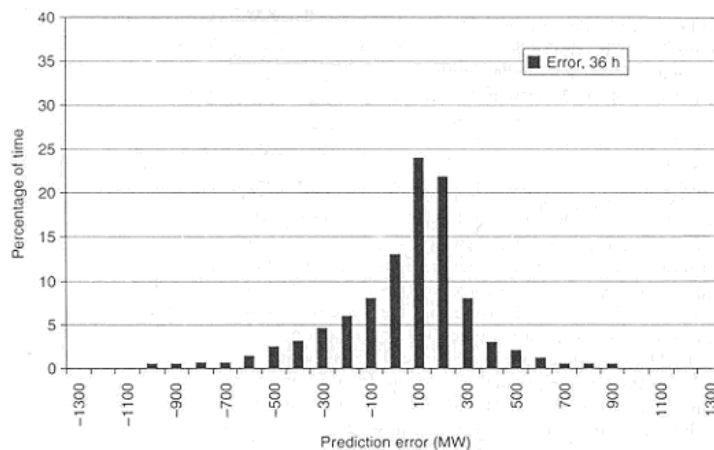
2.2.2. Στατιστικά συστήματα

2.2.2.1. Wind Power Prediction Tool – WPPT

Το WPPT χρησιμοποιεί μια εντελώς διαφορετική φιλοσοφία για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής από αυτή που αναπτύχθηκε μέχρι τώρα.

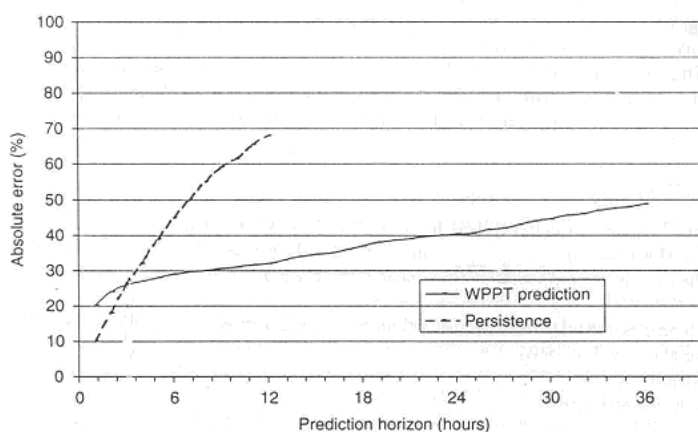
Δημιουργήθηκε από το τεχνικό πανεπιστήμιο της Δανίας (DTU) με συνεργασία των διαχειριστών του δικτύου Eltra και Elsam και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής στη Δανία. Βασίζεται σε στατιστικές μεθόδους και προβλέπει την παραγωγή σε μεγάλες εκτάσεις, συνδυάζοντας μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο (online) από επιλεγμένα αιολικά πάρκα στην περιοχή και αριθμητικές προβλέψεις καιρού, για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Η περιοχή διαιρείται σε υποπεριοχές, εάν αυτό είναι απαραίτητο, και για κάθε υποπεριοχή επιλέγεται ένα αιολικό πάρκο αναφοράς. Οι προβλέψεις γίνονται με δύο τρόπους είτε α) χρησιμοποιώντας τις online μετρήσεις της αιολικής παραγωγής και τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού σαν είσοδο για κάθε αιολικό πάρκο αναφοράς και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο αναβάθμισης για την πρόγνωση της παραγωγής σε όλη την περιοχή, είτε β) χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο που συνδυάζει offline μετρήσεις της αιολικής παραγωγής της περιοχής με τις αριθμητικές προβλέψεις καιρού. Οι προβλέψεις των επιμέρους υποπεριοχών αθροίζονται, για να δώσουν μια πρόβλεψη για ολόκληρη την περιοχή. Η τελική πρόβλεψη για την περιοχή ενδιαφέροντος υπολογίζεται σαν ο σταθμισμένος μέσος των δύο παραπάνω τρόπων πρόβλεψης. Γενικά το WPPT χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους για να καθορίζει την ιδανική ισοστάθμιση μεταξύ online μετρήσεων και μεταβλητών, που είναι αποτέλεσμα μετεωρολογικών προβλέψεων. Έτσι το σύστημα έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται, καθώς μεταβάλλονται τα διαθέσιμα δεδομένα με την πάροδο του χρόνου. Οι μεταβολές μπορεί να οφείλονται σε γήρανση των Α/Γ, μεταβολές στο περιβάλλον και πάνω από όλα σε αλλαγές των NWP, όπως επίσης και σε αλλαγές στον πληθυσμό των Α/Γ σε ένα Α/Π ή μια ευρύτερη περιοχή.

Το διάγραμμα 2.2. δείχνει την κατανομή του σφάλματος για πρόβλεψη 36 ωρών κατά το 2001. Η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 1900MW. Παρατηρείται ότι το 37% των σφαλμάτων είναι μεταξύ ± 100 MW. Σφάλματα μεγαλύτερα από 500MW συμβαίνουν μόνο 7% του χρόνου.



Διάγραμμα 2.2. Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης του WPPT [16]

Το διάγραμμα 2.3. δείχνει την επίδοση του μοντέλου WPPT συγκριτικά με αυτή του Persistence. Φαίνεται ότι το σφάλμα πρόβλεψης, εξαρτάται από τον ορίζοντα πρόβλεψης και αυξάνεται καθώς αυξάνεται αυτός. Το WPPT δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το Persistence για ορίζοντα πρόβλεψης μεγαλύτερο των τριών ωρών.



Διάγραμμα 2.3. Σύγκριση σφαλμάτων Persistence και WPPT [16]

2.2.2.2. SIPREOLICO

Το SIPREOLICO είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης βασισμένο σε στατιστικές μεθόδους, που αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Carlos III, (Μαδρίτη, Ισπανία) και τον

διαχειριστή δικτύου της Ισπανίας, REE [17]. Είναι ένα πρότυπο, που παρέχει ωριαίες προβλέψεις με ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι και 36 ώρες. Αυτές προκύπτουν χρησιμοποιώντας μετεωρολογικές προβλέψεις και online μετρήσεις ισχύος, σαν δεδομένα εισόδου σε αλγορίθμους ανάλυσης χρονοσειρών. Το SIPREOLICO κάνει πρώτα πρόβλεψη για μεμονωμένα Α/Π. Αφού γίνει αυτό για κάθε αιολικό πάρκο, τα αποτελέσματα αθροίζονται σε ζώνες. Τελικά γίνεται πρόβλεψη της παραγωγής ολόκληρης της Ισπανίας. Για ένα δεδομένο Α/Π, το SIREOLICO χρησιμοποιεί τέσσερις τύπους δεδομένων: α) τα χαρακτηριστικά του Α/Π β) τα ιστορικά στοιχεία του εισερχομένου ανέμου και της παραγόμενης ισχύος, για να καταλήξει σε μια πραγματική καμπύλη ισχύος γ) τις online μετρήσεις παραγόμενης ισχύος και δ) τις μετεωρολογικές προβλέψεις από το HIRLAM. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το SIREOLICO για να κάνει προβλέψεις εξαρτώνται από τον τύπο των διαθέσιμων δεδομένων εισόδου. Τα δεδομένα εισόδου μπορεί να είναι βασικά, επιπρόσθετα ή ολοκληρωμένα. Βασικά δεδομένα, είναι αυτά που είναι διαθέσιμα για κάθε Α/Π και αποτελούνται από μια δεδομένη καμπύλη ισχύος και τις μετεωρολογικές προβλέψεις. Επιπρόσθετα δεδομένα, είναι τα βασικά δεδομένα μαζί με την πραγματική καμπύλη ισχύος. Ολοκληρωμένα δεδομένα, είναι τα βασικά δεδομένα μαζί με τις online μετρήσεις της παραγόμενης ενέργειας.

Εάν είναι διαθέσιμα μόνο βασικά δεδομένα, η πρόβλεψη βασίζεται σε πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου και στην δεδομένη καμπύλη ισχύος, η οποία ενσωματώνει τις μεμονωμένες καμπύλες ισχύος των υπάρχουσών Α/Γ. Στην περίπτωση των επιπρόσθετων δεδομένων υπάρχουν ιστορικά δεδομένα του εισερχομένου ανέμου και της παραγόμενης ισχύος του Α/Π. Επειδή από αυτά μπορεί να υπολογιστεί μια πραγματική καμπύλη ισχύος οι προβλέψεις είναι πιο ακριβείς. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να ληφθεί υπόψη πρόβλεψη της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου. Εάν είναι διαθέσιμες online μετρήσεις, εκτελείται μια στατιστική ανάλυση χρονοσειρών. Αυτή η μέθοδος είναι η πιο ακριβής και αποτελεί το βασικό κομμάτι του SIREOLICO.

2.2.2.3. Advanced Wind Power Prediction Tool - AWPPT

Το ινστιτούτο ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) σε συνεργασία με την E.ON Netz δημιούργησε ένα σύστημα διαχείρισης αιολικής παραγωγής (Wind Power Management System-WPMS) [18, 19]. Αυτό αποτελείται από τρία στάδια και

παρέχει την τρέχουσα αιολική παραγωγή, καθώς και την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη αυτής από μία μέχρι 72 ώρες. Έτσι στα πλαίσια αυτού του συστήματος, αναπτύχθηκε ένα σύστημα online παρακολούθησης της αιολικής παραγωγής, το οποίο παρέχει την αιολική παραγωγή μέσω ενός αλγορίθμου αναβάθμισης, από αποτελέσματα που προκύπτουν από αιολικά πάρκα αναφορά (1^ο στάδιο) και ένα μοντέλο πρόβλεψης, το Advanced Wind Power Prediction Tool (AWPPT, 2^ο και 3^ο στάδιο). Το AWPPT βασίζεται σε τέσσερις επιτυχείς προσεγγίσεις:

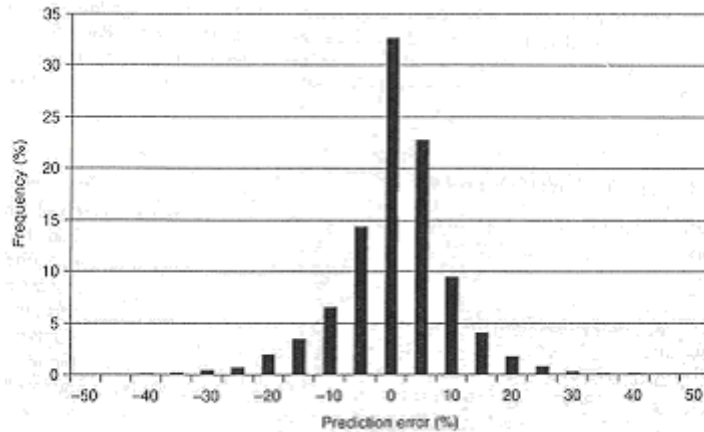
- Ακριβής αριθμητική πρόβλεψη του καιρού από το German Weather Service
- Μετατροπή των προβλεπόμενων δεδομένων ανέμου στην τοποθεσία του Α/Π, χρησιμοποιώντας το μέσης κλίμακας αριθμητικό μοντέλο KLIMM
- Υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος του Α/Π βασισμένη σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα
- Αναβάθμιση της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

Το αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης του AWPPT, που παρέχει τα δεδομένα για τον άνεμο, είναι το Lokal-Modell (LM) του GWS (German Weather Service). Το Lokal-Modell είναι το τελευταίας γενιάς μοντέλο του GWS και είναι ειδικά σχεδιασμένο για να χειρίζεται τα τυπικά μικρής κλίμακας πρότυπα κίνησης (small scale circulation patterns) στα γερμανικά νησιά. Παρέχει αποτελέσματα με χωρική ανάλυση $7 \times 7 \text{ km}^2$ και σε ωριαία βάση. Οι ενημερώσεις του υπολογίζονται δυο φορές τη μέρα και τα στοιχεία που προκύπτουν είναι τα παρακάτω:

- Ταχύτητα ανέμου 30 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους
- Κατεύθυνση του ανέμου
- Πίεση και θερμοκρασία του αέρα σε διάφορα ύψη, τα οποία είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό της κλάσης ατμοσφαιρικής σταθερότητας
- Υγρασία
- Συννεφιά

Αυτά τα δεδομένα συγκρίνονται συνέχεια με τα μετρούμενα δεδομένα για τον άνεμο και με τη βοήθεια μιας στατιστικής διαδικασίας απομακρύνεται το συστηματικό σφάλμα. Η αντιστοιχούσα παραγόμενη ισχύς του Α/Π, υπολογίζεται από τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Αυτά έχουν εκπαιδευθεί με μετρούμενα στοιχεία της ταχύτητας του ανέμου και της αιολικής ισχύος από το παρελθόν, έτσι ώστε να γνωρίζουν την ιδανική σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και ισχύος. Ορισμένα ινστιτούτα έχουν ήδη

εξετάσει αν και πως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν την παραγόμενη ισχύ των Α/Γ. Αντίθετα με κοινούς αλγορίθμους υπολογισμού, τα νευρωνικά δίκτυα μαθαίνουν από την εμπειρία και έχουν την ικανότητα να δίνουν αποτελέσματα ακόμη και με ημιτελή δεδομένα εισόδου. Έτσι το σύστημα του ISET, χρησιμοποιώντας δεδομένα μετρήσεων από τις προηγούμενες ώρες για τις προβλέψεις του, άλλα και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, για να καταλάβει τη σχέση ανάμεσα στα μετεωρολογικά δεδομένα και στην παραγόμενη αιολική ισχύ, έχει την ικανότητα να καθορίζει τη φυσική συνοχή. Ακόμα περισσότερο, η ενσωμάτωση παραπάνω παραμέτρων δεν απαιτεί ακριβές τροποποιήσεις του μοντέλου. Αυτά λοιπόν τα «εκπαιδευμένα» δίκτυα, υπολογίζουν την προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ αντιπροσωπευτικών Α/Π. Η προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύς χρησιμοποιείται τότε σαν είσοδος στον αλγόριθμο μετατροπής του online μοντέλου. Το online μοντέλο απαιτεί μόνο ένα περιορισμένο αριθμό τοποθεσιών με ταχύτητα ανέμου, που έχει ήδη προβλεφθεί, για να προβλέψει την παραγόμενη ισχύ σε μεγαλύτερες εκτάσεις. Αυτό το εργαλείο αντιπροσωπεύει το δεύτερο στάδιο του WPMS και παρέχει την παραγόμενη ισχύ για την περιοχή ελέγχου ή για επιλεγμένες υποπεριοχές. Η ανάλυση είναι ωριαία και το πρόγραμμα πρόβλεψης για 72 ώρες. Το NWP του GWS τρέχει δύο φορές την ημέρα, αρχίζοντας από τα μεσάνυχτα και το απόγευμα και τελειώνοντας στις 8π.μ και 8μ.μ. αντίστοιχα. Η πρόβλεψη της επόμενης μέρας (που είναι συνήθως και αυτή που χρησιμοποιείται για την κατανομή του φορτίου) βασίζεται στα αποτελέσματα από το πρωινό τρέξιμο του NWP και παρέχει προβλέψεις για ολόκληρη την επόμενη μέρα, χωρίς ανανεώσεις. Ο ορίζοντας πρόβλεψης γι' αυτό το λόγο κυμαίνεται μεταξύ 24 και 48 ωρών. Για αυτή την περίοδο πρόβλεψης το μέσο σφάλμα, NRMSE ανάμεσα στην προβλεπόμενη και στην παρατηρούμενη ισχύ είναι περίπου 9,6% της εγκατεστημένης ισχύος. Το διάγραμμα 2.4. δείχνει την κατανομή συχνότητας του σφάλματος πρόβλεψης για την ίδια χρονική περίοδο. Μεγάλα σφάλματα, πάνω από 20% συμβαίνουν μόνο για το 3% του χρόνου. 86% του χρόνου το εύρος του σφάλματος πρόβλεψης κυμαίνεται μεταξύ $\pm 10\%$ της εγκατεστημένης ισχύος. Η πιο συχνή αιτία σφαλμάτων πρόβλεψης μπορεί να αποδοθεί σε σημαντικά απότομες εναλλαγές των καιρικών συνθηκών. Μοντέλα πρόβλεψης που βασίζονται μόνο σε καταγεγραμμένες προβλέψεις ανέμου, δεν μπορούν να διορθώσουν τέτοιες αποκλίσεις.



Διάγραμμα 2.4. Κατανομή συχνότητας σφάλματος πρόβλεψης AWPPT [16]

Έτσι μια άλλη μονάδα, σαν τρίτο στάδιο, χρησιμοποιεί την προβλεπόμενη ισχύ που υπολογίστηκε στο δεύτερο στάδιο σε συνδυασμό με την μετρούμενη ισχύ Α/Π του πρόσφατου παρελθόντος, έτσι ώστε να παρέχει τοπικές ανανεώσεις/ αναβαθμίσεις και προσαρμογές των προβλέψεων, που υπολογίζονται στο δεύτερο στάδιο. Αυτές οι αναβαθμίσεις και προσαρμογές της προβλεπόμενης παραγόμενης ισχύος για τις επόμενες 6 ώρες υπολογίζονται από ANNs και μπορούν να προκύπτουν οποιαδήποτε στιγμή. Ο πίνακας 2.1. δείχνει την ακρίβεια των προβλέψεων αιολικής ισχύος για 3-6 ώρες σε σύγκριση με το μοντέλο Persistence.

Ορίζοντας πρόβλεψης	ISET WPMS 3		PERSISTENCE	
	NRMSE (% P _{nom})	Συσχέτιση	NRMSE (% P _{nom})	Συσχέτιση
3	5,2	0,95	6,5	0,92
4	5,7	0,94	8	0,88
5	6,1	0,93	9,4	0,84
6	6,3	0,93	10,5	0,8

Πίνακας 2.1. Σφάλματα πρόβλεψης και συσχέτιση για το μοντέλο AWPPT

Τα πλεονεκτήματα του AWPPT συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Η αρχιτεκτονική του μοντέλου και ο συνδυασμός της online παρακολούθησης και μοντελοποίησης της πρόβλεψης, το κάνει ικανό να χρησιμοποιείται παντού.
- Παρέχει υψηλή ακρίβεια με ελάχιστο χρόνο υπολογισμού

- Είναι εύκολα εφαρμόσιμο και για τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται και για να υπολογίζει την ανταλλαγή αιολικής ενέργειας μεταξύ των διαχειριστών δικτύου της Γερμανίας. Το επόμενο βήμα είναι να παρέχει ένα διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε πρόβλεψη.

2.2.2.4 Armines Wind Power Prediction System - AWPPS

Στα πλαίσια του προγράμματος CARE αναπτύχθηκαν πιο εξελιγμένα μοντέλα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης για Α/Π εγκατεστημένα στην Κρήτη. Στο πρόγραμμα MORE CARE το ARMINES, ανέπτυξε μοντέλα για την πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος ενός Α/Π για τις επόμενες 48-72 ώρες, βασισμένα σε online SCADA και σε αριθμητικές προβλέψεις καιρού (μετεωρολογικές προβλέψεις).

Το σύστημα που αναπτύχθηκε, μπορεί γενικά να δεχτεί σαν δεδομένα εισόδου διαφορετικούς τύπους μετεωρολογικών προβλέψεων (π.χ. Hirlam, Skiron κ.λ.π.).

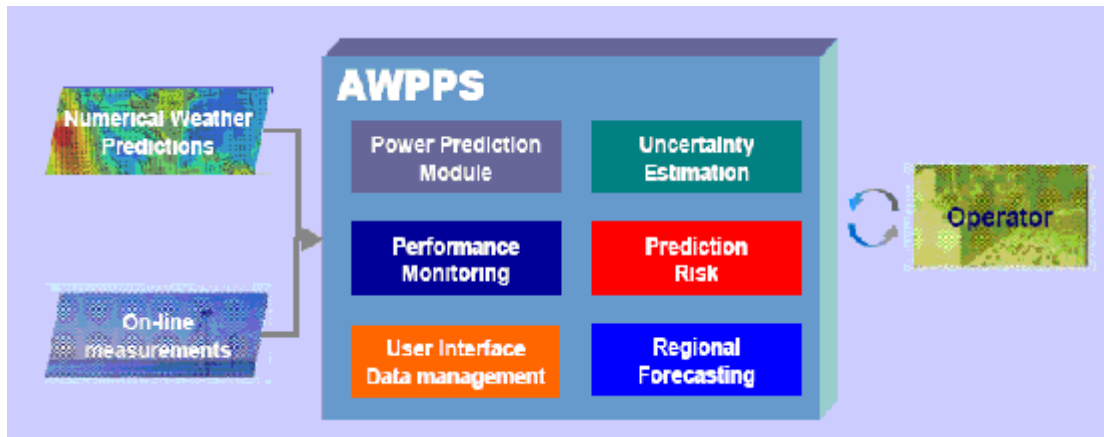
Το AWPPS παρέχει βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας για onshore και offshore Α/Π

- Για τις επόμενες 24-72 ώρες με βήμα μιας ώρας (ανανέωση κάθε 1 ώρα)
- Για τις επόμενες 4-6 ώρες με βήμα 10-15 λεπτών (ανανέωση κάθε 10-15 λεπτά)
- Online εκτίμηση της αβεβαιότητας αυτών των προβλέψεων

Το AWPPS ενσωματώνει:

- Βραχυπρόθεσμα μοντέλα βασισμένα σε στατιστικές χρονοσειρές, προσέγγιση ικανή να προβλέψει αποδοτικά αιολική ισχύ για ορίζοντες μέχρι και 10 ώρες μπροστά.
- Μακροπρόθεσμα μοντέλα βασισμένα σε ασαφή νευρωνικά δίκτυα, ικανά να προβλέψουν την ισχύ ενός αιολικού πάρκου σε ορίζοντα 72 ωρών μπροστά. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν ως δεδομένα εισόδου online SCADA δεδομένα ή αριθμητικές προβλέψεις καιρού.
- Συνδυασμένες προβλέψεις: τέτοιες προβλέψεις προκύπτουν από έξυπνη στάθμιση βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προβλέψεων για μια βέλτιστη απόδοση για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης.

Το λογισμικό του μοντέλου είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.



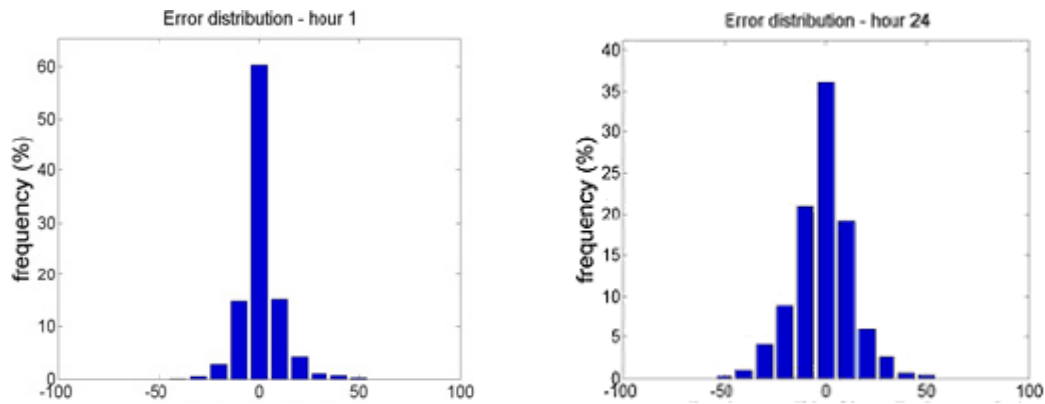
Σχήμα 2.4. Σχηματικό διάγραμμα του AWPPS [20]

Η **μονάδα πρόβλεψης ισχύος (Power Prediction Module)** παρέχει προβλέψεις για την παραγόμενη ισχύ κάθε θεωρούμενου αιολικού πάρκου. Η βασική μονάδα βασίζεται σε σύγχρονα προσαρμοστικά ασαφή νευρωνικά δίκτυα. Αυτή η προσέγγιση παρέχει ισχυρά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με κλασσικά νευρωνικά δίκτυα ή άλλες στατιστικές ή φυσικές τεχνικές. Η μονάδα είναι εφοδιασμένη με online ικανότητες προσαρμογής για ιδανική απόδοση. Το AWPPS είναι το μόνο διαθέσιμο εργαλείο που παρέχει διαστήματα εμπιστοσύνης για τις προβλέψεις ισχύος με ένα προκαθορισμένο επίπεδο εμπιστοσύνης (π.χ 85,90,95% - Διάγραμμα 2.6.). Τα διαστήματα προκύπτουν βασισμένα σε μια εξελιγμένη προσέγγιση κατάλληλη, για το πρόβλημα πρόβλεψης της ισχύος.

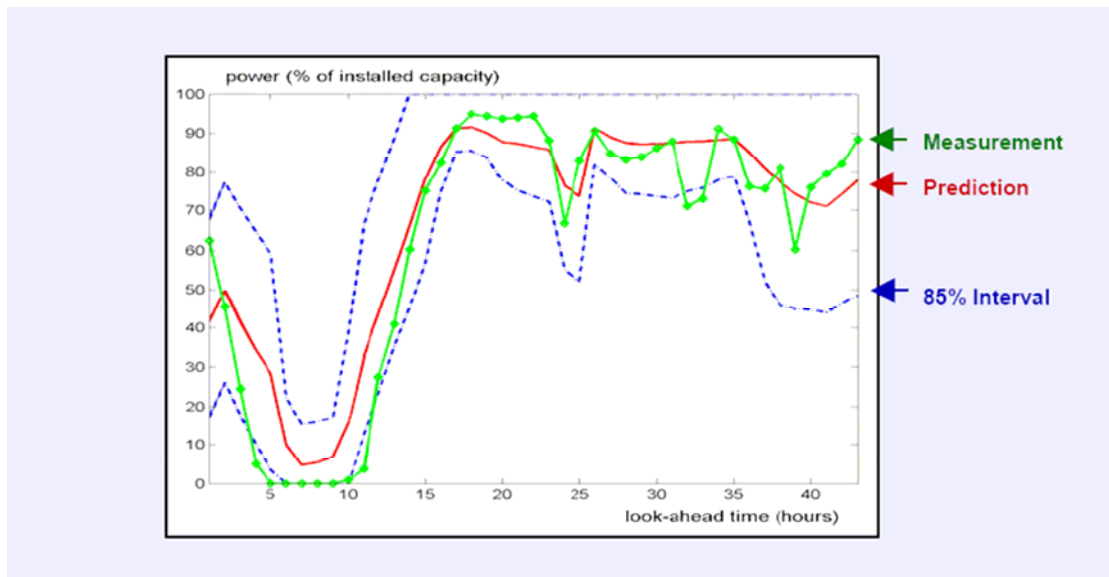
Η **μονάδα πρόβλεψης ρίσκου (Prediction risk)** επιτρέπει την πρόβλεψη της αβεβαιότητας βασισμένη στη σταθερότητα του αναμενόμενου καιρού για τις επόμενες 24 ώρες. Η online χρήση αυτής της μονάδας, επιτρέπει την ανάπτυξη στρατηγικών για την μεγιστοποίηση της αξίας χρήσης των προβλέψεων ισχύος. Το AWPPS περιέχει μονάδες για πρόγνωση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο βασισμένο σε Α/Π αναφοράς.

Το AWPPS υιοθετήθηκε και επικυρώθηκε επιτυχώς για περισσότερα από 35 onshore και offshore αιολικά πάρκα στη Δανία, τη Γερμανία, την Ελλάδα, την Ιρλανδία, την Πορτογαλία, την Ισπανία και τη Μ. Βρετανία και για διαφορετικούς τύπους εδάφους (επίπεδο, μέτριο και πολύπλοκο). Το μέσο σφάλμα για την πρόβλεψη μεμονωμένων αιολικών πάρκων κυμαίνεται μεταξύ 2-5% της εγκατεστημένης ισχύος για προβλέψεις μιας ώρας και μεταξύ 10-15% για πρόβλεψη 48 ωρών. Το μέσο σφάλμα

για εθνική πρόβλεψη είναι 8-10% για 24 ώρες μπροστά. Η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης φαίνεται στο διάγραμμα 2.5.



Διάγραμμα 2.5. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης AWPPS για μια και 24 ώρες [20]



Διάγραμμα 2.6. Διαστήματα εμπιστοσύνης του AWPPS [20]

2.2.2.5 LocalPred και RegioPred

Το LocalPred και το RegioPred είναι δύο εργαλεία πρόβλεψης της αιολικής ισχύος σε περίπλοκα εδάφη, που αναπτύχθηκαν από τον Marti Perez [21]. Το LocalPred είναι ένα μοντέλο πρόβλεψης για Α/Π, που περιλαμβάνει ιδιαίτερα βραχυπρόθεσμες προβλέψεις, βασισμένες στα 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 (NWP). Ακόμα το LocalPred ενσωματώνει υψηλής ανάλυσης φυσικά μοντέλα του εδάφους με το μέσης κλίμακας μοντέλο MM5 ή/ και CFD υπολογισμούς, τα οποία επιτρέπουν τη βελτίωση της επίδοσης των μετεωρολογικών προβλέψεων μέσω μιας λεπτομερούς εξέτασης των χαρακτηριστικών του εδάφους στην περιοχή του Α/Π. Επιπρόσθετα το LocalPred περιλαμβάνει μια μονάδα καμπύλης ισχύος (wind farm power curve module) του Α/Π, έτσι ώστε να γίνονται οι προβλέψεις της παραγόμενης αιολικής ισχύος.

Το LocalPred είναι σχεδιασμένο για να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε NWP (HIRLAM, ECMWF, AVN κ.α.). Είναι σύνθετο, ικανό να κάνει προβλέψεις παραγόμενης ισχύος βασισμένο μόνο σε online μετρήσεις. Εάν δεν υπάρχουν πραγματικά δεδομένα παραγόμενης αιολικής ισχύος, μπορεί να λειτουργήσει μόνο με NWP. Υψηλής ανάλυσης φυσικά μοντελοποιημένες διορθώσεις είναι δυνατές. Όταν είναι διαθέσιμα και NWP και online μετρήσεις, το LocalPred υπολογίζει μια βέλτιστη πρόβλεψη για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης, συνδυάζοντας τις προβλέψεις από τις διαφορετικές μονάδες. Το LocalPred είναι σχεδιασμένο ειδικά για περίπλοκα εδάφη, η μονάδα υποβιβασμού του μπορεί να αναγνωρίσει και να περιορίσει συστηματικά λάθη που εμφανίζονται στις μετεωρολογικές προβλέψεις, εξαιτίας της χαμηλής ανάλυσης του NWP και της πολυπλοκότητας του εδάφους. Οι αλγόριθμοι της μονάδας υποβιβασμού περιλαμβάνουν φυσική παραμετροποίηση, που μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε Α/Π, έτσι ώστε να αυξηθούν οι ικανότητες ανίχνευσης λαθών σε πολύπλοκο έδαφος.

Το RegioPred είναι ένα εργαλείο για την πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος σε εθνικό επίπεδο. Λειτουργεί συνδυαστικά με το LocalPred μέσω μιας μονάδας αναβάθμισης (up-scaling module). Το RegioPred παρέχει ακριβή πρόβλεψη σε χαμηλό κόστος μέσω μιας αποδοτικής επιλογής Α/Π αναφοράς.

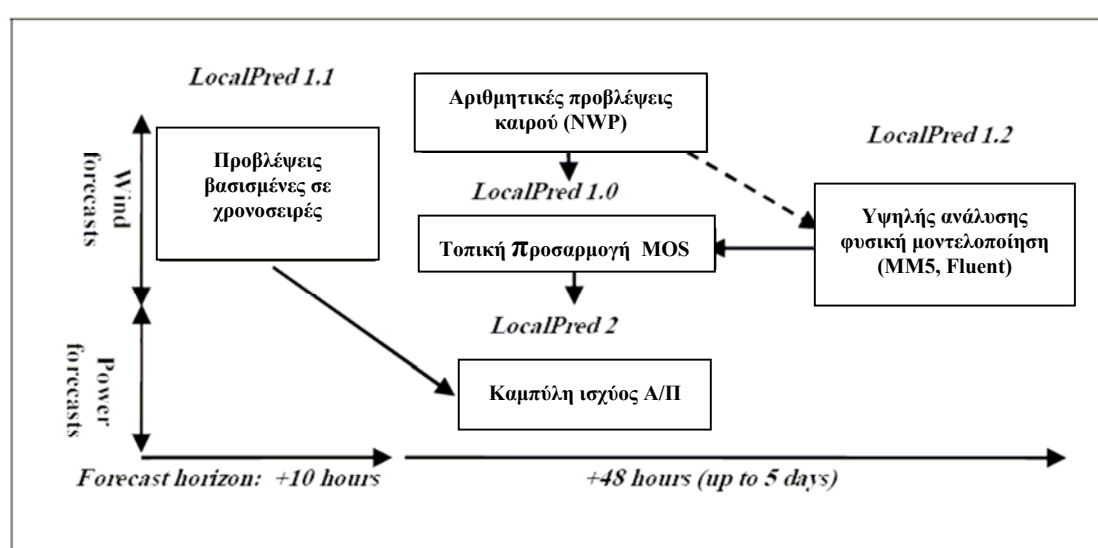
Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω, το LocalPred περιλαμβάνει στατιστική και φυσική διαμόρφωση. Στο σχήμα 2.5. φαίνεται η δομή του LocalPred.

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 online μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος του Α/Π (LocalPred 1.1).

Για μέσου χρόνου προβλέψεις (μεγαλύτερες από 8 ώρες) χρησιμοποιούνται NWP, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές πηγές NWP (HIRLAM, AVN, ECMWF). Για να μειωθούν τα σφάλματα μια MOS διόρθωση υπολογίζεται στατιστικά

(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 χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα παραγωγής ισχύος και NWP.

Η υψηλής ανάλυσης **φυσική μονάδα** (LocalPred 1.2) αποτελείται από το MM5 μοντέλο και τους CFD υπολογισμούς. Ο σκοπός αυτής της μονάδας είναι να εξετάζει τις επιπτώσεις της τοπογραφίας και της τραχύτητας, με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Το LocalPred χρησιμοποιεί σαν είσοδο NWP και μετρούμενα από το Α/Π δεδομένα (ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, παραγωγή ισχύος, θερμοκρασία και πίεση). Σαν μια παραλλαγή το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει online δεδομένα για τη μονάδα χρονοσειρών, όπως επίσης και για τη μονάδα MOS και καμπύλης ισχύος. Λεπτομερής περιγραφή της δομής του LocalPred γίνεται στο [21].



Σχήμα 2.5. Σχηματικό διάγραμμα του LocalPred [21]

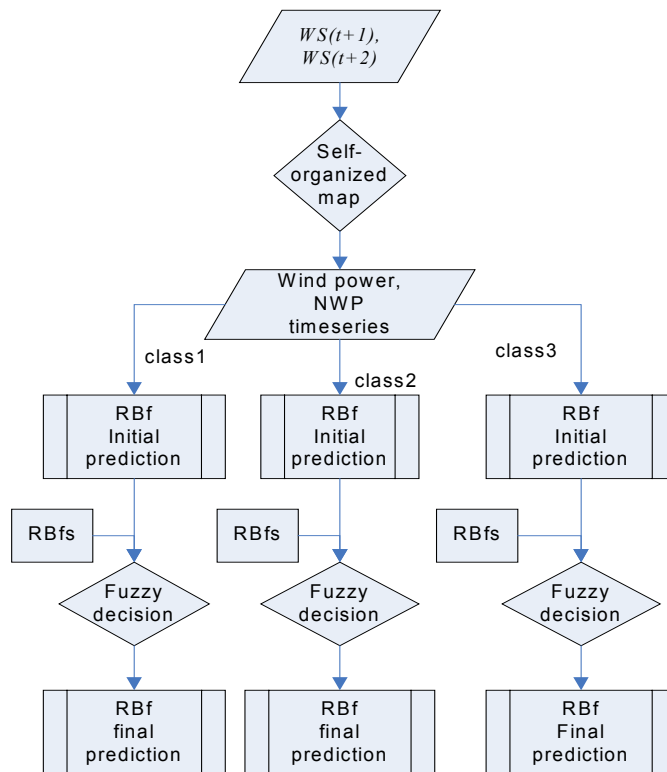
2.2.2.6 Zephyr

Στο τμήμα Μαθηματικής Μοντελοποίησης του τεχνικού πανεπιστημίου της Δανίας, (IMM Department) αναπτύχθηκε ένα νέο πρόγραμμα βραχυπρόθεσμων προβλέψεων της παραγόμενης αιολικής ισχύος, το Zephyr. Το Zephyr [22] συγχωνεύει τα μοντέλα Prediktor και WPPT. Η συγχώνευση αυτή εγγυάται αξιόπιστες προγνώσεις για όλους τους χρονικούς ορίζοντες, βραχυπρόθεσμους (0-9 ώρες) και μακροπρόθεσμους (36-48 ώρες). Το WPPT χρησιμοποιεί προσαρμοστικές στατιστικές μεθόδους για να

μετατρέψει την πρόβλεψη του Hirlam σε πρόβλεψη αιολικής ισχύος, όταν είναι διαθέσιμα μετρούμενα δεδομένα, παρέχοντας έτσι ικανοποιητικά αποτελέσματα για βραχυχρόνιο ορίζοντα. Το Prediktor χρησιμοποιεί το πρόγραμμα WasP, για να παραμετροποιήσει τις τοπικές επιρροές στην ταχύτητα του ανέμου. Τέτοιες μπορεί να είναι για παράδειγμα, η επιτάχυνση πάνω σε ένα λόφο ή ο άνεμος σε διαφορετικές τραχύτητες εδάφους. Το Prediktor υπερέχει όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετρούμενα δεδομένα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σημείο έναρξης για τα στατιστικά μοντέλα ελλείψει αυτών. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνει τις μακροχρόνιες προβλέψεις. Μια έξυπνη ισοστάθμιση των αποτελεσμάτων των δύο κλάδων δίνει το αποτέλεσμα για ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος. Αναλυτική περιγραφή του μοντέλου αυτού μπορεί αν βρει κανείς στα [22, 23].

2.2.2.7. Το μοντέλο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Βασίζεται σε νευρωνικά δίκτυα και τεχνικές ασαφούς λογικής, για να δώσει ακριβή εκτίμηση της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές της αιολικής ισχύος και αριθμητικές προβλέψεις καιρού, έτσι ώστε να μπορούν να εκτιμήσουν την μελλοντική παραγωγή αιολικής ενέργειας. Αυτές οι χρονοσειρές έρχονται σε διαφορετικές συχνότητες, το σύστημα SCADA για παράδειγμα, προμηθεύει κάθε λεπτό με τιμές της αιολικής παραγωγής, ενώ οι μετεωρολογικές υπηρεσίες στέλνουν NWP's μερικές φορές την ημέρα καλύπτοντας έναν ορίζοντα 48 ή 72 ωρών. Τα NWP's είναι αυτά που προμηθεύουν το μοντέλο με τη σημαντικότερη πληροφορία, ιδιαίτερα για μακροπρόθεσμους ορίζοντες πρόβλεψης. Για το λόγο αυτό, μη ακριβή NWP's, ειδικά σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες, κάνουν την πρόβλεψη ιδιαίτερα δύσκολη και επηρεάζουν την ποιότητα της. Η κύρια συνεισφορά αυτού του μοντέλου, είναι ότι χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε συνδυασμό με ένα μοντέλο ασαφούς λογικής για να βελτιστοποιήσει την χρήση των NWP's. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από τρία μοντέλα: το μοντέλο προκαταρκτικής πρόβλεψης αιολικής ισχύος, το μοντέλο που παρέχει μια ασαφή ένδειξη για την αξιοπιστία των αριθμητικών προβλέψεων καιρού και το τελικό μοντέλο πρόβλεψης της αιολικής ισχύος [24]. Η δομή του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου EMPI [24]

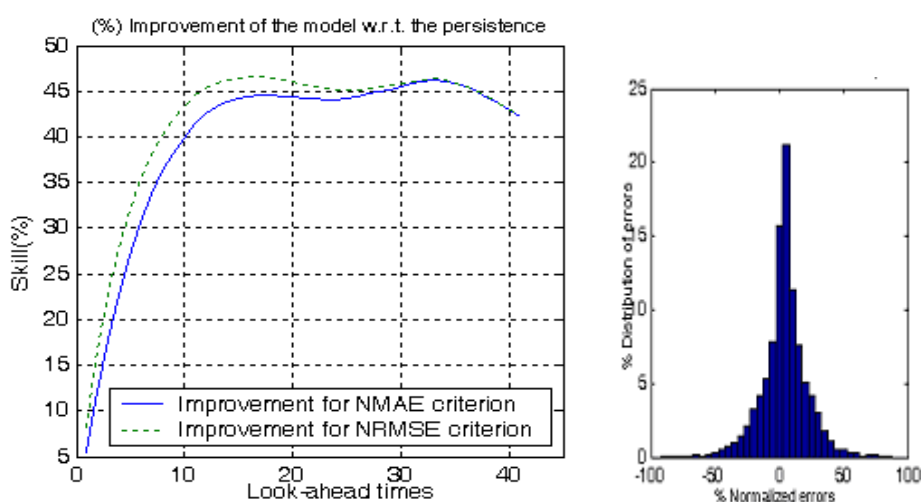
Το πρώτο μοντέλο δίνει μια αρχική εκτίμηση της προβλεπόμενης αιολικής ισχύος. Δέχεται ως δεδομένα εισόδου δύο προβλεπόμενες ταχύτητες ανέμου από NWP, που αντιστοιχούν στην ώρα για την οποία γίνεται πρόβλεψη της ισχύος και στην επόμενη. Η δεύτερη τιμή δίνεται, για να γίνει μια εκτίμηση της τάσης της ταχύτητας να αυξηθεί ή να μειωθεί. Χρησιμοποιώντας έναν αυτοοργανωμένο χάρτη (self-organized map, Kohonen νευρωνικό δίκτυο) διαχωρίζει τις χρονοσειρές της προβλεπόμενης ταχύτητας ανέμου σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το μέγεθος τους (χαμηλή, μεσαία, υψηλή). Καθεμία από αυτές «εκπαιδεύει» ένα ξεχωριστό δίκτυο συνάρτησης ακτινικής βάσης (radial basis function network-RBf). Η δομή των συναρτήσεων αυτών βοηθά στο χειρισμό μη γραμμικών προβλημάτων και το μοντέλο δίνει μια πρώτη εκτίμηση της αιολικής παραγωγής για κάθε κατηγορία.

Το δεύτερο μοντέλο (εκτιμητής ποιότητας NWP) αποτελείται από ένα μοντέλο ασαφούς λογικής και δύο νευρωνικά δίκτυα ακτινικής βάσης. Το ένα δίκτυο δέχεται σαν είσοδο τις δύο τιμές της ταχύτητας του ανέμου από τα NWP. Το άλλο δέχεται σαν είσοδο την προβλεπόμενη κατεύθυνση του ανέμου και την ώρα πρόβλεψης. Τα δίκτυα είναι εκπαιδευμένα να προβλέπουν την θεωρητική τιμή της ισχύος, που

υπολογίζεται από την καμπύλη ισχύος. Στη συνέχεια το μοντέλο ασαφούς λογικής δέχεται αυτά ως δεδομένα εισόδου και την προκαταρκτική εκτίμηση της ισχύος και κρίνει την ποιότητα των NWP.

Το τρίτο μοντέλο (τελική πρόβλεψη αιολικής ισχύος) δίνει την τελική πρόβλεψη της ισχύος χρησιμοποιώντας τρία δίκτυα Rbf, που έχουν εκπαιδευθεί με τα δεδομένα που εκπαιδεύτηκαν και τα Rbf του προκαταρκτικού μοντέλου και τα δεδομένα εξόδου του δεύτερου μοντέλου. Έτσι προκύπτει η τελική εκτίμηση της προβλεπόμενης ισχύος σε ένα αιολικό πάρκο.

Από πειράματα που έχουν γίνει, φαίνεται ότι το μοντέλο αυτό δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από άλλα μοντέλα που έχουν εξεταστεί και ότι η ποιότητα πρόβλεψης σε βραχυπρόθεσμους ορίζοντες είναι καλύτερη και από αυτή του Persistence (Διάγραμμα 2.7.).



Διάγραμμα 2.7. Σύγκριση Persistence και μοντέλου E.M.P. και κατανομή του μέσου σφάλματος για ορίζοντα πρόβλεψης 36 ωρών [24]

2.3. Συμπεράσματα

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες: αυτές που χρησιμοποιούν αριθμητικές προβλέψεις καιρού, NWP και εφαρμόζουν όσο αυτό είναι δυνατό φυσικές εξισώσεις για να υπολογίσουν την παραγόμενη ισχύ σε Α/Π και σε αυτές που χρησιμοποιούν στατιστικές μεθόδους, για να αποκτήσουν την παραγόμενη ισχύ από αποτελέσματα NWP. Ωστόσο και τα δύο είδη συστημάτων χρησιμοποιούν

σε κάποιο στάδιο υπολογισμού τους στοιχεία το ένα από το άλλο. Συγκεκριμένα, εκτός από NWP δεδομένα, τα στατιστικά συστήματα ενσωματώνουν online μετρήσεις για να βελτιστοποιήσουν τις προβλέψεις λίγων ωρών. Από την άλλη πλευρά, τα φυσικά συστήματα χρησιμοποιούν κάποια MOS (Model Output Statistic modules) για να γίνεται συστηματική διόρθωση των σφαλμάτων. Γενικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι προβλέψεις βασισμένες σε NWP παρέχουν καλύτερες προβλέψεις για μακρύτερες χρονικές περιόδους μεταξύ 6 και 48 ωρών, ενώ απαιτούν πρόσθετες μετρήσεις για να παρέχουν ακριβή αποτελέσματα σε βραχυχρόνιες προβλέψεις (0,5h έως 6h). Για παράδειγμα η πρώτη εκδοχή του WPPT, χρησιμοποιούσε μόνο μετρούμενα δεδομένα εισόδου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρούς χρονικούς ορίζοντες μέχρι και 8 ώρες, αλλά δεν ήταν χρήσιμη για μεγαλύτερους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Η δεύτερη εκδοχή του, χρησιμοποιεί σαν είσοδο και δεδομένα NWP. Αυτή η εκδοχή έδωσε πολύ καλύτερα αποτελέσματα για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους πρόβλεψης.

Τα Prediktor και Pveiento χρησιμοποιούν μόνο NWP δεδομένα. Αυτά τα συστήματα απαιτούν δεδομένα μετρήσεων για να βελτιστοποιήσουν τα συστήματα με MOS, αλλά τα δεδομένα δεν είναι απαραίτητο να συλλέγονται online. Αυτό κάνει τη συλλογή των δεδομένων πολύ πιο εύκολη.

Τα Zephyr, SIPREOLICO και AWPPT χρησιμοποιούν NWP δεδομένα και online μετρήσεις σαν δεδομένα εισόδου. Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων: την υψηλή ακρίβεια των NWP για μακρύτερους ορίζοντες πρόβλεψης (μέχρι 48 ώρες) και το πλεονέκτημα των online μετρήσεων για προβλέψεις μικρού χρονικού ορίζοντα. Από την άλλη, οι απαιτούμενες online μετρήσεις δημιουργούν επιπρόσθετα κόστη. Τα υπό μελέτη Α/Π πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για όλη την περιοχή και ο εξοπλισμός τους να είναι αξιόπιστος.

Για τον υπολογισμό του σφάλματος πρόβλεψης είναι αναγκαία πρώτα από όλα η μετρούμενη αιολική ισχύς. Αυτά τα δεδομένα δεν είναι απαραίτητο να είναι διαθέσιμα online, άλλα πρέπει να έχουν υψηλή ακρίβεια. Ένα μεμονωμένο Α/Π είναι εύκολο να παρατηρηθεί, άλλα ο υπολογισμός της συνολικής ισχύος μιας ολόκληρης περιοχής συνήθως απαιτεί έναν αλγόριθμο αναβάθμισης (upscaling algorithm). Αυτό βέβαια εξαρτάται και από την κατανομή των Α/Π στην περιοχή αυτή. Στην Δανία και στη Γερμανία για παράδειγμα, υπάρχουν πολλά μικρά αιολικά πάρκα, όπως επίσης

και μεμονωμένες ανεμογεννήτριες. Έτσι είναι δύσκολο να καταλήξει κανείς στην συνολική ισχύ μέσω μετρήσεων. Στην Ισπανία και στην Αμερική για παράδειγμα υπάρχουν λιγότερα, αλλά μεγαλύτερα αιολικά πάρκα, πράγμα το οποίο κάνει πιο εύκολη την απόκτηση πραγματικών δεδομένων μετρήσεων χωρίς κανενός είδους αναβάθμιση. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία μεταξύ μετρούμενης και συνολικής ισχύος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια αναβάθμισης από τη μια πλευρά, αλλά πιο δαπανηρή η συλλογή δεδομένων από την άλλη. Το σύστημα Zephyr είναι σχεδιασμένο να παίρνει δεδομένα μετρήσεων από όλα τα Α/Π στην περιοχή, ενώ το Prediktor και WPPT χρησιμοποιεί μόνο ένα ζευγάρι από 12 Α/Π στην εκάστοτε περιοχή. Το AWPPT χρησιμοποιεί 25 Α/Π στην περιοχή της Ε.ΟΝ και περίπου 100 μετρήσεις από μεμονωμένες Α/Γ στο «πρόγραμμα των 250 MW». Το Previento περιλαμβάνει περίπου 50 μετρήσεις από μεμονωμένες Α/Γ για να επαληθεύσει την πρόβλεψη για όλη τη Γερμανία.

Διάφορες συναρτήσεις σφάλματος χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν το σφάλμα πρόβλεψης. Το πιο συνηθισμένο είναι το NRMSE (Nominalized Root Mean Square Error) επί της εγκατεστημένης ισχύος. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι επίσης πολύ χρήσιμος για το σκοπό αυτό.

Όλα τα συστήματα πρώτα υπολογίζουν την παραγόμενη ισχύ για ένα Α/Π. Στη συνέχεια χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο αναβάθμισης για να αποκτήσουν τη συνολική αιολική ισχύ για όλη την περιοχή. Ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο σύστημα, το NRMSE σφάλμα για ένα αιολικό πάρκο είναι μεταξύ 10% και 20%. Αφού αναβαθμιστεί στη συνολική ισχύ το NRMSE σφάλμα πέφτει κάτω από το 10% εξαιτίας των διαδικασιών εξομάλυνσης που προκύπτουν από το άθροισμα πολλών σημάτων. Όσο ευρύτερη η περιοχή τόσο ακριβέστερη η πρόβλεψη.

Τα συστήματα είναι δύσκολο να τα συγκρίνει κανείς, γιατί χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιοχές. Τα συστήματα της Δανίας τρέχουν σε επίπεδο έδαφος, το οποίο κάνει την απόκτηση ενός ακριβούς NWP πολύ πιο εύκολη. Υπάρχουν ορισμένες περιόδους, κατά τις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι ιδιαίτερα χαμηλή, παρόλα αυτά και γι' αυτό η μέση αιολική ισχύς είναι υψηλότερη, κάτι το οποίο αυξάνει το συνολικό σφάλμα. Στη Γερμανία είναι πολύ πιο δύσκολο να καταλήξει κανείς σε ένα ακριβές NWP, ειδικά στις περιοχές με χαμηλά βουνά, αλλά οι περιόδους χαμηλής αιολικής ισχύος, ιδιαίτερα το καλοκαίρι μειώνουν το συνολικό σφάλμα.

Δεν είναι δυνατό να αποφασίσει κανείς πιο από τα συστήματα που περιγράφηκαν είναι το πιο ακριβές, εάν δεν συγκριθούν υπό τις ίδιες συνθήκες. Εξαρτάται από τις

ανάγκες του χρήστη και την ικανότητα του να παρέχει δεδομένα. Τα Zephyr, AWPPT και SIPREOLICO είναι πιθανώς ανώτερα, εξετάζοντας τα σφάλματα για ολόκληρο τον ορίζοντα πρόβλεψης από 1 έως 48 ώρες. Παρόλα αυτά το κόστος που σχετίζεται με την οργάνωση και εγκατάσταση του συστήματος είναι υψηλό, ιδιαίτερα για τη συλλογή online δεδομένων.

Συστήματα που χρησιμοποιούν φυσικές εξισώσεις, όπως τα Prediktor και Previento χρειάζονται την ακριβή τοποθεσία και το περιβάλλον των Α/Π που προβλέπουν. Επίσης χρειάζονται μεγάλο χρόνο υπολογισμού, για να μετατρέψουν τη γεωσκοπική ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της πλήμνης με WasP ή άλλα παρόμοια προγράμματα. Στατιστικά μοντέλα, όπως το AWPPT χρειάζονται χρόνο για να μάθουν τη συσχέτιση ανάμεσα στον άνεμο και την ισχύ όταν εγκαθίστανται (learn from experience), άλλα απαιτούν μόνο ελάχιστο χρόνο υπολογισμού.

Όλα τα συστήματα πρόβλεψης παρέχουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Κατά τη διάρκεια πολύ γρήγορων μεταβολών των καιρικών συνθηκών
- Σε καταστάσεις πολύ ισχυρού ανέμου, όταν οι Α/Γ τίθενται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.
- Όταν τοπικές αλλαγές του καιρού προκαλούν προβλήματα στη διαδικασία αναβάθμισης από το επίπεδο του Α/Π στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (upscaling)
- Όταν παράγονται κακές μετρήσεις που δεν γίνονται αμέσως αντιληπτές (μόνο για συστήματα που χρησιμοποιούν online δεδομένα).
- Όταν τα δεδομένα μετεωρολογικών προβλέψεων είναι φτωχά (πολύ συχνά, μια χρονική μετατόπιση ανάμεσα σε προβλέψιμα και πραγματικά δεδομένα δημιουργεί μεγάλα σφάλματα)

Τα συστήματα πρόβλεψης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 2.2. Θα μπορούσε να κάνει κανείς μια πρώτη εκτίμηση για το ποια συστήματα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν με επιτυχία (μικρό σφάλμα πρόβλεψης) στον ελληνικό χώρο. Αυτά είναι, το μοντέλο του Armines που έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία στην Κρήτη, όπως επίσης και συστήματα που είναι σχεδιασμένα για πολύπλοκο έδαφος (LocalPred). Επίσης το AWPPT που είναι φτιαγμένο για να προβλέπει την αιολική παραγωγή στα νησιά της Γερμανίας και έχει

τη δυνατότητα να εφαρμοστεί και σε όλο τον κόσμο, θα μπορούσε να έχει επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα και στον ελληνικό χώρο.

Μοντέλο πρόβλεψης	Developer	Μέθοδος	Δεδομένα εισόδου	Έτος λειτουργίας	Τόπος λειτουργίας
Prediktor	Riso National Laboratory, Δανία	Φυσική	NWP	1994	Ισπανία, Δανία, Ιρλανδία, Γερμανία, (ΗΠΑ)
WPPT	University of Copenhagen, (IMM) Δανία	Στατιστική	NWP, Μετρήσεις	1994	Δανία
Zephyr	Riso και IMM	Φυσική Στατιστική	NWP		
Previento	University of Oldenburg	Φυσική	NWP	2003	Γερμανία
AWPPS (More-Care)	Armines/Ecole des Mines de Paris	Στατιστική, ANN, Ασαφής λογική	NWP, Μετρήσεις	1998, 2002	Ιρλανδία, Κρήτη, Μαδέιρα
SIPREOLICO	University Carlos III, Μαδρίτη, Ισπανία	Στατιστική	NWP, Μετρήσεις	2002	Ισπανία (4GW)
LocalPred/ RegioPred	CENER	Φυσική, Στατιστική	NWP μετρήσεις	2001	La Muela, Soria, Alaiç
AWPT	ISET, Γερμανία	Στατιστική, ANN	NWP, Μετρήσεις	2003	Γερμανία (10GW)
EWind	True Wind Solutions	Φυσική		2003	Καλιφόρνια
HONEYMOON HIRPOM	University College Cork, Ireland REE	Φυσική	Μετρήσεις		
Μοντέλο ΕΜΠ	ΕΜΠ	Στατιστική, ANN, ασαφής λογική	NWP, Μετρήσεις		

Πίνακας 2.2. Συγκεντρωτική παρουσίαση συστημάτων πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Χαρακτηριστικά των σφαλμάτων πρόβλεψης

3.1. Γενικά

Οι προβλέψεις δεν είναι ποτέ ακριβείς και πάντα περιέχουν ένα βαθμό σφάλματος. Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, ο βαθμός ευαισθησίας των σφαλμάτων τους μπορεί να διαφέρει. Στο επίπεδο πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, σφάλματα πρόβλεψης μεταφράζονται σε οικονομικές απώλειες για τους τελικούς χρήστες, καθώς και σε αστάθειες για τους εκάστοτε διαχειριστές του δικτύου. Η αξιολόγηση των προβλέψεων είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, όχι μόνο για την απόκτηση κριτικής άποψης πάνω στην συμπεριφορά μιας συγκεκριμένης προσέγγισης- μεθόδου πρόβλεψης, αλλά και για την απόκτηση βαθύτερης γνώσης ως προς το τι χαρακτηρίζει την αβεβαιότητα της.

Η επίδοση κάθε συστήματος πρόβλεψης εξαρτάται τόσο από τον τρόπο μοντελοποίησης του, όσο και από τα χαρακτηριστικά της προτιθέμενης χρησιμοποίησης του. Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ANEMOS αναπτύχθηκε ένα πλαίσιο για το χαρακτηρισμό του σφάλματος, αποτελούμενο από μια προσέγγιση βασισμένη σε μέτρα σφάλματος και μια προσέγγιση βασισμένη στην κατανομή του. Η πρώτη προσέγγιση συλλέγει ένα σύνολο από μέτρα του στατιστικού σφάλματος σε μορφή ενός πρωτοκόλλου εκτίμησης το οποίο ορίζεται εκτενώς στο [25] και παρουσιάζεται περιληπτικά παρακάτω. Χρησιμοποιώντας κανείς αυτό το πρωτόκολλο, μπορεί να βγάλει συμπεράσματα για την επίδοση της μεθόδου πρόβλεψης και τι την επηρεάζει (ποιότητα εδάφους, εποχή και ορίζοντας πρόβλεψης). Η δεύτερη προσέγγιση στοχεύει στην ανάλυση των κοινών κατανομών των προβλέψεων και των παρατηρήσεων. Ερευνά την επίδραση κάποιων συγκεκριμένων παραμέτρων (επίπεδο προβλεπόμενης ισχύος, ταχύτητας ανέμου κ.α.) στα χαρακτηριστικά της κατανομής του σφάλματος (από το μέσο όρο μέχρι την κύρτωση-

ροπή 1^{ης} μέχρι 4^{ης} τάξης). Αυτή η ανάλυση είναι χρήσιμη για να χαρακτηρίσει τα σφάλματα πρόβλεψης και να συσχετίσει την αδυναμία των μοντέλων με συγκεκριμένες αιτίες.

3.1.1. Ορισμός του σφάλματος πρόβλεψης

Το σφάλμα πρόβλεψης ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ μετρούμενης και προβλεπόμενης τιμής. Θεωρώντας τον κάθε ορίζοντα πρόβλεψης διαφορετικό, το σφάλμα πρόβλεψης που αφορά τη σημειακή πρόβλεψη $\hat{p}_{t+k/t}$ δίνεται από τη σχέση 3.1.

$$e_{t+k/t} \equiv p_{t+k} - \hat{p}_{t+k/t} \quad (3.1.)$$

Η πρόβλεψη αναφέρεται στην αναμενόμενη τιμή της αιολικής ισχύος τη χρονική στιγμή t+k, όπως αυτή προβλέπεται τη χρονική στιγμή t.

Συχνά είναι βολικό να χρησιμοποιεί κανείς το κανονικοποιημένο σφάλμα, το οποίο δίνεται από τη σχέση 3.2.

$$e_{t+k/t} \equiv \frac{1}{P_{nom}} (p_{t+k} - \hat{p}_{t+k/t}) \quad (3.2.)$$

όπου P_{nom} , η εγκατεστημένη ισχύς του Α/Π

γιατί αυτό εξυπηρετεί τη σύγκριση Α/Π που δεν έχουν την ίδια εγκατεστημένη ισχύ.

Το σφάλμα πρόβλεψης μπορεί να διαχωριστεί στο συστηματικό και στο τυχαίο σφάλμα (σχέση 3.3.)

$$e_{t+k/t} \equiv \mu_{t+k/t}^e + \xi_{t+k/t}^e \quad (3.3.)$$

όπου το $\mu_{t+k/t}^e$ είναι σταθερό και το $\xi_{t+k/t}^e$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή. Όταν το σύστημα πρόβλεψης είναι ιδανικό, το συστηματικό σφάλμα ισούται με το μηδέν και το τυχαίο τμήμα του είναι λευκός θόρυβος. Ο λευκός θόρυβος είναι μια σειρά από ανεξάρτητα σφάλματα, που μπορούν να μοντελοποιηθούν με μια κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής (τυποποιημένη κανονική κατανομή). Ωστόσο στην πράξη αυτό δεν ισχύει, αφού τα σφάλματα πρόβλεψης ακολουθούν άλλου είδους κατανομές.

3.2. Ορισμός του πλαισίου εκτίμησης της ακρίβειας των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης

Η ποιότητα των μεθόδων πρόβλεψης μπορεί να προκύψει άμεσα από τη σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών με τις αντίστοιχες μετρούμενες. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι αβεβαιότητες υπάρχουν και στα μετρούμενα δεδομένα. Έτσι για να μπορέσει κανείς να αξιολογήσει επαρκώς τις μεθόδους και να εκτιμήσει την ποιότητα της πρόβλεψης ως προς τη στατιστική συμπεριφορά της, είναι απαραίτητο να θεωρήσει μια ολόκληρη περίοδο εκτίμησης αποτελούμενη από σειρές προβλέψεων, που θα περιλαμβάνει όλα τα πιθανά εμφανιζόμενα καιρικά φαινόμενα. Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομα τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μεθόδων πρόβλεψης. Όπως αναφέρθηκε, υπάρχουν δύο ειδών προσεγγίσεις: η βασισμένη στα μέτρα του σφάλματος και η βασισμένη στην κατανομή του.

3.2.1. Εκτίμηση του σφάλματος βασισμένη στα μέτρα του

Η μέση τιμή (**bias**) μιας μεθόδου αντιστοιχεί στο συστηματικό σφάλμα και δίνεται από το μέσο σφάλμα καθ' όλη την περίοδο εκτίμησης. Υπολογίζεται για τον κάθε ορίζοντα πρόβλεψης από τη σχέση 3.4.

$$bias(k) = \hat{\mu}_k^e = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} e_{t+k/t} \quad (3.4.)$$

όπου N_T ο αριθμός των προβλέψεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του μοντέλου.

Η μέση τιμή είναι βασικός παράγοντας για την εκτίμηση της επίδοσης μιας μεθόδου πρόβλεψης. Δίνει μια αίσθηση για το αν η μέθοδος έχει την τάση να υπερεκτιμά ή να υποτιμά την προβλεπόμενη μεταβλητή. Συνήθως στην πρόβλεψη αιολικής ισχύος, η μέση τιμή του σφάλματος (**bias**) είναι πολύ μικρή χάρη στη χρήση στατιστικών διαδικασιών (ακόμα και οι φυσικές μέθοδοι έχουν τεχνικές MOS για να απομακρύνουν το **bias**). Υπολογίζοντας τη μέση τιμή για διάφορα υποσύνολα στα οποία επικρατούν διαφορετικές καιρικές συνθήκες, μπορεί να βγάλει κανείς συμπεράσμα, για ποιες συνθήκες η μέθοδος π.χ. υπερεκτιμά την πρόβλεψη. Εκτός όμως από αυτή τη διαισθητική προσέγγιση, το **bias** δεν δίνει πληροφορίες για την ικανότητα εκτίμησης του μοντέλου: είναι απίθανο μια μέθοδος με μηδενική μέση

τιμή να δίνει τέλειες προβλέψεις. Σε αυτή την περίπτωση το bias προκύπτει μηδενικό, γιατί θετικές και αρνητικές τιμές του αλληλοαναιρούνται.

Δύο μεγέθη που φανερώνουν τη συνεισφορά θετικών και αρνητικών σφαλμάτων στην έλλειψη ακρίβειας, είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE). Αυτά δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις 3.5. και 3.6.

$$MSE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \quad (3.5.)$$

$$RMSE(k) = MSE(k)^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6.)$$

Το RMSE μπορεί να αναλυθεί ως εξής (σχέση 3.7.):

$$RMSE^2 = bias^2 + SDE^2 = bias^2 + sdbias^2 + disp^2 \quad (3.7.)$$

όπου το sdbias δίνεται από τη σχέση (3.8.)

$$sdbias = \sigma(p) - \hat{\sigma}(p) \quad (3.8.)$$

που εκφράζει τη διαφορά των τυπικών αποκλίσεων μεταξύ μετρούμενης και προβλεπόμενης χρονοσειράς και το disp που αναφέρεται στη διασπορά (σχέση 3.9.)

$$disp = \sqrt{2\sigma(p)\hat{\sigma}(p)(1-r_{p,p})} \quad (3.9.)$$

και συμπεριλαμβάνει την αλληλοσυσχέτιση των χρονοσειρών.

Η σχέση 3.7. δείχνει ότι δύο διαφορετικοί όροι συνεισφέρουν στο RMSE. Το bias, αναφέρεται στη διαφορά των μέσων τιμών της πρόβλεψης και της μέτρησης. Η τυπική απόκλιση, SDE, εκφράζει τις διακυμάνσεις του σφάλματος γύρω από τη μέση τιμή. Αυτή αποτελείται από δύο τμήματα: Το πρώτο, sdbias, που είναι η διαφορά των τυπικών αποκλίσεων των προβλεπόμενων και μετρούμενων τιμών, υπολογίζει τα σφάλματα εξαιτίας λανθασμένης προβλεπόμενης μεταβλητότητας. Αυτό μαζί με το bias είναι ο δείκτης για σφάλματα πλάτους. Το δεύτερο, disp, που είναι η διασπορά, περιλαμβάνει την αλληλοσυσχέτιση σταθμισμένη με τις μέσες τιμές των τυπικών αποκλίσεων των δύο χρονοσειρών. Έτσι η διασπορά περιγράφει τη συνεισφορά των φασικών σφαλμάτων στο RMSE. Ο Lange σημείωσε ότι ένα μεγάλο μέρος της τιμής του RMSE αιτιολογείται από τη διασπορά και έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα

φασικά σφάλματα έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στο τελικό σφάλμα της προβλεπόμενης παραγόμενης ισχύος από ότι τα σφάλματα πλάτους.

Ένα άλλο μέτρο εκτίμησης σφάλματος είναι το **μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE, σχέση 3.10)**, το οποίο είναι η μέση τιμή της απόλυτης τιμής των σφαλμάτων.

$$MAE(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} |e_{t+k/t}| \quad (3.10)$$

Η χρήση του κριτηρίου RMSE ή MAE για την εκτίμηση του μοντέλου εξαρτάται από την ευαισθησία των τελικών χρηστών στο σφάλμα. Η ευαισθησία δίνεται από την συνάρτηση απωλειών. Η χρήση του RMSE υπονοεί τη θεώρηση τετραγωνικής συνάρτησης απωλειών, ενώ η χρήση του MAE υπονοεί τη θεώρηση γραμμικής. Αντί για τη χρησιμοποίηση του RMSE μπορεί να χρησιμοποιήσει κανείς την τυπική απόκλιση (SDE). Το κριτήριο του SDE είναι ένα μέγεθος που σχετίζεται με το τυχαίο τμήμα του σφάλματος. Η **τυπική απόκλιση** δίνεται από τη σχέση 3.11.

$$SDE(k) = \sigma_k^e = \left[\frac{1}{N_T - 1} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t} - \hat{\mu}_k^e)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11.)$$

Σε αντίθεση με το SDE, τόσο τα συστηματικά όσο και τα τυχαία σφάλματα συνεισφέρουν στην τιμή του MAE και RMSE.

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

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

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα πρόβλεψης είναι μη στατικά. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της μη γραμμικής διαδικασίας, υπάρχουν περίοδοι ή

συγκεκριμένες συνθήκες για τις οποίες μπορεί να γίνει ευκολότερα η πρόβλεψη από άλλες. Επίσης κάποια μοντέλα μπορεί να είναι καλύτερα από άλλα, στην απεικόνιση της θεωρούμενης διαδικασίας για δεδομένες μη γραμμικότητες. Είναι σκόπιμο να υπολογίζονται (εκτιμώνται) τα μεγέθη του σφάλματος σε περιόδους που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες συνθήκες: μεγάλη ταχύτητα ανέμου, καλοκαίρι, δυτικός άνεμος κλπ.

3.2.2. Εκτίμηση του σφάλματος βασισμένη στην κατανομή του

Τα μέτρα που προτάθηκαν παραπάνω, αποδίδουν τη συμπεριφορά του μοντέλου με μια μόνο τιμή. Ωστόσο, η εκτίμηση του μοντέλου δεν μπορεί να γίνει από μια μοναδική τιμή. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιεί κανείς την κατανομή του σφάλματος. Η βασισμένη στην κατανομή του σφάλματος προσέγγιση εκτίμησης αναπτύχθηκε, για να επισημάνει τα χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας της πρόβλεψης. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα της κοινής κατανομής των προβλέψεων \hat{p} και παρατηρήσεων p , $q(\hat{p}, p)$, η οποία περιέχει όλες τις μη εξαρτώμενες από το χρόνο πληροφορίες για την ποιότητα της μεθόδου πρόβλεψης. Καθώς είναι δύσκολο να εξετάσει κανείς άμεσα την κοινή κατανομή, μπορεί να εστιάσει στις διάφορες δεσμευμένες και οριακές κατανομές για να εξάγει συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της κοινής κατανομής. Τέτοιες είναι, η δεσμευμένη κατανομή των παρατηρήσεων δεδομένων των προβλέψεων $q(p|\hat{p})$, η δεσμευμένη κατανομή των προβλέψεων δεδομένων των παρατηρήσεων $q(\hat{p}|p)$, η οριακή κατανομή των παρατηρήσεων $q(p)$ και η οριακή κατανομή των προβλέψεων $q(\hat{p})$.

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

- 1) Το μέσο μ_k^e αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους της κατανομής και δίνει πληροφορίες για το συστηματικό σφάλμα της πρόβλεψης. Δίνεται από τη σχέση 3.4. για τη μέση τιμή.

- 2) Η τυπική απόκλιση σ_k^e (σχέση 3.11.) αντανακλά τη διασπορά της κατανομής και έτσι μας πληροφορεί για το βαθμό αβεβαιότητας της πρόβλεψης.
- 3) Η ασυμμετρία ή λοξότητα v_k^e (σχέση 3.12.) περιγράφει την έλλειψη συμμετρίας της κατανομής. Δίνει την πιο πιθανή κατεύθυνση των σφαλμάτων και μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

$$v_k^e = \frac{N_T}{(N_T - 1) \cdot (N_T - 2)} \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{e_{t+k/t} - \hat{\mu}_k}{\sigma_k^e} \right)^3 \quad (3.12)$$

- 4) Η κύρτωση (σχέση 3.13) μας ενημερώνει για το σχήμα της δοσμένης κατανομής, συγκρινόμενη με την κανονική. Όπως είναι προφανές, η κανονική κατανομή έχει μηδενική κύρτωση και θετική κύρτωση αντιστοιχεί σε πιο έντονη αιχμή και βαρύτερα άκρα.

$$\kappa_k^e = \frac{N_T \cdot (N_T + 1)}{(N_T - 1) \cdot (N_T - 2) \cdot (N_T - 3)} \sum_{t=1}^{N_T} \left(\frac{e_{t+k/t} - \hat{\mu}_k}{\sigma_k^e} \right)^4 - \frac{3(N_T - 1)^2}{(N_T - 2) \cdot (N_T - 3)} \quad (3.13.)$$

3.2.3. Σύγκριση της ακρίβειας των διαφόρων μεθόδων πρόβλεψης

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

Ένας άλλος τρόπος για να συγκρίνει κανείς τις διάφορες μεθόδους και να ποσοτικοποιήσει το κέρδος σε σύγκριση με τα μοντέλα αναφοράς, είναι να χρησιμοποιήσει το κριτήριο που ορίζεται σαν **βελτίωση** ως προς το μοντέλο αναφοράς. Αυτό αντιστοιχεί στη μείωση του σφάλματος που επιτυγχάνεται με την προηγμένη μέθοδο, για ένα δεδομένο μέτρο σφάλματος. Η μέθοδος ορίζεται από τη σχέση 3.14.

$$\text{Im } p_Y^{ref} = \frac{Y^{ref}(k) - Y(k)}{Y^{ref}(k)} \quad (3.14)$$

όπου Y το θεωρούμενο κριτήριο (μέτρο) σφάλματος. Αυτό μπορεί να είναι το MAE, το RMSE ή το SDE. Το κριτήριο μπορεί να πάρει είτε θετικές είτε αρνητικές τιμές ανάλογα με το αν έχουμε βελτίωση ή χειροτέρευση της επίδοσης, σε σύγκριση με το μοντέλο αναφοράς.

Μια άλλη δυνατότητα για να συγκρίνει κανείς την επίδοση των μοντέλων, είναι να υπολογίσει τη σταθερά αποφασιστικότητας για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης (σχέση 3.15)

$$R^2 = \frac{MSE^0(k) - MSE(k)}{MSE^0(k)} \quad (3.15)$$

Στη στατιστική η σταθερά αυτή, αντιπροσωπεύει την ικανότητα του μοντέλου να εξηγεί τη μεταβλητότητα των δεδομένων.

3.3. Κατανομή σφαλμάτων πρόβλεψης

3.3.1. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας ανέμου¹

3.3.3.1. Μορφή της κατανομής

Η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου έχει διαπιστωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθεί **κανονική κατανομή** [26]. Στη διδακτορική διατριβή του ο Lange, χρησιμοποίησε το μοντέλο πρόβλεψης Previento για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος σε ορισμένα αιολικά πάρκα διασκορπισμένα στη Γερμανία. Στα πλαίσια της εργασίας, διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων για να διαπιστώσει τη μορφή της κατανομής του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου. Για το σκοπό αυτό όλες οι κατανομές σφαλμάτων εξετάστηκαν με το τεστ χ^2 και με το μη παραμετρικό τεστ Lilliefors με την υπόθεση ότι είναι κανονικές κατανομές. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι περίπου το 75% των εξεταζόμενων κατανομών, είναι κανονικές. Αναλυτικός πίνακας των αποτελεσμάτων παρατίθεται στο [26]. Μια σχεδόν κανονική κατανομή του σφάλματος συμπεραίνεται και από τις

¹ Το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου έχει υπολογιστεί ως η διαφορά της προβλεπόμενης τιμής από τη μετρούμενη, $e = X_{pred} - X_{measured}$

γραφικές αναπαραστάσεις του σφάλματος των Landberg [27] και Giebel [28] για το δανέζικο αριθμητικό μοντέλο πρόβλεψης καιρού HIRLAM. Έτσι, επειδή τα περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος χρησιμοποιούν ως NWP ένα από τα δύο παραπάνω συστήματα, θα μπορούσε κανείς να πει ότι στις περισσότερες περιπτώσεις **η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου είναι κανονική.**

3.3.1.2. Στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου

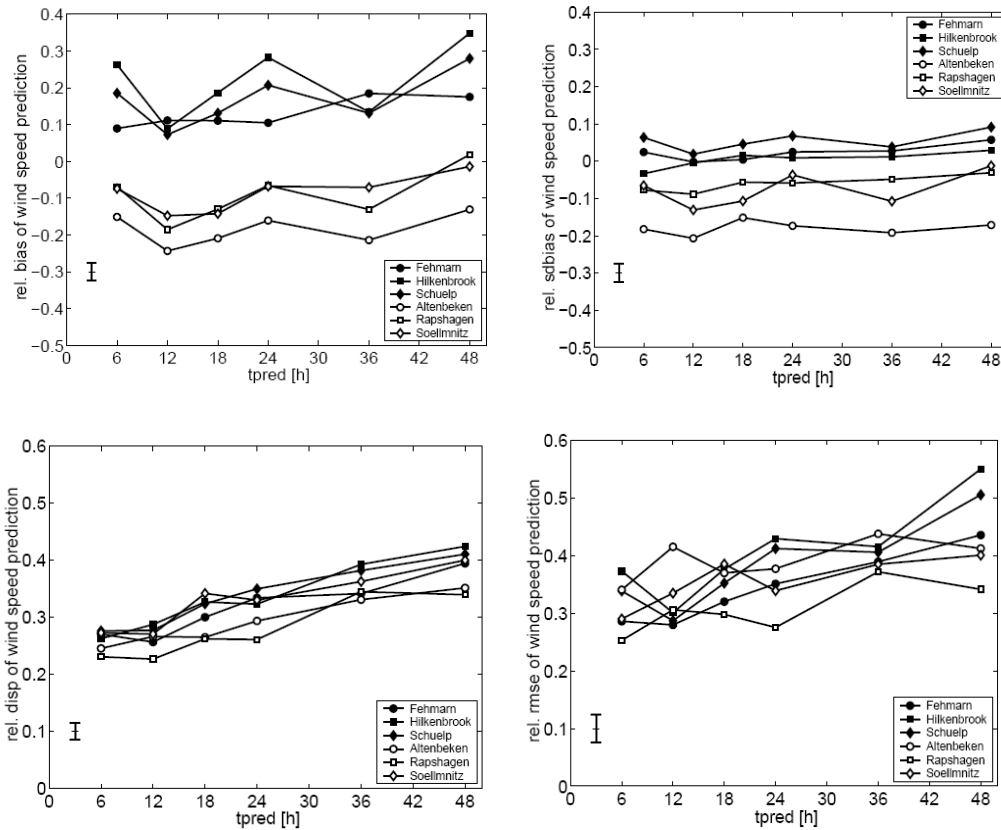
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, μεταβάλλονται ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης και την πολυπλοκότητα του εδάφους [26]. Ορισμένα από αυτά είναι κοινά για όλα τα αιολικά πάρκα και άλλα παρουσιάζουν τοπικό χαρακτήρα. Για τον τρόπο που ο ορίζοντας πρόβλεψης και η πολυπλοκότητα του εδάφους τα επηρεάζουν, ο Lange στη διδακτορική διατριβή του εξέτασε συνολικά 30 αιολικά πάρκα και από αυτά επέλεξε έξι, εκ των οποίων τα τρία βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος στη Β. Γερμανία: Α/Π Fehmarn σε ένα νησί στη Βαλτική, Α/Π Schuelp σε ακτή της Β. Θάλασσας και Hilkenbrook περίπου 70 χμ. μακριά από την ακτή και τα άλλα τρία βρίσκονται σε πολύπλοκο έδαφος: Altenbecken και Söllmnitz σε σχετικά ορεινό έδαφος, Rapshagen σε λιγότερο ορεινό έδαφος.

Αρχικά εξέτασε τη συμπεριφορά του σχετικού RMSE (κανονικοποιημένο ως προς τη μέση ετήσια μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου) συνολικά και μετά τη συμπεριφορά του καθενός από τους όρους που συμβάλλουν σε αυτό, σύμφωνα με την εξίσωση 3.7. Για το σχετικό RMSE, διαπίστωσε ότι αυξάνεται με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης και η τιμή του είναι παρόμοια για όλα τα αιολικά πάρκα, κυμαίνεται δε για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών μεταξύ 0,25 και 0,37 και για ορίζοντα πρόβλεψης 48 ωρών από 0,35 μέχρι και 0,55. Το RMSE παρουσιάζει ημερήσιες διακυμάνσεις, οι οποίες όμως δεν έχουν την ίδια μορφή για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Από τους όρους που αποτελούν το σχετικό RMSE, η σχετική μέση τιμή (relative bias) και σχετική διαφορά των τυπικών αποκλίσεων (relative sdbias) επηρεάζονται από τα τοπικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου Α/Π και συγκεκριμένα από την πολυπλοκότητα του εδάφους. Η σχετική διασπορά, disp επηρεάζει όλα τα Α/Π με τον ίδιο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το σχετικό bias έχει συγκεκριμένη συμπεριφορά για

την πλειοψηφία των εξεταζόμενων Α/Π. Παρουσιάζει ημερήσιες διακυμάνσεις όμοιες για όλα τα Α/Π, με την τιμή του να είναι μικρότερη τις μεσημεριανές ώρες και να αυξάνεται το απόγευμα. Έχει δηλαδή ένα χαρακτηριστικό σχήμα W για τα ηπειρωτικά Α/Π, ενώ στο offshore Α/Π οι διακυμάνσεις δεν είναι τόσο έντονες. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο συστηματικό σφάλμα που εισάγεται από το NWP μοντέλο και σχετίζεται με τη μη ιδανική ατμοσφαιρική διαστρωμάτωση σε αυτό. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μέσης τιμής, είναι ότι Α/Π που βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος έχουν θετική μέση τιμή. Αυτό υποδηλώνει μια υπερεκτίμηση των προβλεπόμενων τιμών. Αντίθετα, Α/Π τοποθετημένα σε πολύπλοκο έδαφος έχουν αρνητική μέση τιμή, κάτι που υποδηλώνει υποτίμηση των προβλεπόμενων τιμών. Η εκάστοτε υποτίμηση ή υπερέκτιμηση των προβλεπόμενων τιμών οφείλεται στα NWP. Συγκεκριμένα η υποτίμηση των προβλεπόμενων τιμών σε πολύπλοκο έδαφος οφείλεται στο γεγονός, ότι τα Α/Π είναι ιδανικά τοποθετημένα, έτσι ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή απόδοση, ενώ το NWP χρησιμοποιεί μέσης κλίμακας πολυπλοκότητα που αντιπροσωπεύει την τυπική και όχι την τοπική πολυπλοκότητα. Η σχετική διαφορά των τυπικών αποκλίσεων (relative sdbias) παρουσιάζει διαφορετικές τιμές για το κάθε Α/Π. Αιολικά πάρκα που είναι τοποθετημένα σε επίπεδο έδαφος παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές sdbias, ενώ μεταξύ των Α/Π που είναι τοποθετημένα σε πολύπλοκο έδαφος η διαφορά των τιμών sdbias είναι μεγαλύτερη. Παράλληλα για όλα τα Α/Π, το sdbias παραμένει σχεδόν σταθερό με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης.

Η σχετική διασπορά, disp, εκφράζει τη συνεισφορά του φασικού σφάλματος στο RMSE και αυξάνεται με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης. Είναι καθολική, με την έννοια ότι η επίδραση του φασικού σφάλματος αυξάνεται με τον ορίζοντα πρόβλεψης, όμοια για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του εδάφους. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης δίνονται στο σχήμα 3.1.

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



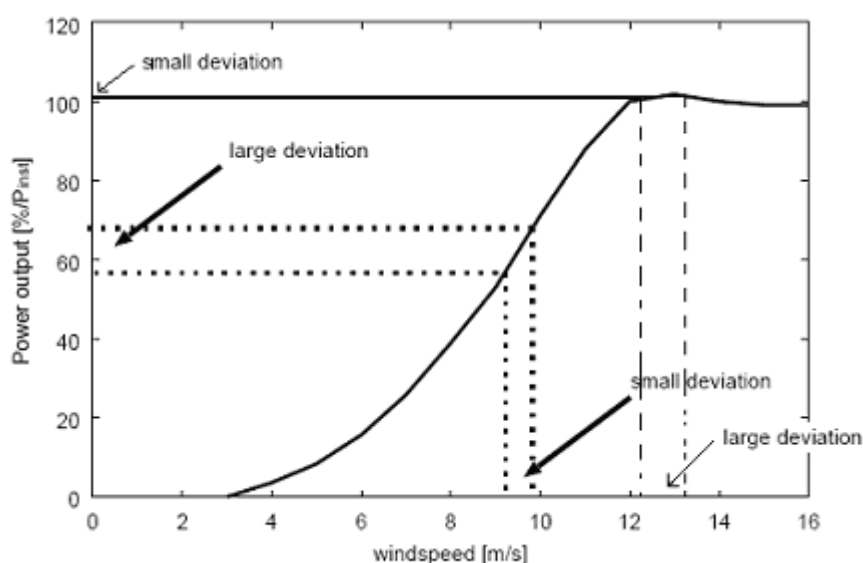
Σχήμα 3.1. Χαρακτηριστικά σφάλματος προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του οριζοντα πρόβλεψης [26]

3.3.2. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Σε αντίθεση με το σφάλμα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου, οι στατιστικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι εντελώς διαφορετικές. Στο [26] αποδεικνύεται ότι οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των σφαλμάτων αυτών είναι μη συμμετρικές και όχι κανονικές και γενικά έχουν υψηλότερη συγκέντρωση σε μικρές τιμές και συγκεκριμένα κοντά στο μηδέν (θετική κύρτωση). Αυτό σχετίζεται με το γεγονός, ότι ταχύτητες κάτω από την ταχύτητα αποκοπής της Α/Γ αντιστοιχούν σε μηδενική παραγόμενη ισχύ από την καμπύλη ισχύος.

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

ταχύτητα ένταξης. Υποθέτουμε ότι η προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου έχει μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή. Στο απότομο κομμάτι της καμπύλης ισχύος μικρή διαφορά μεταξύ προβλεπόμενης και μετρούμενης ταχύτητας του ανέμου μεταφράζεται σε σχετικά μεγάλη διαφορά στην αντιστοιχούσα ισχύ. Σε αντίθεση με αυτό, εάν μικρή απόκλιση στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου συμβαίνει στο επίπεδο κομμάτι της καμπύλης, όπου η κλίση είναι μηδενική, το σφάλμα στην πρόβλεψη της ισχύος είναι σχεδόν μηδενικό. Με αυτόν τον τρόπο, η καμπύλη ισχύος αυξάνει ή μειώνει τις αρχικές αποκλίσεις στην προβλεπόμενη ταχύτητα ανάλογα με την τοπική της παράγωγο (σχήμα 3.2.).



Σχήμα 3.2. Τυπική καμπύλη ισχύος και σχετικές αποκλίσεις [29]

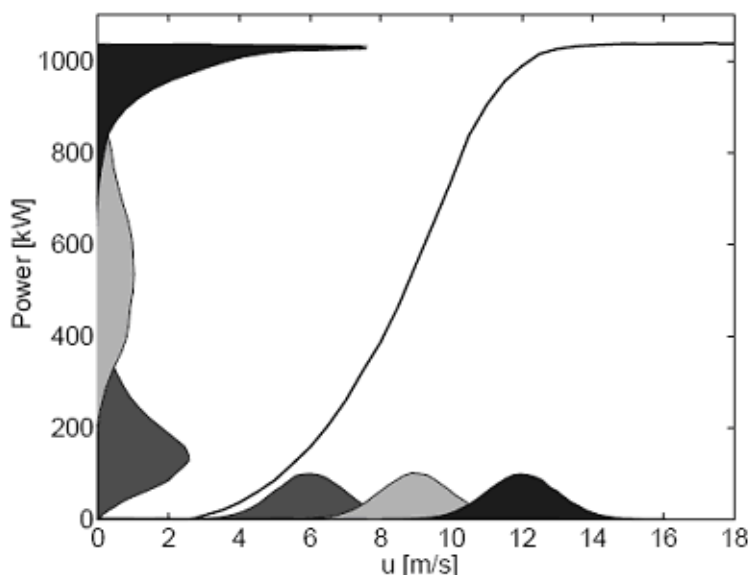
Τα πειράματα που έκανε ο Lange έδειξαν, ότι από τις κατανομές σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος που εξετάστηκαν, καμία δεν ακολουθεί κανονική κατανομή. Για τις περισσότερες εξεταζόμενες περιπτώσεις, η πιθανότητα να βρεθεί το σφάλμα πρόβλεψης μέσα στο διάστημα $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ είναι 77%, μέγεθος πολύ μεγαλύτερο από το 68% που αντιστοιχεί στην κανονική κατανομή. Παρόλα αυτά για τις ανάγκες της έρευνας μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι και η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος είναι κανονική [30]. Παράλληλα στα [30,31] προτείνεται ότι η κατανομή που θα μπορούσε να περιγράψει καταλληλότερα το σφάλμα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, είναι η κατανομή βήτα (σχέση 3.16.).

$$f(x) = x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}n \quad (3.16.)$$

όπου α και β παράμετροι και n , ο συντελεστής κανονικοποίησης. Οι παράμετροι α και β μπορούν να καθοριστούν από δεδομένες τιμές του μέσου και της τυπικής απόκλισης.

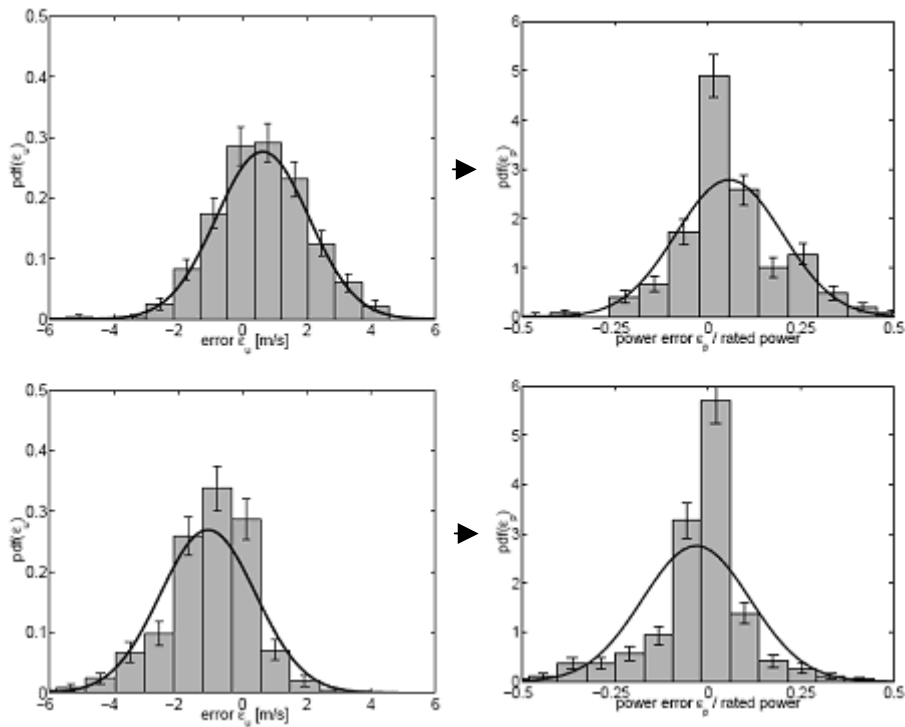
3.3.3. Συμπεράσματα για τη μορφή των κατανομών

Από τα παραπάνω κατανοεί κανείς, ότι μετατρέποντας την ταχύτητα του ανέμου σε αιολική ισχύ, τα στατιστικά χαρακτηριστικά που αφορούν την απόκλιση μεταξύ μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών αλλάζουν τελείως. Αυτό σχετίζεται προφανώς με τη μη γραμμικότητα της καμπύλης ισχύος, σαν βασικό στοιχείο της μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε ισχύ. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στο σχήμα 3.3. Για τρεις διαφορετικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου στον άξονα x έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχες κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος στον άξονα y . Όπως παρατηρείται οι κανονικές κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου για μικρές και μεγάλες ταχύτητες του ανέμου παραμορφώνονται ιδιαίτερα, όταν μετατρέπονται σε αντίστοιχες κατανομές ισχύος. Για μεσαίες ταχύτητες ανέμου, η κατανομή του σφάλματος προβλεπόμενης αιολικής ισχύος είναι πιο επίπεδη και πιο εξαπλωμένη από αυτή της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 3.3. Κατανομές σφάλματος ταχύτητας ανέμου και αντίστοιχες κατανομές σφάλματος προβλεπόμενης ισχύος [26]

Στο σχήμα 3.4. παρουσιάζονται οι κατανομές του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου και οι αντίστοιχες κατανομές σφάλματος πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Η κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας μπορεί να είναι ή όχι κανονική, ενώ η κατανομή του σφάλματος προβλεπόμενης αιολικής ισχύος είναι πάντα μη συμμετρική και όχι κανονική.



Σχήμα 3.4. Αιολική ισχύς vs ταχύτητα ανέμου: Κατανομές σφάλματος για δύο αιολικά πάρκα στη Γερμανία. [26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Εκτίμηση της ακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκαν οι κατανομές των σφαλμάτων της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης ισχύος, καθώς και τα κριτήρια εκτίμησης των μεθόδων πρόβλεψης για τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εκτίμησης τους. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι παράγοντες και ο τρόπος που αυτοί επηρεάζουν την ακρίβεια (τα σφάλματα) των μοντέλων πρόβλεψης. Στο τέλος γίνεται μια συγκριτική μελέτη της επίδοσης όλων των υπάρχοντων μοντέλων πρόβλεψης και εξάγονται γενικά συμπεράσματα. Οι παρατηρήσεις βασίζονται στα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα ANEMOS και από εργασίες των Pinson, Landsberg [32, 33, 34].

4.1. ANEMOS - Project

Στα πλαίσια του προγράμματος ANEMOS έγινε μια προσπάθεια σύγκρισης των σύγχρονων εργαλείων πρόβλεψης. Αυτή η προσπάθεια σύγκρισης σχεδιάστηκε για να καλύψει διαφορετικούς τύπους Α/Π και μοντέλων πρόβλεψης και έτσι τα αποτελέσματα της είναι μια έγκυρη αναφορά της επίδοσης των μοντέλων πρόβλεψης για τους τελικούς χρήστες. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν περίπλοκα εδάφη και σχετικά επίπεδες περιοχές, για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της τοπογραφίας, η απόσταση από την ακτή, το διαφορετικό υψόμετρο και οι κλιματικές συνθήκες στο σφάλμα πρόβλεψης της ισχύος.

Αναπτύχθηκε μια κοινή βάση δεδομένων που περιλαμβάνει μετρήσεις ανέμου (ταχύτητας και κατεύθυνσης), παραγωγή ισχύος και άλλα μετεωρολογικά δεδομένα, έτσι ώστε να κριθεί η επίδοση των μοντέλων κάτω από τις ίδιες καταστάσεις εισόδου. Σε αυτή περιέχονται ακόμη, αριθμητικές προβλέψεις καιρού, όπως επίσης και

χαρακτηριστικά του εκάστοτε εξεταζόμενου Α/Π (καμπύλες ισχύος, ψηφιακοί χάρτες του εδάφους και της τραχύτητας κ.α.).

Από την πλευρά των μοντέλων πρόβλεψης, η μελέτη καλύπτει μεγάλη ποικιλία τεχνικών προσεγγίσεων, από αναδρομικά μοντέλα μέχρι νευρωνικά δίκτυα ασαφούς λογικής, περιλαμβάνοντας συστήματα MOS και φυσικά μοντέλα οριακού στρώματος. Ένα πλήθος βασικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκε κατά την εξέταση, όπως Prediktor, WPPT, Previento, Sireolico, LocalPred, AWPPS, σύστημα πρόβλεψης της RAL, ARIA wind και μοντέλο πρόβλεψης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα είναι σε χρήση σήμερα και χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές δικτύου στην Ισπανία, Δανία, Ιρλανδία και Ελλάδα.

4.1.1. Επιλεγμένα Α/Π

Έξι περιπτώσεις επιλέχθηκαν για να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών που αφορούν την κλιματολογία και το έδαφος και βρίσκονται σε τέσσερις διαφορετικές χώρες:

- Wustenhusen, Α/Π στη Γερμανία (επίπεδο έδαφος)
- Alaiz (ιδιαίτερα περίπλοκο έδαφος) και Sotavento (περίπλοκο έδαφος), Α/Π στην Ισπανία
- Klim (επίπεδο έδαφος) και Tuno (offshore), Α/Π στη Δανία
- Golagh, Α/Π στην Ιρλανδία (περίπλοκο έδαφος)

Το Α/Π Wustenhusen βρίσκεται στη βορειοανατολική Γερμανία, 20 χμ. νοτιοανατολικά της πόλης Greifswald και 8χμ. από την ακτογραμμή της Βαλτικής θάλασσας. Το Α/Π αποτελείται από 2 Α/Γ Nordtank NTK500/41, με συνολική ονομαστική ισχύ 1 MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι $RIX=0$, που σημαίνει ότι η κλίση δεν ξεπερνά πουθενά την τιμή αναφοράς (30%).

Το Α/Π Sotavento βρίσκεται στην περιοχή της Galicia στη βορειοδυτική Ισπανία περίπου 40χμ. από την ακτογραμμή του Ατλαντικού Ωκεανού. Η τοποθεσία βρίσκεται 500-600m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας σε ημιπολύπλοκο έδαφος. Το Α/Π αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών Α/Γ, με την ονομαστική ισχύ τους να κυμαίνεται από 600kW μέχρι 1320 kW. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του Α/Π είναι 17,56MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι $RIX=7$.

Το Α/Π Alaiz βρίσκεται 15χμ. νότια της Pamplona, στην περιοχή της Navarra της Ισπανίας και σε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο έδαφος 910-1120m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το Α/Π αποτελείται από 49 Α/Γ Gamesa G47-660 και μια Lagerwey LW750, με συνολική ονομαστική ισχύ 33,09 MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι RIX=15.

Το Α/Π Klim βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του Jutland, περίπου 8χμ. από τη βόρεια ακτή και 50χμ., δυτικά από την πόλη Aalborg. Το Α/Π αποτελείται από 35 Α/Γ Vestas V44 600kW με συνολική ονομαστική ισχύ 21 MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι RIX=0.

Το Α/Π Tuno Knob βρίσκεται στη θάλασσα, 6χμ. από την ανατολική ακτή του Jutland και 10χμ. δυτικά από το νησί Samsø. Αυτό είναι ένα από τα πρώτα offshore αιολικά πάρκα σε όλο τον κόσμο και αποτελείται από 10 Α/Γ Vestas V39 500kW, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 5MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι RIX=0.

Το Α/Π Golagh βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Ιρλανδίας 370m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αποτελείται από 25 Α/Γ Vestas V42, 600kW που αντιστοιχούν σε συνολική ισχύ 15MW. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας εδάφους (RIX) είναι RIX=7,3.

Στην έρευνα εξετάστηκαν 11 μοντέλα πρόβλεψης ισχύος για τα επιλεγμένα Α/Π. Τα αποτελέσματα των NWP μοντέλων, HIRLAM και Deutschland-Modell, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στα εξεταζόμενα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής.

4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν το σφάλμα πρόβλεψης αιολικής ισχύος

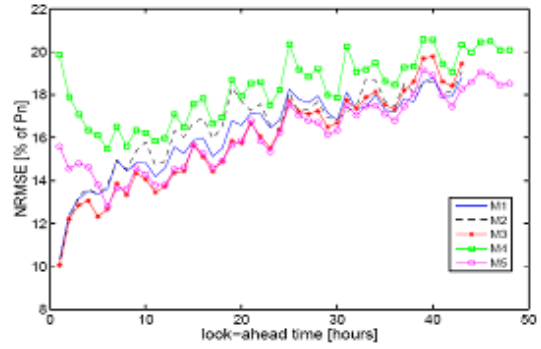
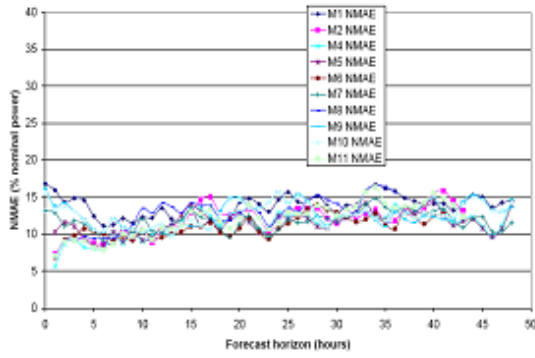
Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το σφάλμα πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής. Ο ορίζοντας πρόβλεψης, η τραχύτητα του εδάφους, τα μετεωρολογικά δεδομένα, το επίπεδο της προβλεπόμενης ισχύος, η έκταση, οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες είναι μόνο μερικοί από αυτούς. Ωστόσο καθένας από αυτούς μπορεί να επηρεάζει διαφορετικά τα μέτρα του σφάλματος και διαφορετικά την στατιστική κατανομή του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα σφάλματα πρόβλεψης καταγράφονται αναλυτικά παρακάτω και παρουσιάζεται η επίδραση τους τόσο στα μέτρα όσο και την κατανομή του σφάλματος.

4.2.1. Ορίζοντας πρόβλεψης

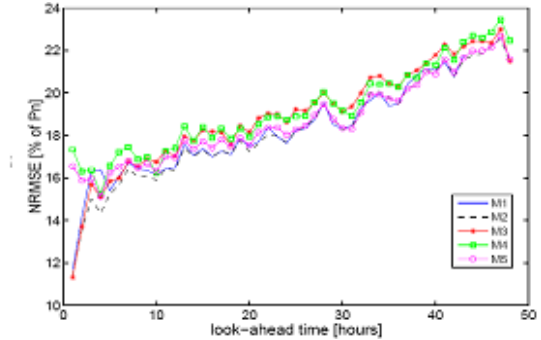
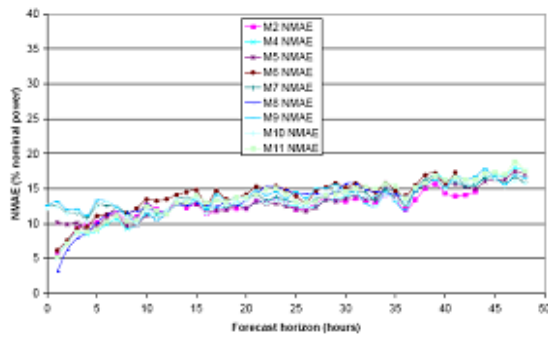
4.2.1.1. Επίδραση στα μέτρα σφάλματος

Τα πιο διαδεδομένα μέτρα σφάλματος, με τα οποία μπορεί να αποκτήσει κανείς μια πρώτη ιδέα για την επίδοση των μοντέλων πρόβλεψης, είναι το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα, NMAE και η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, NRMSE. Τα δύο αυτά μέτρα σφάλματος αυξάνονται με σταθερό ρυθμό συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης με μια τάση που είναι σχετικά γραμμική.

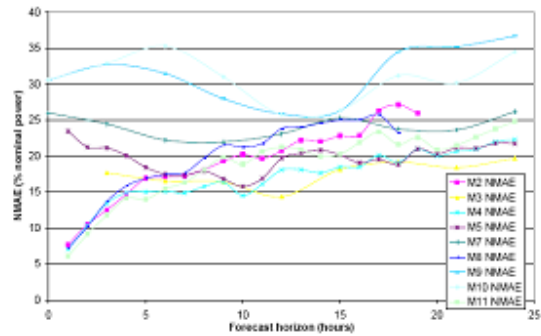
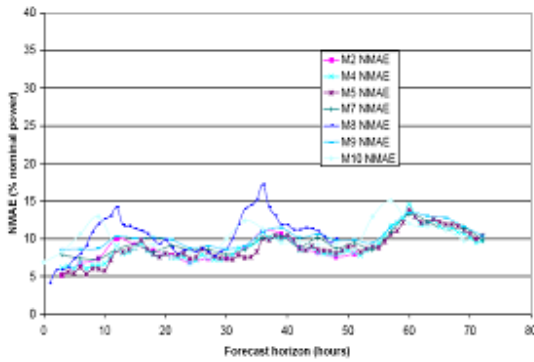
Υπάρχει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στο σφάλμα πρόβλεψης των στατιστικών και των φυσικών μοντέλων. Το σφάλμα πρόβλεψης στα στατιστικά μοντέλα είναι πολύ μικρότερο για σύντομους ορίζοντες πρόβλεψης, σε σύγκριση με αυτό των φυσικών, εξαιτίας της χρήσης δεδομένων παραγόμενης ισχύος σαν δεδομένα εισόδου στα πρώτα. Με αυτόν τον τρόπο, κατορθώνουν να λαμβάνουν υπόψη τους την σταθερή συμπεριφορά του ανέμου. Οι φυσικές προσεγγίσεις βασίζονται μόνο στα NWP για να εκτιμήσουν την παραγόμενη ισχύ. Τέτοια NWP είναι κατώτερης ποιότητας για τις πρώτες ώρες πρόβλεψης, ενώ βελτιώνονται για ορίζοντες πρόβλεψης μεγαλύτερους από 6 ώρες. Στη συνέχεια, ανεξαρτήτως προσέγγισης (στατιστικής ή φυσικής), η διαφορά των σφαλμάτων των δύο προσεγγίσεων είναι 2-3% της εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο στα στατιστικά μοντέλα, το σφάλμα για ορίζοντα πρόβλεψης δύο ημερών είναι σχεδόν διπλάσιο σε σύγκριση με το αντίστοιχο για ορίζοντα πρόβλεψης μιας μέρας. Στα φυσικά μοντέλα δεν παρατηρείται τέτοιου είδους συμπεριφορά. Συμπεραίνει κανείς λοιπόν, ότι τα μοντέλα με δυνατότητα αυτοπροσαρμογής παρουσιάζουν μικρότερα σφάλματα θεωρούμενου ολόκληρου του ορίζοντα πρόβλεψης. Στα διαγράμματα 4.1.-4.5. που ακολουθούν παρουσιάζονται τα NMAE και NRMSE των εξεταζόμενων μοντέλων για τα υπό εξέταση Α/Π.



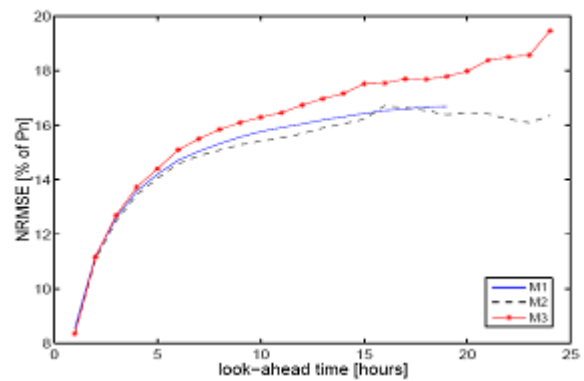
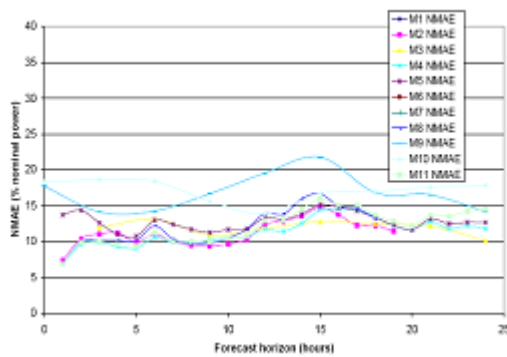
Διάγραμμα 4.1. NMAE και NRMSE για το A/I Golagh [32, 34]



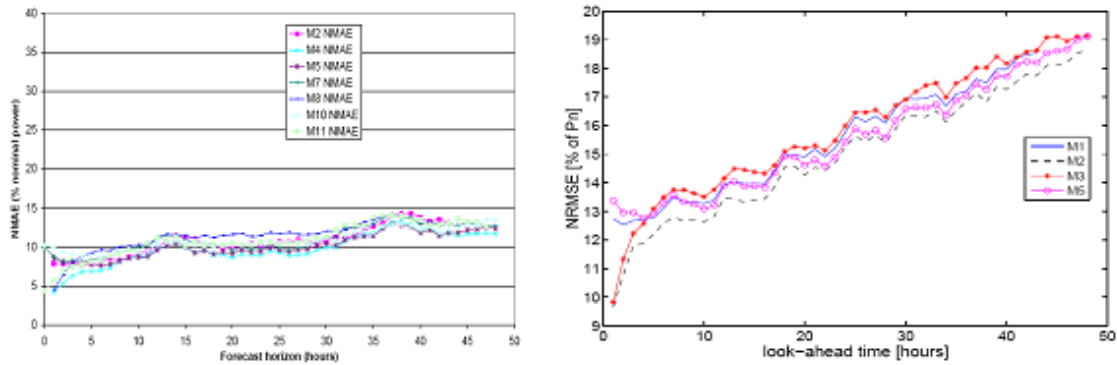
Διάγραμμα 4.2. NMAE και NRMSE για το A/I Tuno [32, 34]



Διάγραμμα 4.3. NMAE και NRMSE για τα A/I Wustenhuse και Alaiz [32, 34]



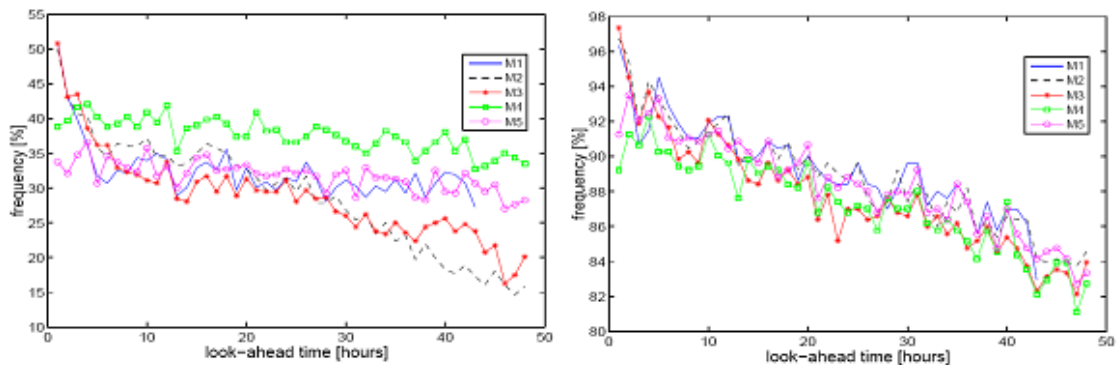
Διάγραμμα 4.4. NMAE και NRMSE για το A/I Sotavento [32, 34]



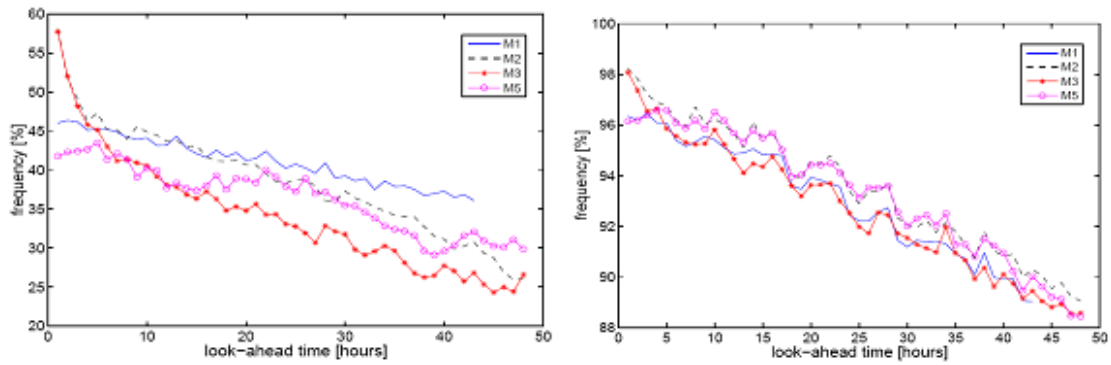
Διάγραμμα 4.5. NMAE και NRMSE για το A/II Klim [32, 34]

4.2.1.2. Επίδραση στην κατανομή του σφάλματος

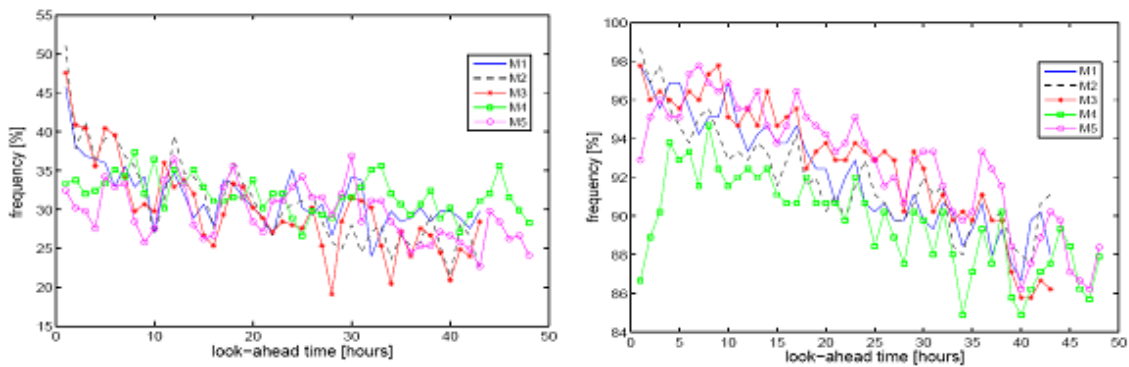
Η μορφή των κατανομών του σφάλματος διαφοροποιείται ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης. Γενικά για πολύ βραχυχρόνιους ορίζοντες το κεντρικό τμήμα της κατανομής είναι υψηλότερο, με κοντύτερα άκρα και τα σφάλματα είναι μικρότερα και πιο συγκεντρωμένα γύρω από το μηδέν, από ότι για μακροχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης. Τα διαγράμματα που δείχνουν τη συχνότητα εμφάνισης ενός σφάλματος συγκεκριμένου εύρους, μας πληροφορούν για το ποσοστό των σφαλμάτων μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα, καθώς και για το ποσοστό των σφαλμάτων κάτω από ένα όριο. Από τα διαγράμματα 4.6.-4.9. καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα, ότι όλα τα μοντέλα (φυσικά και στατιστικά) κάνουν μικρά λάθη σε μόνιμη βάση. Οι στατιστικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερο ποσοστό μικρών σφαλμάτων κατά τους πρώτους ορίζοντες πρόβλεψης, αλλά για τους επόμενους ορίζοντες αυτό το ποσοστό μειώνεται συνεχώς. Τα φυσικά μοντέλα εμφανίζουν πιο σταθερή συμπεριφορά.



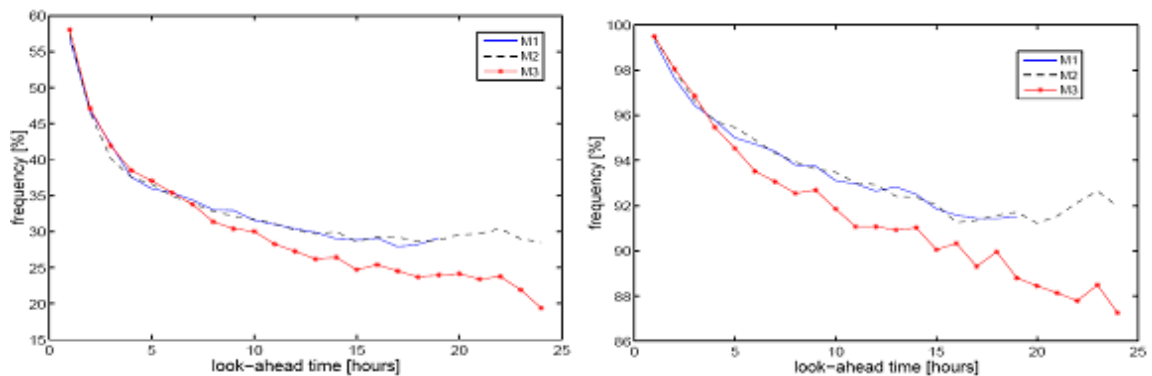
Διάγραμμα 4.6. Ποσοστό σφαλμάτων μέσα στο περιθώριο σφάλματος $\pm 5\%$ (της P_{nom}) και $\pm 30\%$ αντίστοιχα για το A/II Tuno [32]



Διάγραμμα 4.7. Ποσοστό σφαλμάτων μέσα στο περιθώριο σφάλματος $\pm 5\%$ (της P_{nom}) και $\pm 30\%$ αντίστοιχα για το A/P Klim [32]



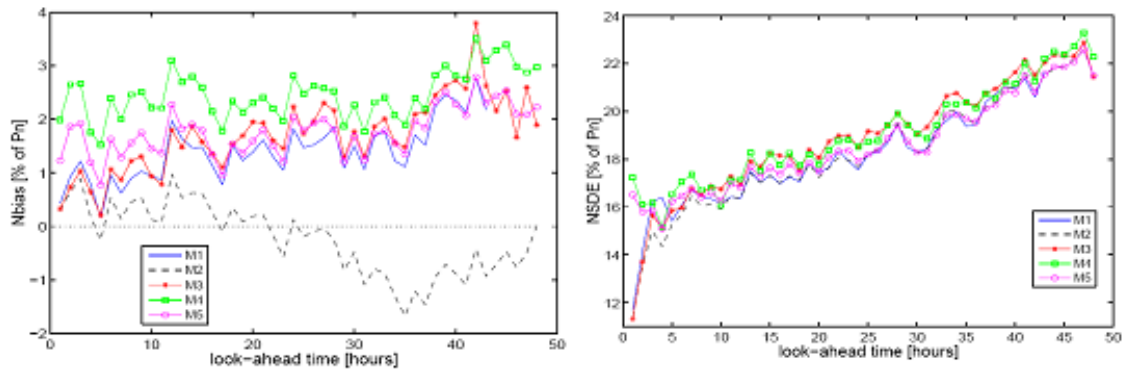
Διάγραμμα 4.8. Ποσοστό σφαλμάτων μέσα στο περιθώριο σφάλματος $\pm 5\%$ (της P_{nom}) και $\pm 30\%$ αντίστοιχα για το A/P Golagh [32]



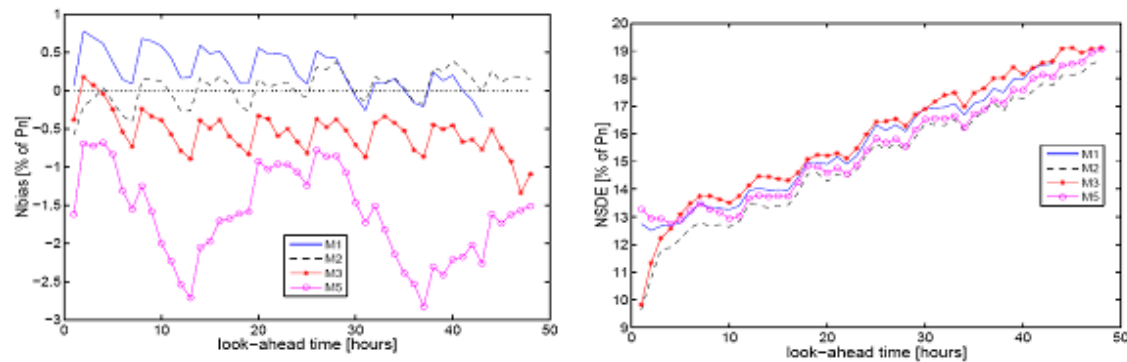
Διάγραμμα 4.9. Ποσοστό σφαλμάτων μέσα στο περιθώριο σφάλματος $\pm 5\%$ (της P_{nom}) και $\pm 30\%$ αντίστοιχα για το A/P Sotavento [32]

Εξετάζοντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής του σφάλματος, συμπεραίνει κανείς, ότι ο ορίζοντας πρόβλεψης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις ροπές μεγαλύτερου βαθμού. Το συστηματικό τμήμα του σφάλματος πρόβλεψης (Nbias) δεν

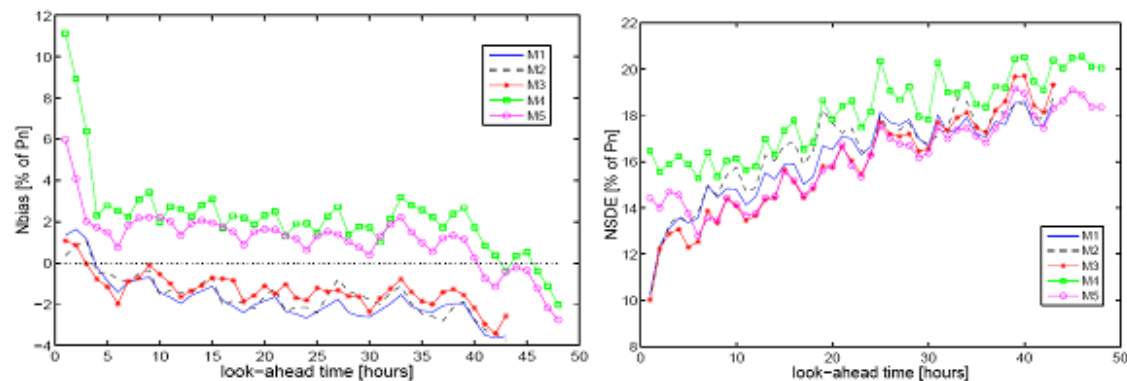
πρέπει να είναι συνάρτηση του ορίζοντα πρόβλεψης και θα πρέπει να παραμένει σε πολύ χαμηλό επίπεδο, καθώς οι στατιστικές μέθοδοι μπορούν να είναι αμερόληπτες χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες μεθόδους υπολογισμού και τα φυσικά μοντέλα χρησιμοποιώντας τεχνικές MOS. Από τα διαγράμματα 4.10.-4.13 για τα διαφορετικά αιολικά πάρκα, βλέπουμε ότι η μέση τιμή του NRMSE κυμαίνεται μεταξύ $\pm 2\%$ της εγκατεστημένης ισχύος για ολόκληρο τον ορίζοντα και τα διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης.



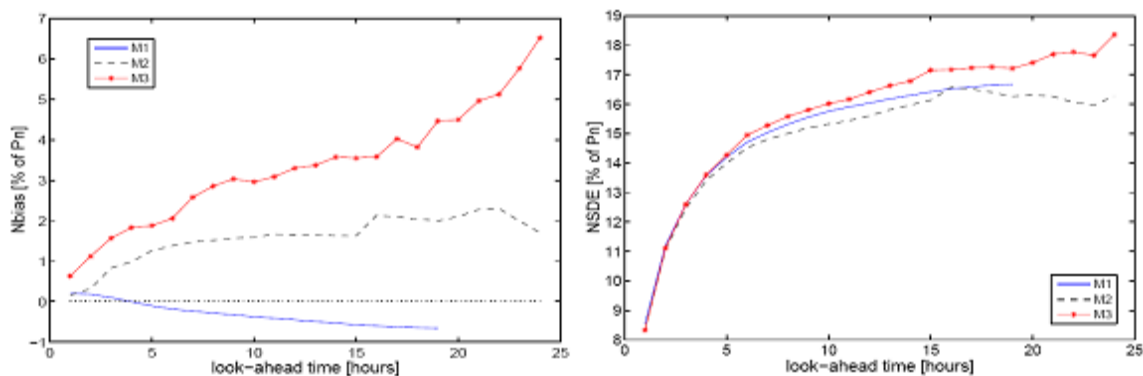
Διάγραμμα 4.10. *Nbias* και *NSDE* για το A/P Tuno [32, 33]



Διάγραμμα 4.11. *Nbias* και *NSDE* για το A/P Klim [32, 33]



Διάγραμμα 4.12. *Nbias* και *NSDE* για το A/P Golagh [32, 33]



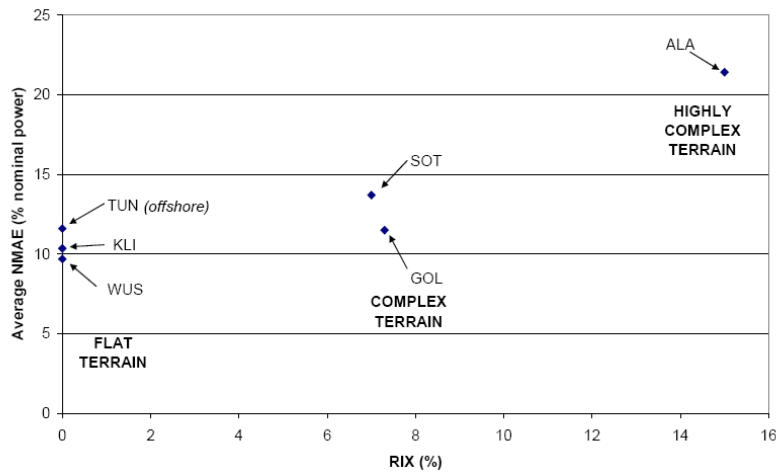
Διάγραμμα 4.13. Nbias και NSDE για το A/I Sotavento [32, 33]

Ταυτόχρονα ο ορίζοντας πρόβλεψης δεν έχει καμία επίδραση στη συμμετρία (ή έλλειψη αυτής). Η λοξότητα παραμένει σταθερή για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης, και είναι γενικά θετική εξαιτίας του μη γραμμικού και περιορισμένου σχήματος της καμπύλης ισχύος. Η κύρτωση και έτσι το σχήμα των κατανομών σφάλματος, επηρεάζονται ελαφρά από τον ορίζοντα πρόβλεψης. Για όλα τα εξεταζόμενα αιολικά πάρκα, η κύρτωση βρέθηκε ότι είναι θετική, κάτι που υποδηλώνει ότι οι κατανομές αυτές, είναι πιο αιχμηρές από την κανονική κατανομή και έχουν μακρύτερα άκρα. Για τους αρχικούς ορίζοντες πρόβλεψης, οι στατιστικές μέθοδοι έχουν πιο αιχμηρές κατανομές σφαλμάτων εξαιτίας της χρήσης online δεδομένων. Στη συνέχεια για μεγαλύτερους ορίζοντες η κύρτωση παρουσιάζει μεταβολές, αλλά πάντα γύρω από μια σταθερή τιμή ανεξάρτητα από την χρησιμοποιούμενη τεχνική πρόβλεψης.

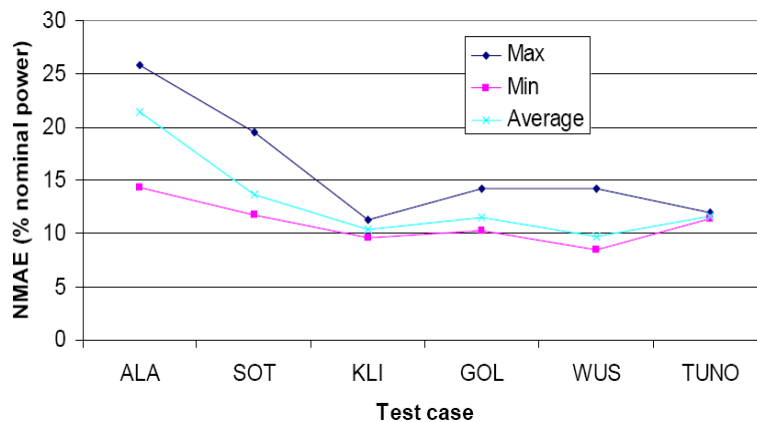
4.2.2. Πολυπλοκότητα του εδάφους

Το σφάλμα πρόβλεψης διαφοροποιείται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του εδάφους και τη μέθοδο πρόβλεψης. Πιο συγκεκριμένα, για βραχυπρόθεσμους ορίζοντες πρόβλεψης τα σφάλματα των στατιστικών μοντέλων δε διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι για ορίζοντες πρόβλεψης από 3-6 ώρες οι στατιστικές προβλέψεις βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία ισχύος και έτσι το μέγεθος του σφάλματος επηρεάζεται κυρίως από την σταθερή συμπεριφορά των τοπικών ανέμων και από την ποιότητα των online δεδομένων για την παραγόμενη ισχύ. Αντίθετα, για μακροπρόθεσμους ορίζοντες πρόβλεψης οι δύο αυτοί παράγοντες είναι μικρότερης σημασίας και τα σφάλματα επηρεάζονται από τις μετεωρολογικές

προβλέψεις. Για ορίζοντες πρόβλεψης μεγαλύτερους από 6 ώρες παρατηρείται μια διαφοροποίηση στο σφάλμα, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Τα αποτελέσματα του προγράμματος ANEMOS δείχνουν, ότι οι τιμές του NMAE αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της πολυπλοκότητας του εδάφους (αύξηση του συντελεστή πολυπλοκότητας εδάφους- RIX). Η μεταβολή του σφάλματος με την πολυπλοκότητα αποδεικνύει ότι είναι πιο εύκολο να προβλέψουμε τον άνεμο σε επίπεδα εδάφη από ότι σε πιο πολύπλοκα. Καταλήγει λοιπόν κανείς στο συμπέρασμα, ότι καθώς αυξάνει η πολυπλοκότητα του εδάφους, αυξάνει τόσο το μέσο σφάλμα όσο και η διαφοροποίηση ανάμεσα στις διαφορετικές προσεγγίσεις πρόβλεψης. Στα διαγράμματα 4.14. και 4.15. παρουσιάζεται εποπτικά η επίδραση της πολυπλοκότητας του εδάφους στην αύξηση του κανονικοποιημένου μέσου απόλυτου σφάλματος (NMAE).



Διάγραμμα 4.14. Μέσο NMAE για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών συναρτήσει του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους- Ποιοτική σύγκριση [33,34]



Διάγραμμα 4.15. Διακύμανση του NMAE για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών- Ποιοτική σύγκριση [33,34]

Από αυτά φαίνεται, ότι για το Α/Π του Alai2 που εμφανίζει τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα εδάφους παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο σφάλμα πρόβλεψης αιολικής παραγωγής. Για το offshore Α/Π, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά για Α/Π σε επίπεδο έδαφος.

4.2.3. Μετεωρολογικές προβλέψεις

Το κύριο δεδομένο εισόδου στις σύγχρονες μεθόδους πρόβλεψης αιολικής ισχύος είναι η πληροφορία που παρέχεται από τις μετεωρολογικές προβλέψεις (NWP). Αυτή αποτελείται κυρίως από εκτιμήσεις της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου, που δίνονται στους κόμβους του δικτύου του NWP μοντέλου γύρω από την περιοχή ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στατιστικές τεχνικές υποβιβασμού (διγραμμική παρεμβολή) για να μετατραπούν οι προβλέψεις αυτές στο επίπεδο του Α/Π. Εάν είναι διαθέσιμα τα online δεδομένα της παραγωγής, χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την επίδοση του μοντέλου κατά τους βραχυχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης και για να απομακρύνουν το συστηματικό σφάλμα. Έτσι η ποιότητα της πρόβλεψης που τα μοντέλα παρέχουν, εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα των NWPs: κακές μετεωρολογικές προβλέψεις δίνουν κακή πρόβλεψη για την αναμενόμενη αιολική παραγωγή.

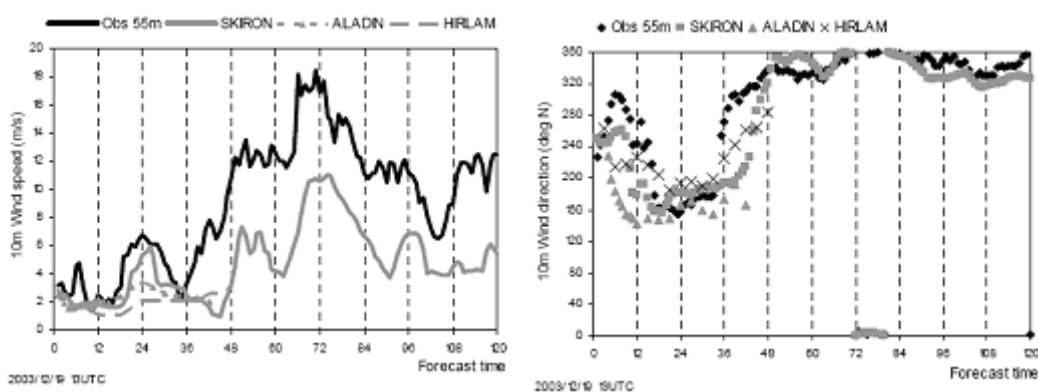
Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα την περίπτωση ενός φασικού σφάλματος στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου. Το φασικό σφάλμα αντιστοιχεί σε μια χρονική μετατόπιση της πρόβλεψης του μετεωρολογικού μετώπου και των μετρήσεων. Σε μια τέτοια περίπτωση το NWP δεν αντιλαμβάνεται την εξέλιξη της κατάστασης κατάλληλα: για παράδειγμα η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προβλέπεται, αλλά μερικές ώρες νωρίτερα από ότι πραγματοποιείται. Τα σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης κάνουν μια βελτιωμένη μετατροπή της ταχύτητας σε ισχύ, αλλά δεν διορθώνουν χρονικές μετατοπίσεις που εμφανίζονται στις μετεωρολογικές προβλέψεις. Έτσι θα μπορούσε να πει κανείς ότι χρονικά εξελισσόμενα πρότυπα επιβάλλονται από τα NWPs.

Στα πλαίσια του προγράμματος ANEMOS, έγινε μια μελέτη των αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού για τα διάφορα συστήματα [34]. Στα πλαίσια αυτής έγινε σύγκριση τριών NWPs, του SKIRON, του HIRLAM και του ALADIN, τα οποία ήταν σε χρήση στην Ελλάδα, στην Ισπανία και τη Γαλλία αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τέτοιου τύπου αριθμητικά μοντέλα είναι κατάλληλα για να

χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη της ισχύος, ενώ η ικανότητα τους εξαρτάται από την ανάλυση που το κάθε μοντέλο χρησιμοποιεί. Χαμηλή ανάλυση οδηγεί σε εξομάλυνση των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής και κατά συνέπεια σε εξαγωγή του μέσου όρου των χαρακτηριστικών ροής για την περιοχή και άρα σε υποτίμηση της πρόβλεψης. Οι διαφορές ανάμεσα στην πρόβλεψη και τις μετρήσεις οφείλονται λοιπόν, τόσο στο γεγονός ότι το κάθε «κύτταρο» του μοντέλου καλύπτει μια μεγάλη περιοχή όσο και σε σφάλματα στις αρχικές και πλευρικές οριακές συνθήκες του παγκόσμιου μοντέλου και/ ή σε πιθανά λάθη στις παρατηρήσεις, π.χ. σφάλματα οργάνων κλπ. Σε πρόσφατες μελέτες αποδείχτηκε ότι η χρήση φίλτρων Kalman βελτιώνει τις αριθμητικές προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου. Τα φίλτρα αυτά μπορούν να θεωρηθούν σαν μια τεχνική MOS που έχει ως στόχο την απομάκρυνση του συστηματικού και του γραμμικού τμήματος του σφάλματος.

Η εκτίμηση των αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού βασίστηκε σε συγκρίσεις μεταξύ μοντέλου και παρατηρήσεων και συγκρίσεις μεταξύ μοντέλων καθώς και σε παραγώγους στατιστικών παραμέτρων. Η σύγκριση των NWP's έγινε για μετεωρολογικές προβλέψεις στο Α/Π του Alaiz και βασίστηκε σε παρατηρούμενα δεδομένα. Αυτό το Α/Π παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη πολυπλοκότητα εδάφους, κάτι το οποίο αντανακλάται και στις προβλέψεις των NWP's. Η παρακολούθηση του ανέμου γίνεται σε ύψος 55 μέτρων, ενώ η πρόβλεψη και για τα τρία μοντέλα γίνεται σε ύψος 10 μέτρων. Για το λόγο αυτό άμεση σύγκριση των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων τιμών είναι δύσκολη. Παρόλα αυτά μπορούν να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες. Εστιάζοντας στην χρονική εξέλιξη του ανέμου, παρατηρούμε ότι και τα τρία μοντέλα καθόλη τη διάρκεια πρόβλεψης συμβαδίζουν με τις παρατηρήσεις (σχήμα 4.1α.). Καθώς τα δεδομένα του HIRLAM είναι χαμηλότερης ανάλυσης από τα άλλα, έχουν μικρότερη διαφοροποίηση με το χρόνο και χαμηλότερες ταχύτητες. Η συμπεριφορά του ALADIN είναι καλύτερη από του HIRLAM. Το SKIRON προβλέπει με ακρίβεια τις χρονικές μεταβολές. Οι προβλέψεις του συμφωνούν καλά με τις παρατηρήσεις ακόμα και μετά από 48 ώρες. Οι διαφορές στην πρόβλεψη της κατεύθυνσης του ανέμου μεταξύ των μοντέλων και των προβλέψεων είναι ανεκτές (σχήμα 4.1β.). Για να κατανοήσει κανείς τη αξία της ανάλυσης των μοντέλων και να ερευνήσει περισσότερο την ικανότητα/ όρια του καθενός στην πρόβλεψη του ανέμου σε μια μόνο περιοχή, είναι απαραίτητη η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Εάν μετατρέψει κανείς τα δεδομένα των HIRLAM και SKIRON στα 55 μέτρα παρατηρεί ότι τα μοντέλα είναι αξιόπιστα

ακόμα και για προβλέψεις μετά από 5 μέρες. Επίσης για μικρές ταχύτητες του ανέμου (μέχρι 6m/s) η επίδοση των δύο μοντέλων είναι ισάξια. Ωστόσο το SKIRON σε υψηλότερες ταχύτητες συμπίπτει με μεγαλύτερη ακρίβεια με τα παρατηρούμενα δεδομένα (μέχρι 15m/s), ενώ το HIRLAM τα υποτιμά συστηματικά. Η υποτίμηση στα NWP δεδομένα του ανέμου, όπως αναφέρθηκε αποδίδεται σε εξομάλυνση της τοπογραφίας, κυρίως για χαμηλής ανάλυσης διαμορφώσεις. Ωστόσο σε όλα NWP παρατηρείται αύξηση του σφάλματος με τον ορίζοντα πρόβλεψης.



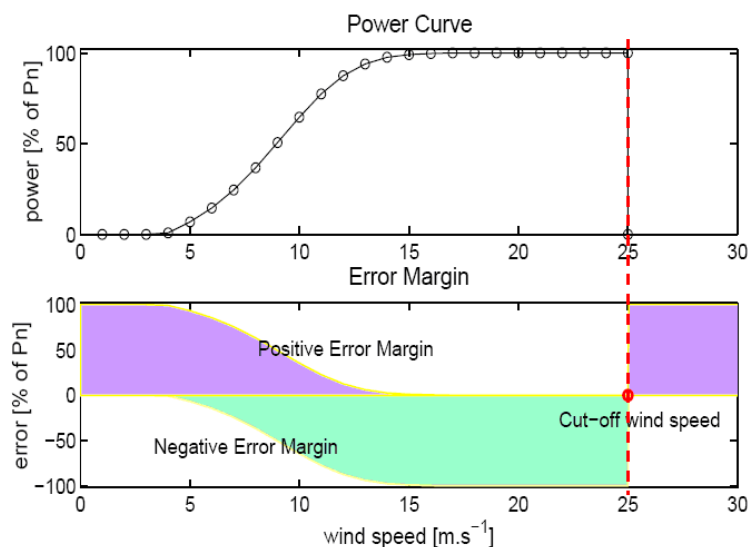
Σχήμα 4.1α. και β. Χρονοσειρές ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου σύμφωνα με τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα από το SKIRON, ALADIN και HIRLAM [34]

4.2.4. Μοντέλο μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε αιολική ισχύ

Εκτός από τα σφάλματα που εισάγουν τα NWP στην πρόβλεψη της αιολικής ισχύος, και το ίδιο το μοντέλο συνεισφέρει στο σφάλμα. Το σφάλμα του μοντέλου μπορεί να οφείλεται στον τρόπο που τα αριθμητικά δεδομένα μετασχηματίζονται στο επίπεδο του πάρκου, στον τρόπο που μοντελοποιείται το προφίλ του ανέμου, στον τρόπο που λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις του πάρκου και τέλος στον τρόπο που υπολογίζεται η καμπύλη ισχύος.

Η καμπύλη ισχύος του αιολικού πάρκου έχει δύο χαρακτηριστικά: είναι περιορισμένη μεταξύ του μηδενός και της ονομαστικής ισχύος, P_{nom} και είναι μη γραμμική. Η επίδραση του πρώτου χαρακτηριστικού στο σφάλμα πρόβλεψης, είναι ότι αυτό μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ -100% και $+100\%$ της ονομαστικής ισχύος, P_{nom} του αιολικού πάρκου. Το πιθανό σφάλμα του μοντέλου πρόβλεψης, που ορίζεται ως περιθώριο σφάλματος, εξαρτάται από το επίπεδο της προβλεπόμενης (ή της

μετρούμενης) αιολικής ισχύος. Το σχήμα 4.2. δείχνει γραφικά το περιθώριο του σφάλματος ως συνάρτηση της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος του Α/Π.



Σχήμα 4.2. Περιθώριο σφάλματος ως συνάρτηση της καμπύλης ισχύος της Α/Γ [35]

Για ταχύτητες του ανέμου κάτω από την ταχύτητα ένταξης, το περιθώριο σφάλματος είναι μέγιστο, αφού το μοντέλο μπορεί να προβλέψει παραγωγή μέχρι την ονομαστική ισχύ της Α/Γ. Σε αντίθεση, για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου το μοντέλο εμφανίζει αρνητικό περιθώριο σφάλματος, το οποίο σημαίνει ότι η παραγόμενη ισχύς είναι πιθανώς μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη από το μοντέλο. Κοντά στην ταχύτητα αποκοπής η αβεβαιότητα είναι πάλι μέγιστη, αφού το μοντέλο μπορεί να μεταβεί από το θετικό στο αρνητικό περιθώριο σφάλματος και αντίθετα. Ο Lange έδειξε, ότι το μέγεθος του σφάλματος πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου δεν εξαρτάται από το επίπεδο της προβλεπόμενης ταχύτητας. Αλλά καθώς υπάρχει ένα εγγενές σφάλμα μοντελοποίησης, που σχετίζεται με τον επιλεγμένο τρόπο που μετατρέπεται η ταχύτητα σε ισχύ, η καμπύλη ισχύος του Α/Π μεγεθύνει (μεταξύ ταχύτητας ένταξης και ονομαστικής ταχύτητας) ή μειώνει (κάτω από την ταχύτητα ένταξης και μεταξύ ονομαστικής και ταχύτητας αποκοπής) την αβεβαιότητα που εισάγεται από τα NWP.

Η επίδραση αυτή μπορεί να ποσοτικοποιηθεί υπολογίζοντας τη τοπική παράγωγο της καμπύλης ισχύος. Μια τέτοια επίδραση είναι ιδιαίτερα σημαντική στο απότομο τμήμα της καμπύλης, όπου τα σφάλματα πρόβλεψης της παραγόμενης ισχύος μπορεί να είναι διπλάσια ή ακόμα και τριπλάσια συγκρινόμενα με τα σφάλματα πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου. Για το λόγο αυτό, το NMAE, το NRMSE και η τυπική

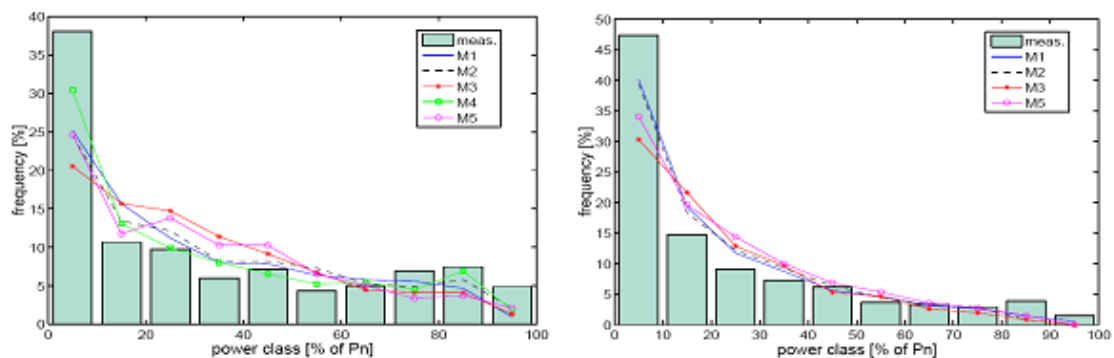
απόκλιση στην εξαρτώμενη από την ισχύ κατανομή σφάλματος, θα κυμαίνεται ανάλογα. Με μαθηματικούς όρους η σχέση μεταξύ της κλίσης της καμπύλης ισχύος και της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη της ισχύος δίνεται από τη σχέση 4.1.

$$\sigma_p(u) = \left| \frac{dP}{du}(u) \right| \cdot \overline{\sigma_u} \quad (4.1.)$$

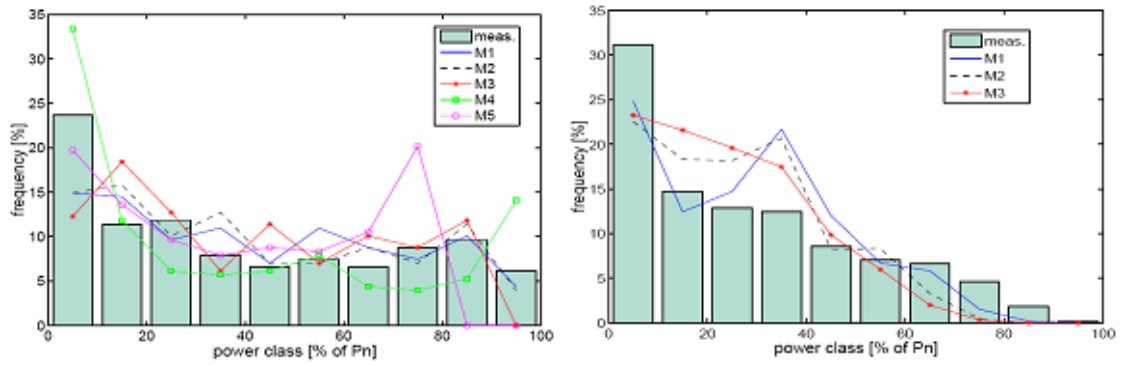
όπου σ_p είναι η τυπική απόκλιση, που αντιπροσωπεύει το τρέχον σφάλμα πρόβλεψης της ισχύος, $\left| \frac{dP}{du}(u) \right|$ η απόλυτη τιμή της παραγώγου της καμπύλης ισχύος στο u και $\overline{\sigma_u}$ ο ετήσιος μέσος του σφάλματος πρόβλεψης ταχύτητας του ανέμου.

Οι κατανομές ταχύτητας ανέμου μετατρέπονται σε κατανομές αιολικής ισχύος μέσω μιας επιλεγμένης διαδικασίας. Καθώς καταστάσεις με χαμηλή ταχύτητα ανέμου εμφανίζονται συχνότερα από δυνατούς ανέμους, περίοδοι με χαμηλή παραγωγή αιολικής ισχύος παρουσιάζονται σε πιο συχνή βάση. Εξαιτίας της ποικιλίας των κατανομών ανέμου και των διαφορών στη διαδικασία μετατροπής της ταχύτητας σε ισχύ, η κατανομή της ισχύος σε κάθε πάρκο μπορεί να θεωρηθεί μοναδική.

Αν εξετάσουμε τα ιστογράμματα που απεικονίζουν τη συχνότητα εμφάνισης των διαφόρων τιμών προβλεπόμενης παραγόμενης ισχύος για τα διάφορα αιολικά πάρκα, παρατηρούμε ότι η ράβδος που περιλαμβάνει τιμές προβλεπόμενης ισχύος μικρότερες από 10% της ονομαστικής, έχει τη μεγαλύτερη και με διαφορά τιμή από τις άλλες. Για όλες τις μεθόδους πρόβλεψης και για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις η τιμή αυτή κυμαίνεται από 24-47% (Διάγραμμα 4.16-4.17.). Αυτό δείχνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών αντιστοιχεί σε ισχύ μικρότερη από 10% ή ακόμα και μηδενική ενώ μεγαλύτερες τιμές ισχύος εμφανίζονται κατά 5-10% του χρόνου, ανά κλάση.



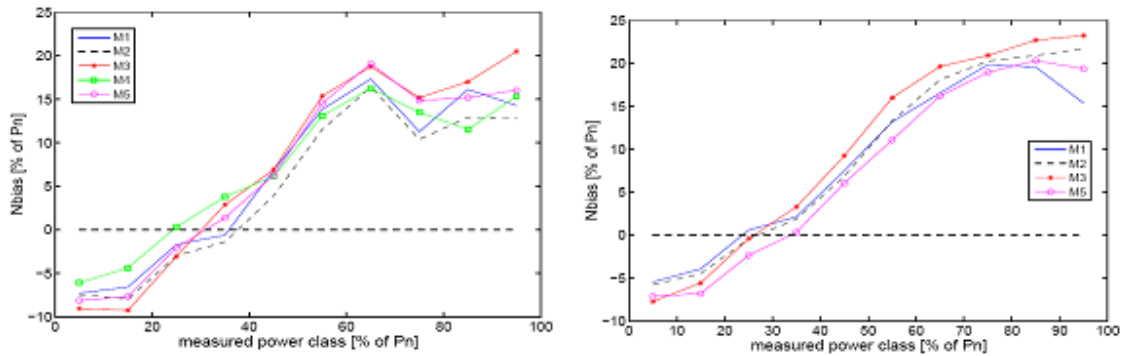
Διάγραμμα 4.16. Ιστογράμματα συχνοτήτων των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών ισχύος, Α/Π Tuno και Klim [32]



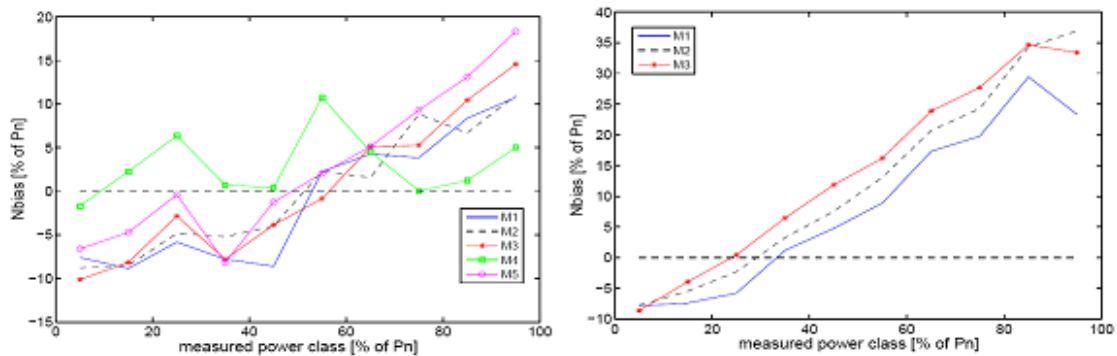
Διάγραμμα 4.1.7. Ιστόγραμμα συχνοτήτων των μετρούμενων και προβλεπόμενων τιμών ισχύος, A/Π Golagh και Sotavento [32]

Από αυτά συμπεραίνει κανείς ότι οι μέθοδοι πρόβλεψης δεν προβλέπουν χαμηλές τιμές ισχύος, όπως συχνά απαιτείται και υπερεκτιμούν την προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ. Σε αντίθεση, όλα τα μοντέλα πρόβλεψης τείνουν να υποτιμούν την ισχύ για υψηλές μετρούμενες τιμές. Επίσης από το ιστόγραμμα συμπεραίνει κανείς ότι ορισμένες μέθοδοι δεν μπορούν να προβλέψουν περισσότερο από το 90% (ή ακόμα και 80%) της εγκατεστημένης ισχύος. Αυτό συνήθως συμβαίνει σε αιολικά πάρκα που δεν παράγουν συχνά μεγάλη ισχύ. Έτσι η έλλειψη δεδομένων στις υψηλές ισχύεις σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα NWP's συχνά υποτιμούν την ταχύτητα, κάνει τις προβλέψεις για αυτές τις τιμές ισχύος αδύνατες.

Στο πλαίσιο εκτίμησης των μοντέλων με βάση την κατανομή του σφάλματος, θα μπορούσε να εξεταστεί κανείς την εξάρτηση της μέσης τιμής τόσο από την μετρούμενη όσο και από την προβλεπόμενη ισχύ. Η πρώτη προσέγγιση σχετίζεται με την ιδέα της εξέτασης των δεσμευμένων κατανομών των προβλέψεων για δεδομένες μετρούμενες ισχύεις $\hat{q}(p|p)$, η οποία δίνει και ένα μέτρο για την ποιότητα της πρόβλεψης. Αυτή αντιστοιχεί στην ικανότητα των μοντέλων να διακρίνουν μεταξύ των παρατηρήσεων. Εξετάζοντας τη μεταβολή της μέσης τιμής συναρτήσει της μετρούμενης ισχύος, παρατηρούμε ότι αυτή αυξάνεται γραμμικά καθώς αυξάνεται η μετρούμενη ισχύς. Είναι ελαφρώς αρνητική για χαμηλές τιμές ισχύος και παίρνει πολύ μεγάλες τιμές για τιμές ισχύος μεγαλύτερες από 50% της ονομαστικής. Όλα τα μοντέλα πρόβλεψης και για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις υπερτιμούν κατά 15%-20% κατά μέσο όρο, την πραγματική παραγόμενη ισχύ σε αυτό το διάστημα τιμών (Διαγράμματα 4.18.-4.19.).



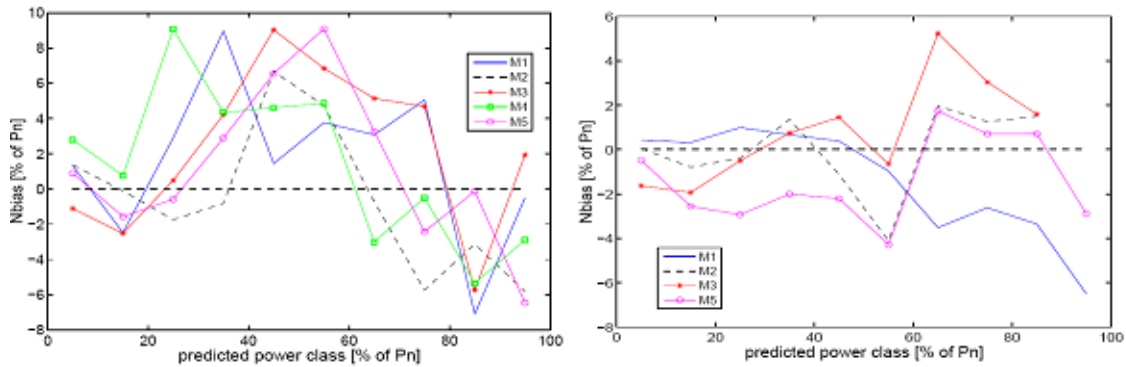
Σχήμα 4.18. Μεταβολή της μέσης τιμής του σφάλματος συναρτήσει της μετρούμενης ισχύος, A/Π Tuno και Klim [33]



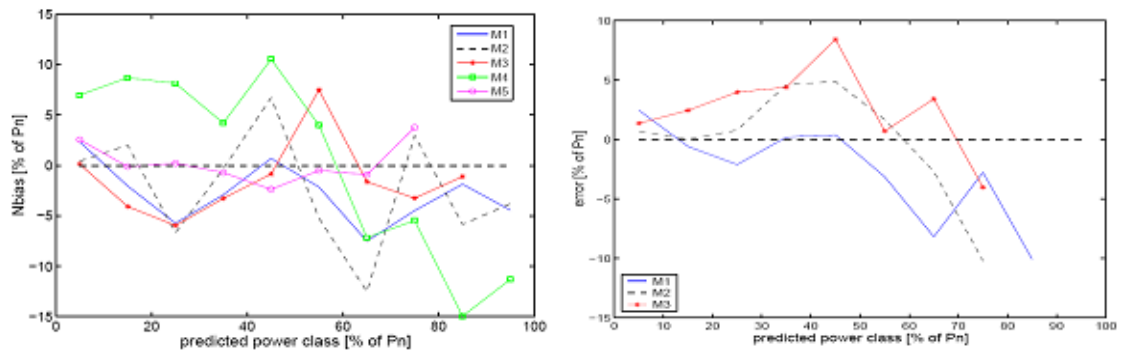
Σχήμα 4.19. Μεταβολή της μέσης τιμής του σφάλματος συναρτήσει της μετρούμενης ισχύος, A/Π Golagh και Sotavento [33]

Η δεύτερη προσέγγιση αντίθετα, σχετίζεται με την ιδέα της εξέτασης των δεσμευμένων κατανομών των μετρήσεων, για δεδομένες τις προβλέψεις $q(\hat{p}|p)$. Αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της αξιοπιστίας των προβλέψεων αιολικής ισχύος και την εξέταση της εξάρτησης του συστηματικού σφάλματος από το επίπεδο προβλεπόμενης ισχύος. Η μέση τιμή του σφάλματος πρόβλεψης ισχύος συναρτήσει της προβλεπόμενης ισχύος παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται μεταξύ -7% και $+9\%$ της ονομαστικής ισχύος και δείχνουν να έχουν θετική τάση στο κατώτερο τμήμα της καμπύλης ισχύος και αρνητικές στο ανώτερο (Διαγράμματα 4.20-4.21). Παρατηρώντας όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, φαίνεται να υπάρχει μια εξάρτηση από την πολυπλοκότητα του εδάφους. Αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε ημιπολύπλοκο ή πολύπλοκο έδαφος παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέση τιμή (bias). Ωστόσο μια σαφής σχέση μεταξύ του επιπέδου προβλεπόμενης ισχύος και μέσης τιμής της πρόβλεψης δεν υπάρχει. Γενικά, ακόμα και αν η αξιοπιστία της μεθόδου δεν είναι ιδανική δεν μπορούμε να αναγνωρίσουμε

μα συστηματική έλλειψη αξιοπιστίας σε συγκεκριμένα τμήματα της καμπύλης ισχύος ή μιας δεδομένης μεθόδου εκτός από τα παραπάνω.

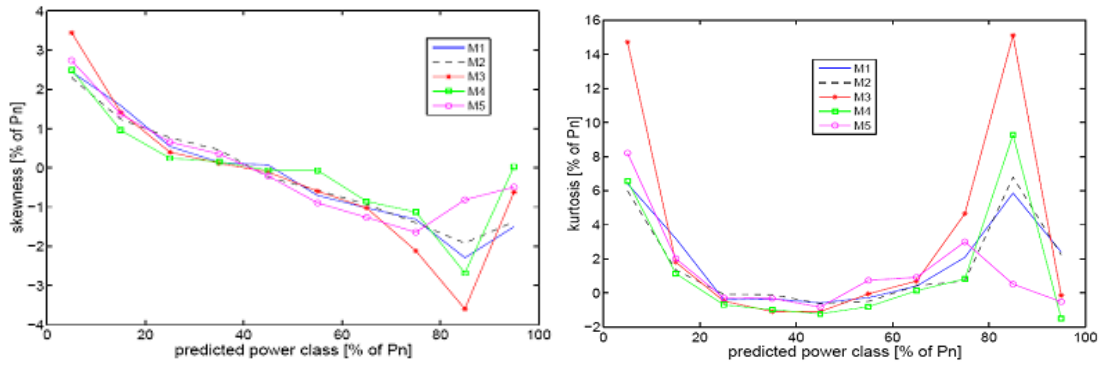


Διάγραμμα 4.20. Μεταβολή της μέσης τιμής του σφάλματος συναρτήσει της προβλεπόμενης ισχύος, A/Π Τυνο και Klim [32]



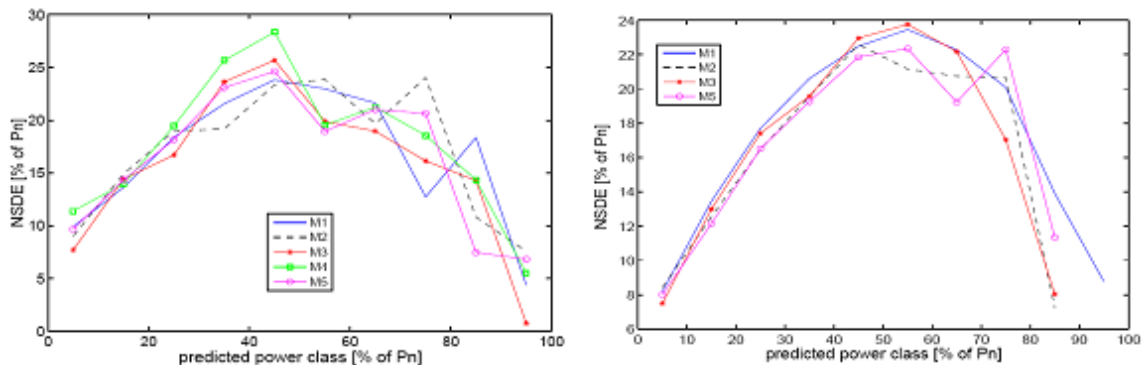
Διάγραμμα 4.21. Μεταβολή της μέσης τιμής του σφάλματος συναρτήσει της προβλεπόμενης ισχύος, A/Π Golagh και Sotavento[32]

Η λοξότητα μεταβάλλεται με το επίπεδο προβλεπόμενης ισχύος. Οι κατανομές εμφανίζουν θετική ασυμμετρία για χαμηλές προβλεπόμενες τιμές και αρνητική, όταν η προβλεπόμενη ισχύς είναι υψηλή. Επίσης, η μη γραμμική διαδικασία επηρεάζει τη διασπορά και την αιχμή των κατανομών. Όσον αφορά την κύρτωση, εμφανίζει υψηλές τιμές κοντά στην ελάχιστη και στη μέγιστη προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ. Οι κατανομές σφάλματος εμφανίζουν σε αυτές τις ζώνες της καμπύλης ισχύος, μεγάλη αιχμή. Στο μέσο της καμπύλης ισχύος, η κύρτωση έχει ελαφρά αρνητικές τιμές, πράγμα που υποδηλώνει ότι οι κατανομές ισχύος είναι πιο επίπεδες από ότι η κανονική κατανομή. Η λοξότητα και η κύρτωση φαίνονται στο διάγραμμα 4.22.

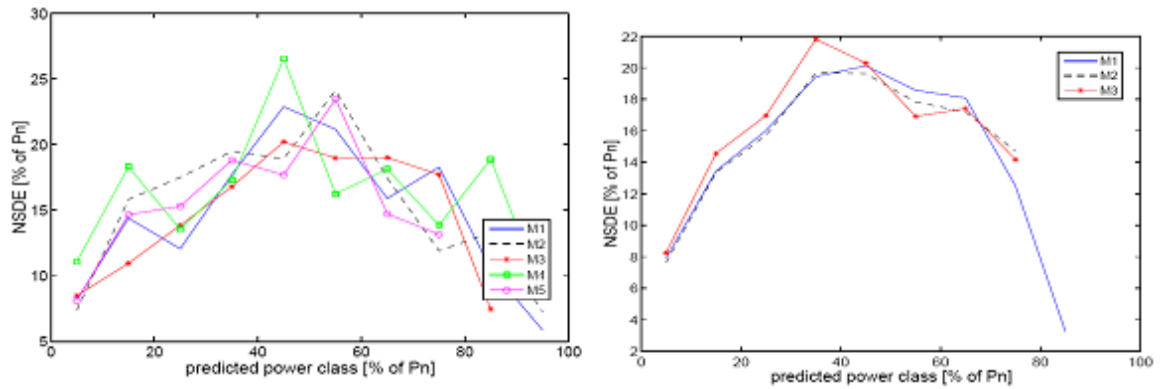


Διάγραμμα 4.22. Λοξότητα και κύρτωση συναρτήσεως της προβλεπόμενης ισχύος [33]

Οι καμπύλες της τυπικής απόκλισης συναρτήσεως της προβλεπόμενης ισχύος είναι σχεδόν συμμετρικές ως προς τον άξονα που περνάει από το 50% της προβλεπόμενης ισχύος (σχήμα 4.23.-4.24.). Για τιμές που αντιστοιχούν στο απότομο τμήμα της καμπύλης ισχύος, η τυπική απόκλιση είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη από ότι εκείνη, που αντιστοιχεί σε τιμές ισχύος στα επίπεδα τμήματα της καμπύλης. Οι τιμές τυπικής απόκλισης και για τα δύο αυτά επίπεδα είναι σχεδόν όμοιες. Ο λόγος μεταξύ αβεβαιότητας στο απότομο τμήμα της καμπύλης ισχύος και εκείνης στο χαμηλό ή υψηλό τμήμα της είναι περίπου ο ίδιος, για όλες τις μεθόδους πρόβλεψης και εξεταζόμενες περιπτώσεις, ακόμα και αν το σχήμα της τυπικής απόκλισης διαφέρει από τη μια εξεταζόμενη περίπτωση στην άλλη. Αυτό μας λέει ότι οι μεταβολές της αβεβαιότητας πρόβλεψης είναι σχετικά παρόμοιες ανεξάρτητα από το αιολικό πάρκο και εξαρτώνται από την διαδικασία μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε ισχύ. Το επίπεδο αβεβαιότητας μπορεί να είναι μεγαλύτερο όταν είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ταχύτητα του ανέμου, αλλά ο τρόπος που η αβεβαιότητα μεταβάλλεται σαν συνάρτηση της προβλεπόμενης ισχύος είναι παρόμοιος.



Διάγραμμα 4.23. Τυπική απόκλιση συναρτήσεως της προβλεπόμενης ισχύος, Α/Π Τυνο και Klim [34]



Διάγραμμα 4.24. Τυπική απόκλιση συναρτήσεων της προβλεπόμενης ισχύος, A/Π Golagh και Sotavento [34]

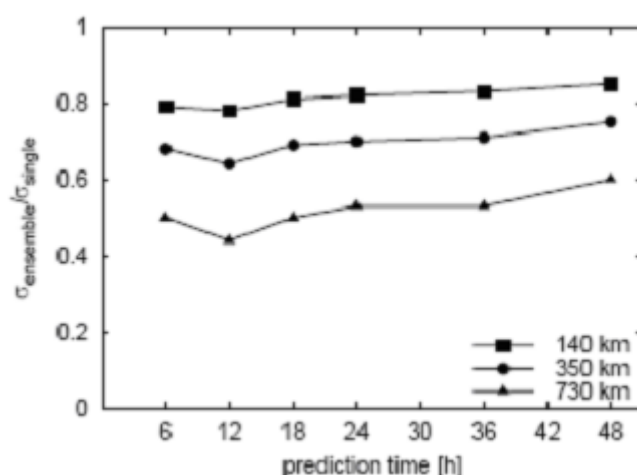
4.2.5. Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και ο αριθμός των αιολικών πάρκων

Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και ο αριθμός των αιολικών πάρκων που περιλαμβάνονται σε αυτή, επηρεάζουν σημαντικά το σφάλμα πρόβλεψης. Η πρόβλεψη της ισχύος για ένα μόνο αιολικό πάρκο ή για ένα σύνολο δεν οδηγεί στο ίδιο επίπεδο αβεβαιότητας. Εξαιτίας γεωγραφικών παραγόντων εξομάλυνσης (Spatial smoothing effect- Φαινόμενο χωρικής εξομάλυνσης), η μεταβλητότητα της παραγόμενης ισχύος μειώνεται και το μέσο επίπεδο σφάλματος πρόβλεψης ελαττώνεται.

Μέχρι τώρα η εκτίμηση του σφάλματος πρόβλεψης της παραγόμενης ισχύος έγινε για μεμονωμένα αιολικά πάρκα. Όμως, σε λειτουργικές συνθήκες είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της συνολικής παραγόμενης ισχύος των Α/Π, που είναι διασπαρμένα σε μια ευρύτερη περιοχή. Με τη διεύρυνση αυτή, τα σφάλματα που υπάρχουν στις μετρήσεις και τις προβλέψεις μεμονωμένων Α/Π αναιρούνται μερικώς. Τα στατιστικά φαινόμενα εξομάλυνσης οδηγούν σε μείωση του σφάλματος πρόβλεψης σε μια περιοχή σε σύγκριση με την τοπική πρόβλεψη. Η **έκταση της περιοχής** και ο **αριθμός των Α/Π** που αυτή περιέχει είναι οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν το ποσοστό μείωσης του σφάλματος. Ωστόσο ύστερα από έρευνα που έγινε από τους Lange, Focken, Mönnich και Waldl [36], η μείωση του σφάλματος πρόβλεψης εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της περιοχής ενδιαφέροντος και όχι από τον αριθμό των αιολικών πάρκων.

Σε μια πρώτη προσέγγιση ερευνήθηκε το φαινόμενο εξομάλυνσης χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα σύνολο 30 αιολικών πάρκων που υπάρχουν στη βόρεια Γερμανία. Οι περιοχές έχουν διαιρεθεί σε δύο διαφορετικών ειδών, σύμφωνα με την χρησιμότητα τους. Οι μικρότερες περιοχές με διάμετρο 140 km περιλαμβάνουν 3-5 σημεία μέτρησης η καθεμία. Οι ευρύτερες περιοχές έχουν περίπου 350 km διάμετρο και 5-7 σημεία η καθεμία. Για σύγκριση δημιουργήθηκε μια πολύ μεγάλη περιοχή που περιλαμβάνει όλα τα σημεία και η οποία έχει έκταση περίπου 730 km.

Η προβλεπόμενη και μετρούμενη παραγόμενη ισχύς της περιοχής υπολογίζεται, προσθέτοντας τις χρονοσειρές για κάθε Α/Π, που περιλαμβάνεται στην περιοχή και διαιρώντας με τον αριθμό των Α/Π. Η δεδομένη διασπορά μεταξύ των δύο αυτών συνολικών χρονοσειρών (προβλεπόμενων κα μετρούμενων) δίνει το σφάλμα πρόβλεψης της περιοχής. Το σχήμα 4.3. δείχνει τα αποτελέσματα για διαφορετικές εκτάσεις και χρονικούς ορίζοντες.



Σχήμα 4.3. Λόγος τυπικών αποκλίσεων μεμονωμένων Α/Π και συνόλου Α/Π για περιοχές διαφορετικής έκτασης συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης [36]

Για το δοσμένο σύνολο, ο λόγος $\sigma_{\text{σύνολο}}/\sigma_{\text{μεμονωμένου Α/Π}}$ μειώνεται με την αύξηση της έκτασης της περιοχής, π.χ. για πρόβλεψη έξι ωρών έχει μία μέση τιμή 0,77 για περιοχή 140km, 0,65 για περιοχή 350km και 0,49 για περιοχή 730km. Σε όλες τις περιπτώσεις η μείωση του σφάλματος πρόβλεψης είναι λιγότερο εμφανής για μεγαλύτερες περιόδους πρόβλεψης.

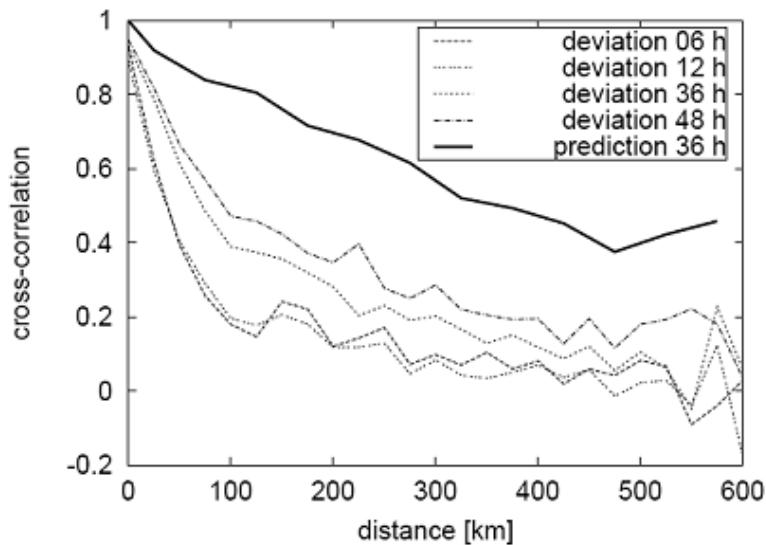
Από την παραπάνω ανάλυση, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχει σημαντική μείωση του σφάλματος πρόβλεψης συγκριτικά με μεμονωμένα αιολικά πάρκα. Για να εξάγει κανείς γενικά συμπεράσματα για άλλες διαμορφώσεις αιολικών πάρκων είναι σκόπιμο να χρησιμοποιήσει τυχαία δείγματα. Αυτό μας επιτρέπει να μεταβάλουμε τον

αριθμό των Α/Π και την έκταση των περιοχών και να δούμε, πώς η μείωση του σφάλματος πρόβλεψης επηρεάζεται από αυτές τις παραμέτρους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε στατιστική περιγραφή του σφάλματος.

Το σημείο-κλειδί που συνδέει την χωρική κατανομή των Α/Π με το σφάλμα πρόβλεψης, είναι η συνάρτηση αλληλοσυσχέτισης r_{xy} της διαφοράς μεταξύ μέτρησης και πρόβλεψης για μεμονωμένα αιολικά πάρκα. Εάν είναι γνωστό το r_{xy} , η διασπορά $\sigma_{\text{συνόλου}}$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το σ_x των μεμονωμένων Α/Π σύμφωνα με τη σχέση 4.2.

$$\sigma_{\text{συνόλου}}^2 = \frac{1}{N^2} \sum_x \sum_y \sigma_x \sigma_y r_{xy} \quad (4.2.)$$

Αρχικά καθορίζεται η αλληλοσυσχέτιση των μετρούμενων δεδομένων. Για κάθε ζευγάρι από τα 30 Α/Π υπολογίζεται το r_{xy} και ταξινομείται με βάση την απόσταση xy . Το σχήμα 4.3. δίνει την αλληλοσυσχέτιση συναρτήσει της απόστασης για διάφορους ορίζοντες πρόβλεψης.

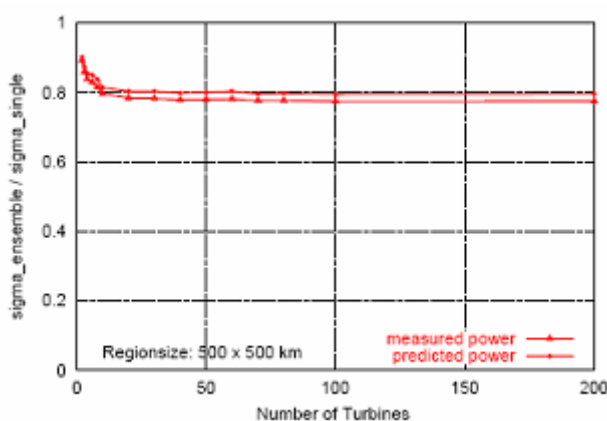


Σχήμα 4.3. Αλληλοσυσχέτιση συναρτήσει της απόστασης [36]

Η καμπύλη μειώνεται πιο αργά για μεγαλύτερα διαστήματα πρόβλεψης, υποδηλώνοντας ένα αυξανόμενο συστηματικό σφάλμα που ενυπάρχει στο NWP. Μπορεί κανείς να αποκτήσει μια επαρκή περιγραφή για την αλληλοσυσχέτιση, προσαρμόζοντας κατάλληλα αναλυτικές συναρτήσεις τις μορφής $r_{xy} = a \cdot e^{-\frac{d}{b}}$ με βάση τα μετρούμενα δεδομένα. Κανονικοποιούμε το σ_x των πλασματικών Α/Π σε μονάδα, το οποίο σημαίνει ότι όλα έχουν την ίδια βαρύτητα. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες των συνόλων του μοντέλου επιλέγονται τυχαία. Κάθε αποτέλεσμα στη συνέχεια

αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή από τα 10 σύνολα με συγκεκριμένη έκταση και αριθμό Α/Π.

Το σχήμα 4.4. δείχνει το λόγο μεταξύ σφάλματος ολόκληρης της περιοχής και μέσου σφάλματος μεμονωμένων αιολικών πάρκων $\sigma_{\text{συνόλου}}/\sigma_{\text{μεμονωμένου Α/Π}}$ για δύο περιοχές με διαφορετική έκταση, συναρτήσει του αριθμού των Α/Π στην περιοχή. Όπως παρατηρείται ο λόγος αυτός φτάνει σε μια στάθμη κορεσμού καθώς αυξάνεται ο αριθμός των Α/Π. Πρακτικά λοιπόν, η μείωση του σφάλματος δεν εξαρτάται από τον αριθμό των Α/Π στην περιοχή, άλλα από την έκταση της περιοχής.



Σχήμα 4.4. Λόγος τυπικής απόκλισης ολόκληρης περιοχής προς μεμονωμένο αιολικό πάρκο συναρτήσει του αριθμού των Α/Π στην περιοχή [36]

Από τα παραπάνω καταλήγει λοιπόν κανείς στο συμπέρασμα, ότι το μέγεθος μείωσης του σφάλματος πρόβλεψης εξαρτάται έντονα από την έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Ο αριθμός των Α/Π που αυτή περιέχει φτάνει σε ένα κορεσμό και μάλιστα για μικρό αριθμό Α/Π. Αυτό σημαίνει ότι μόνο λίγα αιολικά πάρκα είναι αρκετά για να καθορίσουν το μέγεθος βελτίωσης της αιολικής πρόβλεψης.

4.2.6. Άλλοι παράγοντες

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν στο σφάλμα είναι:

- **Η περίοδος πρόβλεψης.** Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την εποχή (χειμώνα- καλοκαίρι) εξαιτίας της διαφοροποίησης της έντασης και των άλλων χαρακτηριστικών του ανέμου.

- **Οι καιρικές συνθήκες.** Οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν την προβλεπόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου και αυτή με τη σειρά της την προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύ.

Σε ορισμένες περιοχές ενδιαφέροντος η αβεβαιότητα της προβλεπόμενης ταχύτητας του ανέμου εξαρτάται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Όπως έχει διαπιστωθεί [35,37] το σφάλμα μπορεί να διαφέρει σημαντικά για διαφορετικές επικρατούσες συνθήκες. Ωστόσο αυτή η συμπεριφορά δεν είναι κοινή για όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος, το γιατί όμως παραμένει ακόμα αναπάντητο. Ο Lange έκανε μια προσπάθεια να κατηγοριοποιήσει τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες σε διαφορετικές κλάσεις ανάλογα με τις μετεωρολογικές μετρήσεις. Έτσι χώρισε τις καιρικές συνθήκες σε 5 ομάδες και για καθεμία από αυτές προέβλεψε το αναμενόμενο σφάλμα. Κατέληξε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο σφάλμα στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου εμφανίζεται στην ομάδα που χαρακτηρίζεται από χαμηλές πιέσεις, ενώ το σφάλμα είναι πολύ μικρότερο στην ομάδα που χαρακτηρίζεται από υψηλές πιέσεις, όπου οι καιρικές συνθήκες είναι πιο στατικές.

4.3. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, μπορεί κανείς να εξάγει συνολικά συμπεράσματα για τους παράγοντες και τον τρόπο με τον οποίο αυτοί επηρεάζουν τα σφάλματα πρόβλεψης παραγόμενης αιολικής ισχύος, καθώς και να κάνει μια ποιοτική σύγκριση των υπαρχόντων μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος.

Η ποιότητα των NWP, η διαδικασία μετατροπής της ταχύτητας του ανέμου σε ισχύ (καμπύλη ισχύος), η πολυπλοκότητα του εδάφους, η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος, ο ορίζοντας πρόβλεψης και οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης παραγόμενης αιολικής ισχύος.

Η πρόβλεψη της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου γίνεται από τα NWP. Αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια από τα μοντέλα πρόβλεψης αιολικής ισχύος για την πρόβλεψη της ισχύος. Σφάλματα που εισάγονται από τα NWP εξαιτίας της μη

κατάλληλης χωρικής ανάλυσης αυτών και εξομάλυνσης των τοπικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής, μεταφέρονται άμεσα στην προβλεπόμενη ισχύ. Στη συνέχεια, η καμπύλη ισχύος επιτείνει το σφάλμα αυτό λόγω της μη γραμμικότητας της και μεταβάλλει τα στατιστικά χαρακτηριστικά του σφάλματος πρόβλεψης. Έτσι το σφάλμα που ενυπάρχει στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου εντείνεται, αν βρισκόμαστε στο απότομο τμήμα της καμπύλης ισχύος ή μειώνεται, αν είμαστε μεταξύ της ταχύτητας που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ και της ταχύτητας αποκοπής ή κάτω από την ταχύτητα ένταξης. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής του σφάλματος επηρεάζονται ιδιαίτερα από το ποσοστό της προβλεπόμενης και μετρούμενης ισχύος. Η μέση τιμή του σφάλματος πρόβλεψης συναρτήσει της μετρούμενης ισχύος αυξάνεται σχεδόν γραμμικά για όλα τα μοντέλα και τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η μέση τιμή του σφάλματος συναρτήσει της προβλεπόμενης ισχύος, δεν εμφανίζει σταθερή συμπεριφορά και λαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Η λοξότητα μειώνεται συναρτήσει της προβλεπόμενης ισχύος. Η τυπική απόκλιση εμφανίζει μια συμμετρία, με άξονα συμμετρίας το 50% της προβλεπόμενης ισχύος, ενώ η κύρτωση έχει μεγάλη τιμή στα χαμηλά και υψηλά επίπεδα προβλεπόμενης ισχύος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ποιότητα πρόβλεψης των NWP επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Έτσι το μεγαλύτερο σφάλμα στην πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου, εμφανίζεται σε καιρικές συνθήκες που επικρατούν χαμηλές πιέσεις, ενώ το σφάλμα είναι πολύ μικρότερο όταν επικρατούν υψηλές πιέσεις, όπου οι καιρικές συνθήκες είναι πιο στατικές. Πρέπει ωστόσο να παρατηρηθεί ότι τα NWP προβλέπουν το ίδιο καλά και ισχυρούς και ασθενείς ανέμους.

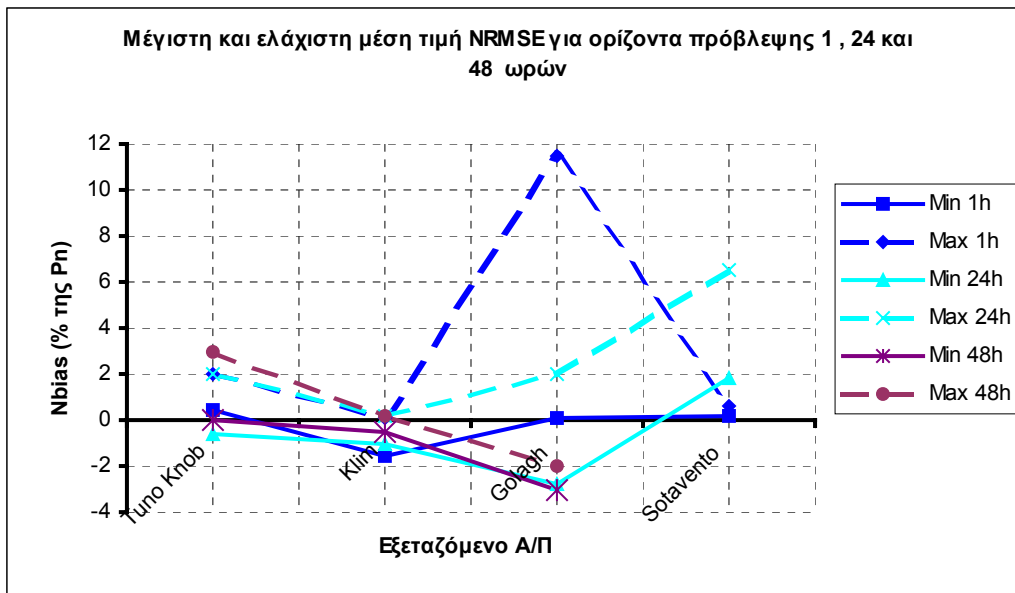
Η πολυπλοκότητα του εδάφους επηρεάζει ιδιαίτερα το σφάλμα πρόβλεψης. Καθώς αυξάνεται η πολυπλοκότητα του εδάφους, αυξάνεται και το σφάλμα. Αυτό οφείλεται και σε αύξηση του σφάλματος που εισάγεται από τις μετεωρολογικές προβλέψεις.

Όπως είναι αναμενόμενο, το σφάλμα πρόβλεψης αυξάνεται με τον ορίζοντα πρόβλεψης. Ωστόσο παρατηρείται ότι τα φυσικά μοντέλα εμφανίζουν μεγαλύτερο σφάλμα σε βραχυχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης από ότι τα στατιστικά, κάτι το οποίο για μακροχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης δεν ισχύει. Παράλληλα και για τα δύο είδη μοντέλων, η μέση τιμή του σφάλματος για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης είναι πολύ μικρή (κυμαίνεται μεταξύ $\pm 2\%$ της εγκατεστημένης ισχύος) εξαιτίας της χρήσης στατιστικών συναρτήσεων ή μοντέλων MOS και ότι η τυπική απόκλιση είναι εκείνη που κυρίως συνεισφέρει στο σφάλμα.

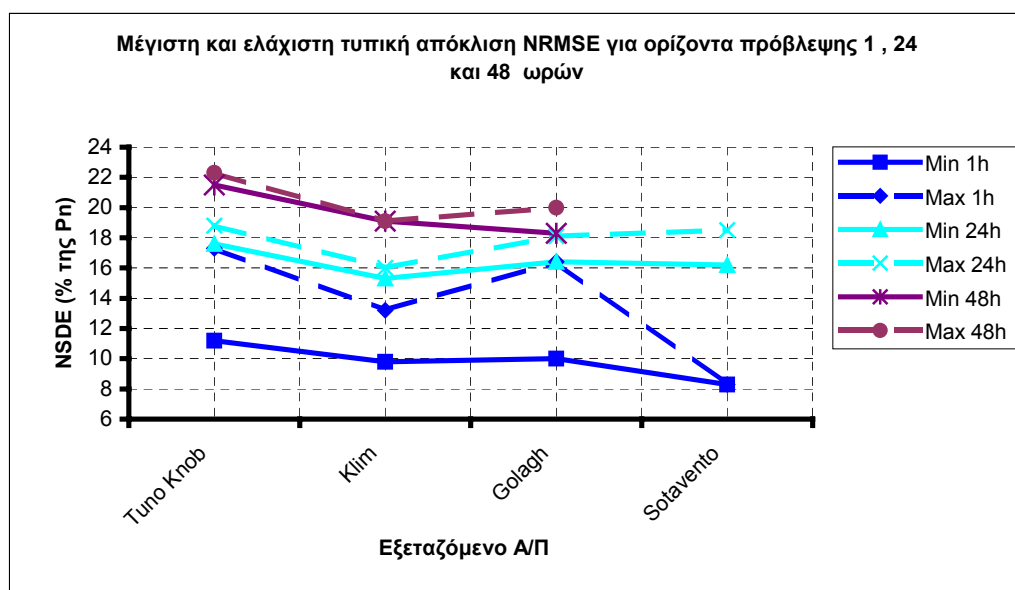
Τέλος, η έκταση της εξεταζόμενης περιοχής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το σφάλμα πρόβλεψης. Αυτό μειώνεται αισθητά με την αύξηση της έκτασης της περιοχής, ενώ η βελτίωση αυτή μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ορίζοντας πρόβλεψης. Η μείωση του σφάλματος με την αύξηση της έκτασης της περιοχής ενδιαφέροντος, οφείλεται στο ότι τα δεδομένα για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου είναι πιο ακριβή για μια ευρύτερη περιοχή από ότι σε τοπικό επίπεδο.

Θα μπορούσε κανείς να πει, ότι οι περισσότεροι από τους παράγοντες που επηρεάζουν τα σφάλματα πρόβλεψης αιολικής ισχύος, οφείλονται άμεσα ή έμμεσα στα NWP. Για το λόγο αυτό βελτίωση των υπαρχόντων NWP ή χρήση κατάλληλων φίλτρων θα βελτίωνε σημαντικά το σφάλμα πρόβλεψης.

Από όσα αναφέρθηκαν μπορεί κανείς να κάνει μια εκτίμηση για το μέγεθος του σφάλματος την επόμενη ώρα, μια ημέρα (24 ώρες) και δύο ημέρες (48 ώρες) μετά. Από την εξίσωση $RMSE^2 = bias^2 + SDE^2 = bias^2 + sdbias^2 + disp^2$ εκτιμάται η μεταβολή της μέσης τιμής (Nbias) και της τυπικής απόκλισης (NSDE) της ρίζας του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Από τα αποτελέσματα του προγράμματος ANEMOS καταλήγουμε στα εξής: Η μέση τιμή του σφάλματος, παρουσιάζει ανεξάρτητα από τον ορίζοντα πρόβλεψης μικρότερη τιμή $-3,8\%$ (της P_{nom}) και μεγαλύτερη $11,5\%$ (της P_{nom}). Ωστόσο ο μέσος όρος των μέγιστων μέσων τιμών για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, τα μοντέλα και τον ορίζοντα πρόβλεψης είναι $2,5\%$ και των ελαχίστων $-0,7\%$. Αναλυτικά, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του Nbias για ορίζοντα πρόβλεψης μιας, 24 και 48 ωρών δίνεται στο διάγραμμα 4.25. Η τυπική απόκλιση εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή $23,3\%$ και μικρότερη $8,3\%$. Ωστόσο, ο μέσος όρος των μέγιστων τιμών των τυπικών αποκλίσεων για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, τα μοντέλα και τον ορίζοντα πρόβλεψης είναι 17% και των ελαχίστων 15% . Αναλυτικά, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης για ορίζοντα πρόβλεψης μιας, 24 και 48 ωρών δίνεται στο διάγραμμα 4.26.

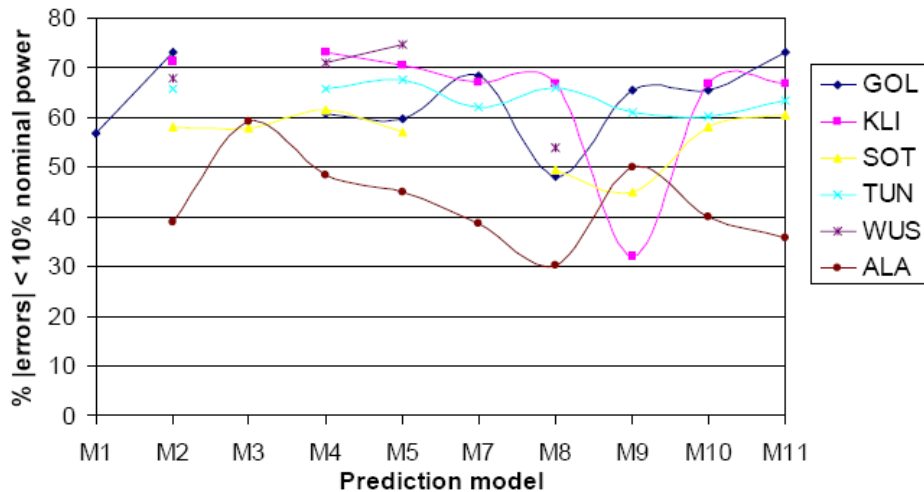


Διάγραμμα 4.25. Μέγιστη και ελάχιστη μέση τιμή NRMSE



Διάγραμμα 4.26. Μέγιστη και ελάχιστη τιμή τυπικής απόκλισης NRMSE

Τελειώνοντας μπορεί να γίνει μια ποιοτική σύγκριση των εξεταζόμενων μοντέλων. Για κάθε εξεταζόμενο αιολικό πάρκο ήταν διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης διαθέσιμα. Παρόλο που δεν αναλύθηκε ο ίδιος αριθμός μοντέλων για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση και εξετάστηκαν διαφορετικές χρονικές περιόδους, μπορεί να γίνει μια ποιοτική σύγκριση των μοντέλων. Στο διάγραμμα 4.27, δίνεται η σχετική επίδοση του κάθε μοντέλου για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, σε όρους % των απόλυτων σφαλμάτων που είναι κάτω από 10% της ονομαστικής ισχύος.



Σχήμα 4.27. Επίδοση των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης. Ποιοτική σύγκριση [33]

Για καθεμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις η ιδανική επίδοση αποκτάται από συνδυασμό διαφορετικών μοντέλων πρόβλεψης. Με άλλα λόγια, κανένα από τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν δεν είχε την καλύτερη επίδοση για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης ή την εξεταζόμενη περίπτωση. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι συνδυασμός των υπάρχοντων μοντέλων πρόβλεψης θα μπορούσε να οδηγήσει στο βέλτιστο αποτέλεσμα για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

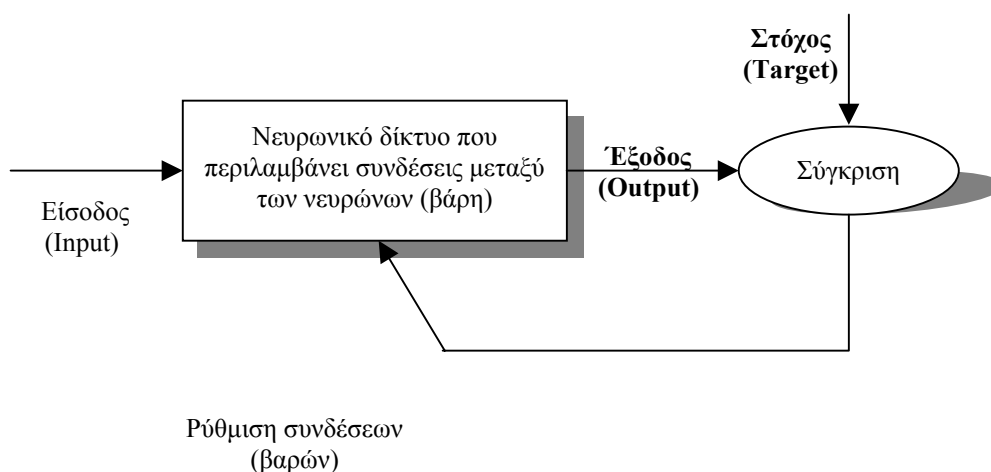
Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται συνοπτικά η θεωρία των νευρωνικών δικτύων και η διαδικασία υλοποίησης ενός τέτοιου δικτύου συνάρτησης ακτινικής βάσης στο MATLAB, για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Το απλό αυτό μοντέλο, εφαρμόστηκε σε τρία διαφορετικά Α/Π για να εκτιμηθεί η ικανότητα πρόβλεψης του.

5.1. Θεωρία νευρωνικών δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από απλά στοιχεία, τα οποία λειτουργούν παράλληλα. Πηγή έμπνευσης των στοιχείων αυτών, είναι βιολογικά νευρικά συστήματα. Όπως και στη φύση, η χρήση του δικτύου εξαρτάται άμεσα από τις συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων. Μπορούμε να εκπαιδεύσουμε ένα νευρωνικό δίκτυο έτσι ώστε να παρουσιάζει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις τιμές των συνδέσεων (βαρών) ανάμεσα στα στοιχεία από τα οποία αυτό αποτελείται. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να λύσουν δύσκολα προβλήματα όπως αναγνώριση, ταύτιση, κατηγοριοποίηση, πρόβλεψη και έλεγχος. Για το λόγο αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα πεδία της ανθρώπινης δραστηριότητας, στη ρομποτική, την αεροναυπηγική, την ηλεκτρονική, την οικονομία, την ιατρική, τις τηλεπικοινωνίες, τις κατασκευές.

Τα νευρωνικά δίκτυα συνήθως, ρυθμίζονται (εκπαιδεύονται) έτσι ώστε ένα συγκεκριμένο δεδομένο εισόδου να οδηγεί σε ένα επίσης συγκεκριμένο επιθυμητό αποτέλεσμα-στόχο. Η βασική αρχή λειτουργίας των νευρωνικών δικτύων παρουσιάζεται στο σχήμα 5.1. Το δίκτυο ρυθμίζεται, με βάση τη σύγκριση της εξόδου και του στόχου, μέχρι η έξοδος του να ταυτίζεται τελικά με το στόχο (target). Πολλά ζευγάρια τιμών, δεδομένα εισόδου - στόχοι, χρησιμοποιούνται για να εκπαιδεύσουν το νευρωνικό δίκτυο. Η εκπαίδευση του νευρωνικού ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να είναι είτε ομαδική είτε προσθετική (προσαρμοστική). Η πρώτη

γίνεται μεταβάλλοντας τα βάρη (weights) και τα σφάλματα (biases) λαμβάνοντας υπόψη όλα τα διανύσματα δεδομένων εισόδου, ενώ η δεύτερη μεταβάλλει τα βάρη και τα σφάλματα αναλόγως, μετά από κάθε ξεχωριστό διάνυσμα εισόδου.



Σχήμα 5.1. Βασική αρχή λειτουργίας νευρωνικών δικτύων

Ένα νευρωνικό δίκτυο ανάλογα με τη χρησιμότητα του, μπορεί να έχει ως δεδομένα εισόδου μονόμετρα ή διανυσματικά μεγέθη, να αποτελείται από έναν ή περισσότερους νευρώνες, οι οποίοι με τη σειρά τους να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα επίπεδα και τέλος να χρησιμοποιεί διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς κατά περίπτωση. Το νευρωνικό μοντέλο που κατασκευάστηκε για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής στη διπλωματική αυτή, συμπεριλαμβάνεται σε μια ξεχωριστή κατηγορία δικτύων, τα λεγόμενα δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης (radial basis function networks) και για το λόγο αυτό η θεωρία των νευρωνικών δικτύων θα περιοριστεί σε αυτή.

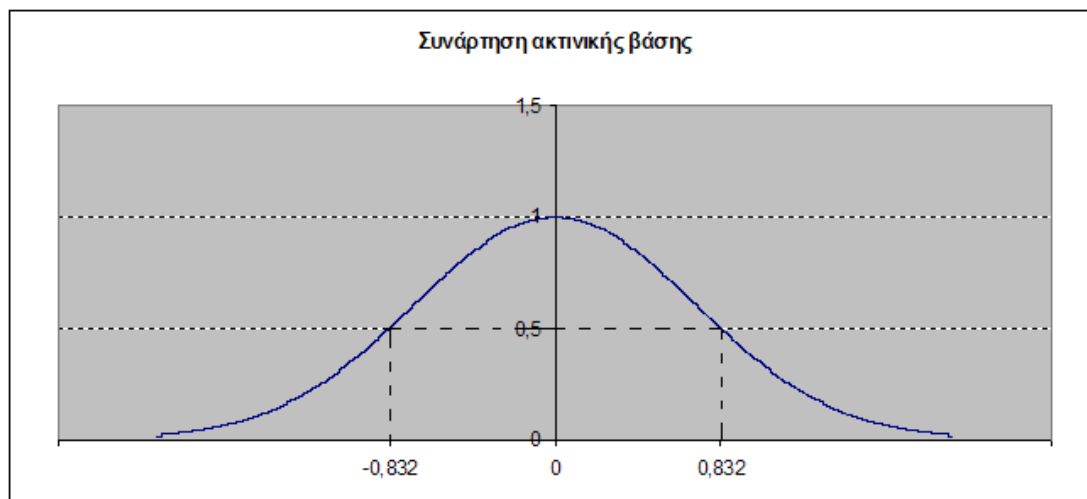
5.2. Δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης – Radial basis function Networks (RBF)

Ένα νευρωνικό δίκτυο ακτινικής βάσης έχει R διανυσματικά δεδομένα εισόδου και αποτελείται από δύο επίπεδα, το κρυφό επίπεδο ακτινικής βάσης (hidden layer), που έχει S_1 νευρώνες και το γραμμικό επίπεδο εξόδου (linear output layer), που έχει S_2 νευρώνες. Το όρισμα στη συνάρτηση μεταφοράς δεν είναι απλά τα δεδομένα εισόδου, αλλά η διανυσματική (ευκλείδεια) απόσταση ανάμεσα στο διάνυσμα βάρους w και στο διάνυσμα εισόδου p , πολλαπλασιασμένο με το bias. Τα δεδομένα εισόδου

στην διανυσματική απόσταση, είναι το διάνυσμα εισόδου p και ο πίνακας-γραμμή του βάρους και η έξοδος της ένα διάνυσμα που έχει S_1 στοιχεία. Η έξοδος πολλαπλασιάζεται στη συνέχεια με το bias και αποτελεί το δεδομένο εισόδου στην ακτινικής βάσης συνάρτηση μεταφοράς (radial basis transfer function) του δικτύου. Αυτή η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται από τη σχέση 5.1.

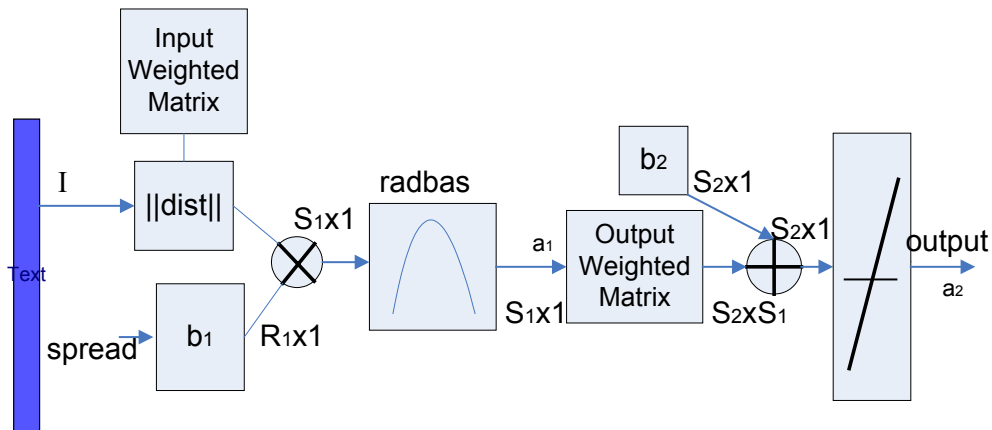
$$radbas(n) = e^{-n^2} \quad (5.1.)$$

και έχει μέγιστο 1 όταν η είσοδος της είναι ίση με το μηδέν (Διάγραμμα 5.1.).



Διάγραμμα 5.1. Συνάρτηση μεταφοράς RBF κρυφού επιπέδου νευρωνικού δικτύου

Καθώς η απόσταση ανάμεσα στο w και το p μειώνεται, η έξοδος αυξάνεται. Έτσι ένας τέτοιου τύπου νευρώνας αντιδρά σαν ανιχνευτής που δίνει αποτέλεσμα ίσο με τη μονάδα, όταν η είσοδος p ισούται με το διάνυσμα βάρους w . Το bias επιτρέπει την προσαρμογή της ευαισθησίας του νευρώνα. Για παράδειγμα, εάν ο νευρώνας είχε bias 0,1 θα είχε έξοδο 0,5 για κάθε διάνυσμα εισόδου, p με διανυσματική απόσταση 8,326 ($0,8326/b$) από το διάνυσμα βαρών του, w . Το δεύτερο επίπεδο του νευρωνικού δικτύου είναι γραμμικό και έχει ως δεδομένα εισόδου, τα δεδομένα εξόδου του κρυφού επιπέδου πολλαπλασιασμένα με τον πίνακα βαρών των δεδομένων εξόδου και προσαυξημένα κατά το bias. Αυτό είναι και το όρισμα της γραμμικής συνάρτησης μεταφοράς του επιπέδου αυτού. Ένα δίκτυο ακτινικής συνάρτησης βάσης φαίνεται στο σχήμα 5.2.



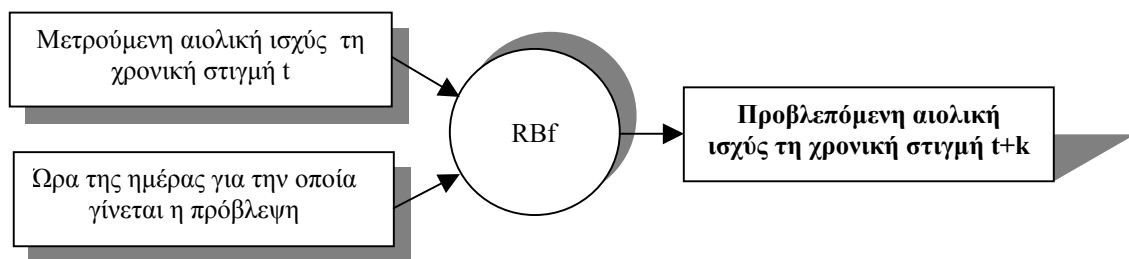
Σχήμα 5.2. Δίκτυο συνάρτησης ακτινικής βάσης

5.3. Νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

5.3.1. Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο που υλοποιήθηκε στη διπλωματική αυτή και χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής και τον υπολογισμό των σφαλμάτων της είναι, όπως αναφέρθηκε, ένα νευρωνικό δίκτυο συνάρτησης ακτινικής βάσης. Ως τέτοιο αποτελείται από δύο επίπεδα. Στο κρυφό επίπεδο το set εκπαίδευσης διαιρείται σε οντότητες και ο πυρήνας της καθεμίας αποτελεί τον πίνακα βάρους, κάτι που πραγματοποιείται με την εύρεση της Ευκλείδειας απόστασης κάθε διανύσματος εισόδου του set εκπαίδευσης. Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, λόγω έλλειψης μετεωρολογικών δεδομένων, είναι η τιμή της μετρούμενης αιολικής παραγωγής τη χρονική στιγμή t (δηλαδή k ώρες πριν την ώρα της πρόβλεψης) και η ώρα της ημέρας για την οποία γίνεται αυτή. Με δοκιμές βρέθηκε ότι για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος (μείωση του σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών), η χρήση ενός δικτύου αποτελούμενο από 9 νευρώνες είναι ιδανική. Στο δεύτερο επίπεδο το δίκτυο είναι γραμμικό και εκπαιδεύεται με τις πραγματικές τιμές της αιολικής ισχύος (διάνυσμα στόχος). Ο συνδυασμός μη παρακολουθούμενης εκπαίδευσης στο πρώτο (κρυφό) επίπεδο και παρακολουθούμενης στο δεύτερο κάνει τα RBF δίκτυα κατάλληλα για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, όπως η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής.

Για την υλοποίηση του μοντέλου πρόβλεψης χρειάστηκαν λοιπόν ένα set εκπαίδευσης (training set) και ένα set εκτίμησης (test set). Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Έχοντας ως δεδομένα εισόδου την μετρούμενη αιολική παραγωγή k ώρες πριν την πρόβλεψη και την ώρα της ημέρας για την οποία γίνεται η πρόβλεψη και ως στόχο την πραγματική τιμή της αιολικής παραγωγής, εκπαιδεύτηκε ένα νευρωνικό δίκτυο με τη συνάρτηση `newrb` του Neural Network Toolbox του Matlab. Η συνάρτηση `newrb` λειτουργεί επαναληπτικά δημιουργώντας ένα νευρώνα σε κάθε μονάδα χρόνου. Οι νευρώνες προστίθενται στο δίκτυο είτε μέχρι το σφάλμα να γίνει μικρότερο από τη δεδομένη τιμή που έχουμε ορίσει, είτε μέχρι να φθάσουμε τον επιθυμητό αριθμό νευρώνων (στην περίπτωση μας 9). Αφού έχει δημιουργηθεί το επιθυμητό νευρωνικό δίκτυο, το test set χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα της πρόβλεψης που παρέχει το νευρωνικό αυτό δίκτυο. Η δομή του μοντέλου πρόβλεψης φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3. Δομή του μοντέλου πρόβλεψης

Με τη βοήθεια του μοντέλου αυτού έγινε η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για τρία διαφορετικά αιολικά πάρκα σε διαφορετικές χώρες (Ιρλανδία, Δανία, Ισπανία), για το οποία υπήρχαν διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα εισόδου. Το set εκπαίδευσης καθενός αιολικού πάρκου αποτελείται από στοιχεία μετρούμενης αιολικής παραγωγής προηγούμενων ετών. Για τα δύο από αυτά (Wind park 1 και Wind park 2), υπολογίστηκε η προβλεπόμενη παραγωγή για έναν ολόκληρο χρόνο, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι ανεπηρέαστα από πιθανή εποχικότητα του ανέμου. Για το τρίτο αιολικό πάρκο (Wind park 3) τα δεδομένα δεν ήταν επαρκή για κάτι τέτοιο και έτσι η πρόβλεψη έγινε μόνο για τέσσερις μήνες του έτους. Ο ορίζοντας πρόβλεψης (λόγω έλλειψης μετεωρολογικών δεδομένων) περιορίστηκε στις 12 ώρες. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα σφάλματα πρόβλεψης, όπως αυτά ορίστηκαν στο πλαίσιο

εκτίμησης, και οι κατανομές τους, συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το νευρωνικό μοντέλο που επιλέχτηκε δεν αποτελεί κατ' ανάγκη το μοναδικό, αφού αυτό εξαρτάται από το επιλεγμένο set εκπαίδευσης, τον αριθμό των νευρώνων και την επιλεγμένη διασπορά. Ωστόσο για τα συγκεκριμένα διαθέσιμα δεδομένα, τα αποτελέσματα του είναι ικανοποιητικά. Στις παραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν για κάθε αιολικό πάρκο και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από το μοντέλο Persistence.

5.3.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα χαρακτηριστικά των τριών αιολικών πάρκων, για τα οποία έγινε η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.1.

	Wind park 1 ²	Wind park 2	Wind park 3
Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	17560	21000	15000
Συντελεστής τραχύτητας (RIX)	7	0	7,3
Training Set (Πλήθος στοιχείων)	8760 (1 έτος)	8760 (1 έτος)	2903 (4 μήνες)
Test Set (Πλήθος στοιχείων)	8760 (1 έτος)	8760 (1 έτος)	2928 (4 μήνες)

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά αιολικών πάρκων

Χρησιμοποιώντας το Set εκπαίδευσης του κάθε αιολικού πάρκου, εκπαιδεύθηκε ένα ξεχωριστό νευρωνικό δίκτυο για καθένα από αυτά, με τον απαραίτητο αριθμό νευρώνων και την κατάλληλη διασπορά. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του Set εξέτασης, προβλέφθηκε η αιολική παραγωγή για ορίζοντα πρόβλεψης μιας μέχρι δώδεκα ωρών. Υπολογίστηκε το κανονικοποιημένο μέσο απόλυτο σφάλμα (NMAE) και η κανονικοποιημένη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (NRMSE), έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ του εκάστοτε αιολικού πάρκου. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν, είναι αυτοί που ορίστηκαν από το πρωτόκολλο εκτίμησης της απόδοσης των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος [25] και δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις 5.2. και 5.3. Τα σφάλματα αυτά συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης δίνονται στον πίνακα 5.2. και

² Το Wind park 1 είναι το αιολικό πάρκο Sotavento στην Ισπανία, όπως αυτό περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1.1. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση είναι μετρούμενες ωριαίες τιμές για το έτος 2005 και 2006, όπως προέκυψαν από το [47].

στα διαγράμματα 5.2α. και 5.2β.

$$NMAE(k) = \frac{1}{P_{nom}} \left(\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} |e_{t+k/t}| \right) \quad (5.2.)$$

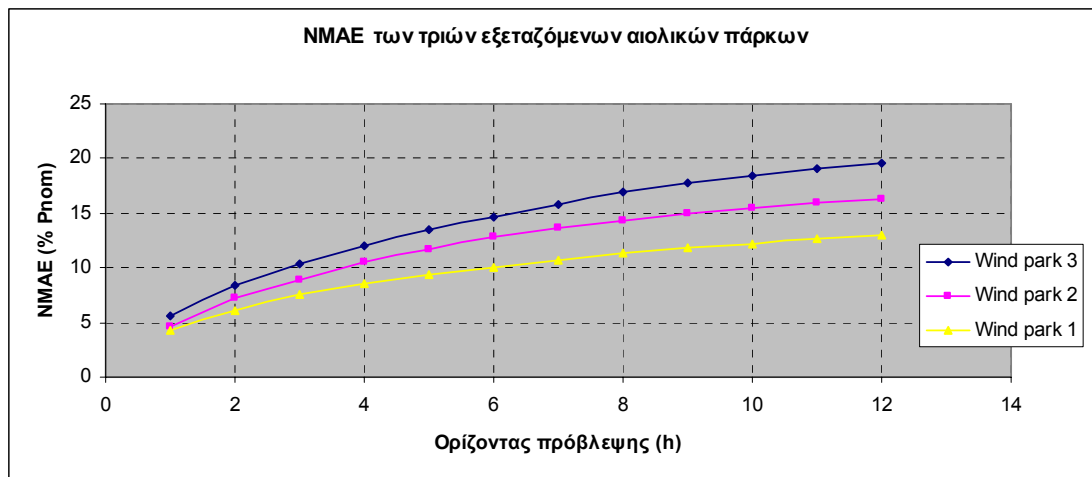
$$NRMSE(k) = NMSE(k)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{P_{nom}} \left[\left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5.3.)$$

	Wind park 1	
Ορίζοντας πρόβλεψης k (h)	NMAE (% P_{nom})	NRMSE (% P_{nom})
1	4,2	6,3
2	6,1	8,9
3	7,5	10,5
4	8,5	11,7
5	9,3	12,7
6	10,1	13,6
7	10,7	14,3
8	11,3	14,9
9	11,8	15,4
10	12,2	15,9
11	12,6	16,3
12	13,0	16,7

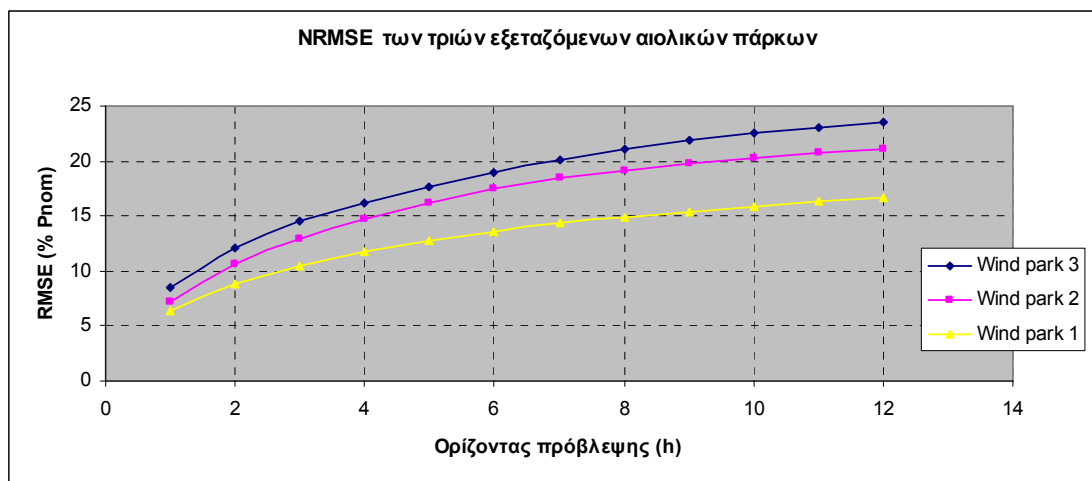
	Wind park 2	
Ορίζοντας πρόβλεψης k (h)	NMAE (% P_{nom})	NRMSE (% P_{nom})
1	4,65	7,26
2	7,18	10,65
3	8,96	12,94
4	10,45	14,75
5	11,66	16,20
6	12,76	17,44
7	13,58	18,42
8	14,31	19,14
9	14,92	19,76
10	15,44	20,31
11	15,91	20,78
12	16,27	21,12

	Wind park 3	
Ορίζοντας πρόβλεψης k (h)	NMAE (% P _{nom})	NRMSE (% P _{nom})
1	5,62	8,45
2	8,42	12,17
3	10,40	14,53
4	11,98	16,18
5	13,43	17,68
6	14,68	18,96
7	15,80	20,09
8	16,91	21,08
9	17,78	21,89
10	18,39	22,50
11	19,11	23,07
12	19,57	23,58

Πίνακας 5.2. NMAE και NRMSE νευρωνικού δικτύου και για τα τρία A/Π



Διάγραμμα 5.2α. NMAE συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης για τα τρία A/Π



Διάγραμμα 5.2β. NRMSE συναρτήσεως του ορίζοντα πρόβλεψης για τα τρία Α/Π

Όπως αναμενόταν, το σφάλμα πρόβλεψης (είτε NMAE είτε NRMSE) αυξάνεται με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης και έχει μια σχεδόν γραμμική συμπεριφορά. Για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας το αιολικό πάρκο 1, εμφανίζει NMAE ίσο με 4,2 % της ονομαστικής ισχύος, ενώ το αντίστοιχο σφάλμα για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών είναι 13%. Για το αιολικό πάρκο 2, τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 4,65% και 16,27% και για το αιολικό πάρκο 3, 5,62% και 19,57%. Από τα ποσοστά αυτά συμπεραίνει κανείς ότι το NMAE μέσα σε ορίζοντα 12 ωρών σχεδόν τριπλασιάζεται. Η συμπεριφορά του NRMSE και για τα τρία αιολικά πάρκα είναι ανάλογη με αυτή του NMAE, με το πρώτο να είναι μεγαλύτερο από το δεύτερο. Παράλληλα από τα διαγράμματα φαίνεται μια εξάρτηση του μεγέθους του σφάλματος από την ποιότητα του εδάφους, ωστόσο εξαιτίας του μικρού όγκου διαθέσιμων δεδομένων δεν μπορεί να εξαχθεί κανείς ασφαλή συμπεράσματα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά, με τα αντίστοιχα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία για εμπορικά εργαλεία πρόβλεψης, προκύπτει ότι είναι ικανοποιητικά. Το νευρωνικό αυτό δίκτυο, αν και ιδιαίτερα απλό, έχει καλύτερη επίδοση από τα φυσικά μοντέλα για σύντομους ορίζοντες πρόβλεψης, ενώ συναγωνίζεται καλά τα αντίστοιχα σφάλματα των στατιστικών. Βέβαια καθώς ο ορίζοντας πρόβλεψης αυξάνεται, τα σφάλματα αυτά αποκλίνουν. Κάτι τέτοιο άλλωστε, είναι αναμενόμενο, αφού το μοντέλο που υλοποιήθηκε εδώ, στερείται μετεωρολογικών δεδομένων. Τα NWP's δεδομένα είναι αυτά που κάνουν τις προβλέψεις ακριβείς για μακροχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης. Μια συγκριτική παρουσίαση των σφαλμάτων των εμπορικών

μοντέλων και του νευρωνικού που υλοποιήθηκε στην διπλωματική, γίνεται στον πίνακα 5.3. για ορίζοντα πρόβλεψης μίας και δώδεκα ωρών.

ΣΦΑΛΜΑ	ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ (H)	WIND PARK 1	WIND PARK 2	WIND PARK 3
Εμπορικά μοντέλα				
NMAE (%)	1h	7,5-14	4,7-9	6,5-16
	12h	11-20	10-11,5	9-15
NRMSE (%)	1h	8,5	9,8-13,4	10-20
	12h	15,7-16,7	13,2-14	14-16
Νευρωνικό δίκτυο				
NMAE (%)	1h	4,2	4,65	5,62
	12h	13	16,27	19,57
NRMSE (%)	1h	6,3	7,26	8,45
	12h	16,7	21,12	23,58

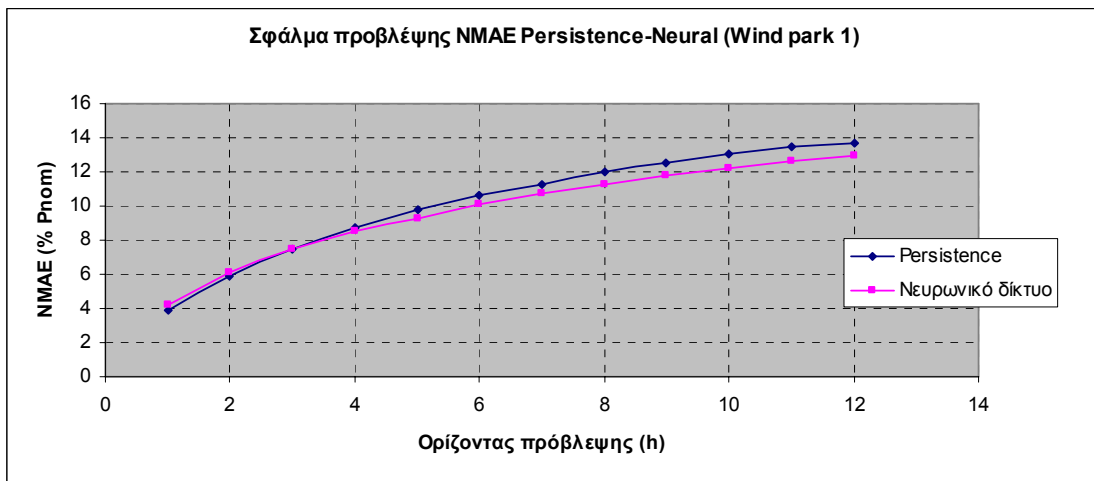
Πίνακας 5.3. Συγκριτική παρουσίαση σφαλμάτων εμπορικών μοντέλων και νευρωνικού μοντέλου

Για την εκτίμηση της επίδοσης του νευρωνικού δικτύου συγκρίνουμε την επίδοση του με αυτή του Persistence. Στα διαγράμματα 5.3. έως 5.8. φαίνεται η συμπεριφορά του μοντέλου συγκριτικά με αυτή του Persistence και για τα τρία εξεταζόμενα αιολικά πάρκα. Για το αιολικό πάρκο 1 το NMAE του Persistence για ορίζοντα πρόβλεψης μίας και δύο ωρών, είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του νευρωνικού. Για ορίζοντα πρόβλεψης μεγαλύτερο από αυτό των τριών ωρών, το νευρωνικό δίκτυο έχει μικρότερο σφάλμα NMAE και άρα καλύτερη επίδοση. Η βελτίωση του (Improvement) σε σχέση με το Persistence για ορίζοντα πρόβλεψης 4 μέχρι 12 ωρών είναι 2,3% και 5,3%, αντίστοιχα. Ως προς το NRMSE, η συμπεριφορά των δύο μοντέλων είναι όμοια για ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι και τριών ωρών, ενώ για μεγαλύτερους ορίζοντες το νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζει βελτίωση που κυμαίνεται μεταξύ 2,5% και 5,7%.

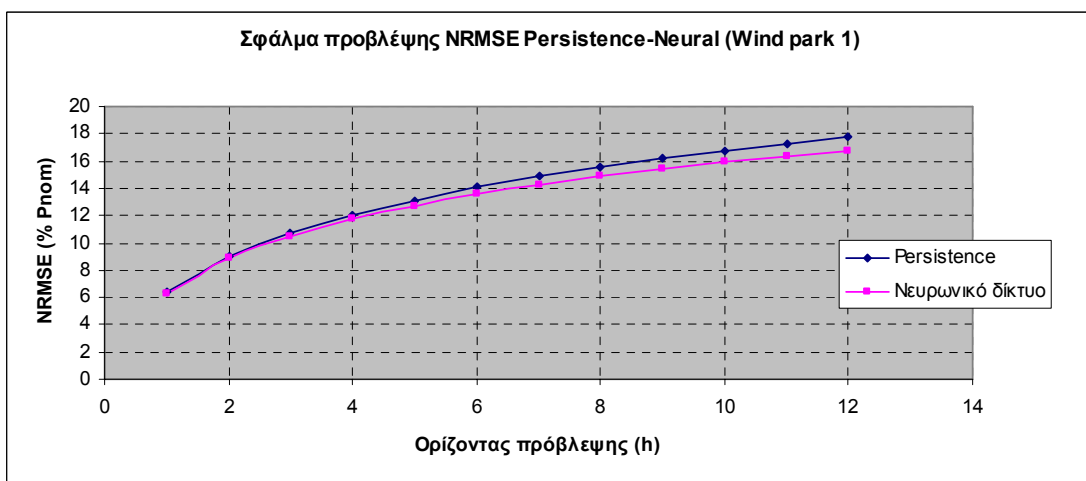
Για το αιολικό πάρκο 2, το NMAE του Persistence είναι μικρότερο από αυτό του νευρωνικού για ορίζοντες πρόβλεψης μέχρι και εννέα ωρών. Για μεγαλύτερους ορίζοντες πρόβλεψης τα πράγματα αντιστρέφονται. Η βελτίωση του νευρωνικού

συγκριτικά με το Persistence για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών φτάνει το 2,65%. Η συμπεριφορά του NRMSE για το αιολικό πάρκο 2 είναι όμοια με την αντίστοιχη του αιολικού πάρκου 1, η δε βελτίωση του συγκριτικά με το Persistence είναι για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών 5,5%, ενώ για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών 16%.

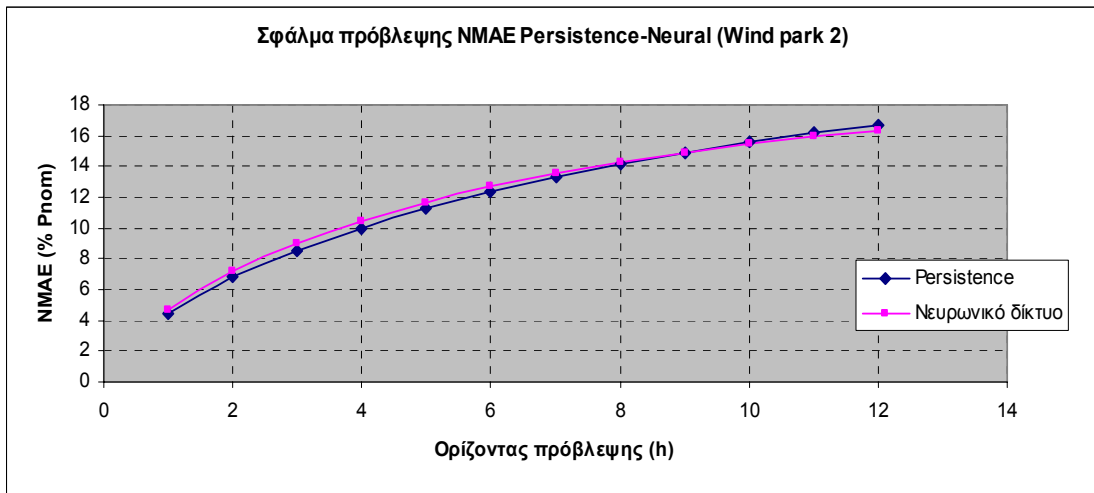
Για το αιολικό πάρκο 3, η συμπεριφορά του μοντέλου συγκριτικά με το Persistence είναι διαφορετική από ότι στα άλλα δύο αιολικά πάρκα. Όσον αφορά το NMAE, είναι μικρότερο, ενώ το NRMSE μεγαλύτερο για το μοντέλο Persistence, ανεξάρτητα από τον ορίζοντα πρόβλεψης. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο μικρό set εκπαίδευσης που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση του νευρωνικού δικτύου για αυτό το αιολικό πάρκο. Έτσι μπορεί οι σύνδεσμοι του να μην απέκτησαν τα απαραίτητα βάρη έτσι ώστε να κάνουν μια ακριβέστερη πρόβλεψη.



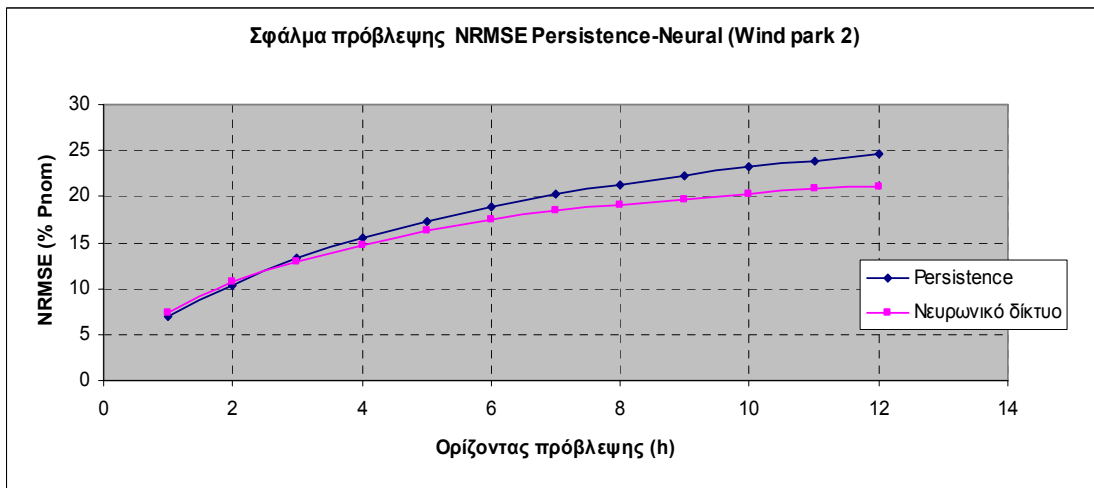
Διάγραμμα 5.3. Συγκριτική παρουσίαση NMAE νευρωνικού δικτύου και Persistence



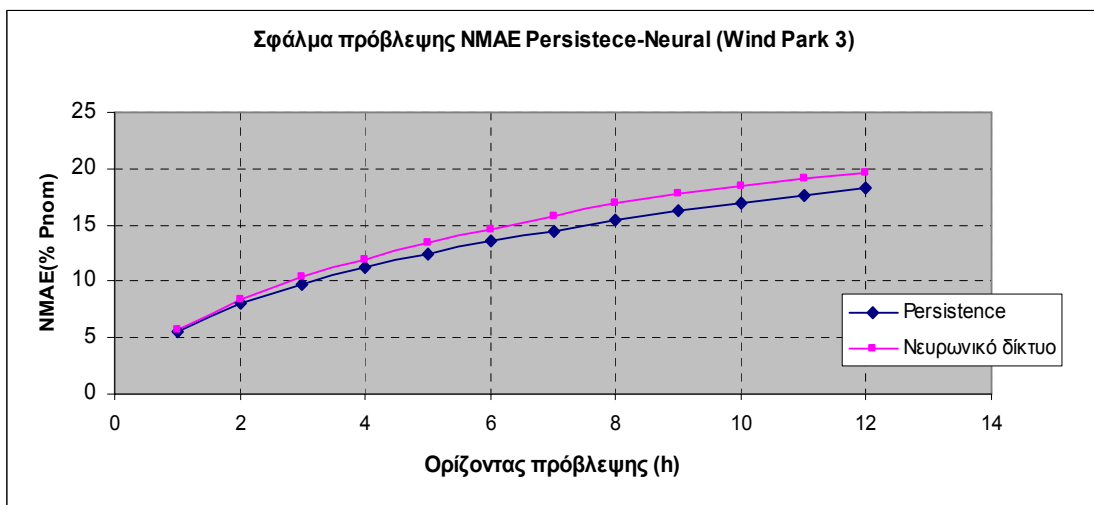
Διάγραμμα 5.4. Συγκριτική παρουσίαση NRMSE νευρωνικού δικτύου και Persistence



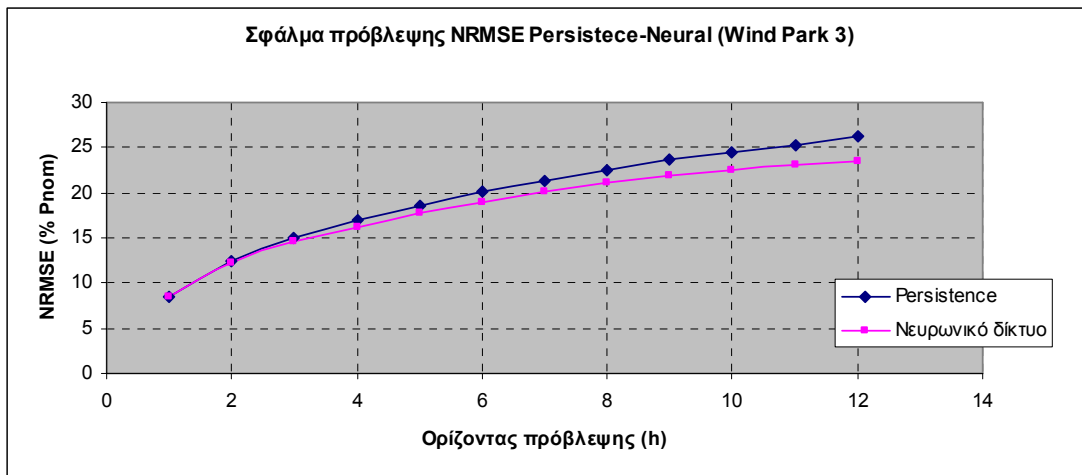
Διάγραμμα 5.5. Συγκριτική παρουσίαση NMAE νευρωνικού δικτύου και Persistence



Διάγραμμα 5.6. Συγκριτική παρουσίαση NRMSE νευρωνικού δικτύου και Persistence

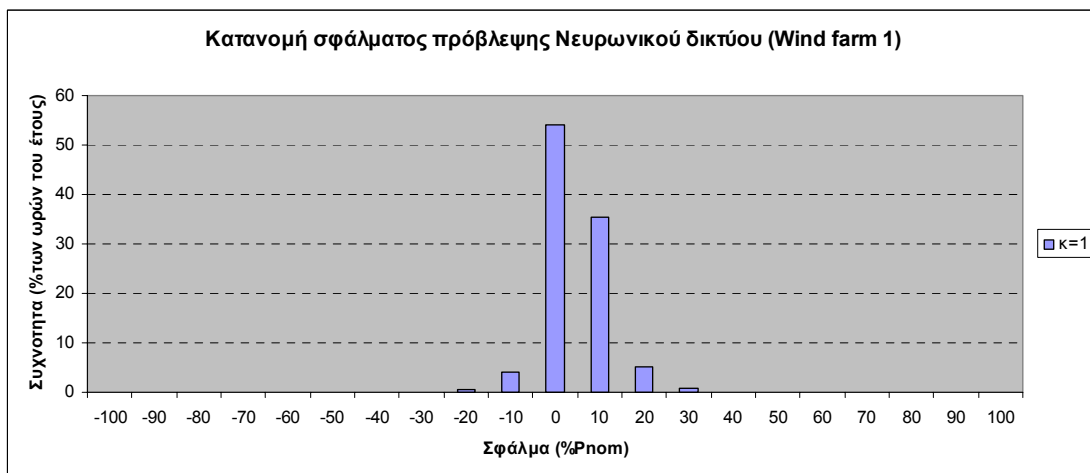


Διάγραμμα 5.7. Συγκριτική παρουσίαση NMAE νευρωνικού δικτύου και Persistence

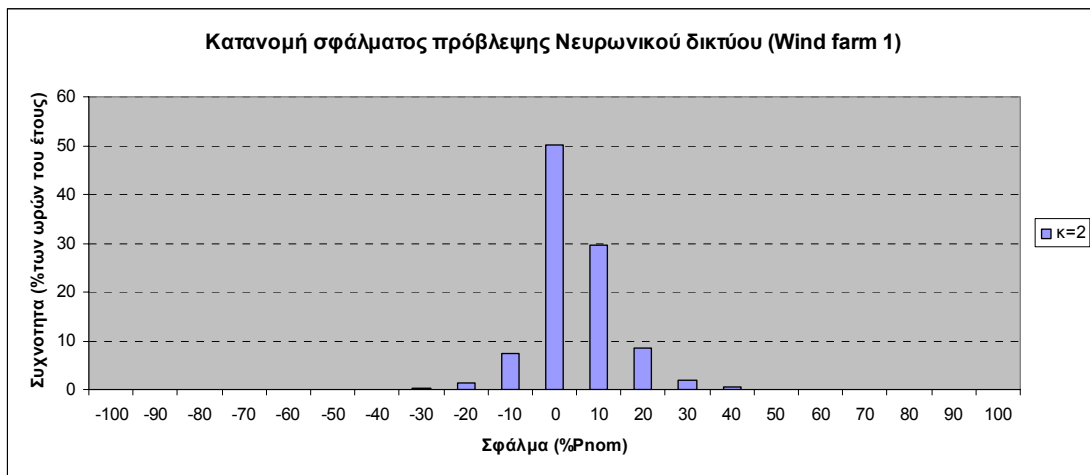


Διάγραμμα 5.8. Συγκριτική παρουσίαση NRMSE νευρωνικού δικτύου και Persistence

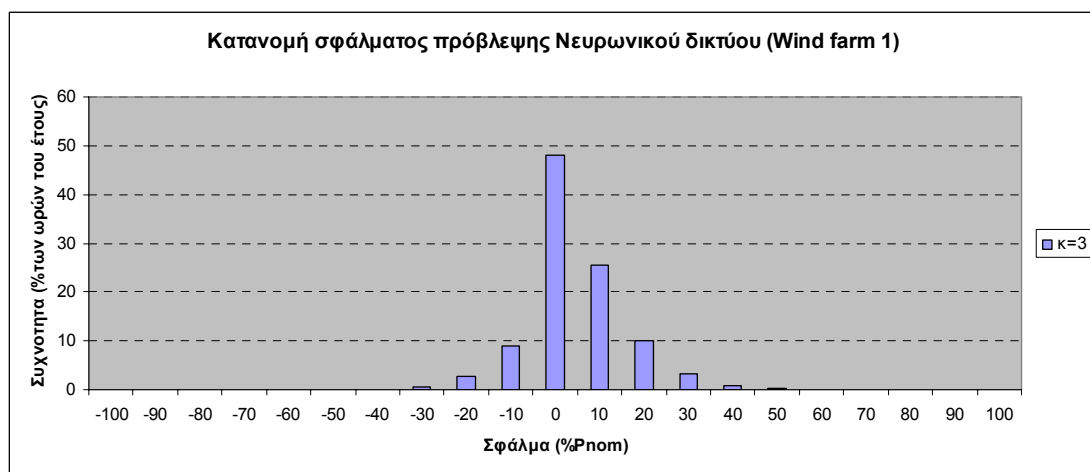
Η κατανομή των επί της εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης μίας έως δώδεκα ωρών παρουσιάζουν παρόμοια μορφή και για τα τρία αιολικά πάρκα. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζονται οι κατανομές μόνο για το αιολικό πάρκο 1 στα διαγράμματα 5.9. έως 5.20. που ακολουθούν, ενώ οι αντίστοιχες για τα αιολικά πάρκα 2 και 3 φαίνονται στο Παράρτημα.



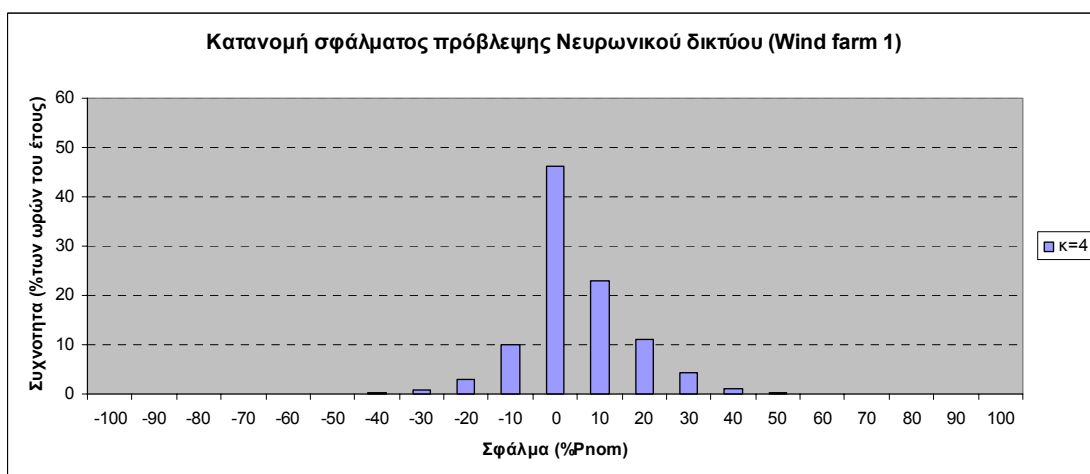
Διάγραμμα 5.9. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



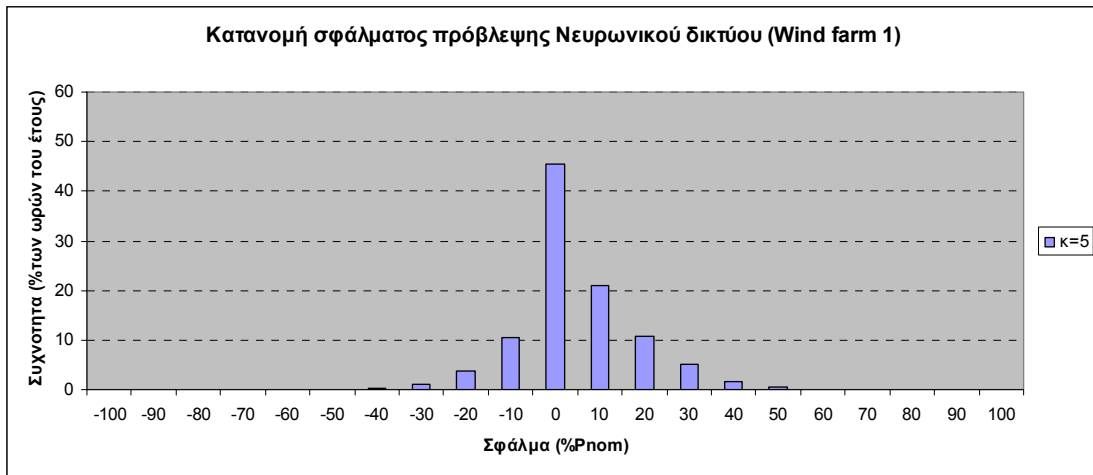
Διάγραμμα 5.10. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



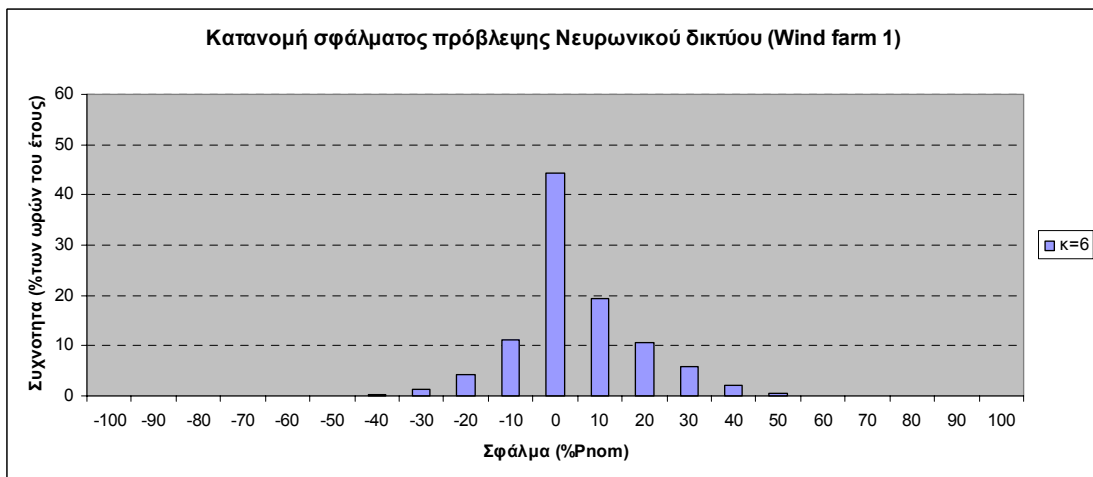
Διάγραμμα 5.11. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



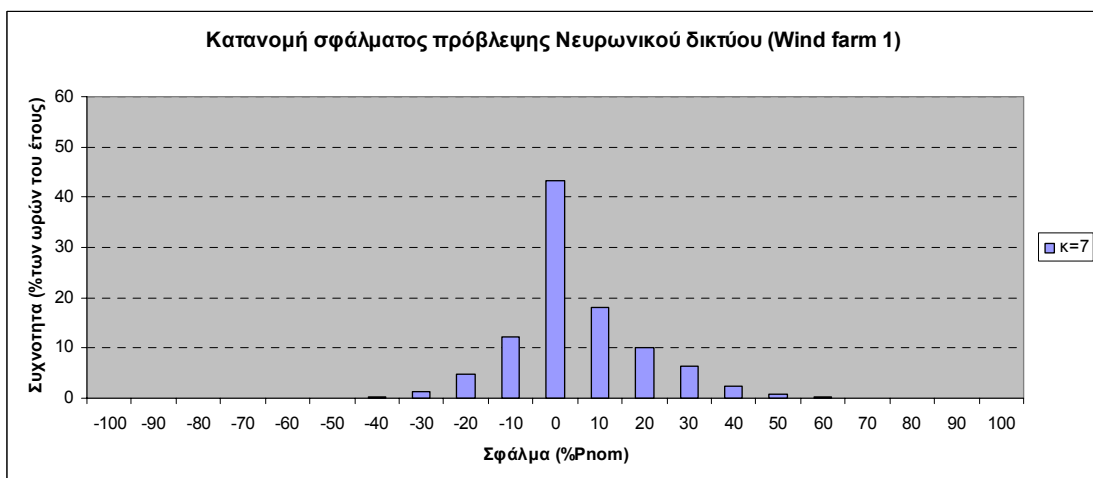
Διάγραμμα 5.12. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



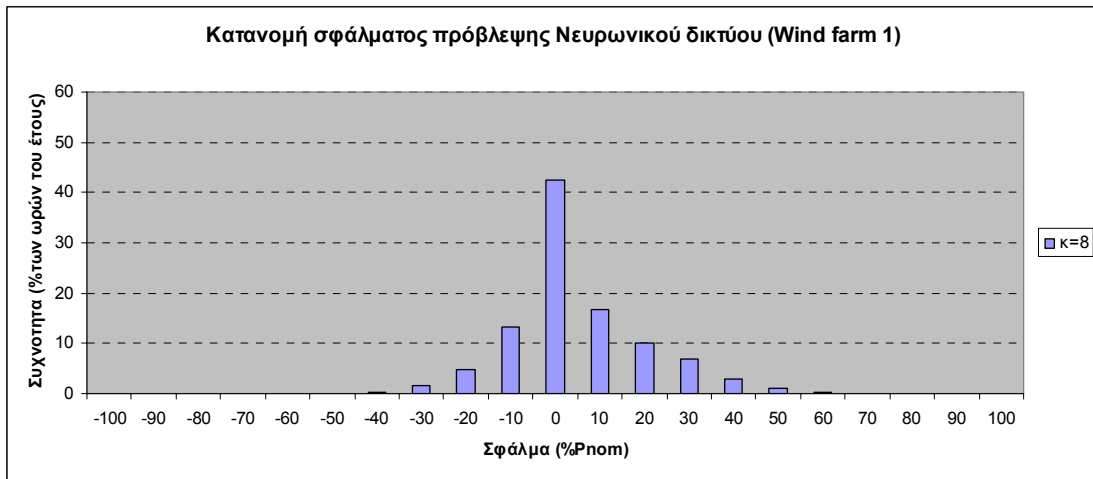
Διάγραμμα 5.13. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



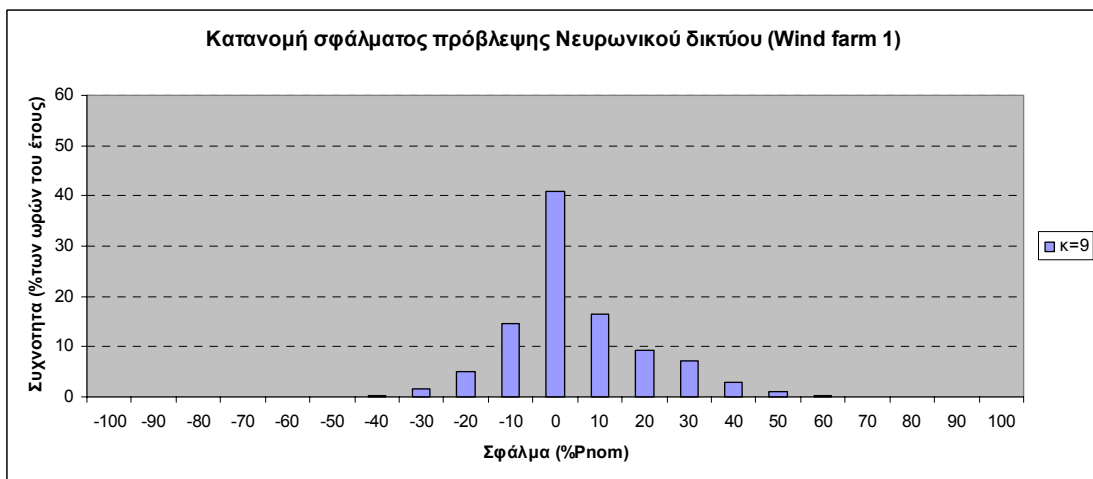
Διάγραμμα 5.14. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



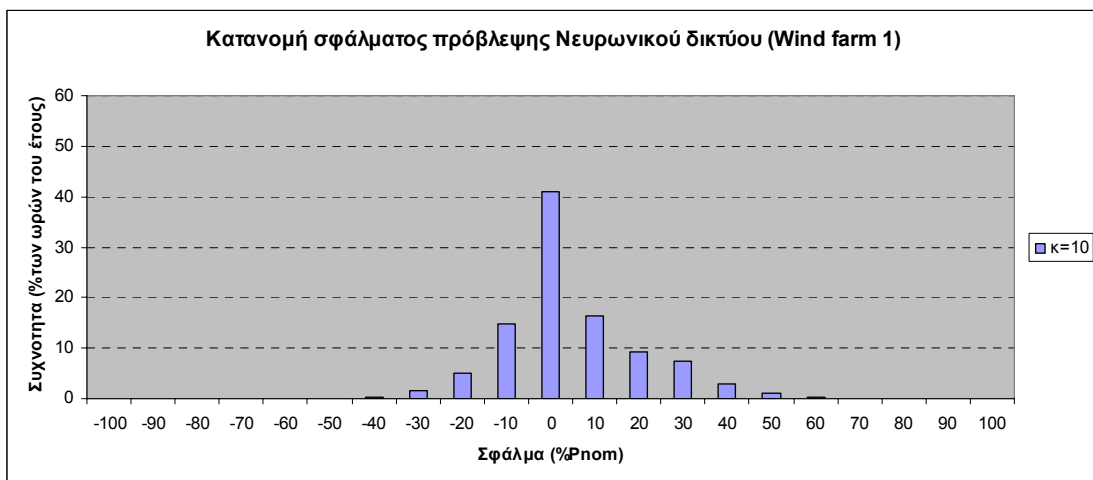
Διάγραμμα 5.15. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



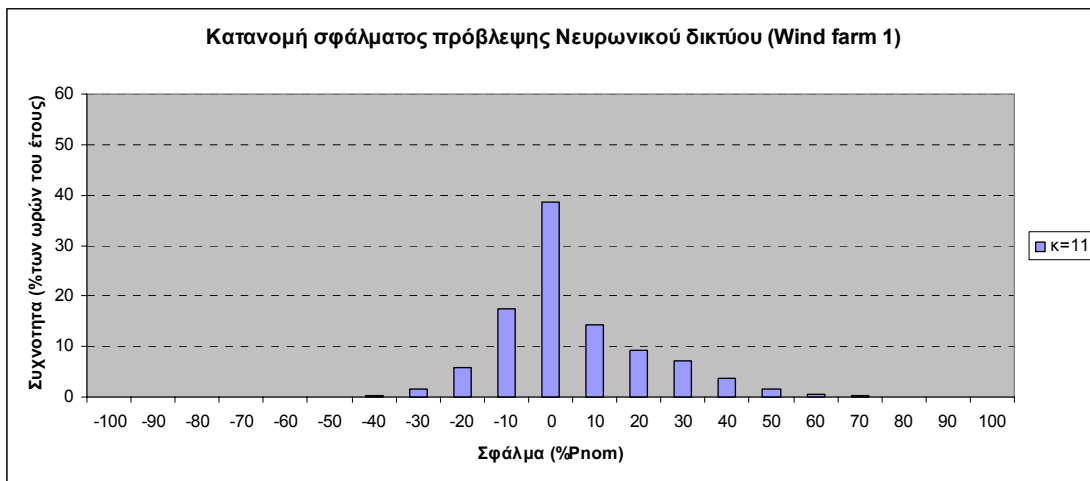
Διάγραμμα 5.16. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



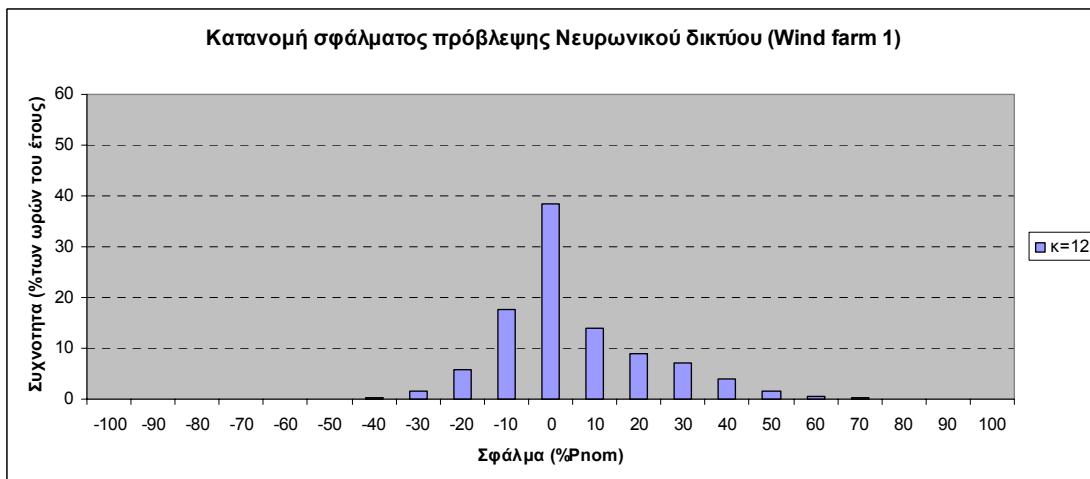
Διάγραμμα 5.17. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 5.18. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 10 ωρών



Διάγραμμα 5.19. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών



Διάγραμμα 5.20. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

Ως προς την κατανομή των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης, μπορεί να βγάλει κανείς τα εξής γενικά συμπεράσματα: Καθώς αυξάνει ο ορίζοντας πρόβλεψης τα σφάλματα εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά. Για μικρούς ορίζοντες πρόβλεψης τα σφάλματα σε ποσοστό 90%-93% του χρόνου είναι συγκεντρωμένα μεταξύ $\pm 10\%$ της ονομαστικής ισχύος. Για μεγαλύτερους ορίζοντες το ποσοστό αυτό μειώνεται μέχρι 50%. Και για τα τρία αιολικά πάρκα παρατηρείται μια θετική ασυμμετρία και θετική κύρτωση, κάτι που υποδηλώνει ότι το ποσοστό του χρόνου που εμφανίζονται θετικά σφάλματα είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των αρνητικών και ότι το ποσοστό των σφαλμάτων που είναι συγκεντρωμένα στο κέντρο της κατανομής είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο, αν η κατανομή ήταν κανονική. Θετικά σφάλματα υποδηλώνουν

υποτίμηση της προβλεπόμενης ισχύος συγκριτικά με την πραγματική. Επίσης για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης σχεδόν το 80% του χρόνου, το σφάλμα πρόβλεψης είναι μικρότερο από το $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος του αιολικού πάρκου. Από τα αυτά μπορεί να πει κανείς ότι για ορίζοντες πρόβλεψης μέχρι και 12 ώρες το μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα για το αιολικό πάρκο 1 και για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας, το 93% του χρόνου τα σφάλματα, κυμαίνονται μεταξύ $\pm 10\%$ της ονομαστικής ισχύος, για ορίζοντα πρόβλεψης έξι ωρών το αντίστοιχο ποσοστό του χρόνου είναι 74% και για ορίζοντα πρόβλεψης δώδεκα ωρών, 69%. Για ορίζοντες πρόβλεψης μίας και δύο ωρών, σφάλματα πρόβλεψης μέχρι $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος εμφανίζονται σε ποσοστό μόλις 6%. Σφάλματα μέχρι και $50\%P_{nom}$ παρατηρούνται για αυτούς τους ορίζοντες πρόβλεψης για χρονικό διάστημα 1% των ωρών του έτους, ποσοστό που θεωρείται αμελητέο. Για ορίζοντα πρόβλεψης από τρεις έως έξι ώρες, το ποσοστό του χρόνου που το σφάλμα ξεπερνάει το $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος, είναι 1,2%, 1,6%, 2,4% και 4% αντίστοιχα. Το ίδιο σφάλμα, φτάνει για ορίζοντα πρόβλεψης δώδεκα ωρών το 6,5 % . Περίπου όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το αιολικό πάρκο 2 με τα σφάλματα όμως να παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά και να κυμαίνονται από το -60% έως το $+90\%$ της ονομαστικής ισχύος. Ωστόσο και για αυτό το αιολικό πάρκο η πλειοψηφία των σφαλμάτων είναι μεταξύ $\pm 10\%P_{nom}$. Η κατανομή των σφαλμάτων πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο 3 παρουσιάζει γενικά μια ίδιου τύπου συμπεριφορά, με τα σφάλματα να εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά αυξανόμενου του ορίζοντα πρόβλεψης. Ωστόσο αυτό παρουσιάζει για ορίζοντα πρόβλεψης μεγαλύτερο των 5 ωρών ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό σφαλμάτων, τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 0 και $-10\%P_{nom}$ και εμφανίζονται σε ποσοστό 31-35% του έτους. Αυτό οφείλεται στα μικρά σετ δεδομένων εκπαίδευσης και προσομοίωσης, τα οποία είναι πιθανώς επηρεασμένα από την εποχικότητα του ανέμου. Στον πίνακα 5.4. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, το ποσοστό των ωρών του έτους που τα σφάλματα και των τριών αιολικών πάρκων για ορίζοντα πρόβλεψης μίας, έξι και δώδεκα ωρών κυμαίνονται μεταξύ $\pm 10\%$ και $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος.

Συγκρίνοντας τα ποσοστά αυτά με τα αντίστοιχα των εμπορικών μοντέλων για ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι 12 ώρες συμπεραίνει κανείς, ότι το υλοποιηθέν νευρωνικό δίκτυο εμφανίζει όμοια συμπεριφορά με αυτά.

		Ποσοστό του χρόνου		
Σφάλμα (%P _{nom})	Ορίζοντας πρόβλεψης	Wind park 1	Wind park 2	Wind park 3
± 10	1h	93	92	90
	6h	74	70	67
	12h	69	64	54
± 30	1h	99,88	99,6	99,5
	6h	96,9	93,3	91,9
	12h	93,5	81,8	77,8

Πίνακας 5.4. Σφάλματα πρόβλεψης νευρωνικού μοντέλου

Αν ωστόσο κοιτούσε κανείς την αντίστοιχη κατανομή των επί τοις εκατό της πραγματικής και όχι της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, τα αποτελέσματα θα ήταν τελείως διαφορετικά. Στον υπολογισμό της κατανομής αυτής υπάρχει μια εγγενής δυσκολία όταν η πραγματική τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι μηδενική. Αυτό γιατί σε αυτή την περίπτωση, το επί τοις εκατό σφάλμα με αυστηρά μαθηματικούς όρους απειρίζεται. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού και επειδή σφάλματα σε πολύ μικρές ισχύεις δεν έχουν πρακτική σημασία στην εκτίμηση της επίδοσης του μοντέλου, το επί τοις εκατό σφάλμα που αντιστοιχεί σε τιμές πραγματικής ισχύος μέχρι 10% της ονομαστικής του εκάστοτε Α/Π, κανονικοποιήθηκε, όχι ως προς την εκάστοτε πραγματική ισχύ, αλλά ως προς το 10% της ονομαστικής ισχύος του Α/Π. Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι το νευρωνικό μοντέλο κάνει τα μεγαλύτερα σφάλματα σε μικρές ισχύεις, τα όποια πολλές φορές ξεπερνούν το 100% της πραγματικής. Για τις μικρές αυτές ισχύεις, το μοντέλο υπερτιμά την παραγόμενη ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι προβλέπει ακριβέστερα τις μεγάλες τιμές ισχύος. Από την κατανομή αυτών των σφαλμάτων προκύπτει ότι, σε ποσοστό 1-2% των ωρών του έτους, τα σφάλματα ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας για όλα τα αιολικά πάρκα, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών κυμαίνεται μεταξύ 19% και 44 % ανάλογα με το Α/Π. Ο πίνακας 5.5. παρουσιάζει αναλυτικά το χρόνο που τα σφάλματα ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος για όλα τα εξετασθέντα

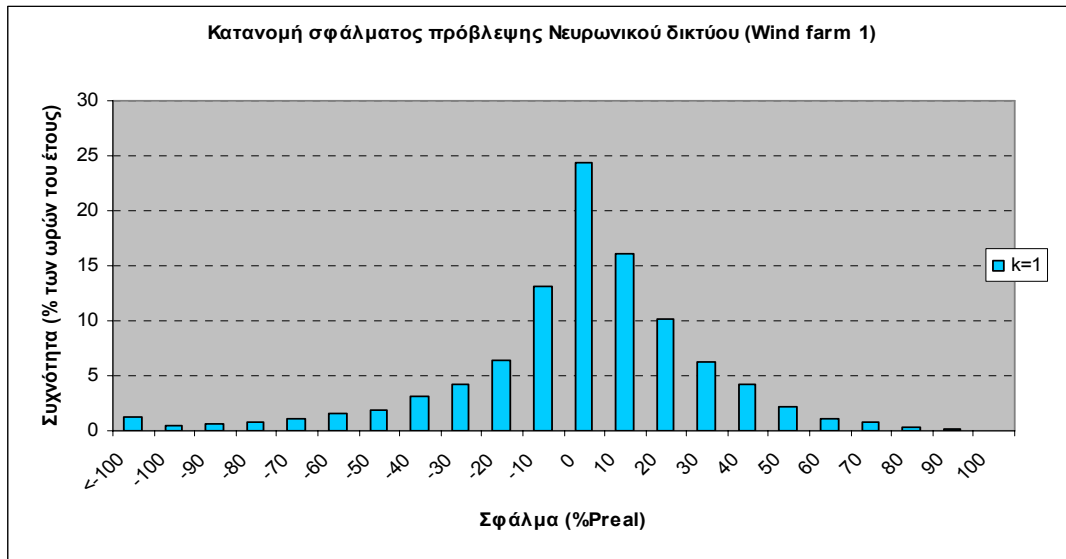
αιολικά πάρκα και τους ορίζοντες πρόβλεψης. Από αυτόν μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η πληρότητα του Training set ως προς τα δεδομένα που αυτό περιλαμβάνει είναι σημαντική γιατί ένα, που δεν περιλαμβάνει όλα τα καιρικά φαινόμενα, εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα.

Ορίζοντας πρόβλεψης (h)	Χρόνος % των ωρών του έτους που το σφάλμα ξεπερνά το 100% της πραγματικής ισχύος		
	Αιολικό πάρκο 1	Αιολικό πάρκο 2	Αιολικό πάρκο 3
1	1,2	1,73	2,33
2	4,01	5,64	6,52
3	6,46	9,4	9,84
4	8,02	12,5	13
5	9,82	16	16,7
6	10,9	17,6	21,3
7	12,4	20,4	30
8	13,6	21,9	38,6
9	15,3	23,7	40,9
10	16,7	25,3	41,8
11	18,5	27	42,9
12	18,7	28,1	44

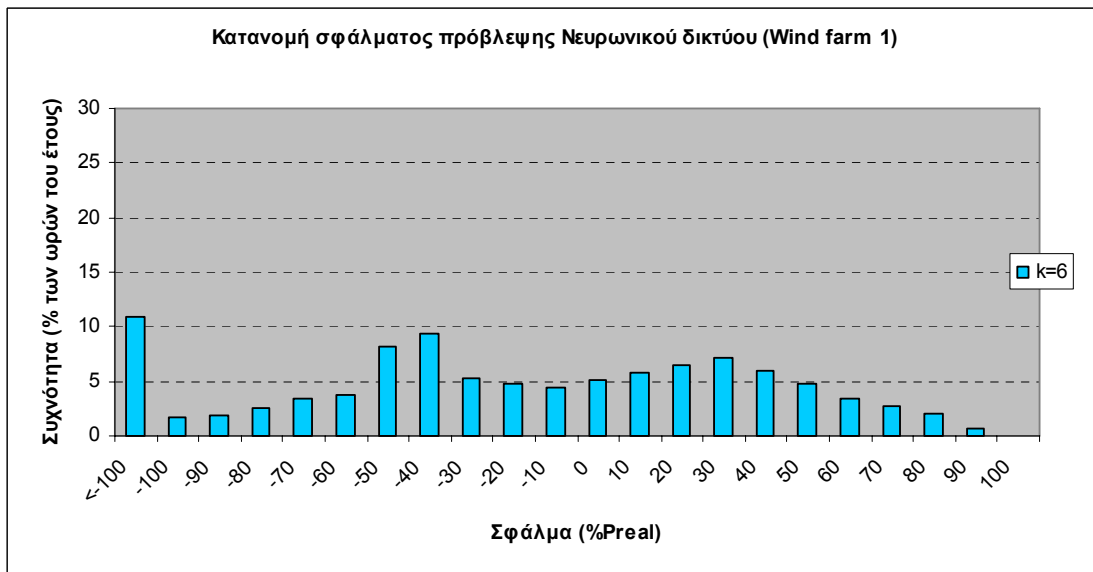
Πίνακας 5.5. Σφάλματα μεγαλύτερα από το 100% της πραγματικής ισχύος

Όσον αφορά την κατανομή των σφαλμάτων που **δεν** ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος, παρατηρεί κανείς ότι το ποσοστό των θετικών σφαλμάτων αυξάνει, καθώς αυξάνεται και ο ορίζοντας πρόβλεψης. Με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης, το ποσοστό το σφαλμάτων μεταξύ $\pm 100\%P_{real}$ μειώνεται και το ποσοστό του χρόνου ανά κλάση έχει μια τάση εξίσωσης, δηλαδή όλες οι κλάσεις τείνουν να μην έχουν μεγάλες διαφορές ως προς το ποσοστό του χρόνου που εμφανίζονται τα αντίστοιχα σφάλματα. Οι κατανομές αυτές για το Α/Π 1 και για ορίζοντα πρόβλεψης μίας, έξι και δώδεκα ωρών φαίνονται στα διαγράμματα 5.21-5.23, ενώ τα αντίστοιχα

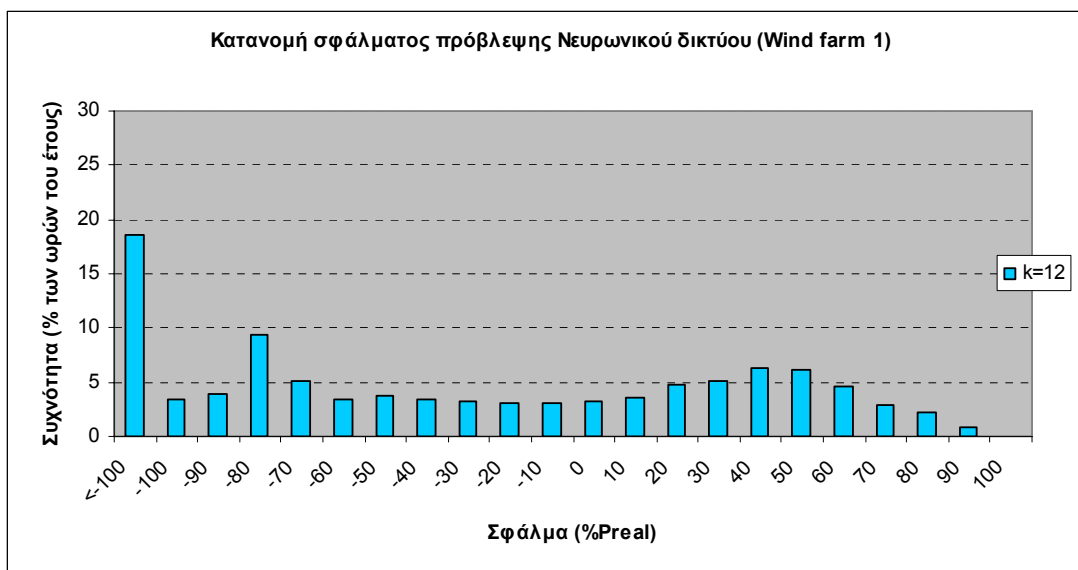
για οριζόντια πρόβλεψη μίας έως δώδεκα ωρών και για τα τρία αιολικά πάρκα παρουσιάζονται στο Παράρτημα.



Διάγραμμα 5.21. Κατανομή % της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, ορίζοντας πρόβλεψης μίας ώρας



Διάγραμμα 5.22. Κατανομή % της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, ορίζοντας πρόβλεψης έξι ωρών

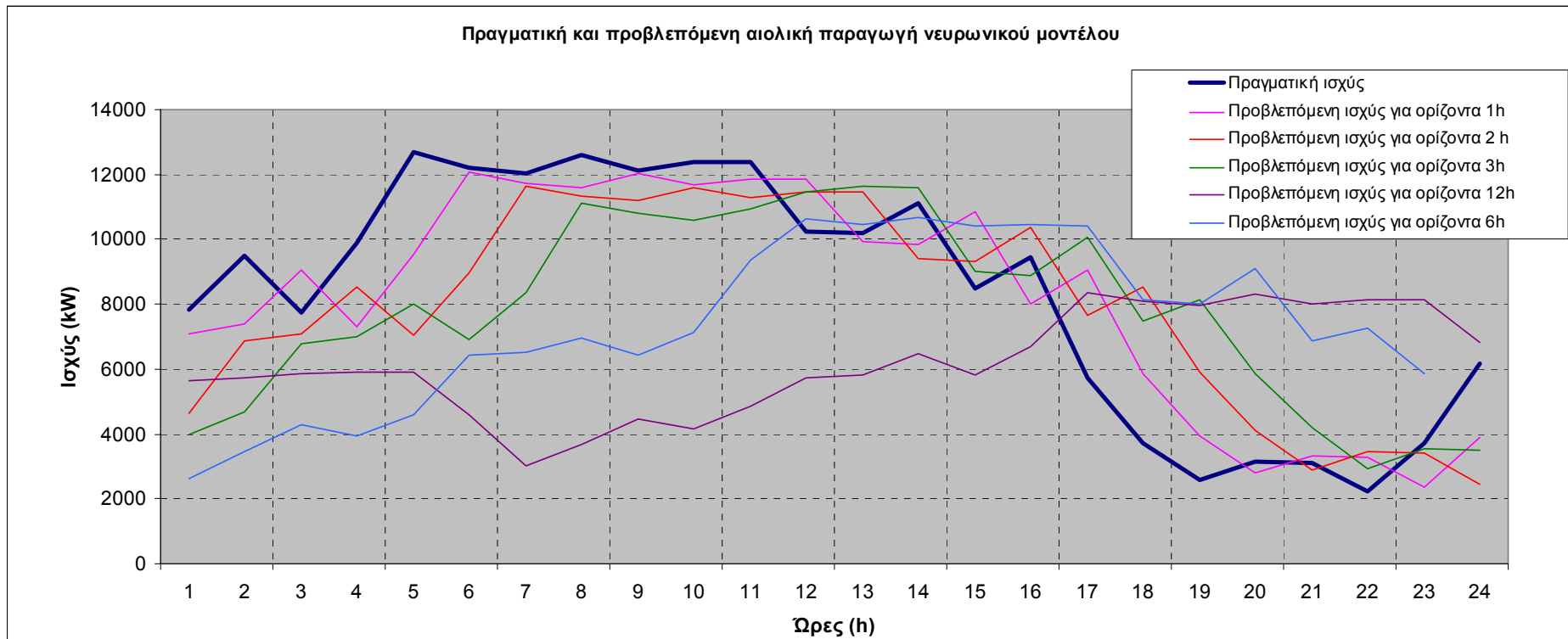


Διάγραμμα 5.23. Κατανομή % της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, ορίζοντας πρόβλεψης δώδεκα ωρών

Αν ήθελε κανείς να εκτιμήσει τη συμπεριφορά του μοντέλου αξιολογώντας την πρόβλεψη που αυτό παρέχει για ένα 24ώρο, θα κατέληγε στο συμπέρασμα ότι οι προβλεπόμενες τιμές παρουσιάζουν μια χρονική ολίσθηση, συγκριτικά με τις πραγματικές. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο έχει ως δεδομένο εισόδου την τιμή της ισχύος την ώρα που γίνεται η πρόβλεψη και επηρεάζεται ιδιαίτερα από αυτή. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα 5.24. λαμβάνοντας την πρόγνωση για ένα τυχαίο 24ωρο.

5.4. Συμπεράσματα

Από όσα αναφέρθηκαν μέχρι τώρα καταλήγει κανείς σε αντιφατικά συμπεράσματα όσον αφορά την αξιοπιστία του νευρωνικού δικτύου. Κρίνοντας το μοντέλο μόνο με βάση τους δείκτες NMAE και NRMSE, όπως αυτοί έχουν οριστεί στο πρωτόκολλο αξιολόγησης όλων των υπαρχόντων μοντέλων, θα μπορούσε να πει ότι το μοντέλο για την απλότητα του έχει μια πολύ αξιόλογη συμπεριφορά. Αν ωστόσο προσπαθήσει να κάνει κανείς μια πιο λεπτομερή εξέταση αυτού του μοντέλου, θα συμπεράνει ότι τα σφάλματα ως προς την πραγματική ισχύ είναι πολύ μεγάλα και μπορούν να θέσουν μέχρι και σε αμφισβήτηση την αξιοπιστία του.



Διάγραμμα 5.24. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή 24 ωρών νευρωνικού μοντέλου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης αιολικής παραγωγής

Εκτός από το νευρωνικό δίκτυο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής και ένα στατιστικό μοντέλο, γνωστό από τη βιβλιογραφία, το WPPT και αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του για ένα αιολικό πάρκο. Υπολογίστηκαν τα σφάλματα πρόβλεψης και συγκρίθηκε η επίδοση του με αυτή του μοντέλου Persistence.

6.1. Γενικά

Στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής χρησιμοποιούνται τόσο φυσικά όσο και στατιστικά μοντέλα. Ωστόσο έχει αποδειχθεί, ότι τα φυσικά μοντέλα, που περιγράφουν μόνο τη διάταξη του αιολικού πάρκου και την επίδραση του περιβάλλοντος, μπορούν σε συνδυασμό με μετεωρολογικές προβλέψεις της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου, να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για ορίζοντα πρόβλεψης από 12 μέχρι 36 ώρες. Για ορίζοντα πρόβλεψης μικρότερο των 12 ωρών τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Στατιστικά μοντέλα σε συνδυασμό με μετρήσεις της αιολικής ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου μπορούν να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για αυτούς τους σύντομους ορίζοντες πρόβλεψης. Από αυτά είναι εμφανές ότι μια βελτίωση μπορεί να προέλθει από συνδυασμό μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και μετεωρολογικών προβλέψεων σε ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους. Τέτοιου τύπου μοντέλα είναι και τα αυτοπροσδιοριζόμενα με εξωτερικά δεδομένα εισόδου (ARX models- Auto-Regressive with eXogenous input).

6.2. Αυτοπροσδιοριζόμενα μοντέλα με εξωτερικά δεδομένα εισόδου (ARX-Models)

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή των μοντέλων αυτού του τύπου, είναι μια απλή εξίσωση διαφορών, που δίνεται από τη γενική εξίσωση 6.1.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) \quad (6.1.)$$

Αυτή συσχετίζει την τρέχουσα έξοδο $y(t)$ με ένα πεπερασμένο αριθμό προηγούμενων εξόδων $y(t-k)$ και εισόδων $u(t-k)$. Έτσι η εξίσωση προσδιορίζεται από τους τρεις ακέραιους na , nb και nk . Το na αντιπροσωπεύει τον αριθμό των πόλων και το $nb-1$ τον αριθμό των μηδενικών, ενώ nk είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων a_i και b_i χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Αυτή βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων της διαφοράς της δεξιάς μείον την αριστερή πλευρά της παραπάνω εξίσωσης, δηλαδή

στην ελαχιστοποίηση του κριτηρίου: $V(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_{t-1}(\theta))^2$, όπου N είναι ο

αριθμός των παρατηρήσεων, y_t είναι η παρατήρηση τη χρονική στιγμή t και $\hat{y}_{t-1}(\theta)$, είναι η πρόβλεψη της παρατήρησης τη στιγμή t δεδομένων των παρατηρήσεων μέχρι τη χρονική στιγμή $t-1$.

Ένα γνωστό από τη βιβλιογραφία ARX μοντέλο υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του MATLAB για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής ενός μεμονωμένου αιολικού πάρκου (Wind park 1).

6.3. Υλοποίηση μοντέλου πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Το ARX μοντέλο που υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο MATLAB είναι το γνωστό από τη βιβλιογραφία μοντέλο WPPT (Wind Power Prediction Tool). Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τον Madsen και χρησιμοποιεί μόνο μετρούμενα δεδομένα για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Η προβλεπόμενη αιολική παραγωγή δίνεται από τη σχέση 6.2.

$$\begin{aligned} \sqrt{p_{t+k}} &= a_1 \sqrt{p_t} + b_1 \sqrt{w_t} + b_2 w_t + m_t + e_{t+k} \\ m_t &= m + c_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + c_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \end{aligned} \quad (6.2.)$$

όπου p_t , είναι η μετρούμενη παραγόμενη ισχύς τη χρονική στιγμή t , w_t είναι η μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου τη χρονική στιγμή t , e_{t+k} είναι μια κατανομή λευκού θορύβου και m_t είναι μια συνάρτηση που περιγράφει την ημερήσια μεταβλητότητα του ανέμου.

Η μετατροπή της αιολικής παραγωγής και της ταχύτητας του ανέμου σε ρίζα έχει προέλθει από την καταφερή πυκνότητα της ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου. Έχει αποδειχθεί ότι η μετατροπή σε ρίζα οδηγεί σε κατανομές σφαλμάτων πρόβλεψης, που μπορούν να προσεγγισθούν από κανονική κατανομή.

Με τη χρήση αυτής της εξίσωσης και με εργαλεία από System Identification Toolbox του MATLAB υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε το μοντέλο αυτό.

Γράφοντας την εξίσωση 6.2. στη μορφή 6.1. προκύπτει ότι το μοντέλο έχει μια έξοδο και πέντε εισόδους. Η έξοδος είναι η προβλεπόμενη τιμή της αιολικής ισχύος και τα δεδομένα εισόδου είναι, η μετρούμενη αιολική ισχύς k ώρες πριν από την πρόβλεψη και η αντίστοιχη τιμή του ανέμου, και δύο συνημιτονικοί όροι που σχετίζονται με την ημερήσια μεταβλητότητα αυτού.

Έξοδος : $y(t) = \sqrt{p_{t+k}}$

Είσοδοι: $u_1(t-k) = \sqrt{p_t}$ $u_2(t-k) = \sqrt{w_t}$ $u_3(t-k) = w_t$

$u_4(t-k) = c_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right)$ και $u_5(t-k) = c_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right)$

Οι τιμές των n_a , n_b και n_k είναι διανύσματα.

$n_a = [0]$

$n_b = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$,

$n_k = [k \ k \ k \ 0 \ 0]$

όπου το k συμβολίζει τον ορίζοντα

πρόβλεψης

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `argx` του MATLAB και ένα πεπερασμένο αριθμό δεδομένων εισόδου, υπολογίζονται για κάθε ορίζοντα πρόβλεψης οι παράμετροι a_1 ,

b_1, b_2, c_1, c_2 του μοντέλου, με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνέχεια για τις υπολογιζόμενες τιμές παραμέτρων και για διαφορετικά από τα προηγούμενα δεδομένα εισόδου, γίνεται η πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για ορίζοντα πρόβλεψης k από μία έως δώδεκα ώρες.

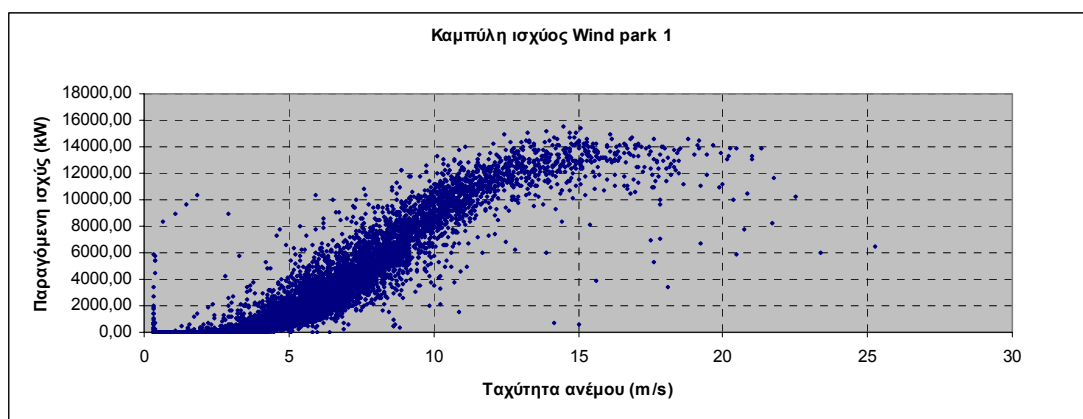
6.4. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το αιολικό πάρκο που χρησιμοποιήθηκε έχει τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1. και είναι το ίδιο με το Α/Π 1, που χρησιμοποιήθηκε και στην προσομοίωση του νευρωνικού δικτύου.

Wind park 1	Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	Συντελεστής τραχύτητας εδάφους (RIX)
	17560	7

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά αιολικού πάρκου

Η καμπύλη ισχύος του πάρκου αυτού όπως προκύπτει από μετρούμενα δεδομένα φαίνεται στο διάγραμμα 6.1.



Διάγραμμα 6.1. Καμπύλη ισχύος εξεταζόμενου αιολικού πάρκου

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίστηκε το μέσο απόλυτο σφάλμα, NMAE και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, NRMSE. Οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί που ορίστηκαν από το πρωτόκολλο εκτίμησης της

απόδοσης των μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος [25] και δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις 6.3. και 6.4.

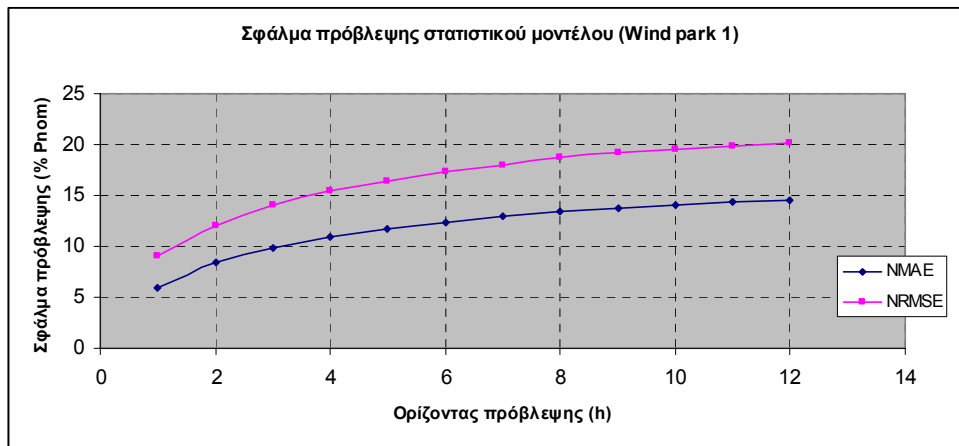
$$NMAE(k) = \frac{1}{P_{nom}} \left(\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} |e_{t+k/t}| \right) \quad (6.3.)$$

$$NRMSE(k) = NMSE(k)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{P_{nom}} \left[\left[\frac{1}{N_T} \sum_{t=1}^{N_T} (e_{t+k/t})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6.4.)$$

Τα σφάλματα αυτά, συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης δίνονται στον πίνακα 6.1. απεικονίζονται γραφικά στο διάγραμμα 6.2.

Ορίζοντας πρόβλεψης k (h)	NMAE (% P_{nom})	NRMSE (% P_{nom})
1	6,0	9,0
2	8,4	12,0
3	9,9	14,0
4	11,0	15,4
5	11,7	16,4
6	12,4	17,3
7	12,9	18,0
8	13,5	18,7
9	13,8	19,2
10	14,1	19,5
11	14,3	19,9
12	14,5	20,2

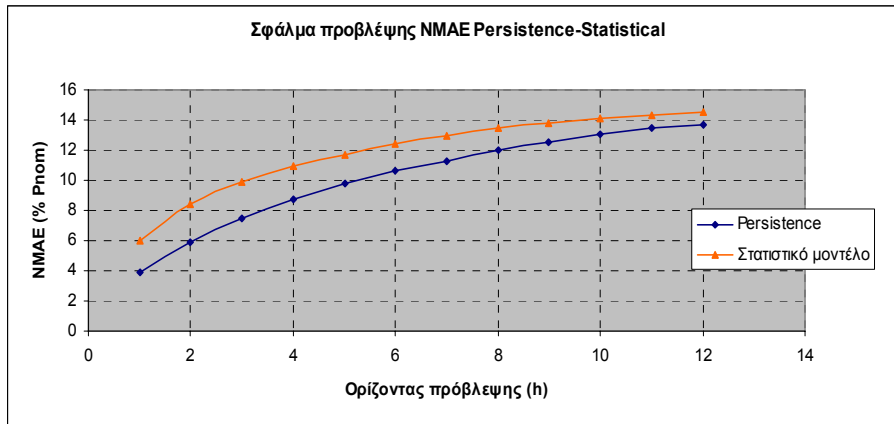
Πίνακας 6.1. NMAE και NRMSE στατιστικού μοντέλου για το αιολικό πάρκο 1



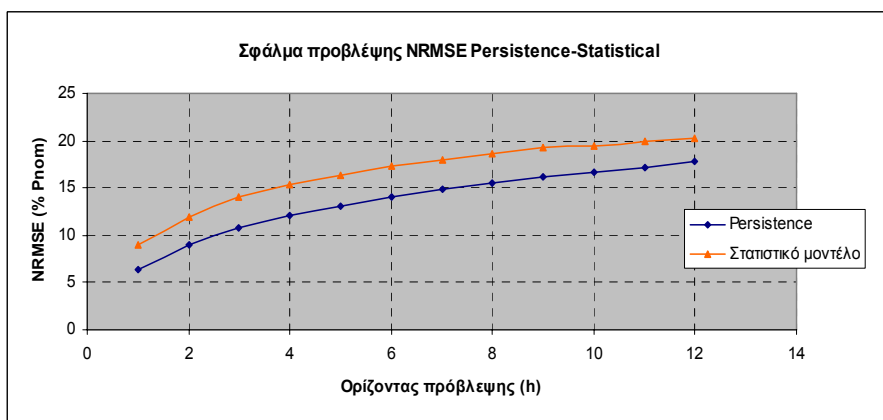
Διάγραμμα 6.2. Σφάλμα πρόβλεψης στατιστικού μοντέλου συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης

Το μέσο απόλυτο σφάλμα πρόβλεψης, NMAE του στατιστικού μοντέλου για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο κυμαίνεται μεταξύ 6% και 14,5% για ορίζοντα πρόβλεψης μίας και δώδεκα ωρών αντίστοιχα. Το NRMSE για τους ίδιους ορίζοντες πρόβλεψης έχει τιμή 9% και 20,2%. Από αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία [32] γι' αυτό το αιολικό πάρκο παρατηρεί κανείς ότι το NMAE και NRMSE αυτού του μοντέλου, είναι για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης μεγαλύτερο από ότι το αντίστοιχο των εμπορικών μοντέλων. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη χρήσης μετεωρολογικών δεδομένων από το στατιστικό αυτό μοντέλο για την πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Άλλωστε όπως έχει αναφερθεί, η βελτίωση των στατιστικών μοντέλων ως προς τα φυσικά, έγκειται ακριβώς στην δυνατότητα συνδυασμού μετρούμενων δεδομένων και δεδομένων που προέρχονται από αριθμητικές προβλέψεις καιρού για στην εύρεση του ιδανικού βάρους ανάμεσα τους, ανάλογα με τον ορίζοντα πρόβλεψης. Έτσι ελλείπει μετεωρολογικών δεδομένων δεν υπάρχει καμία βελτίωση συγκριτικά με το Persistence (Διαγράμματα 6.3. και 6.4.).

Από το διάγραμμα 6.3. φαίνεται ότι το στατιστικό μοντέλο έχει χειρότερη επίδοση από το Persistence, αλλά υπάρχει τάση, τα σφάλματα αυτών των μοντέλων να εξισωθούν για ορίζοντα πρόβλεψης 12-13 ωρών και πιθανώς το στατιστικό μοντέλο να υπερτερεί του Persistence για ορίζοντα πρόβλεψης μεγαλύτερο των 14 ωρών. Η συμπεριφορά αυτή δεν οφείλεται κατ' ανάγκη στη βελτίωση του στατιστικού μοντέλου με την αύξηση του ορίζοντα πρόβλεψης, αφού το σφάλμα που αυτό εμφανίζει και για αυτούς τους ορίζοντες πρόβλεψης είναι πολύ μεγάλο, αλλά στην κακή επίδοση του Persistence. Την ίδια τάση εμφανίζει και το NRMSE αλλά για πιο μακροχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης.

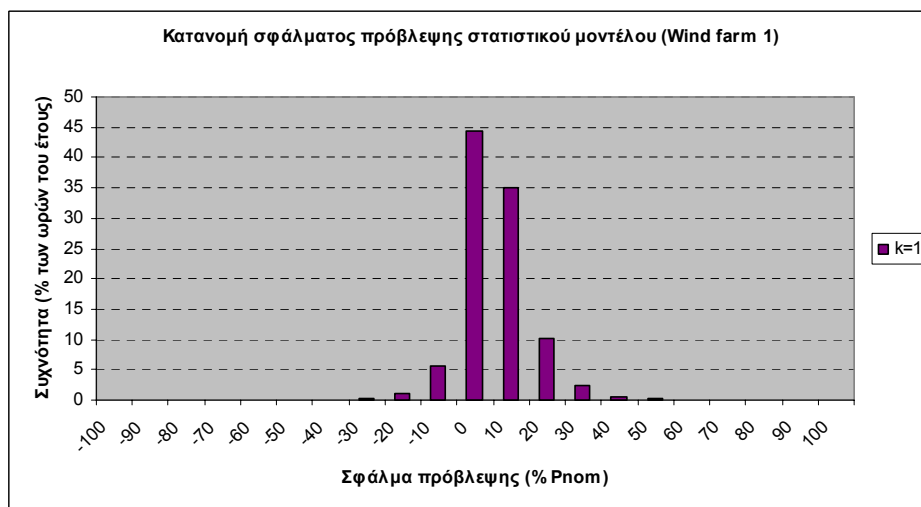


Διάγραμμα 6.3. NMAE στατιστικού μοντέλου και Persistence

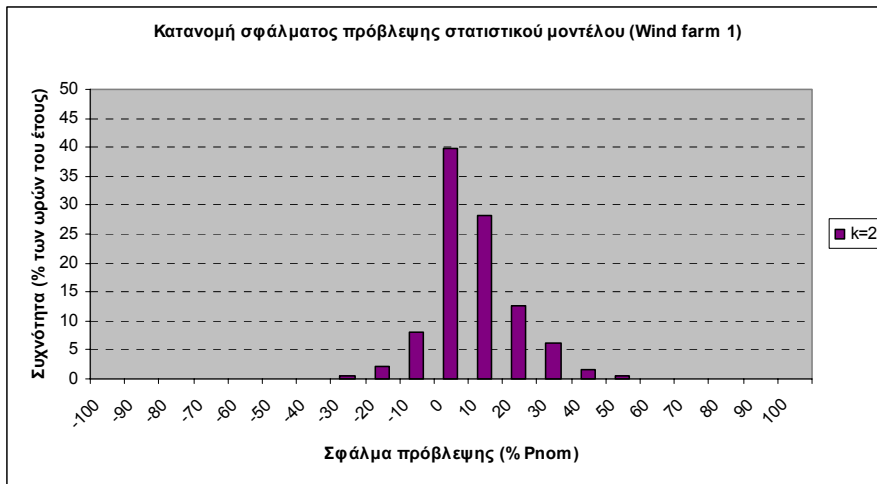


Διάγραμμα 6.4. NRMSE στατιστικού μοντέλου και Persistence

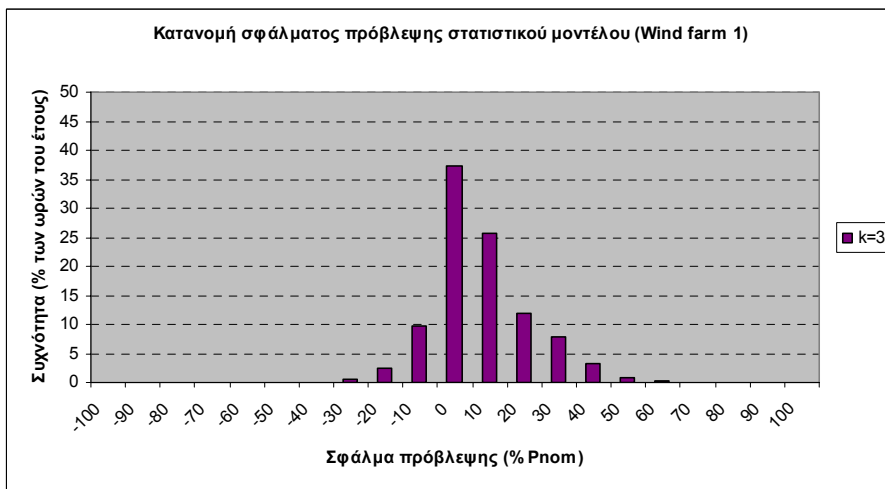
Στη συνέχεια, στα διαγράμματα 6.5. έως 6.16. παρουσιάζονται οι κατανομές των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης του στατιστικού μοντέλου για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης.



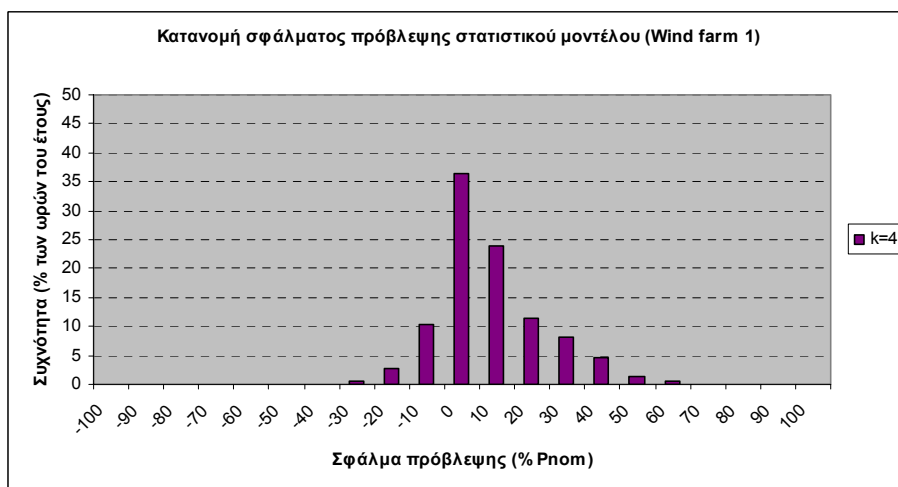
Διάγραμμα 6.5. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 1h



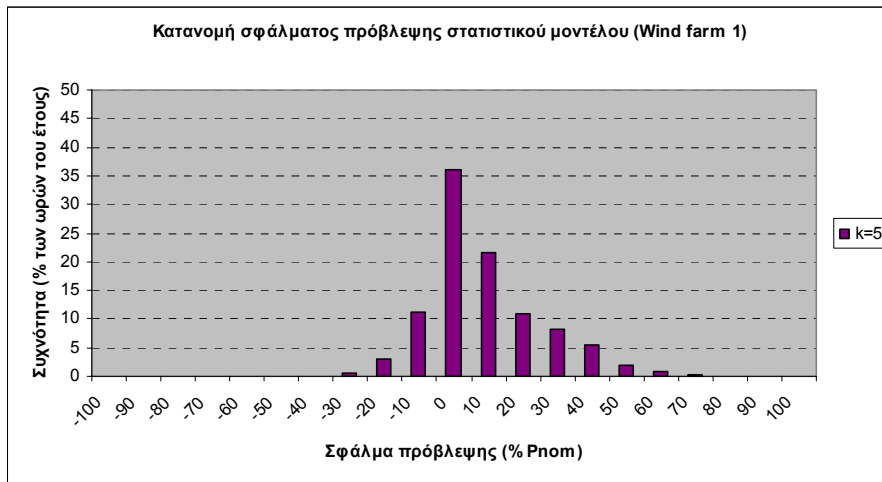
Διάγραμμα 6.6. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 2h



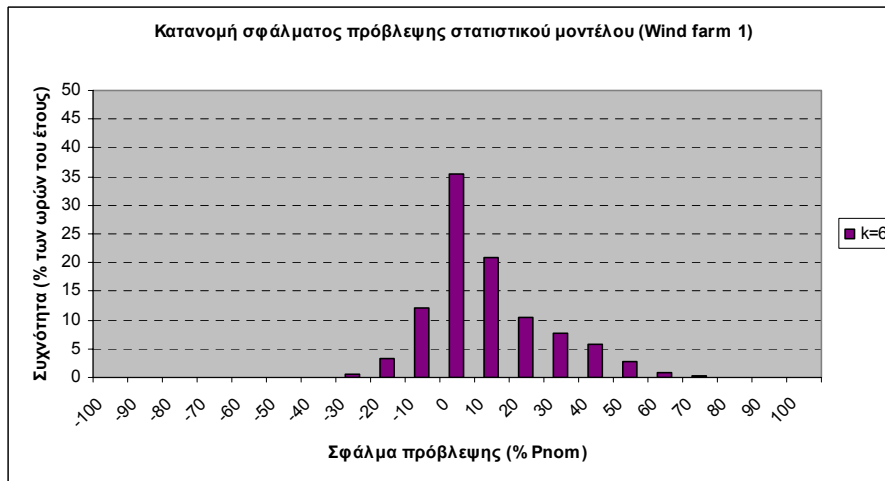
Διάγραμμα 6.7. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 3h



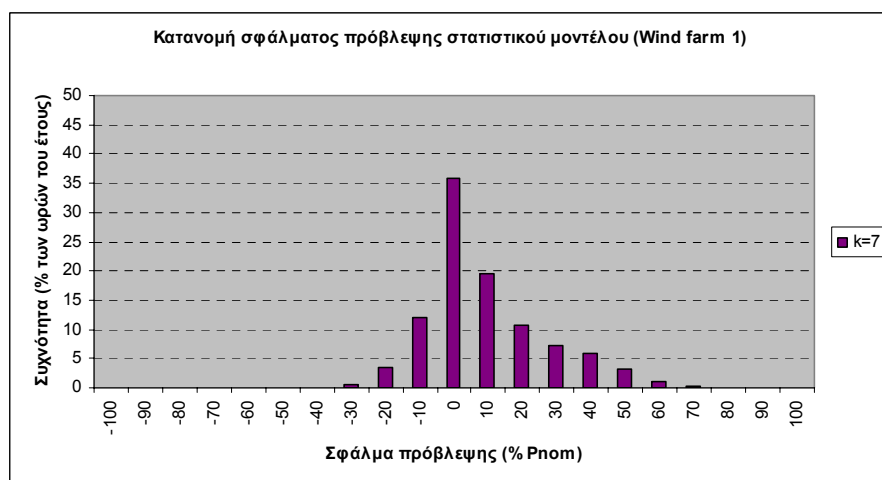
Διάγραμμα 6.8. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 4h



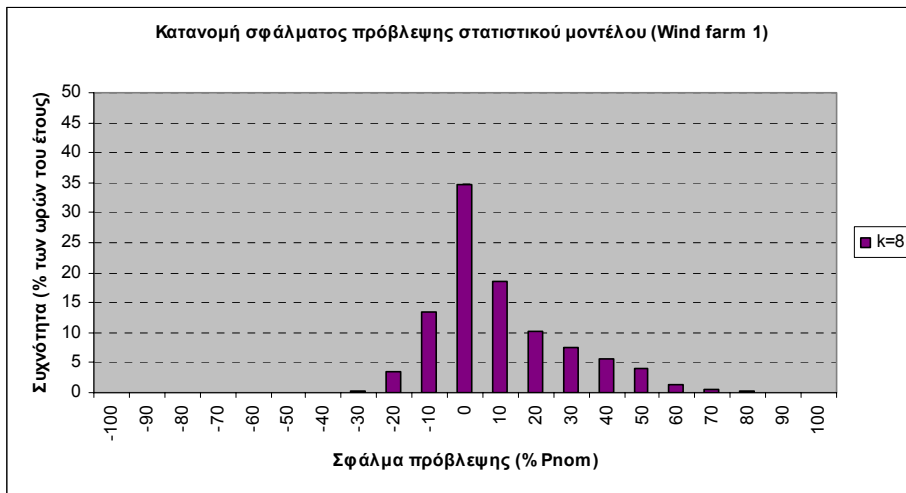
Διάγραμμα 6.9. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 5h



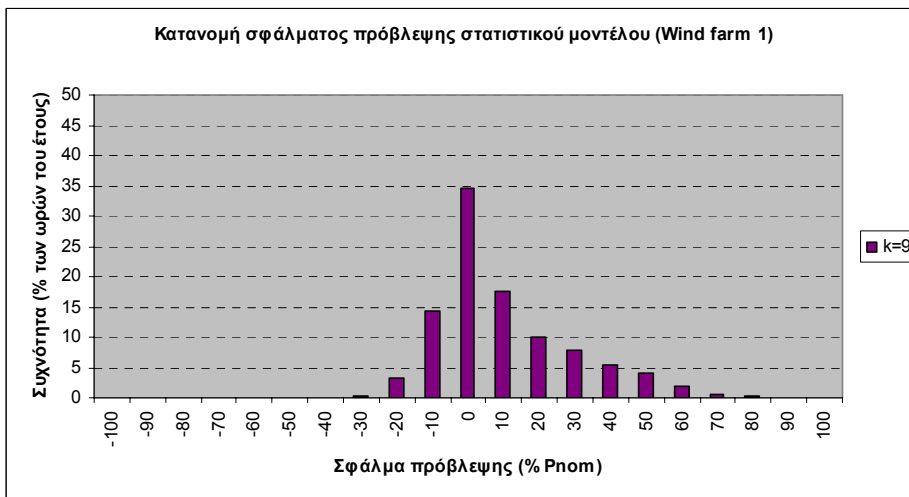
Διάγραμμα 6.10. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 6h



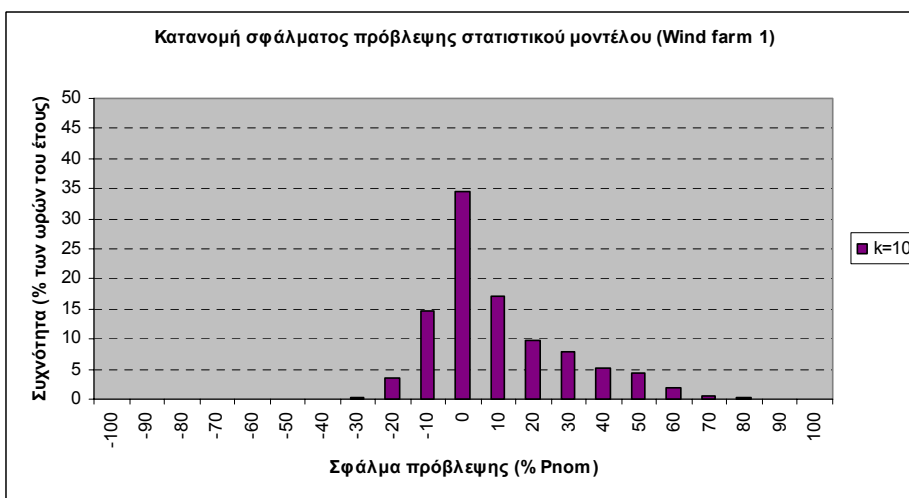
Διάγραμμα 6.11. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 7h



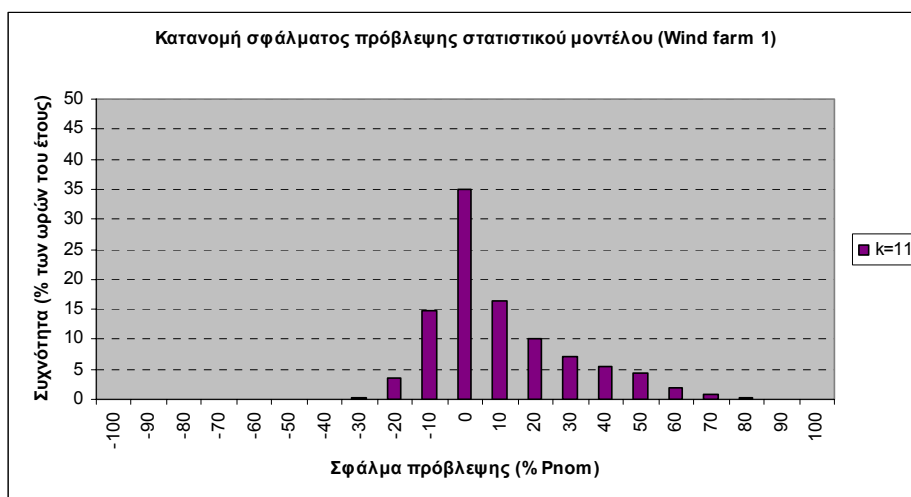
Διάγραμμα 6.12. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 8h



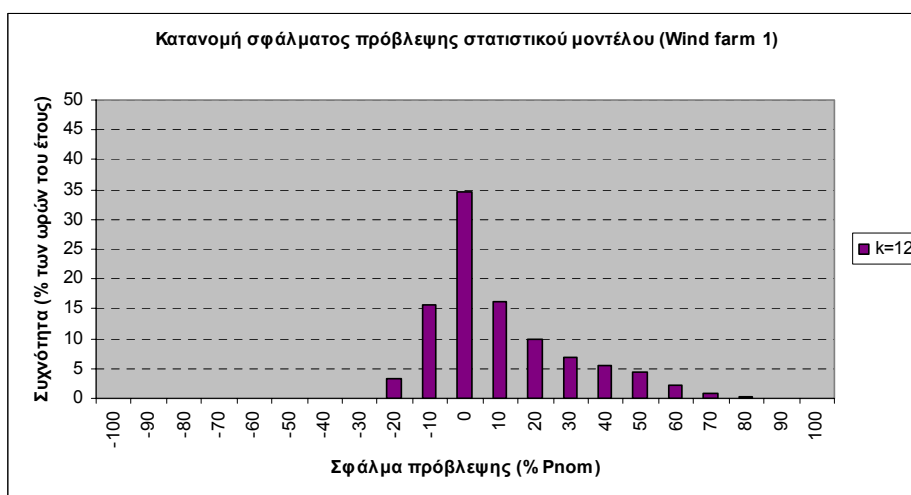
Διάγραμμα 6.13. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 9h



Διάγραμμα 6.14. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 10h



Διάγραμμα 6.15. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 11h



Διάγραμμα 6.16. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα 12h

Από την κατανομή σφαλμάτων του στατιστικού μοντέλου, παρατηρεί κανείς ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των σφαλμάτων κυμαίνεται μεταξύ $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης. Καθώς ο ορίζοντας πρόβλεψης αυξάνει, αυξάνει και η διασπορά των σφαλμάτων. Για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας το 85% του χρόνου τα σφάλματα δεν ξεπερνούν το $\pm 10\%$ της ονομαστικής ισχύος, για ορίζοντα πρόβλεψης έξι ωρών το αντίστοιχο ποσοστό είναι 68%, ενώ για ορίζοντα πρόβλεψης δώδεκα ωρών, μόλις 66,45%. Σφάλματα $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος εμφανίζονται για ορίζοντα πρόβλεψης μίας ώρας, 99,2% του χρόνου, για ορίζοντα πρόβλεψης έξι ωρών 90% και για ορίζοντα δώδεκα ωρών 87%. Μπορεί λοιπόν να πει κανείς ότι το στατιστικό αυτό μοντέλο δεν εμφανίζει συχνά σφάλματα που να

ξεπερνούν το $\pm 30\%$ της ονομαστικής ισχύος. Ωστόσο παρόλα αυτά η συμπεριφορά του δεν είναι καλύτερη από αυτή του Persistence και άρα για ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι και δώδεκα ωρών μεταξύ των δύο, το τελευταίο φαίνεται να είναι πιο αξιόπιστο.

Αξιολογώντας την αντίστοιχη κατανομή, των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι τα σφάλματα που ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος, για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας, εμφανίζονται σε ποσοστό 3% των ωρών του έτους, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών, είναι 16%. Έτσι καθώς αυξάνεται ο ορίζοντας πρόβλεψης, αυξάνεται το ποσοστό των σφαλμάτων που ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 6.2.

Ποσοστό του έτους που τα σφάλματα ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος	
Ορίζοντας πρόβλεψης (h)	Αιολικό πάρκο 1
1	2,93
2	6,25
3	8,44
4	9,93
5	11
6	12,1
7	12,8
8	13,8
9	14,2
10	14,8
11	15,1
12	15,6

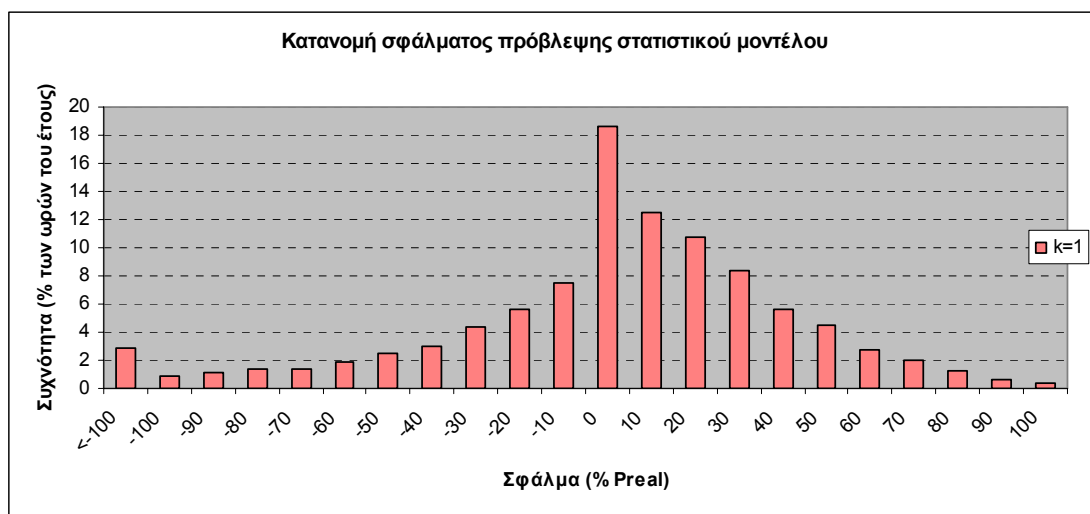
Πίνακας 6.2. Ποσοστό του έτους που τα σφάλματα του στατιστικού μοντέλου ξεπερνούν το 100% της πραγματικής ισχύος

Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της κατανομής αυτής υπάρχει μια εγγενής δυσκολία όταν η πραγματική τιμή της παραγόμενης ισχύος είναι μηδενική. Αυτό γιατί σε αυτή την περίπτωση, το επί τοις εκατό σφάλμα με αυστηρά μαθηματικούς όρους

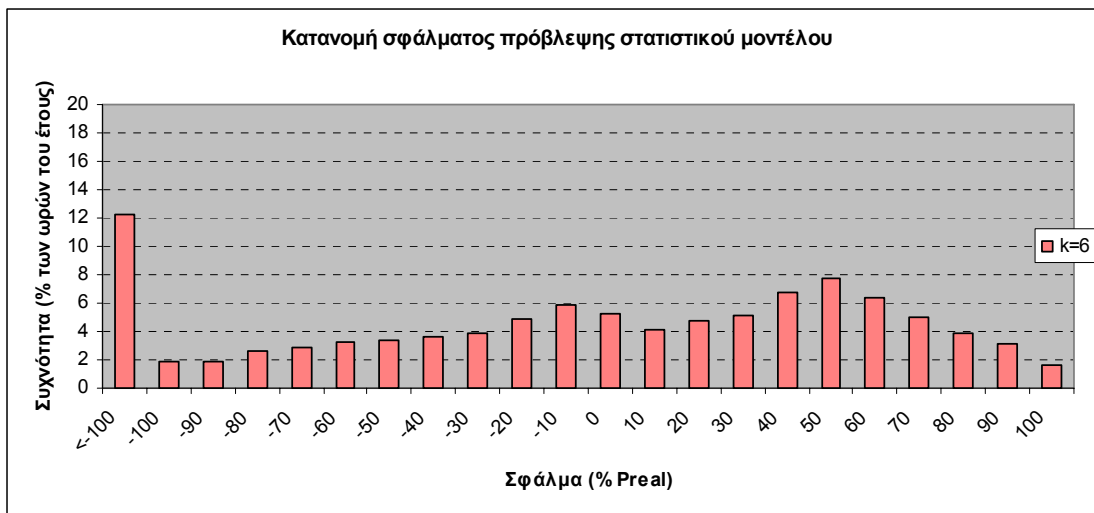
απειρίζεται. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού και επειδή σφάλματα σε πολύ μικρές ισχύες δεν έχουν πρακτική σημασία στην εκτίμηση της επίδοσης του μοντέλου, το επί τοις εκατό σφάλμα που αντιστοιχεί σε τιμές πραγματικής ισχύος μέχρι 10% της ονομαστικής του εξεταζόμενου Α/Π, κανονικοποιήθηκε, όχι ως προς την εκάστοτε πραγματική ισχύ, αλλά ως προς το 10% της ονομαστικής ισχύος.

Γενικά, το στατιστικό μοντέλο έχει μια τάση για μικρές τιμές πραγματικής ισχύος να υπερτιμά την προβλεπόμενη τιμή. Για μεγάλες τιμές ισχύος υποτιμά την προβλεπόμενη τιμή.

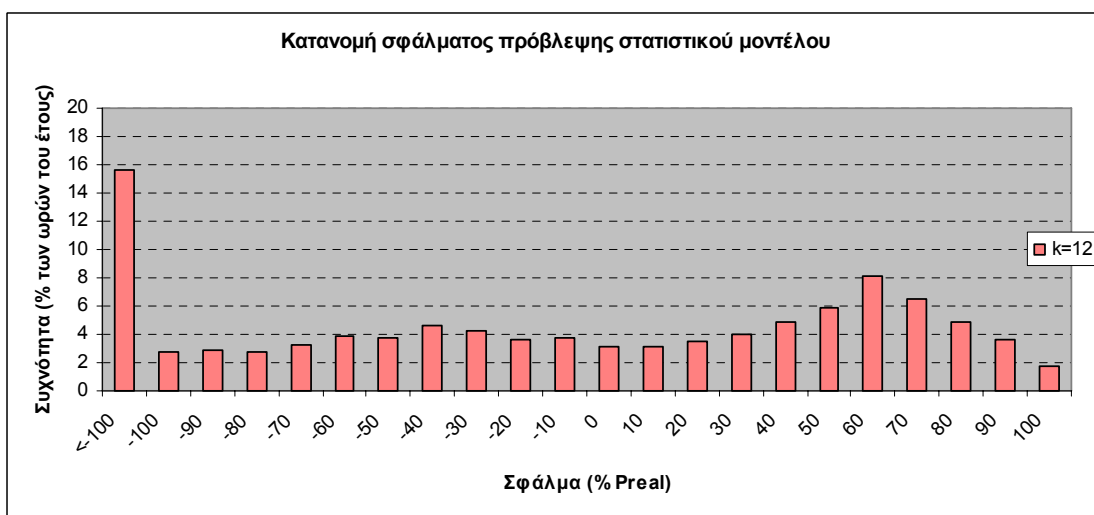
Στα διαγράμματα 6.17.-6.19. φαίνεται η κατανομή των επί της εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων για ορίζοντα πρόβλεψης μιας, έξι και δώδεκα ωρών. Τα σφάλματα που ξεπερνούν το $\pm 100\%$ της πραγματικής ισχύος είναι συγκεντρωμένα σε δύο κλάσεις. Από αυτά φαίνεται ότι καθώς ο ορίζοντας πρόβλεψης αυξάνεται, σφάλματα πρόβλεψης μεταξύ $\pm 100\%P_{\text{real}}$ μειώνονται, με μια τάση να εξισωθούν τα ποσοστά των κλάσεων. Οι κατανομές αυτές δίνονται αναλυτικά για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης στο Παράρτημα.



6.17. Κατανομή επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1h

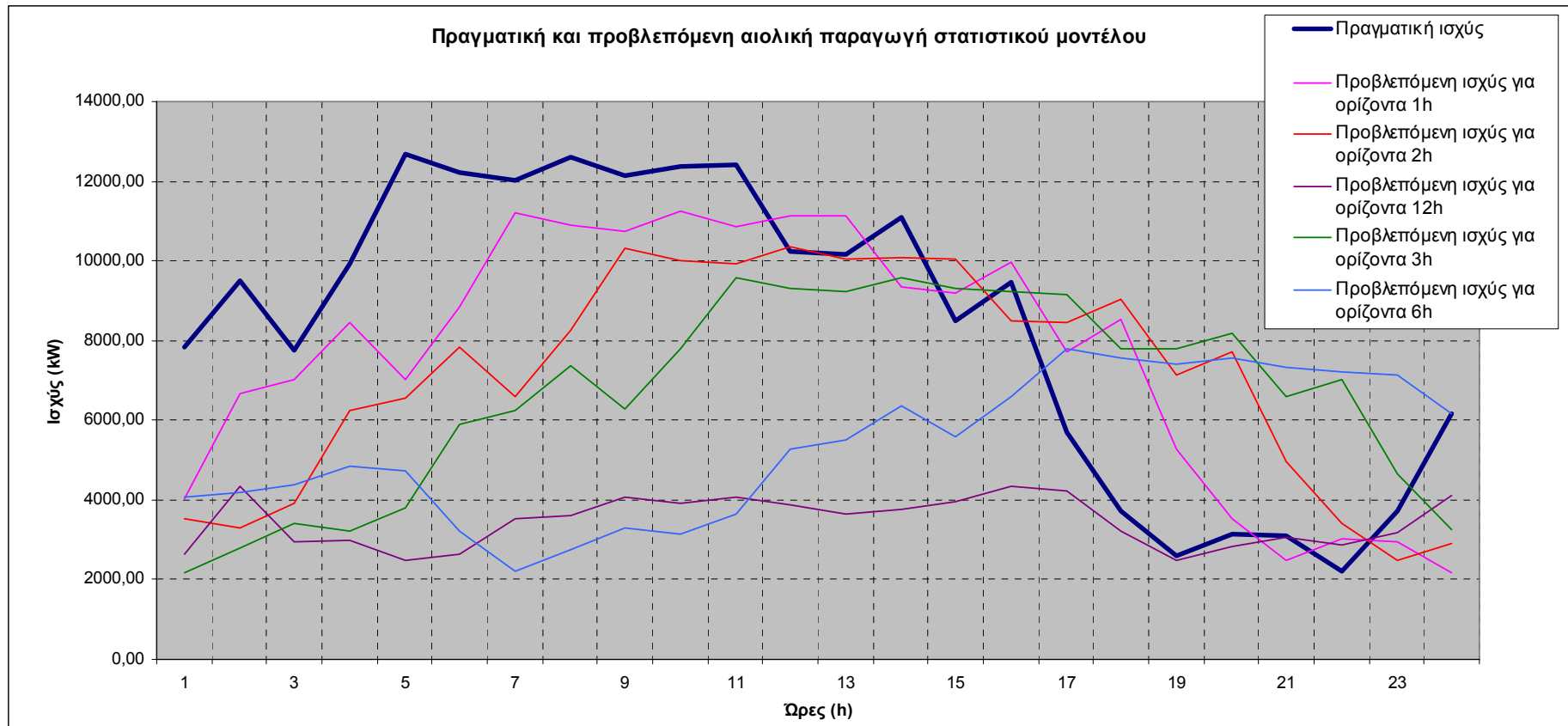


6.18. Κατανομή επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6h



6.19. Κατανομή επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12h

Στο διάγραμμα 6.20. φαίνεται η πρόβλεψη ενός τυχαίου 24ώρου, όπως δίνεται από το στατιστικό μοντέλο. Σε αυτό παρουσιάζεται μια χρονική ολίσθηση μεταξύ πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών.



Διάγραμμα 6.20. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή 24 ωρών στατιστικού μοντέλου

6.5. Συμπεράσματα

Το στατιστικό μοντέλο που υλοποιήθηκε χωρίς τη χρήση μετεωρολογικών δεδομένων, παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα ακόμα και για βραχυχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης. Ουσιαστικά δηλαδή, δεν έχει καμία βελτίωση συγκριτικά με το Persistence. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, αφού η βελτίωση του σφάλματος στα στατιστικά μοντέλα για βραχυχρόνιους ορίζοντες έγκειται στην χρήση μετεωρολογικών δεδομένων και στο συνδυασμό αυτών με μετρούμενες τιμές. Οι προβλεπόμενες από το στατιστικό μοντέλο τιμές εμφανίζουν μια χρονική ολίσθηση συγκριτικά με τις πραγματικές. Οι κατανομές των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων εμφανίζουν θετική κύρτωση, ενώ στις κατανομές των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης, εμφανίζεται μια τάση εξίσωσης του ποσοστού του χρόνου που εμφανίζονται σφάλματα μεταξύ $\pm 100\%$ της πραγματικής ισχύος ανά κλάση, καθώς ο ορίζοντας πρόβλεψης αυξάνεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί αναφορικά με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο, η αιολική ενέργεια θα παίξει το σημαντικότερο ρόλο. Για τον λόγο αυτό, και εξαιτίας των προβλημάτων που αυτή δημιουργούνται στην ενσωμάτωσή της αιολικής παραγωγής στα ΣΗΕ, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου, αναπτύχθηκαν πολλά μοντέλα για την πρόβλεψή της.

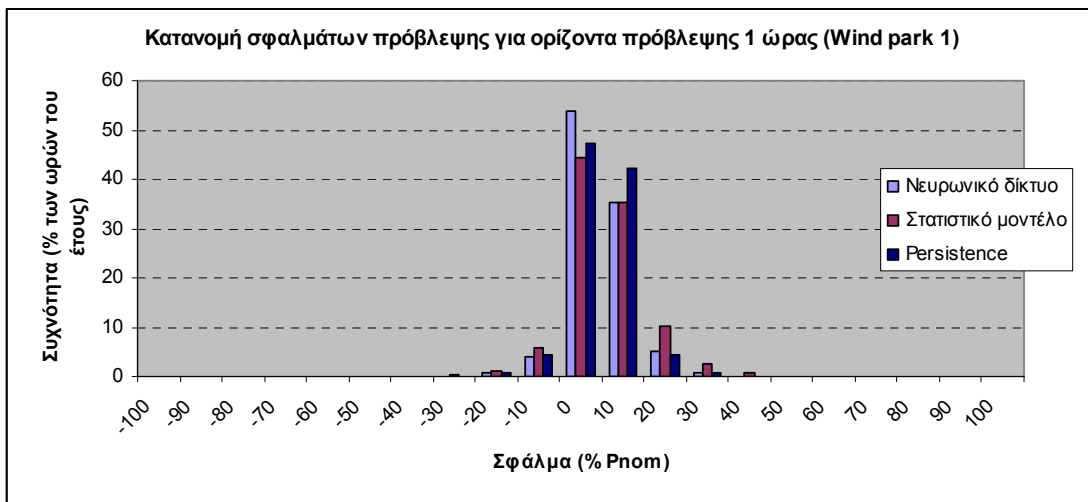
Τα βασικότερα εργαλεία πρόβλεψης αιολικής ισχύος παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο πρώτο μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας, καταγράφοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του καθενός. Τα μοντέλα χωρίστηκαν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτά που χρησιμοποιούν φυσική και σε αυτά που χρησιμοποιούν στατιστική προσέγγιση, για την επίλυση του προβλήματος της πρόβλεψης. Ωστόσο κάποια από αυτά συνδυάζουν και τις δύο προσεγγίσεις για την ακριβέστερη πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Τα μοντέλα, Prediktor, Previento, το μοντέλο της Ewind και το HIRPOM ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, τα AWPPT, WPPT, SIPREOLICO και το μοντέλο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στη δεύτερη, ενώ μοντέλα που χρησιμοποιούν και τις δύο μεθόδους είναι τα Zephyr, Local-και RegioPred. Τα μοντέλα αυτά δεν είναι τα μοναδικά που υπάρχουν, πολλά ακόμα βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο σε όλο τον κόσμο.

Ωστόσο όλα τα μοντέλα όσο ακριβή και αν είναι, παρουσιάζουν ένα βαθμό αβεβαιότητας. Το σφάλμα της πρόβλεψης της ταχύτητας του ανέμου ακολουθεί στις περισσότερες περιπτώσεις κανονική κατανομή, ενώ η αντίστοιχη κατανομή του σφάλματος πρόβλεψης αιολικής παραγωγής είναι μη συμμετρική. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το σφάλμα της πρόβλεψης και άρα την επίδοση των μοντέλων. Ο ορίζοντας πρόβλεψης, η τιμή της προβλεπόμενης ισχύος, η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και ο αριθμός των αιολικών πάρκων που υπάρχουν σε αυτή, τα μετεωρολογικά δεδομένα πρόβλεψης καιρού, η πολυπλοκότητα του εδάφους, η

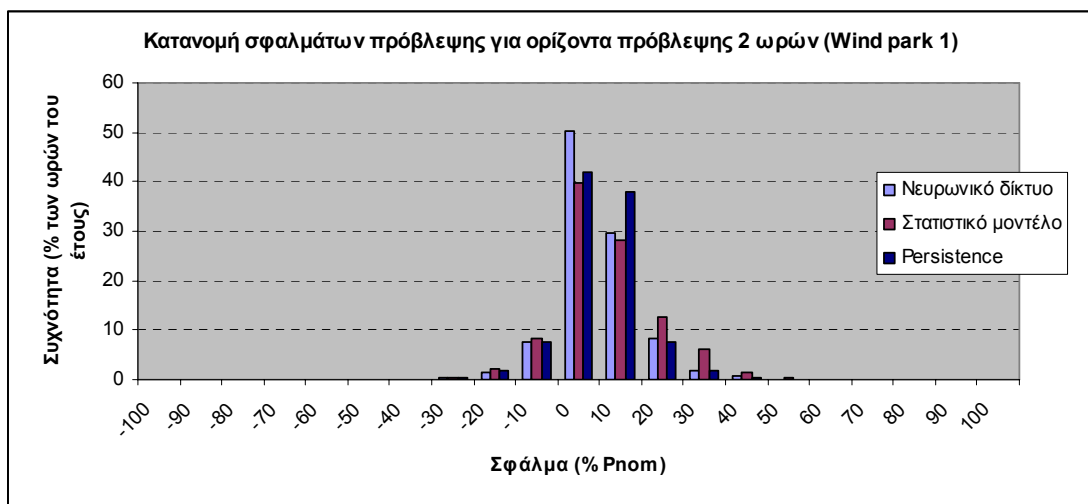
περίοδος της πρόβλεψης και οι καιρικές συνθήκες, είναι οι παράγοντες που εξετάστηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής. Καθένας από αυτούς διαπιστώθηκε ότι επηρεάζει διαφορετικά τα μέτρα και διαφορετικά την κατανομή του σφάλματος. Επίσης διαφορετική είναι και η επίδραση των παραγόντων αυτών, ανάλογα με το είδος του μοντέλου. Έτσι στατιστικά μοντέλα έχουν καλύτερη επίδοση από τα φυσικά για πολύ βραχυχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης, ενώ η επίδοση των τελευταίων βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου. Όλα τα σύγχρονα εργαλεία πρόβλεψης χρησιμοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα, η ποιότητα των οποίων επηρεάζει ιδιαίτερα την πρόβλεψη. Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος μειώνει το σφάλμα συγκριτικά με το αντίστοιχο του μεμονωμένου αιολικού πάρκου, εξαιτίας εξομαλυντικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Η τραχύτητα του εδάφους με τη σειρά της, επηρεάζει ιδιαίτερα το σφάλμα, παρουσιάζοντας μια αναλογική σχέση με την αύξηση του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους. Από τη μελέτη που έγινε δεν μπορεί να καταλήξει κανείς για το ποια μοντέλα θα ήταν πιο αξιόπιστα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής. Κάποια εμφανίζουν μεγαλύτερο σφάλμα υπό κάποιες συνθήκες και κάποια υπό άλλες. Πιθανόν ο συνδυασμός όλων των υπάρχουσών μεθόδων με χρήση του καθενός από αυτά ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες να έδινε τα καλύτερα αποτελέσματα.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν δύο απλά μοντέλα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής, ένα νευρωνικό δίκτυο, με εννιά νευρώνες και ένα στατιστικό μοντέλο γνωστό από τη βιβλιογραφία, το WPPT, τα οποία περιγράφηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων με κάποια σχόλια παρουσιάζονται συγκριτικά παρακάτω.

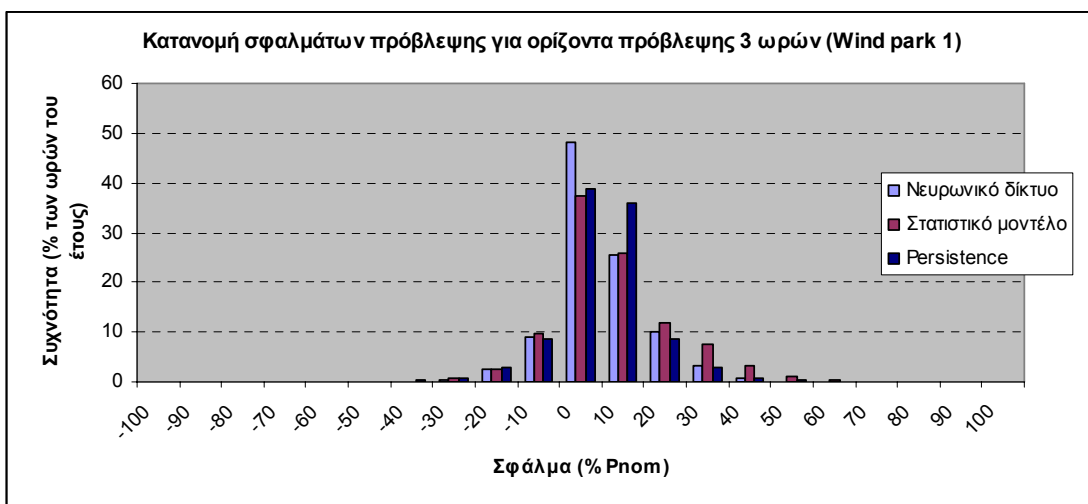
Στα διαγράμματα 7.1.-7.12. παρουσιάζεται η κατανομή των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης των μοντέλων που υλοποιήθηκαν συγκριτικά και με την αντίστοιχη του μοντέλου Persistence.



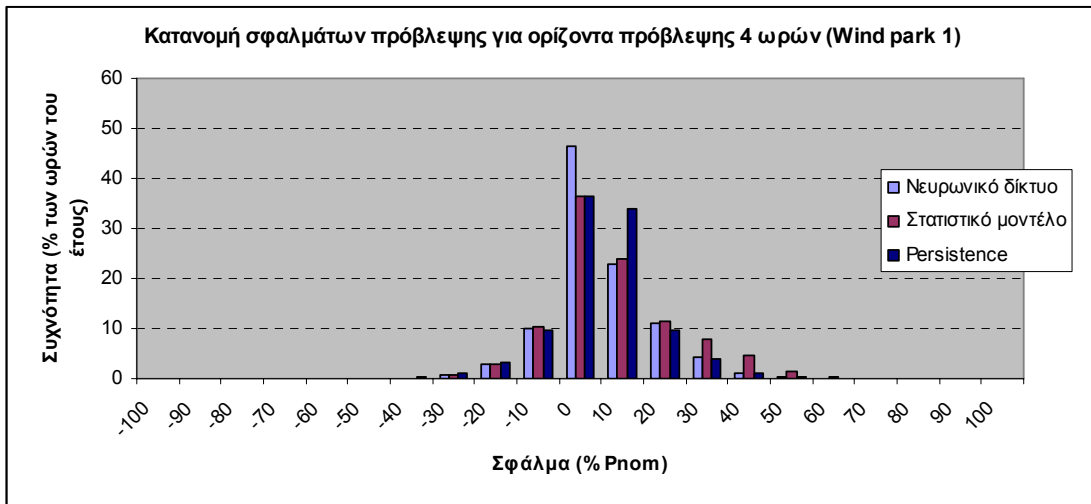
Διάγραμμα 7.1. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (1h)



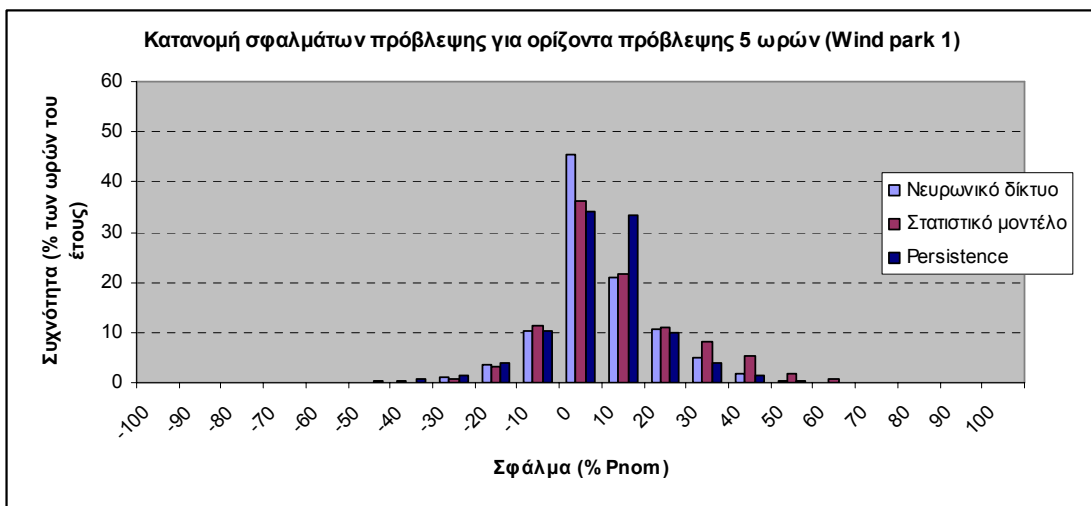
Διάγραμμα 7.2. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (2h)



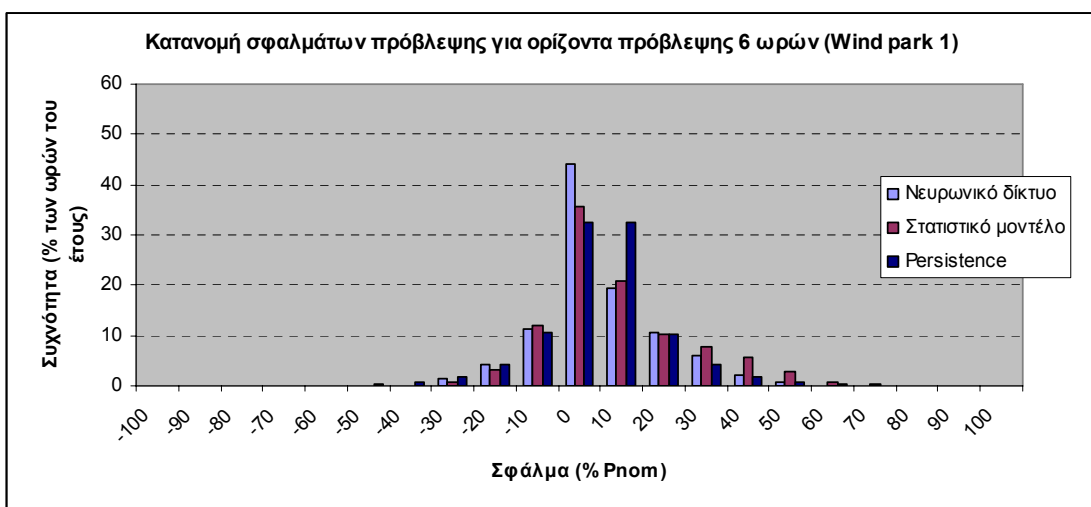
Διάγραμμα 7.3. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (3h)



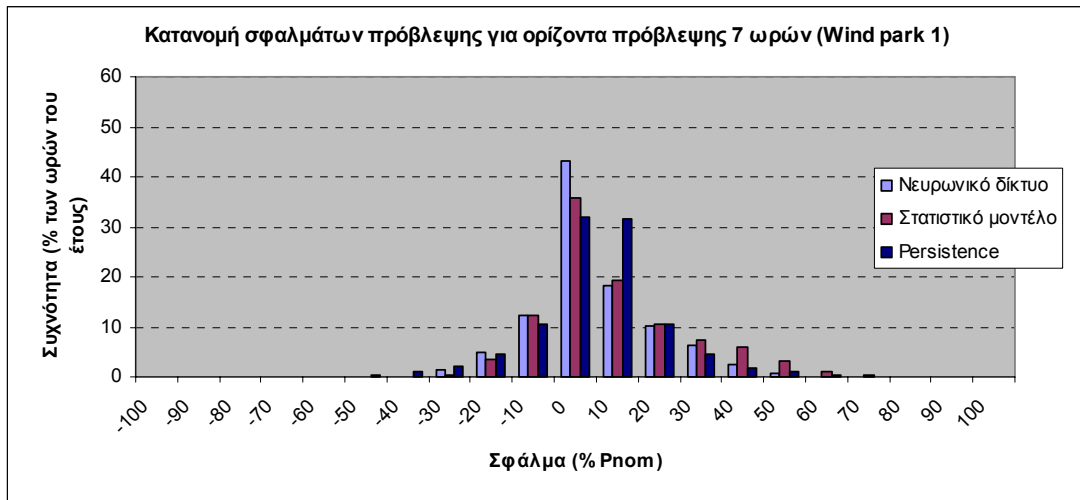
Διάγραμμα 7.4. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (4h)



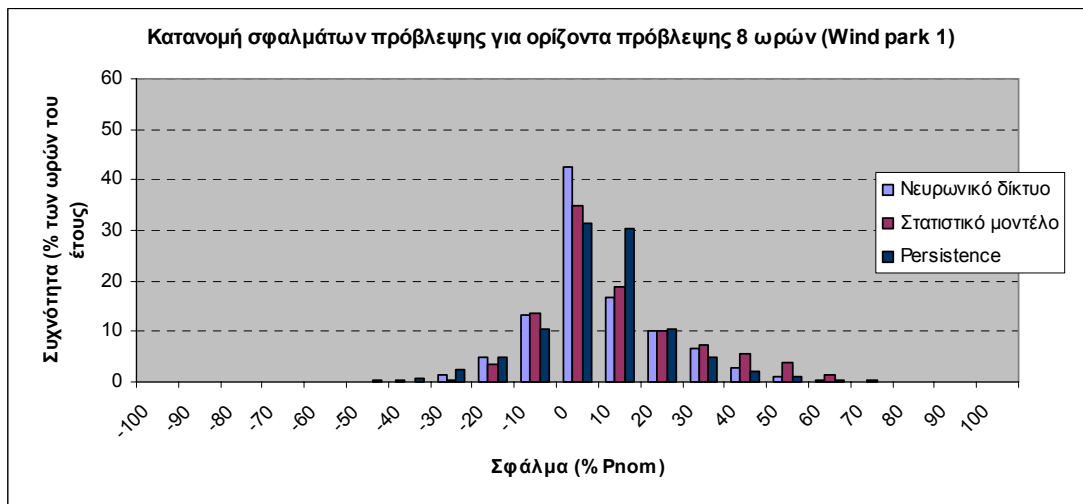
Διάγραμμα 7.5. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (5h)



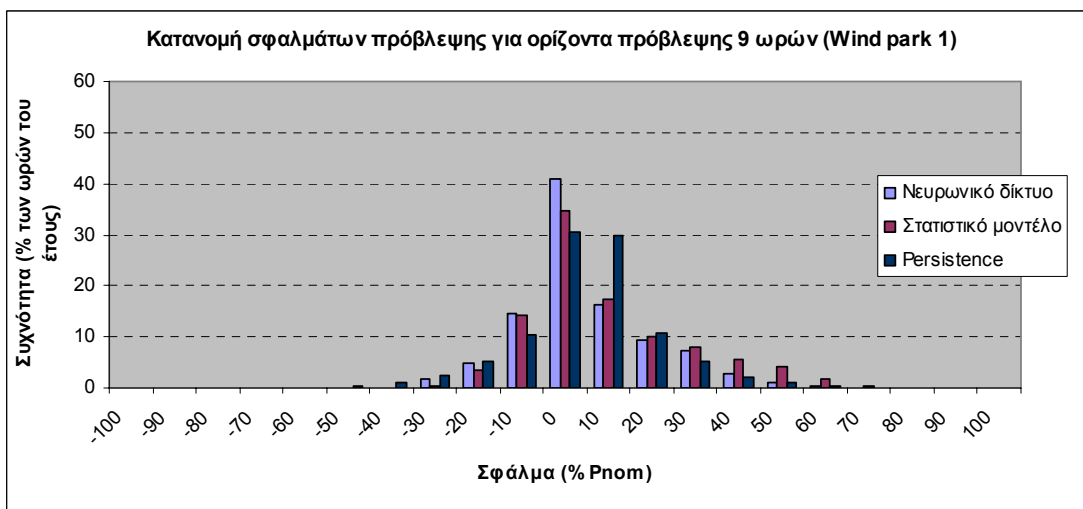
Διάγραμμα 7.6. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (6h)



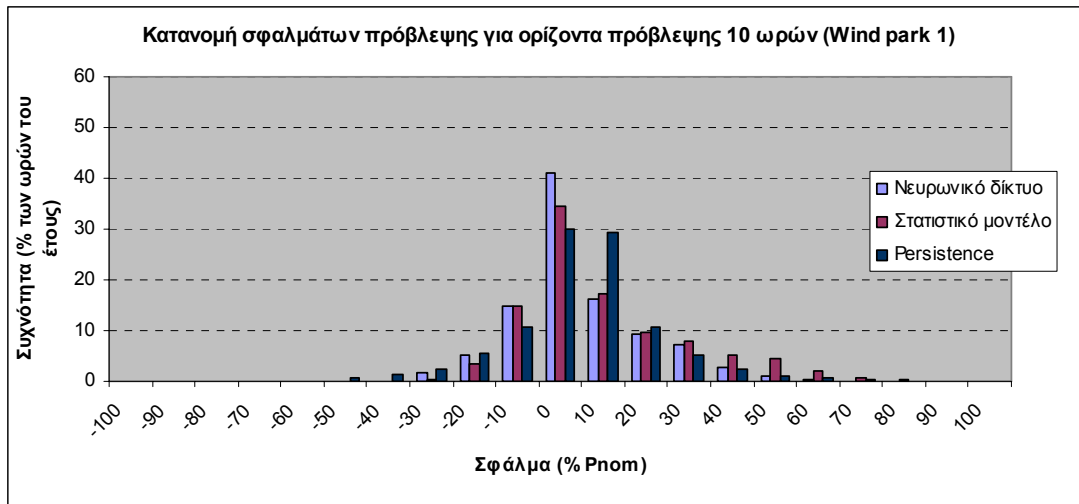
Διάγραμμα 7.7. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (7h)



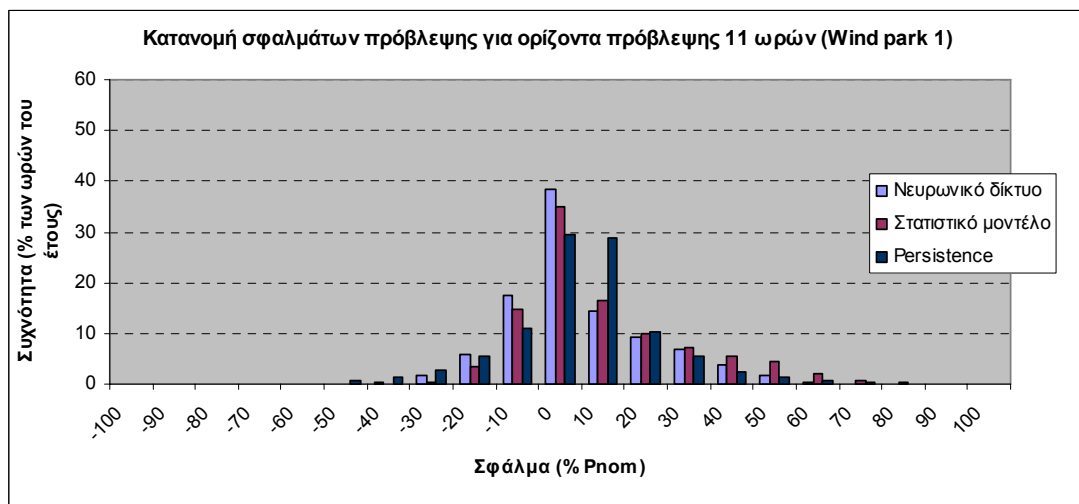
Διάγραμμα 7.8. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (8h)



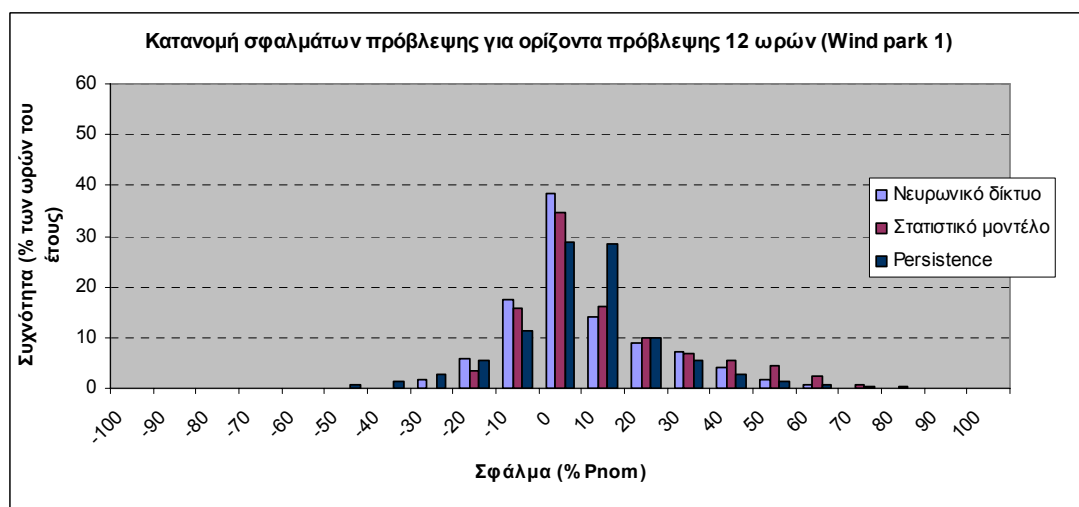
Διάγραμμα 7.9. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (9h)



Διάγραμμα 7.10. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (10h)



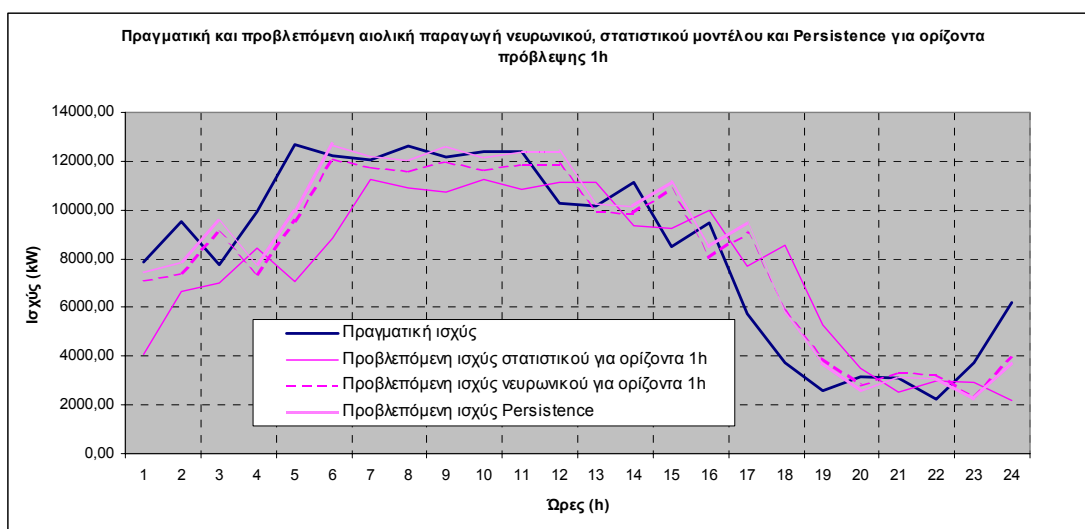
Διάγραμμα 7.11. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (11h)



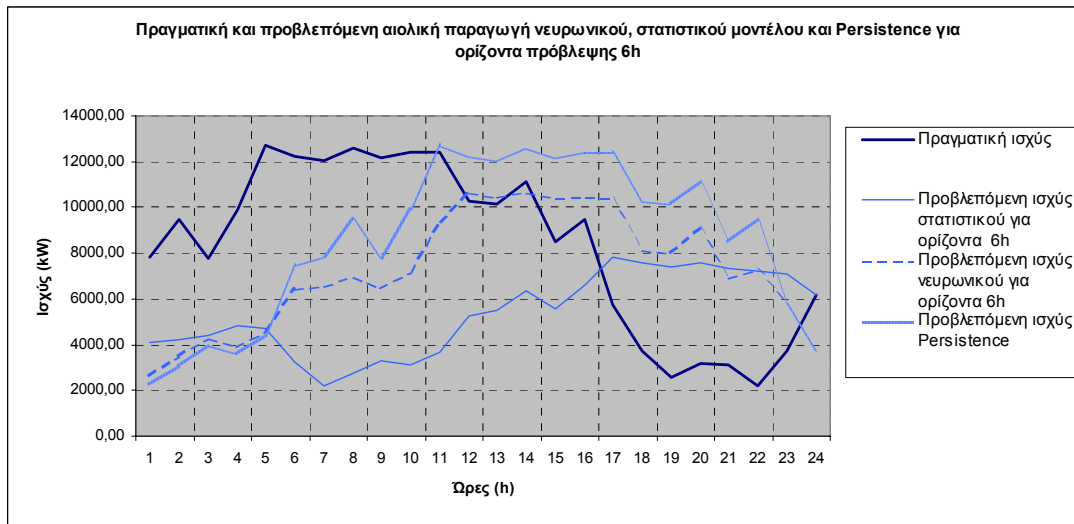
Διάγραμμα 7.12. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης και των τριών μοντέλων (12h)

Για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης το νευρωνικό δίκτυο έχει υψηλότερο ποσοστό σφαλμάτων μεταξύ $\pm 10\%$ της ονομαστικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια την αιολική παραγωγή. Το στατιστικό μοντέλο εμφανίζει σφάλματα μέχρι και 90% της ονομαστικής ισχύος (σε μικρό βέβαια ποσοστό), ενώ το νευρωνικό μόνο μέχρι 60%. Έτσι οι κατανομές του σφάλματος των δύο μοντέλων διαφοροποιούνται ως προς την ασυμμετρία και την κύρτωση. Το στατιστικό μοντέλο εμφανίζει θετικότερη ασυμμετρία, κάτι που υποδηλώνει ότι έχει μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων στο δεξί άκρο, από ότι το νευρωνικό. Αντίθετα το νευρωνικό εμφανίζει μεγαλύτερη αιχμή και επομένως μεγαλύτερη κύρτωση στην κατανομή των σφαλμάτων του συγκριτικά με το στατιστικό.

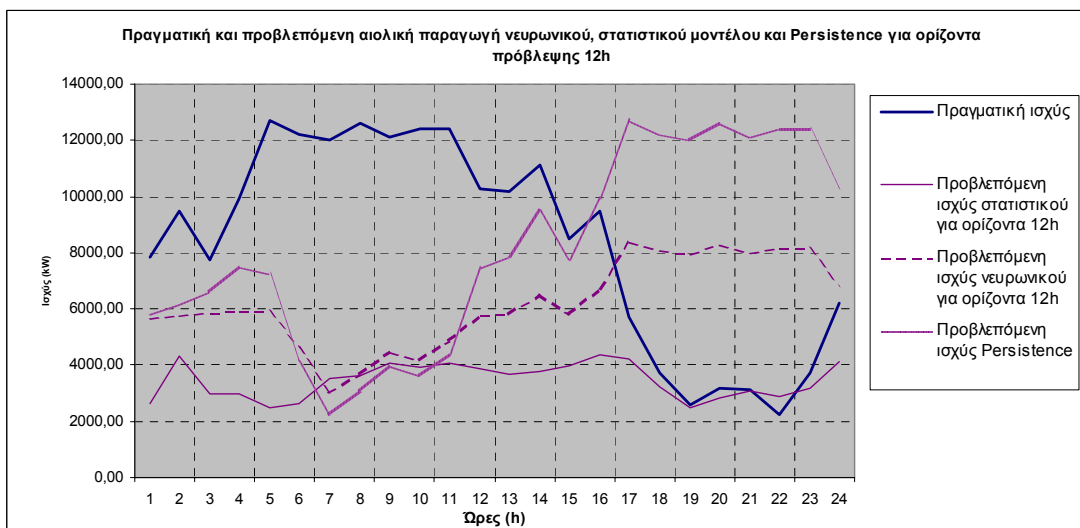
Η πρόβλεψη που το στατιστικό και το νευρωνικό μοντέλο παρέχει για ένα τυχαίο 24ωρο του έτους φαίνεται για ορίζοντα πρόβλεψης μίας, έξι και δώδεκα ωρών στα διαγράμματα 7.13-7.15. Σε αυτά φαίνεται ότι η πρόβλεψη που παρέχεται και από τα δύο μοντέλα, εμφανίζει μια χρονική ολίσθηση συγκριτικά με την πραγματική τιμή.



Διάγραμμα 7.13. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή για ορίζοντα πρόβλεψης μιας ώρας

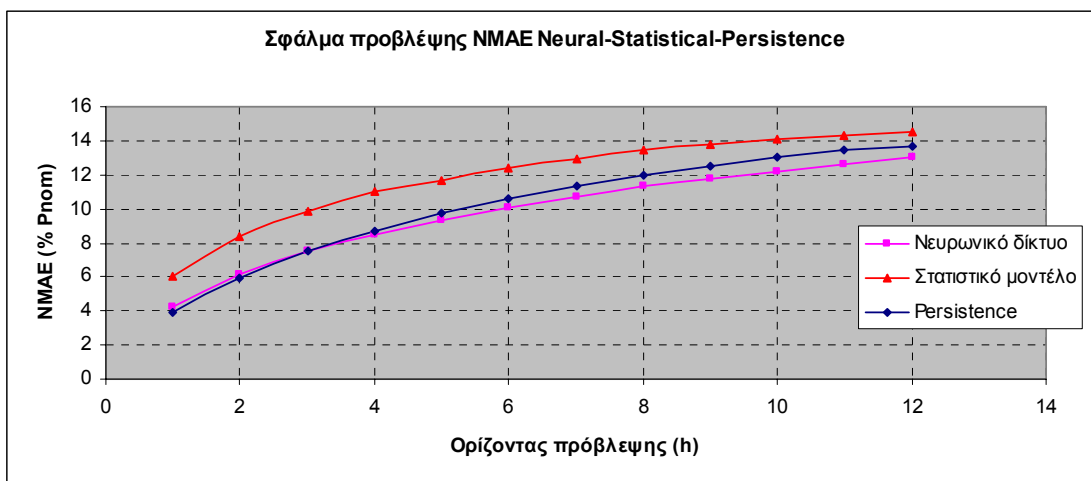


Διάγραμμα 7.14. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή για ορίζοντα πρόβλεψης έξι ωρών

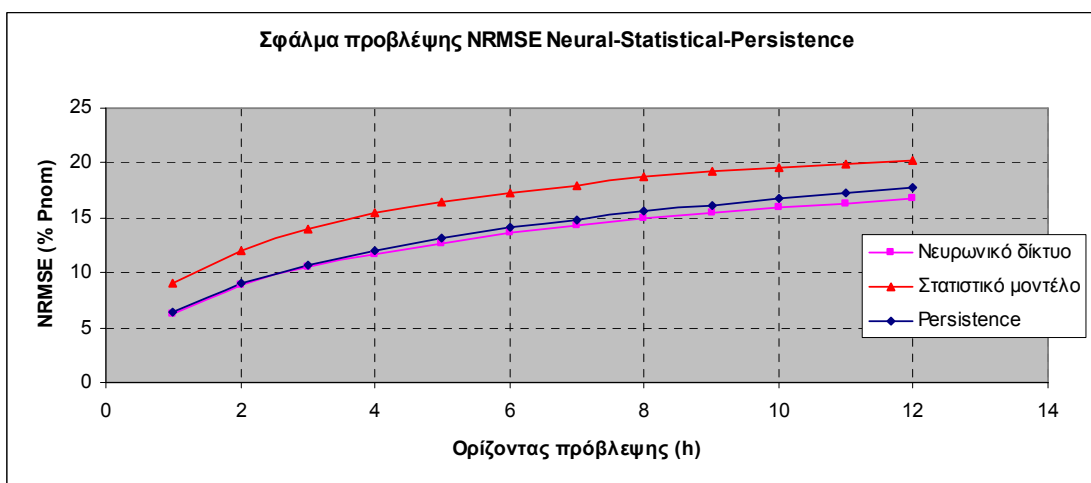


Διάγραμμα 7.15. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή για ορίζοντα πρόβλεψης δώδεκα ωρών

Στα διαγράμματα 7.16. και 7.17. παρουσιάζεται η επίδοση των μοντέλων συναρτήσει του ορίζοντα πρόβλεψης.



Διάγραμμα 7.16. NMAE συναρτήσεϊ του ορίζοντα πρόβλεψης



Διάγραμμα 7.17. NRMSE συναρτήσεϊ του ορίζοντα πρόβλεψης

Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρεί κανείς, ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει μικρότερο σφάλμα από το στατιστικό μοντέλο για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης. Υπενθυμίζεται ότι τα μοντέλα (στατιστικό και νευρωνικό) που υλοποιήθηκαν και ερευνήθηκαν δεν περιλάμβαναν αριθμητικές προβλέψεις καιρού, λόγω αδυναμίας εύρεσης τέτοιων δεδομένων. Συγκρίνοντας λοιπόν, ένα στατιστικό μοντέλο χωρίς NWP και ένα αντίστοιχο νευρωνικό, συμπεραίνει κανείς ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει καλύτερη επίδοση από το στατιστικό και μάλιστα η βελτίωση του ως προς αυτό, είναι περίπου 30% για όλους τους ορίζοντες πρόβλεψης. Φαίνεται ότι το νευρωνικό δίκτυο (χωρίς NWP) έχει την ικανότητα να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ορίζοντα πρόβλεψης μέχρι δώδεκα ώρες. Τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι μόνο βελτιωμένα συγκριτικά με τα αντίστοιχα από το Persistence, αλλά μπορούν για ορίζοντα

πρόβλεψης μέχρι δώδεκα ωρών να συναγωνιστούν και εμπορικά εργαλεία πρόβλεψης. Αντίθετα με το νευρωνικό δίκτυο, το στατιστικό μοντέλο χωρίς τη χρήση NWP δεν βελτιώνει την επίδοση του συγκριτικά με το Persistence ούτε καν για βραχυχρόνιους ορίζοντες πρόβλεψης. Έτσι μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι το στατιστικό μοντέλο χωρίς τη χρήση NWP δεν μπορεί να δώσει αξιόπιστες προβλέψεις και άρα καλό είναι να αποφεύγεται. Η χρήση αριθμητικών δεδομένων καιρού (NWPs) στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής για ορίζοντα πρόβλεψης μεγαλύτερο από δώδεκα ώρες είναι απαραίτητη και στα δύο μοντέλα, αφού από υπολογισμούς που έγιναν αποδείχθηκε ότι χωρίς τα NWPs, το σφάλμα πρόβλεψης σχεδόν διπλασιάζεται συγκριτικά με το αντίστοιχο για πρόβλεψη δώδεκα ωρών. Έτσι μοντέλα που δεν χρησιμοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη 24ώρου ή 48ώρου, η οποία είναι χρήσιμη στον προγραμματισμό της διαχείρισης του δικτύου. Το νευρωνικό λοιπόν που υλοποιήθηκε εδώ, δίνει αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνητικούς σκοπούς, δεν μπορεί όμως να συναγωνιστεί εμπορικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη 24ώρου ή 48ώρου. Το στατιστικό μοντέλο δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για κανένα ορίζοντα πρόβλεψης.

Από τη βιβλιογραφία τα μοντέλα που βασίζονται σε θεωρία νευρωνικών δικτύων παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση από το μοντέλο Persistence για ορίζοντες πρόβλεψης μεγαλύτερους των τριών ωρών, κάτι που πιστοποιείται και από τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται στα δεδομένα εισόδου και να ρυθμίζουν έτσι τις συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων ώστε να δίνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να έχει διαφορετική επίδοση από ένα άλλο που έχει τα ίδια χαρακτηριστικά, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικό set εκπαίδευσης. Για το λόγο αυτό η επιλογή του set εκπαίδευσης, έτσι ώστε αυτό να περιλαμβάνει όλα τα καιρικά φαινόμενα, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ποιότητα της πρόβλεψης. Όσον αφορά τα στατιστικά μοντέλα η βελτίωση τους ως προς το Persistence και τα φυσικά μοντέλα έγκειται στη ικανότητά τους να συσχετίζουν με κατάλληλες στατιστικές μεθόδους τα μετρούμενα και τα προβλεπόμενα δεδομένα, έτσι ώστε να δίνουν ασφαλείς προβλέψεις. Εάν λοιπόν ένα τέτοιου τύπου μοντέλο λειτουργεί χωρίς αριθμητικά δεδομένα πρόβλεψης καιρού χάνει την αξιοπιστία του.

Από όσα αναφέρθηκαν είναι εμφανές ότι το θέμα της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής είναι ιδιαίτερα περίπλοκο, δυναμικό και δεν επιδέχεται μια μόνο λύση. Καθώς η αιολική διείσδυση αυξάνεται, οι απαιτήσεις των τελικών χρηστών διαφοροποιούνται και γίνονται όλο και πιο πολύπλοκες. Για το λόγο αυτό, συνεχείς έρευνες σε αυτό τον τομέα πρέπει να είναι σε εξέλιξη, ώστε να επαναπροσδιορίζονται ανάλογα με τις συνθήκες, οι στόχοι. Μελλοντικός στόχος, θα πρέπει να είναι η ποσοτικοποίηση του σφάλματος της πρόβλεψης και η ανάπτυξη ιδανικών στρατηγικών για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στην αγορά, έτσι ώστε αυτή να συμμετέχει αξιόπιστα στην κάλυψη του φορτίου του συστήματος. Η περαιτέρω έρευνα θα βοηθήσει στον καθορισμό των ορίων διείσδυσης της αιολικής παραγωγής, στην πρόληψη της ρύπανσης και στην εκτίμηση της επίδρασης των προβλέψεων σε τομείς όπως η ευστάθεια του συστήματος. Ήδη έχει αποδειχθεί ότι χρησιμοποιώντας εξελιγμένα εργαλεία πρόβλεψης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Πρέπει λοιπόν να δοθούν απαντήσεις σε όλα τα ερωτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της καθαρής αυτής μορφής ενέργειας, ώστε να θεωρείται πλέον και αυτή αναπόσπαστο κομμάτι για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών παγκοσμίως.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παράρτημα παρουσιάζονται οι κατανομές των επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης και για τα τρία εξετασθέντα αιολικά πάρκα για το νευρωνικό μοντέλο πρόβλεψης, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες κατανομές των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης. Οι αντίστοιχες κατανομές δίνονται και για το στατιστικό μοντέλο πρόβλεψης για το αιολικό πάρκο 1.

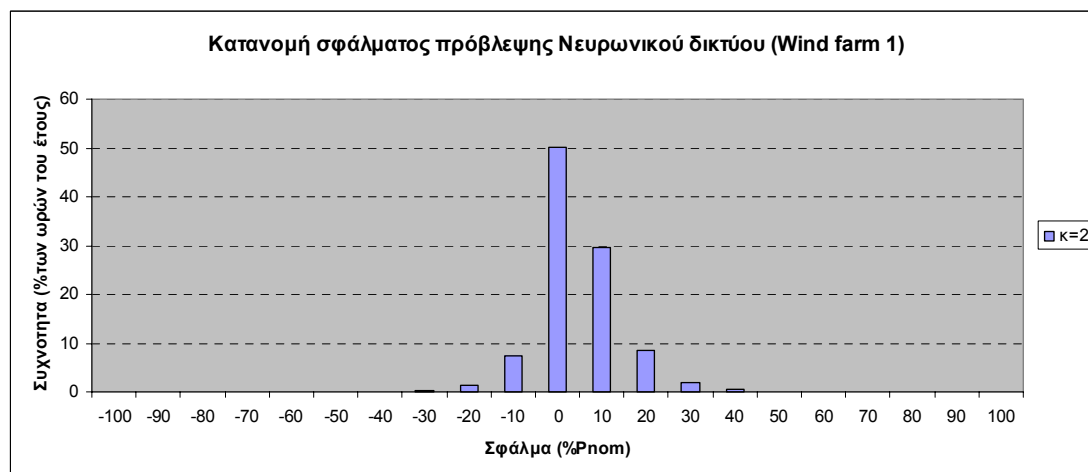
A. Νευρωνικό μοντέλο

Π.1.Κατανομή των επί της εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης

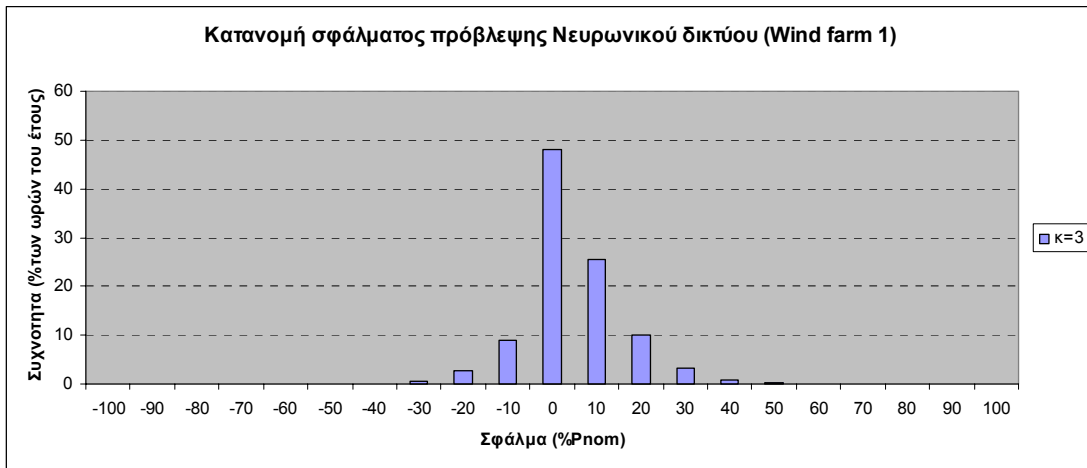
Π.1.1. Αιολικό πάρκο 1



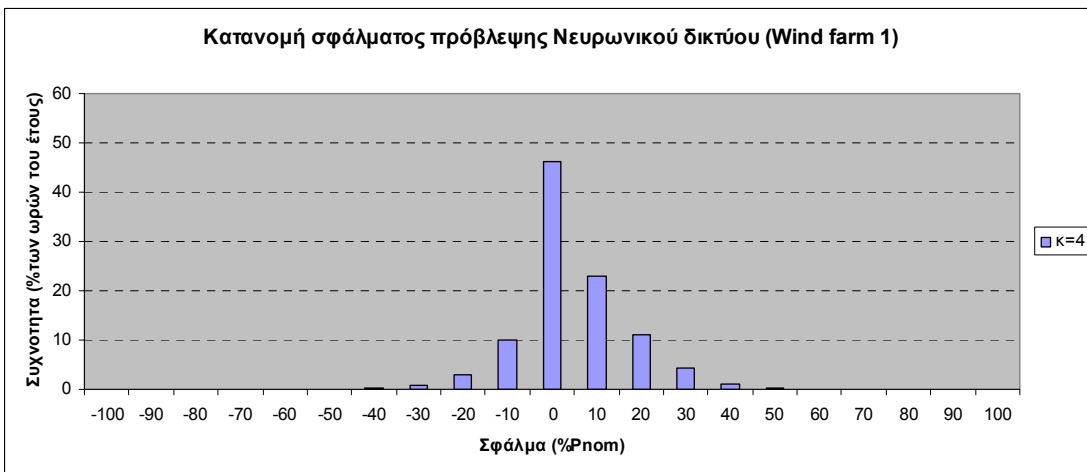
Διάγραμμα 1. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



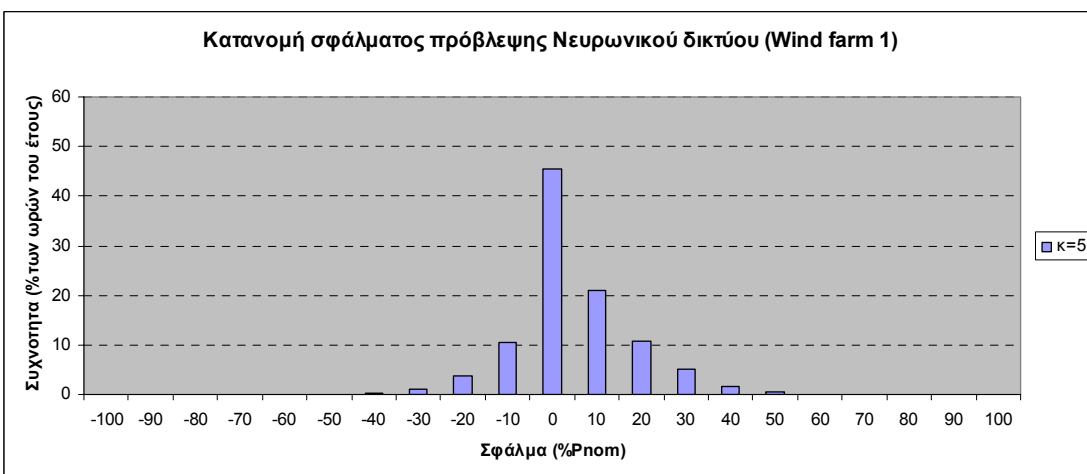
Διάγραμμα 2. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



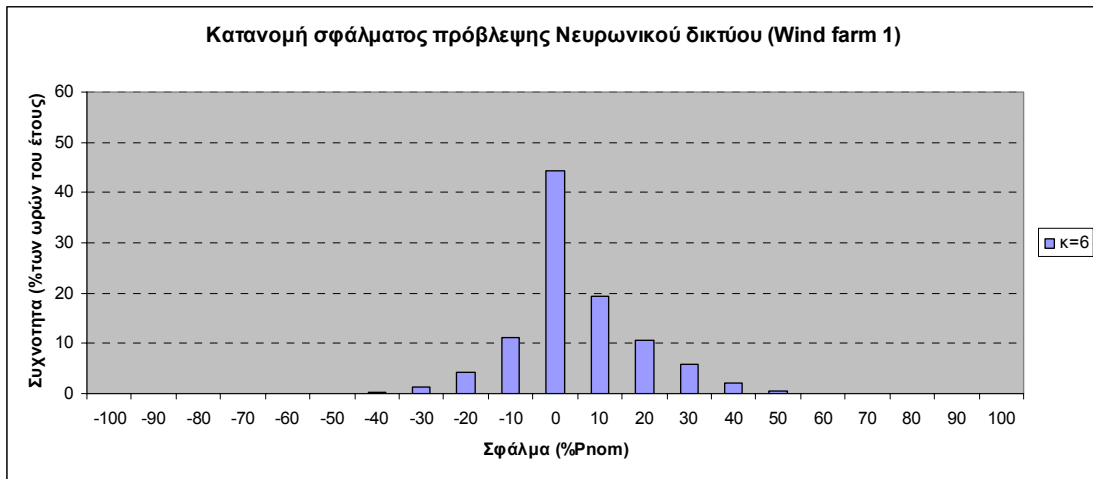
Διάγραμμα 3. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



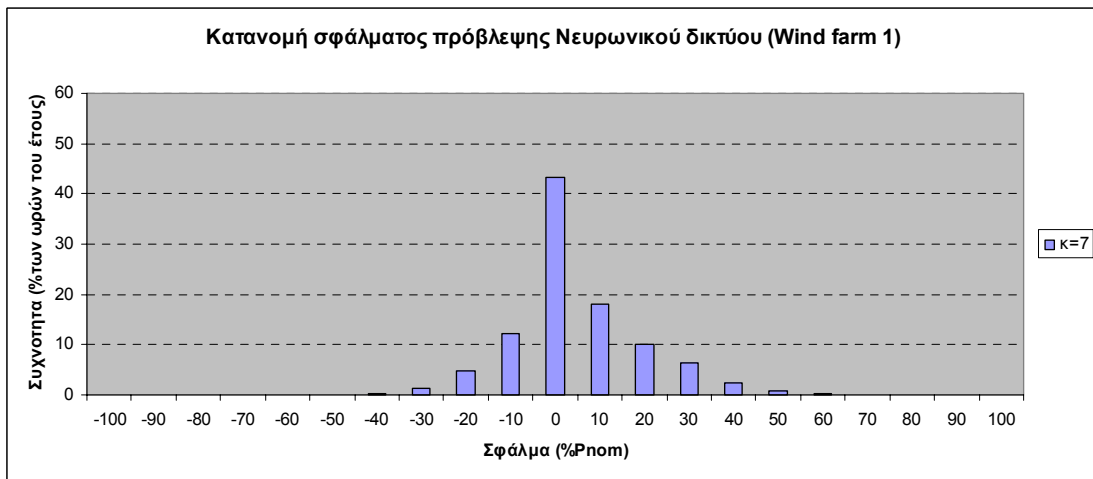
Διάγραμμα 4. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



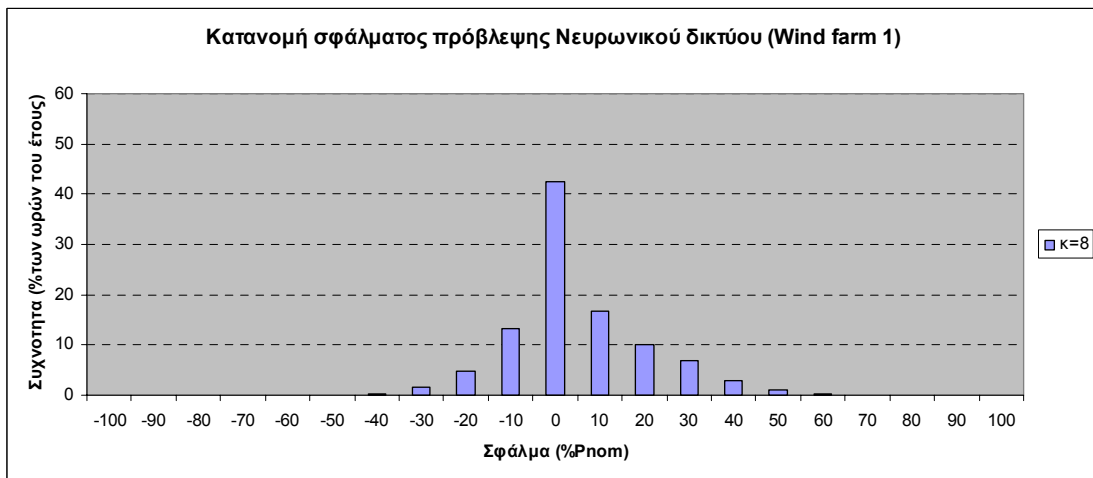
Διάγραμμα 5. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



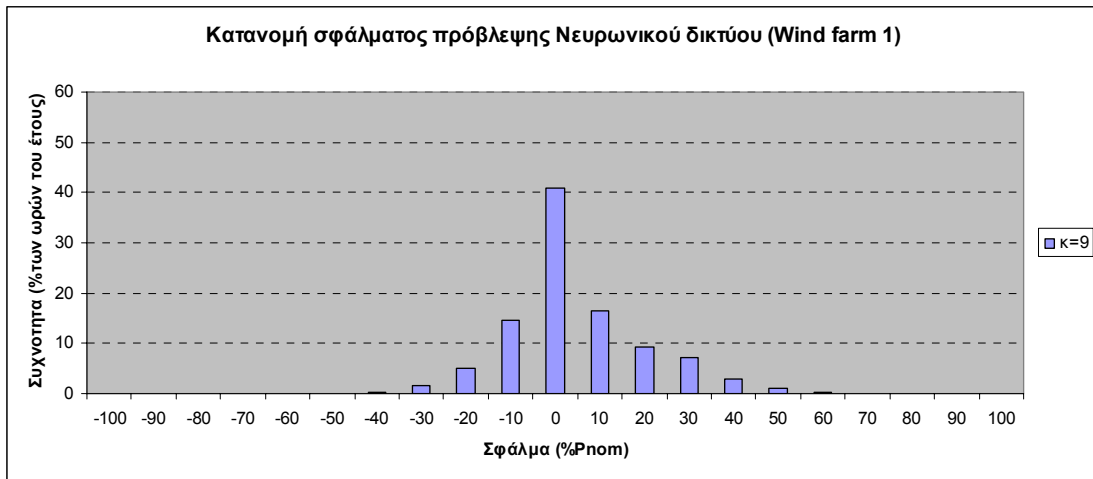
Διάγραμμα 6. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



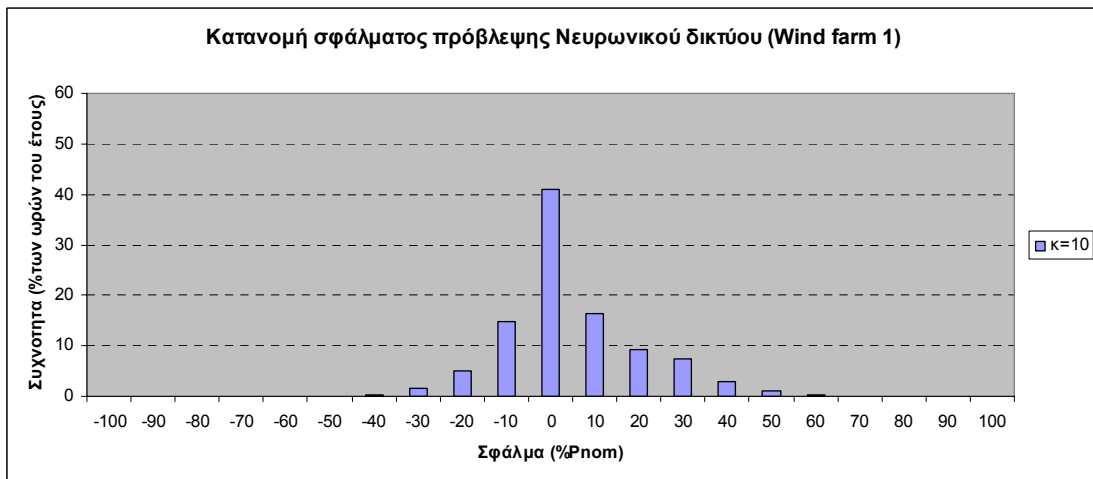
Διάγραμμα 7. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



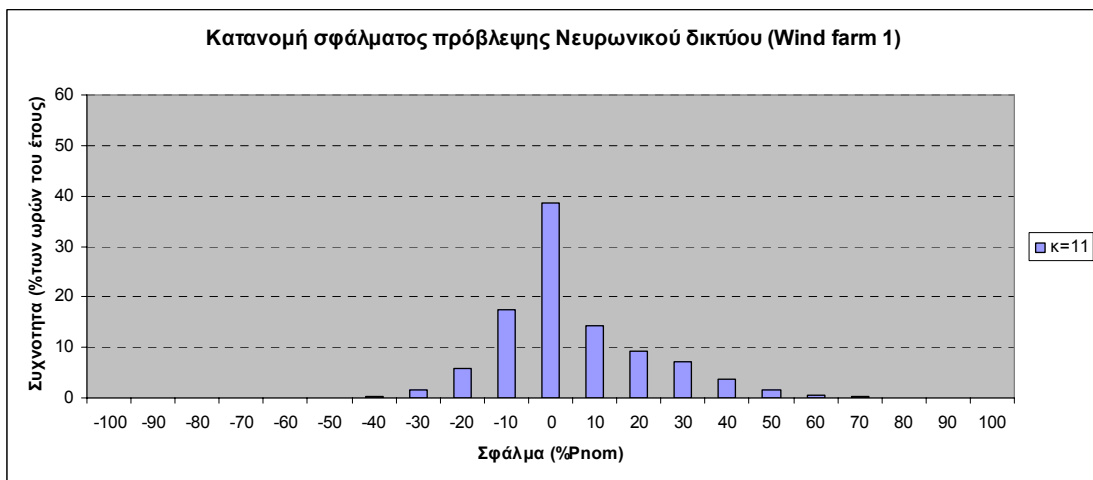
Διάγραμμα 8. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



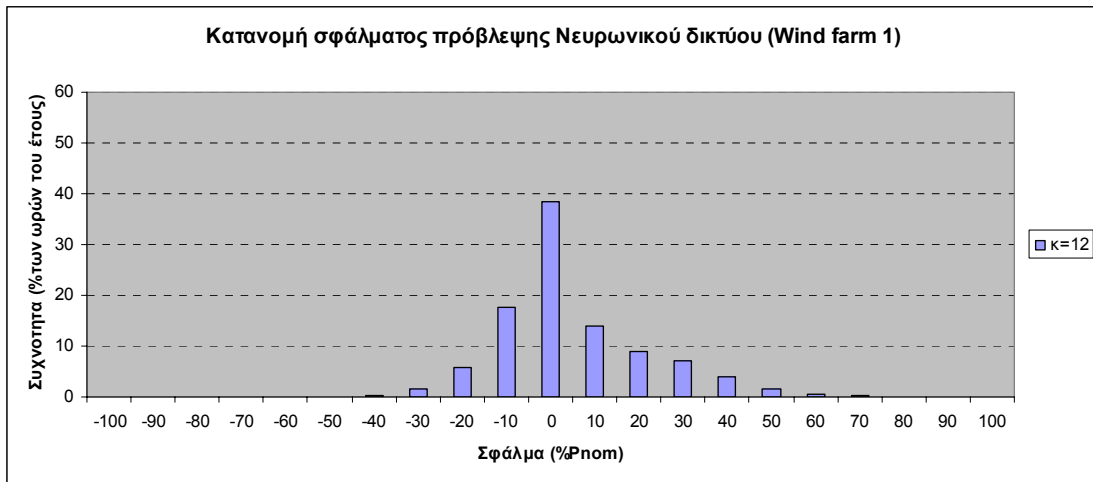
Διάγραμμα 9. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 10. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 10 ωρών

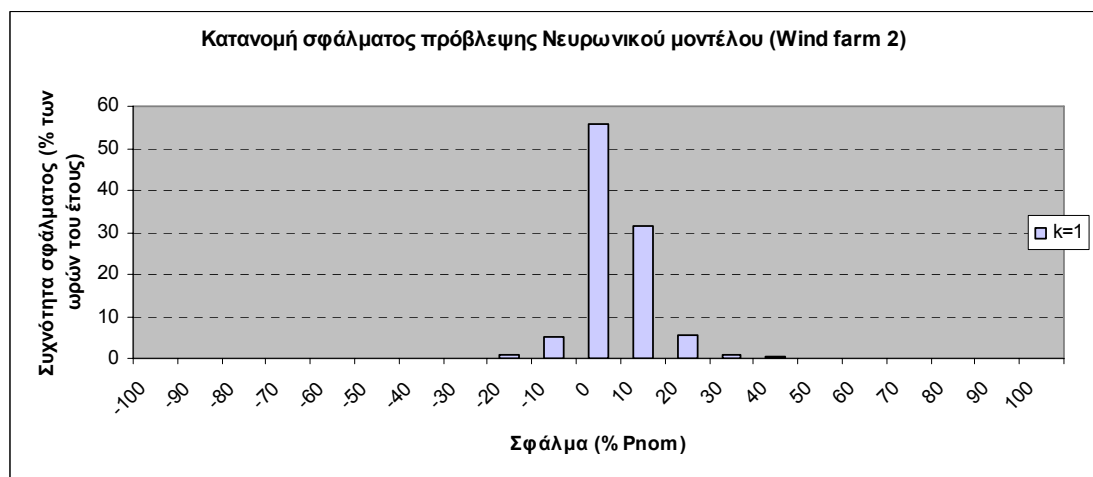


Διάγραμμα 11. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών

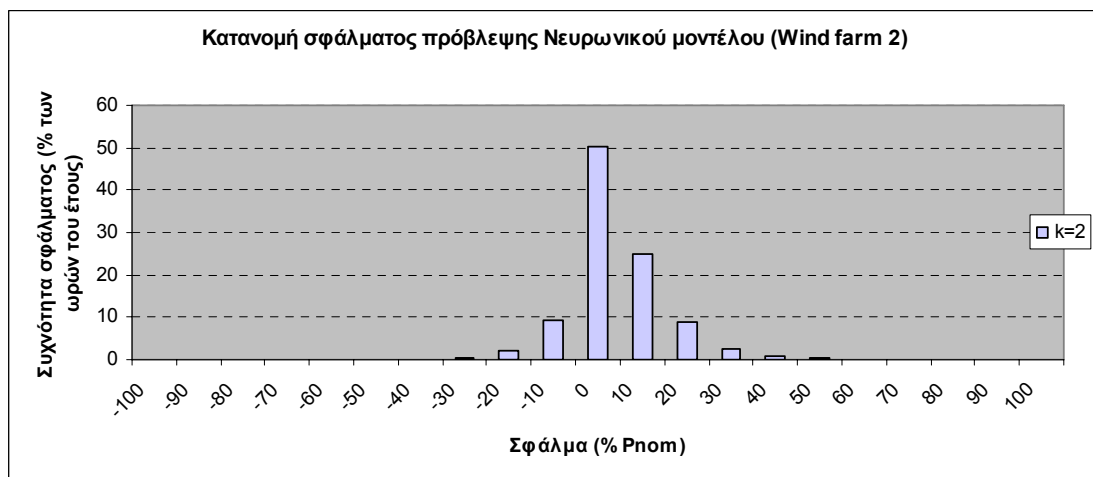


Διάγραμμα 12. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

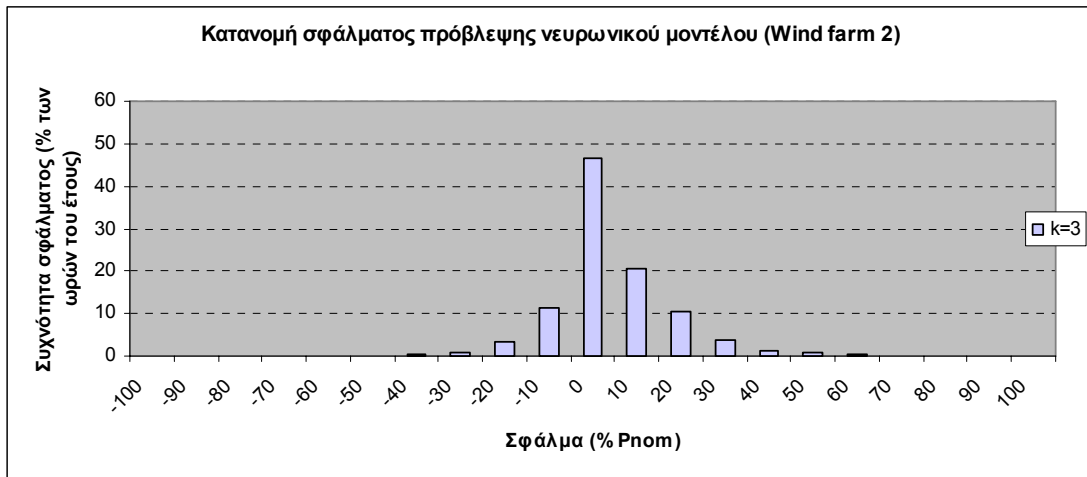
Π.1.2. Αιολικό πάρκο 2



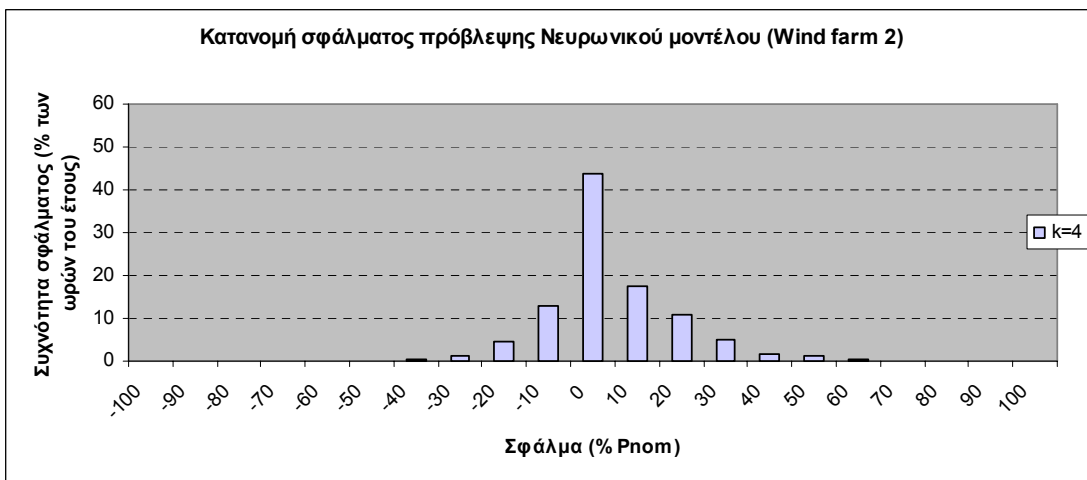
Διάγραμμα 13. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



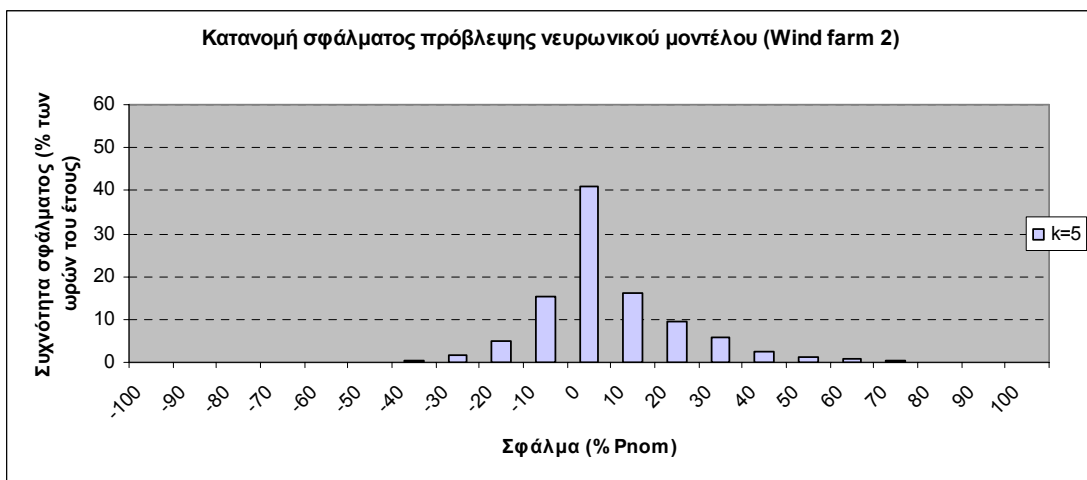
Διάγραμμα 14. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



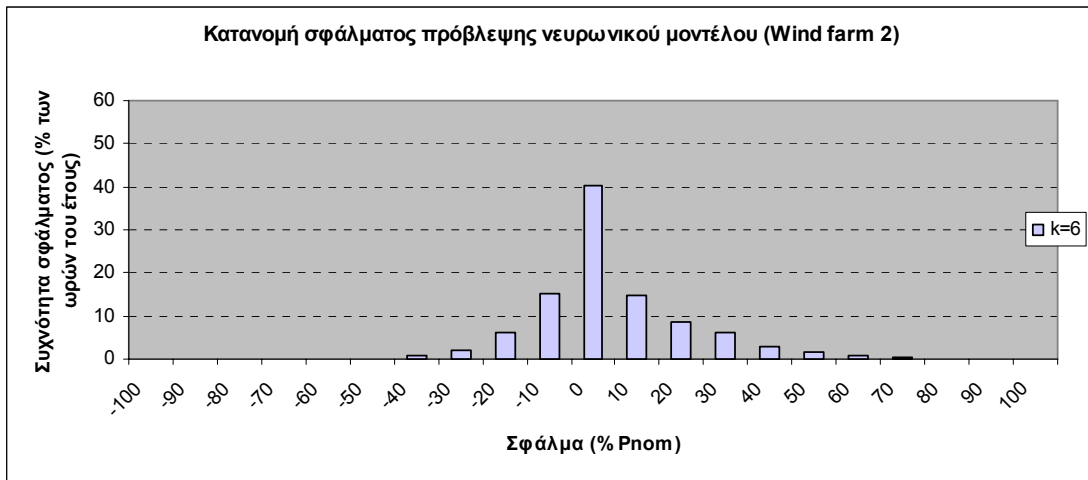
Διάγραμμα 15. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



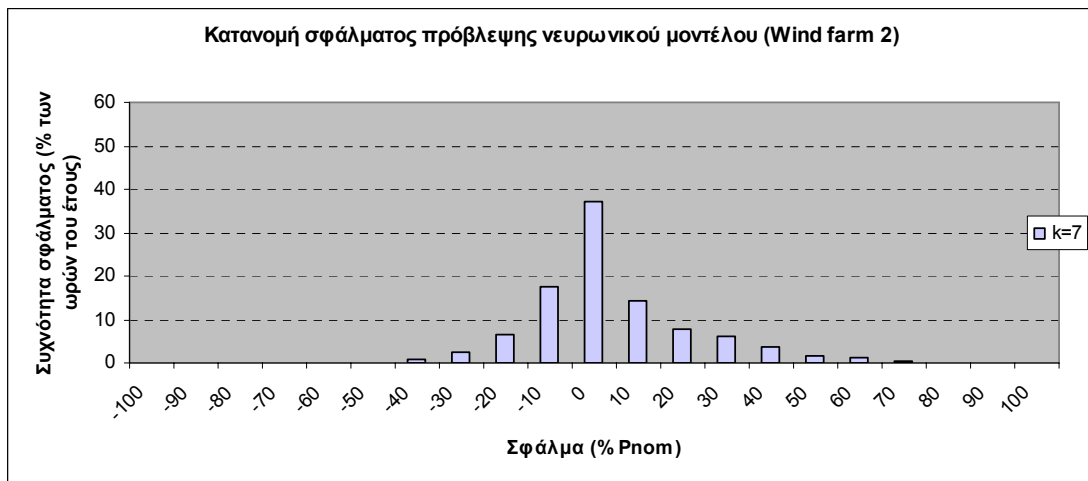
Διάγραμμα 16. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



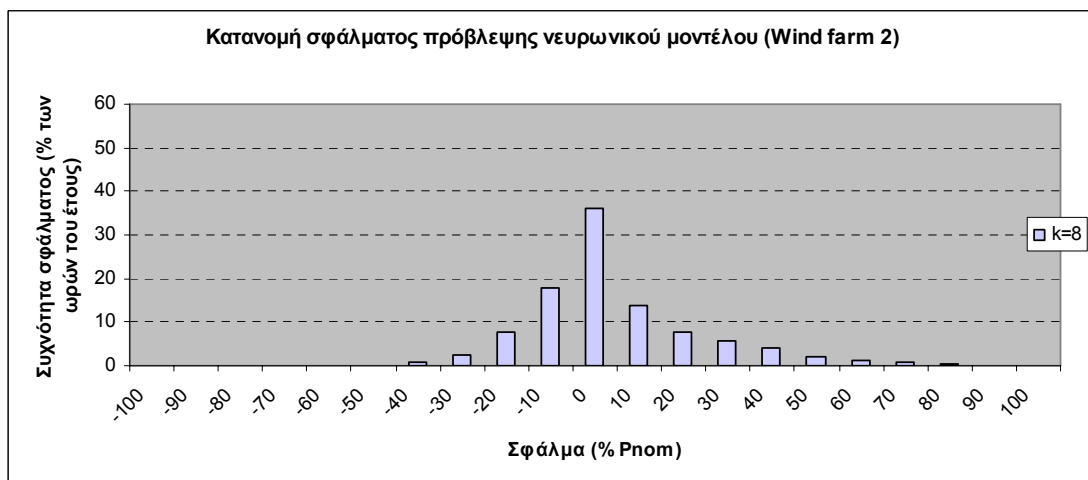
Διάγραμμα 17. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



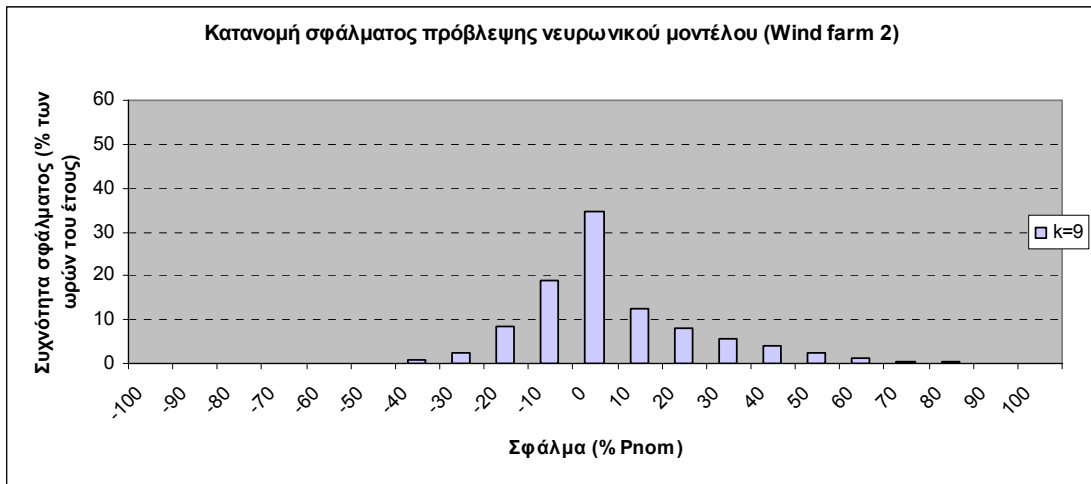
Διάγραμμα 18. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



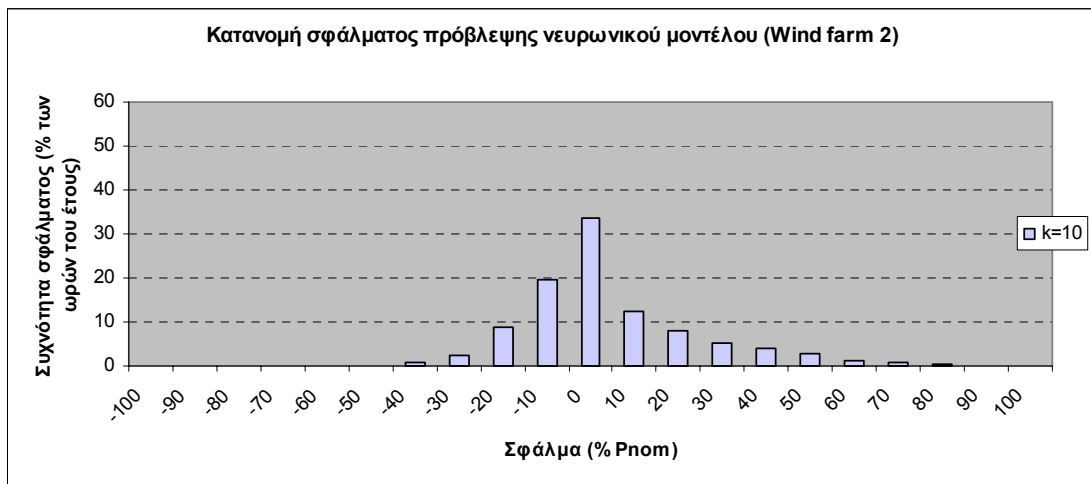
Διάγραμμα 19. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



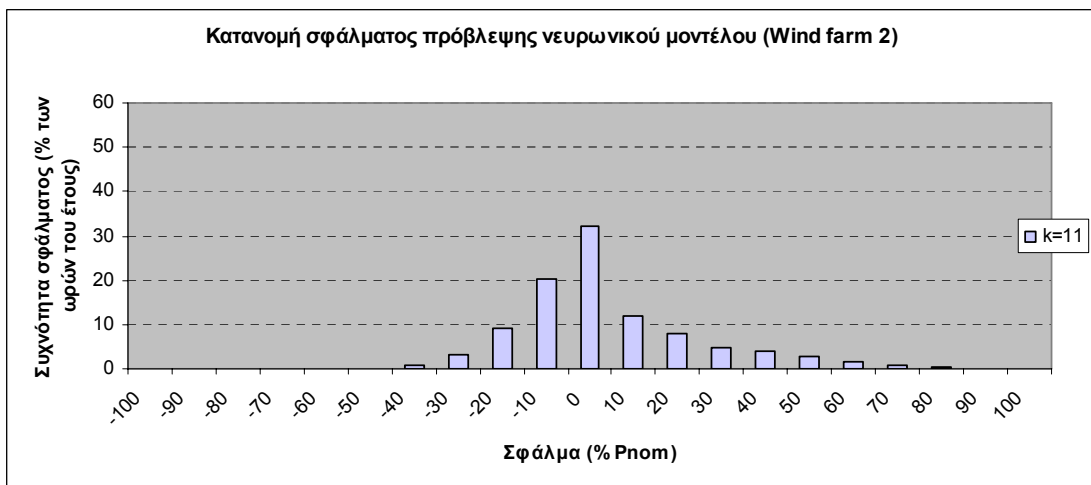
Διάγραμμα 20. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



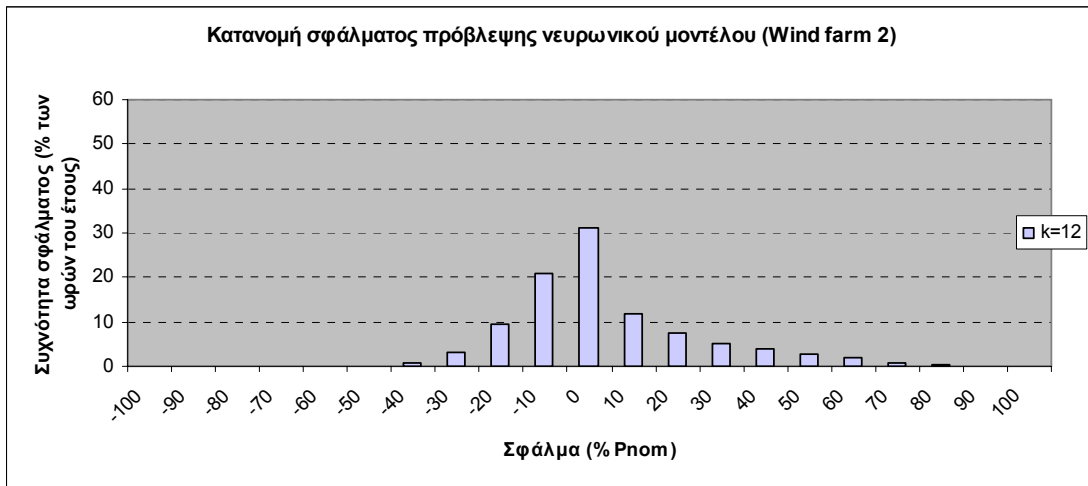
Διάγραμμα 21. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 22. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών

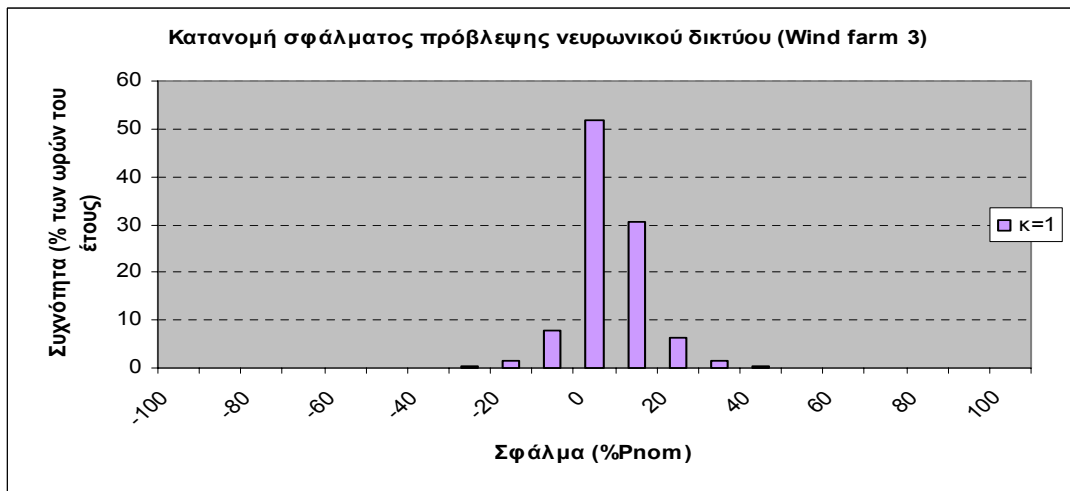


Διάγραμμα 23. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών

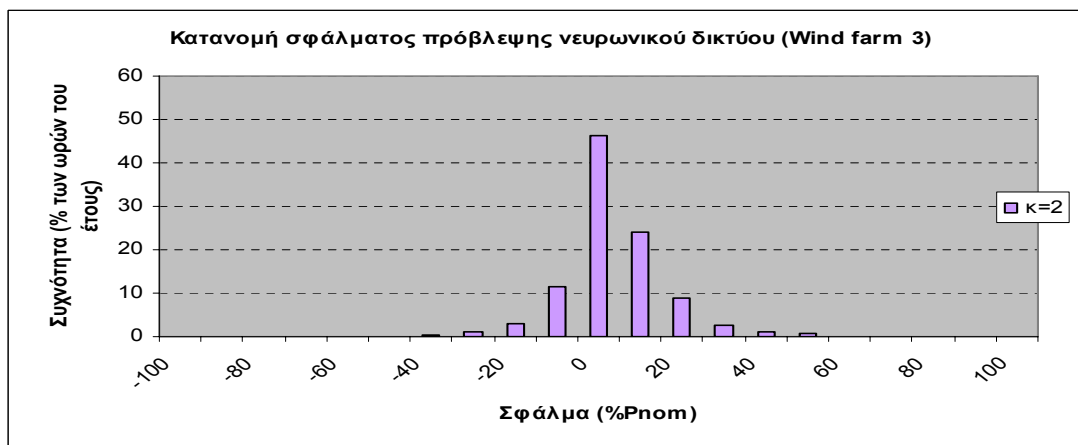


Διάγραμμα 24. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

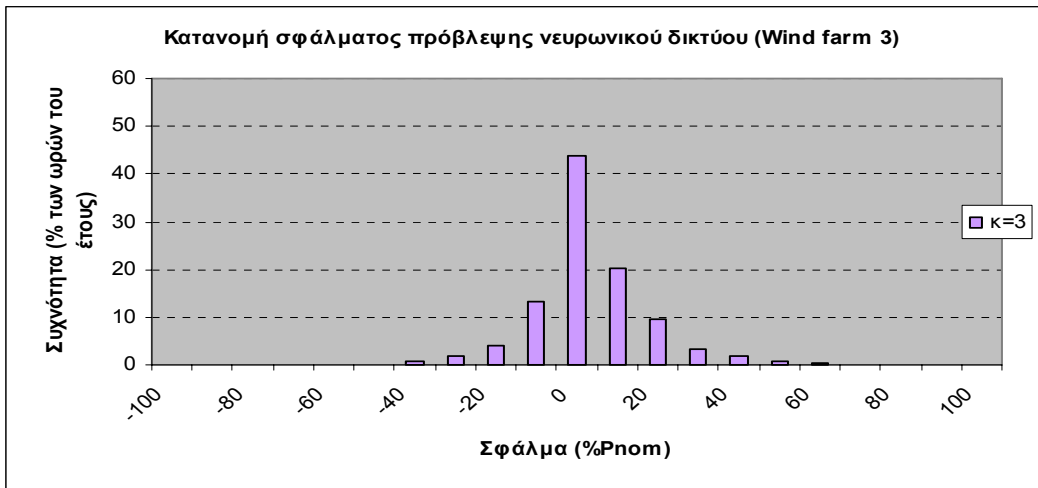
Π.1.3. Αιολικό πάρκο 3



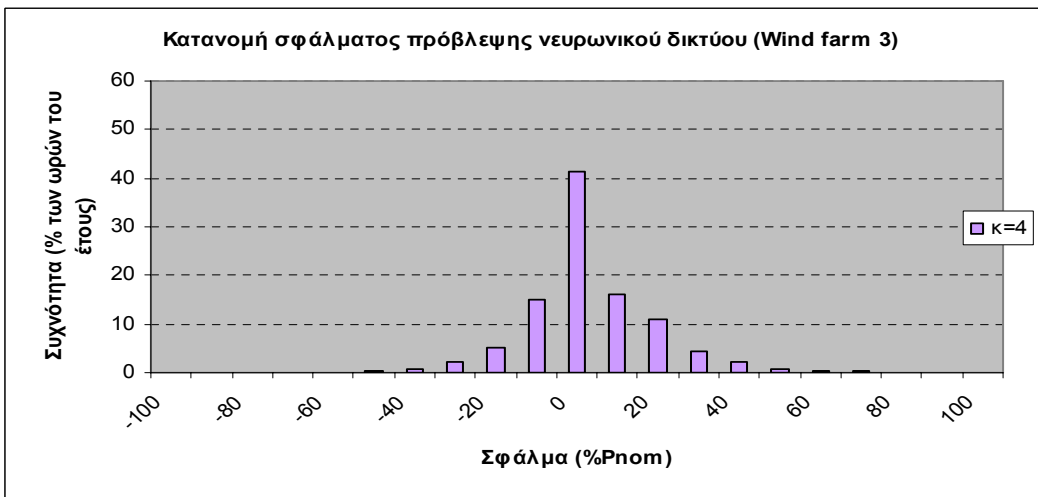
Διάγραμμα 25. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



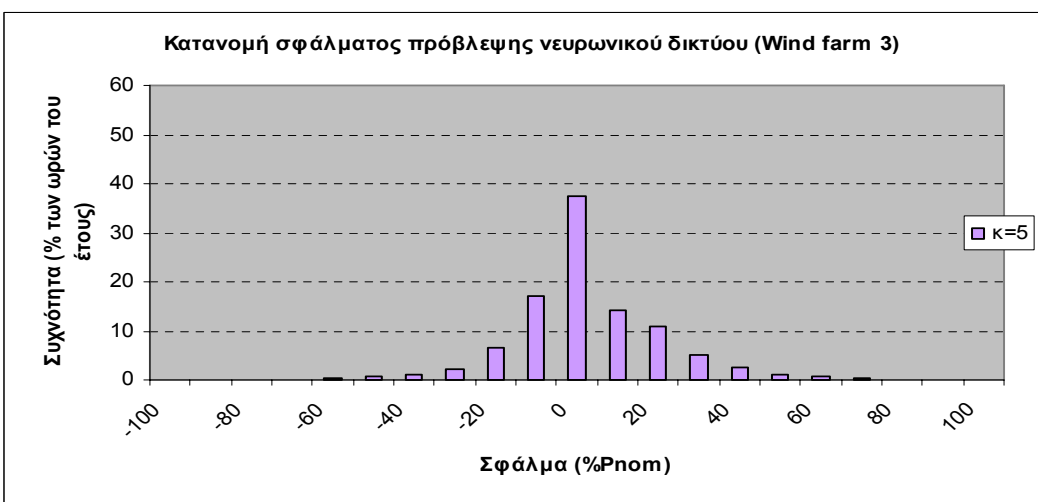
Διάγραμμα 26. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



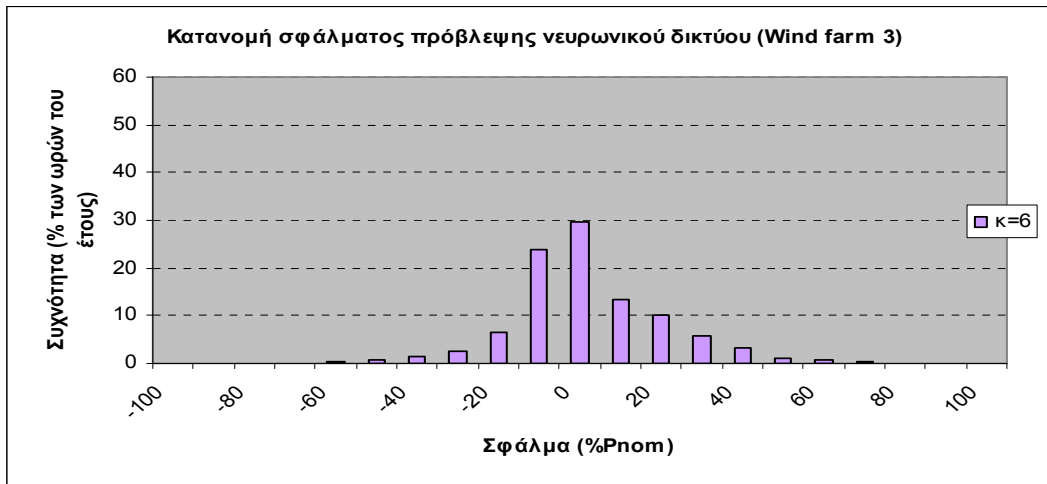
Διάγραμμα 27. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



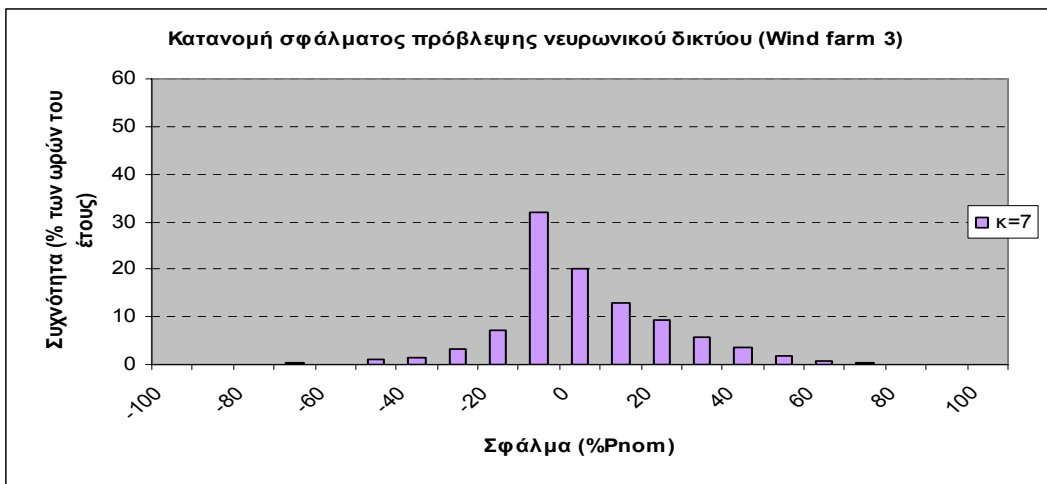
Διάγραμμα 28. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



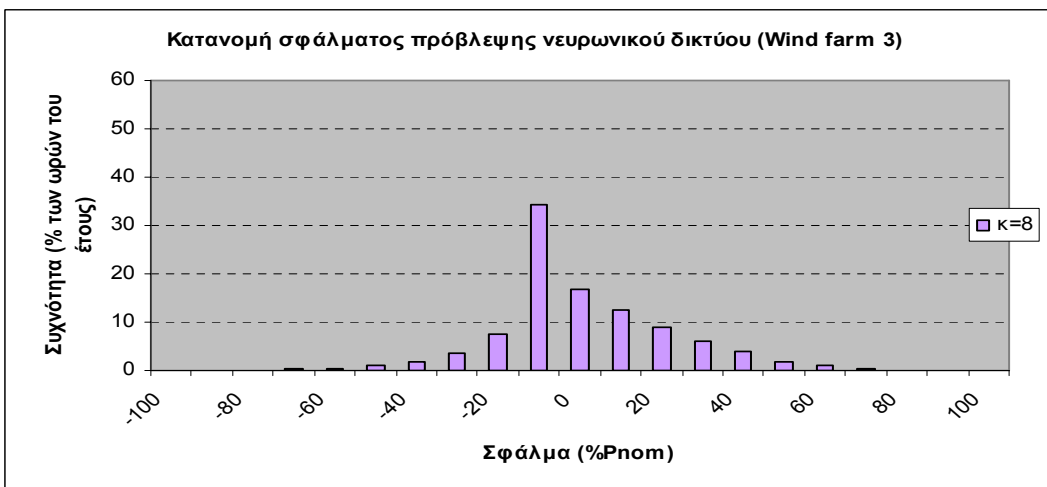
Διάγραμμα 29. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



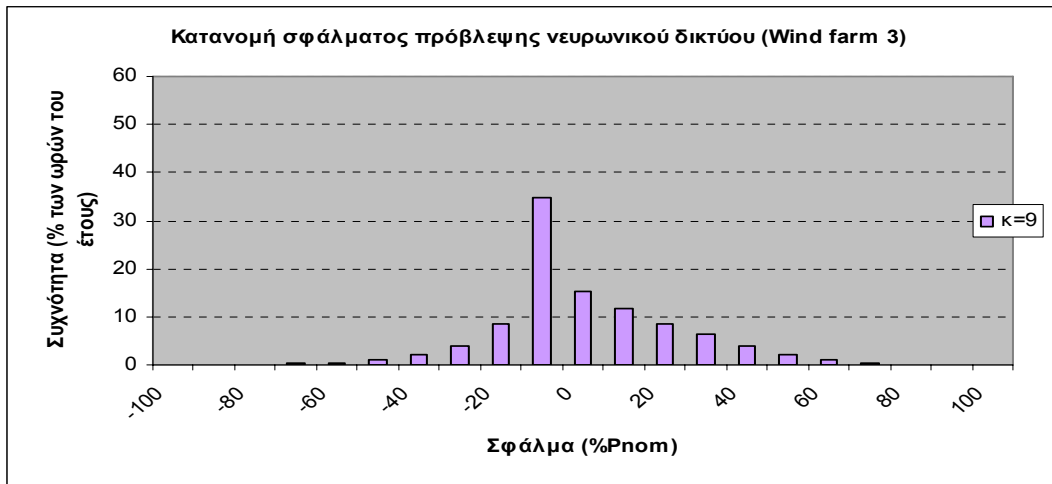
Διάγραμμα 30. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 6 ωρών



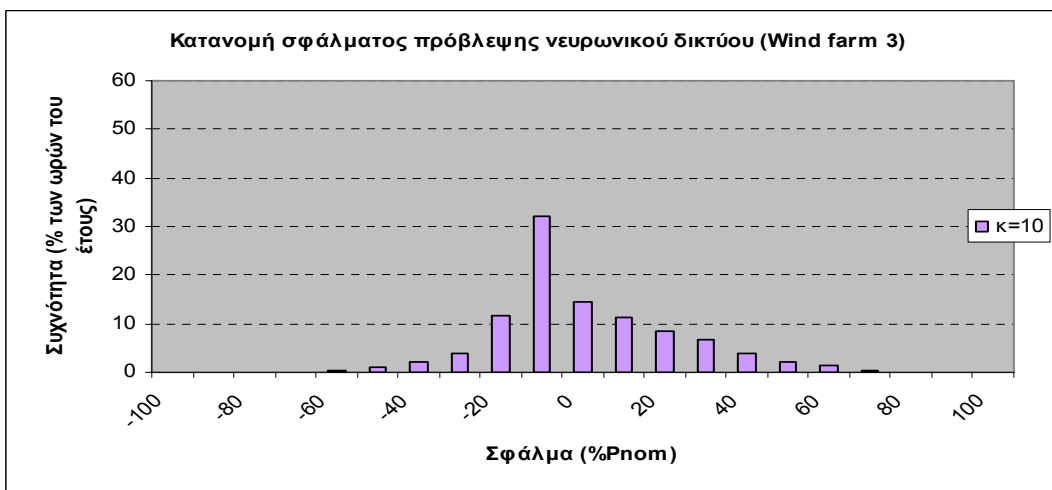
Διάγραμμα 31. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 7 ωρών



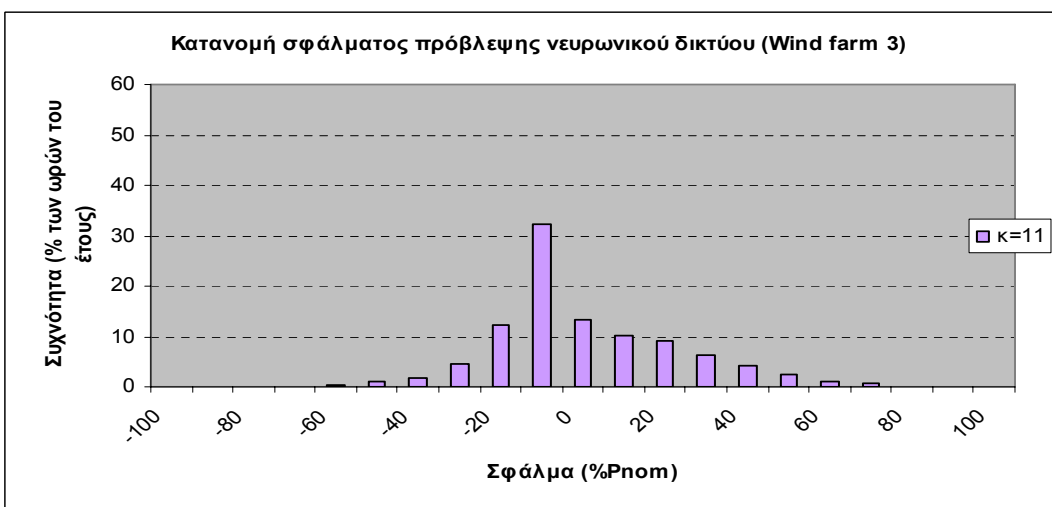
Διάγραμμα 32. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 8 ωρών



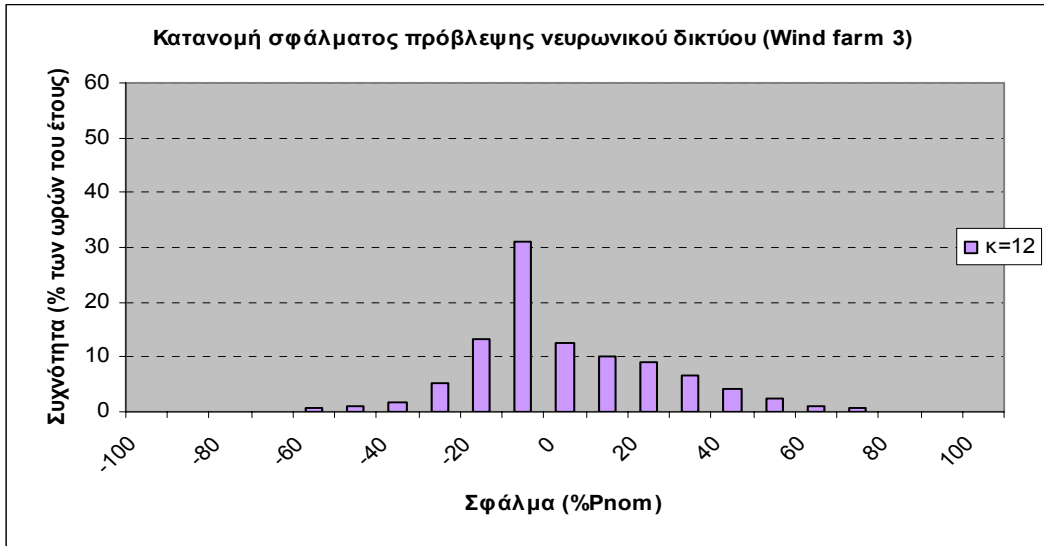
Διάγραμμα 33. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 34. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



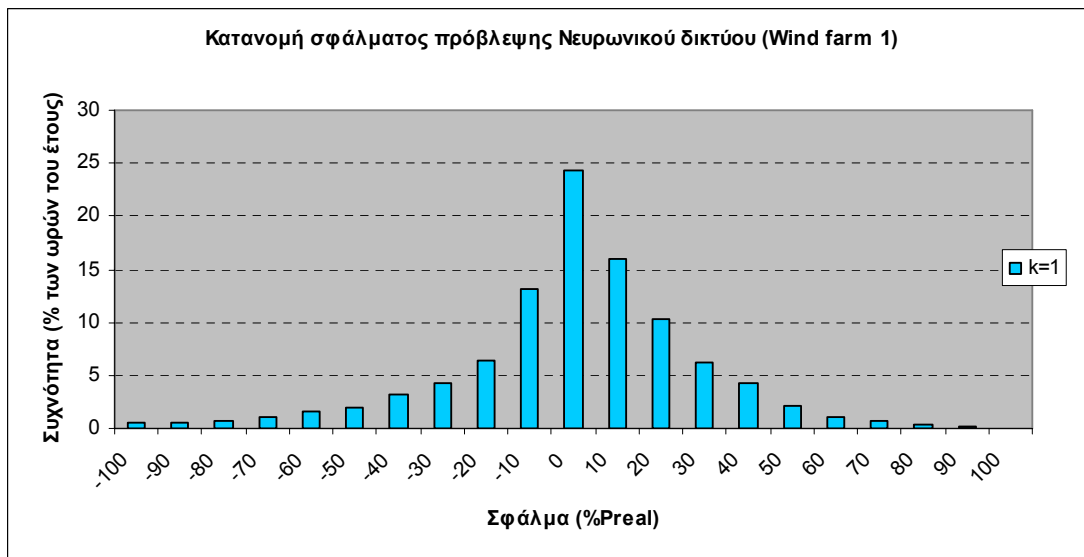
Διάγραμμα 35. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών



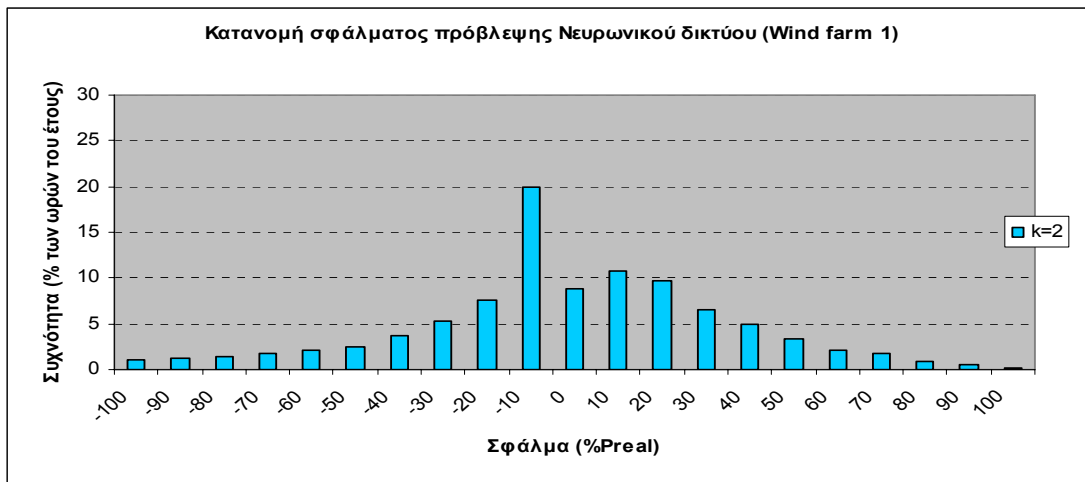
Διάγραμμα 36. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

Π.2. Κατανομή των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης

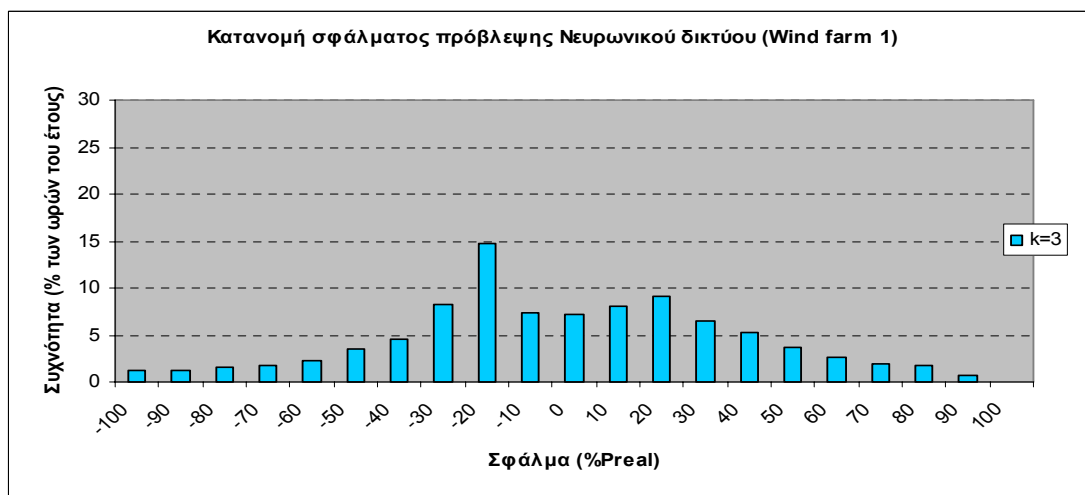
Π.2.1. Αιολικό πάρκο 1



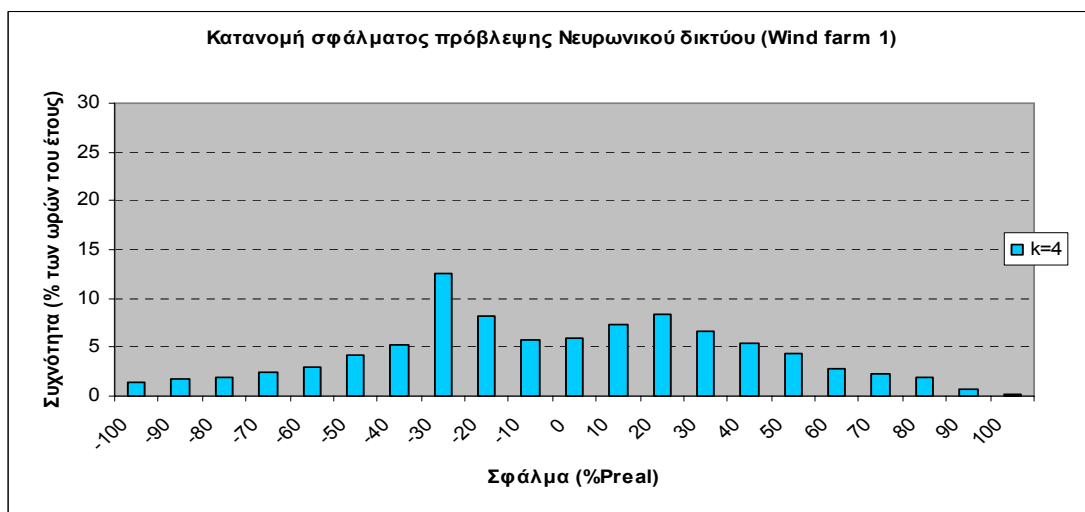
Διάγραμμα 37. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



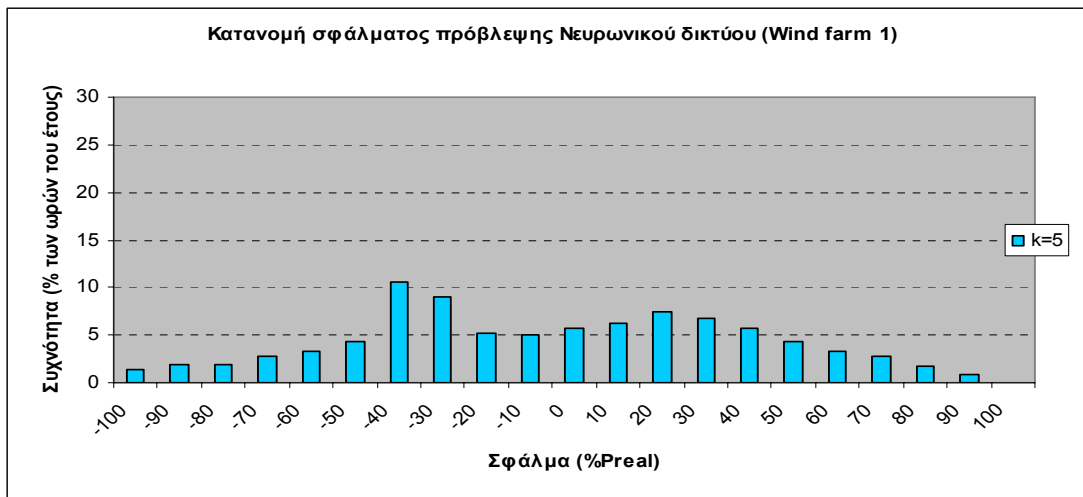
Διάγραμμα 38. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψη 2 ωρών



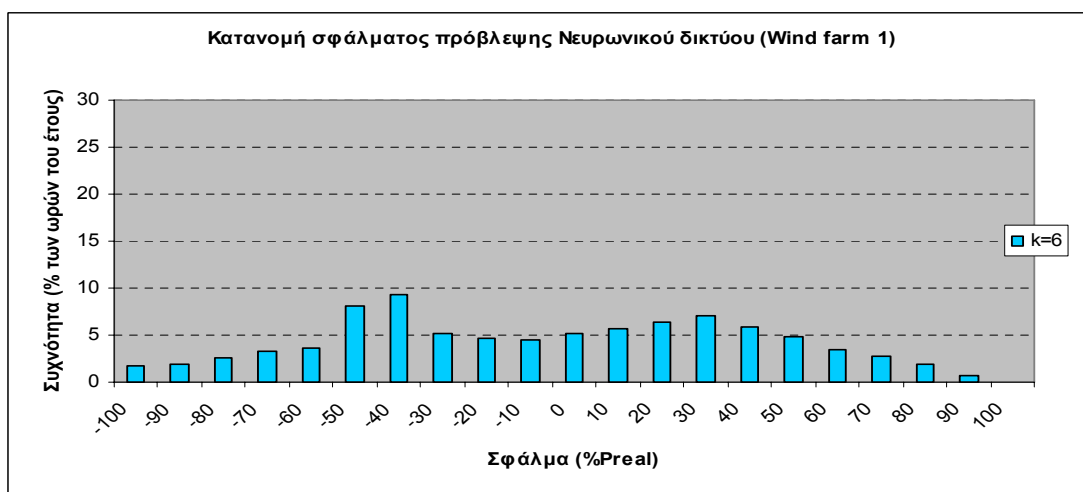
Διάγραμμα 39. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψη 3 ωρών



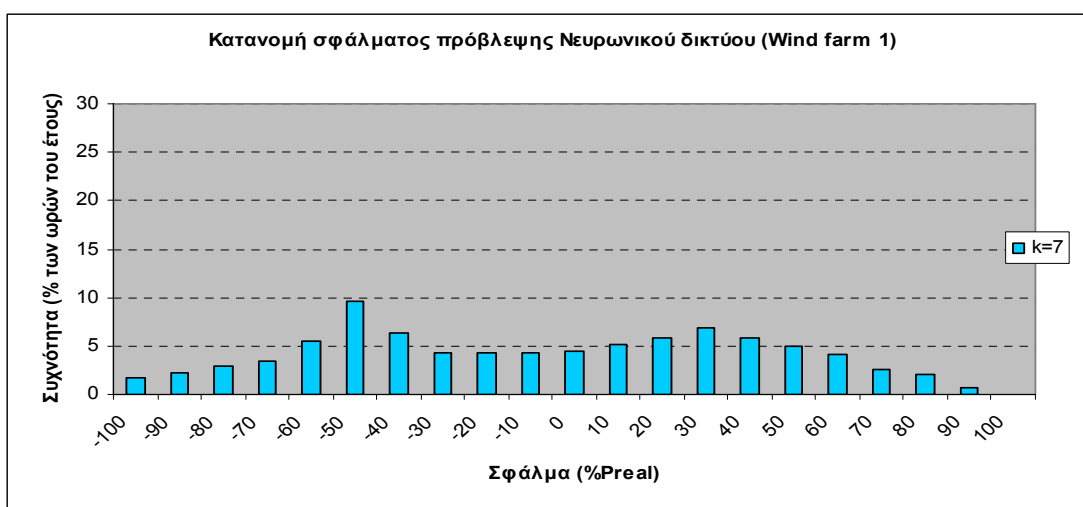
Διάγραμμα 40. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψη 4 ωρών



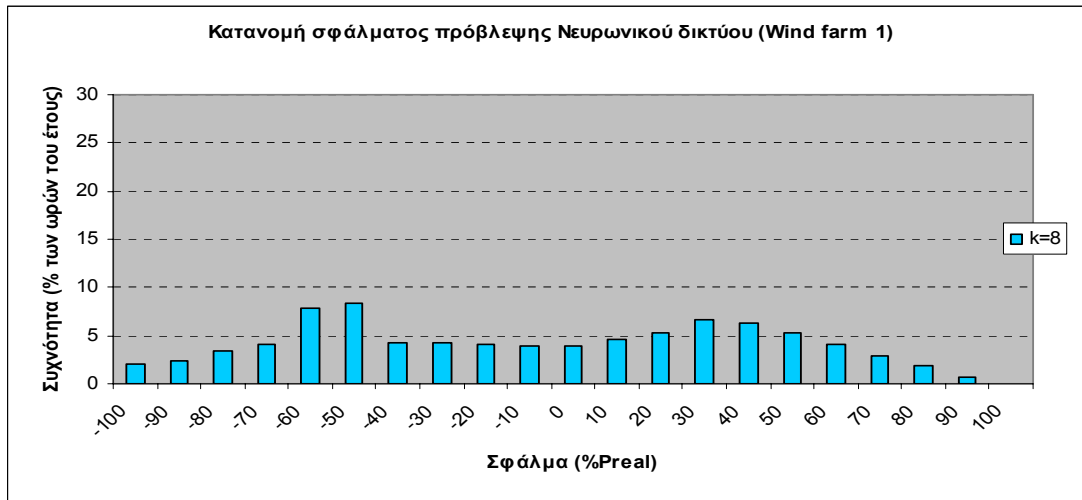
Διάγραμμα 41. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



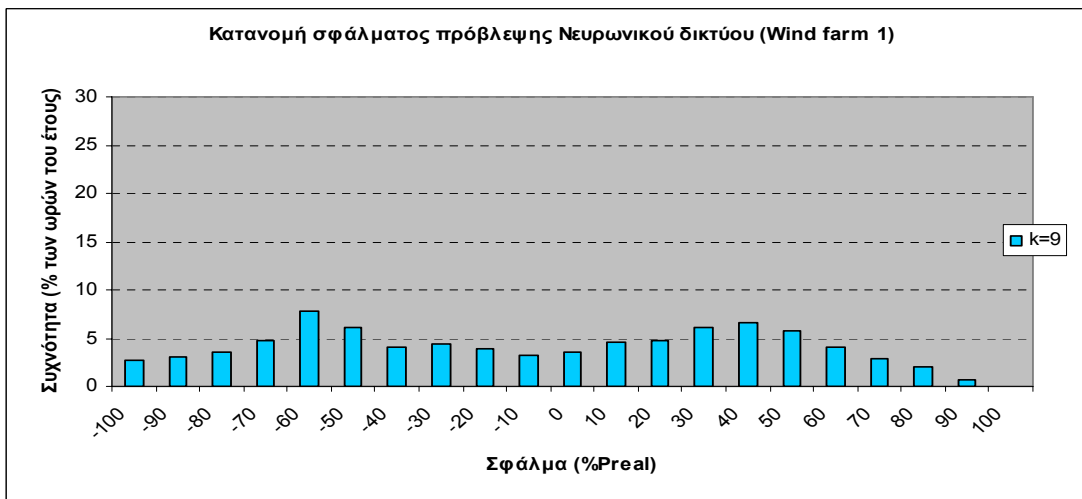
Διάγραμμα 42. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



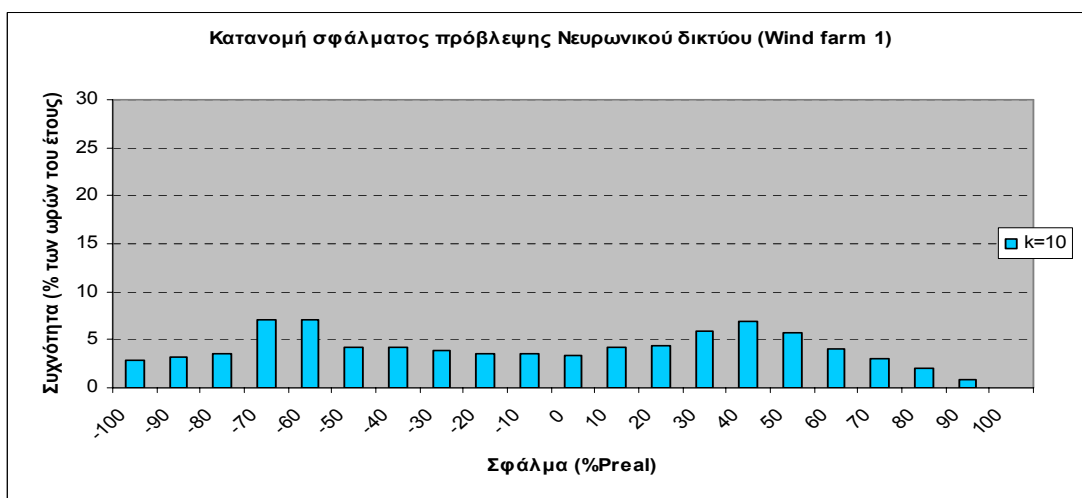
Διάγραμμα 43. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



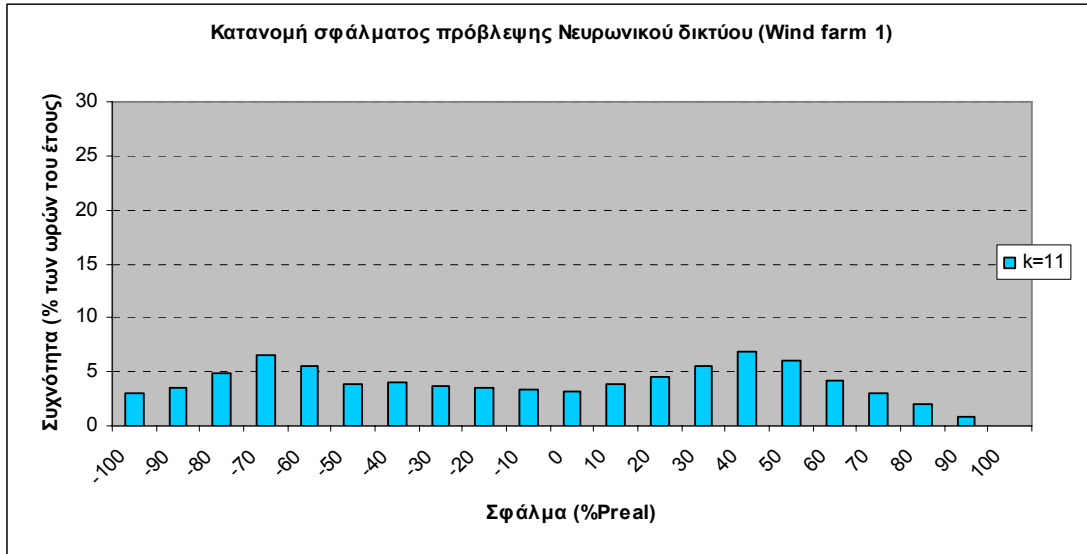
Διάγραμμα 44. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



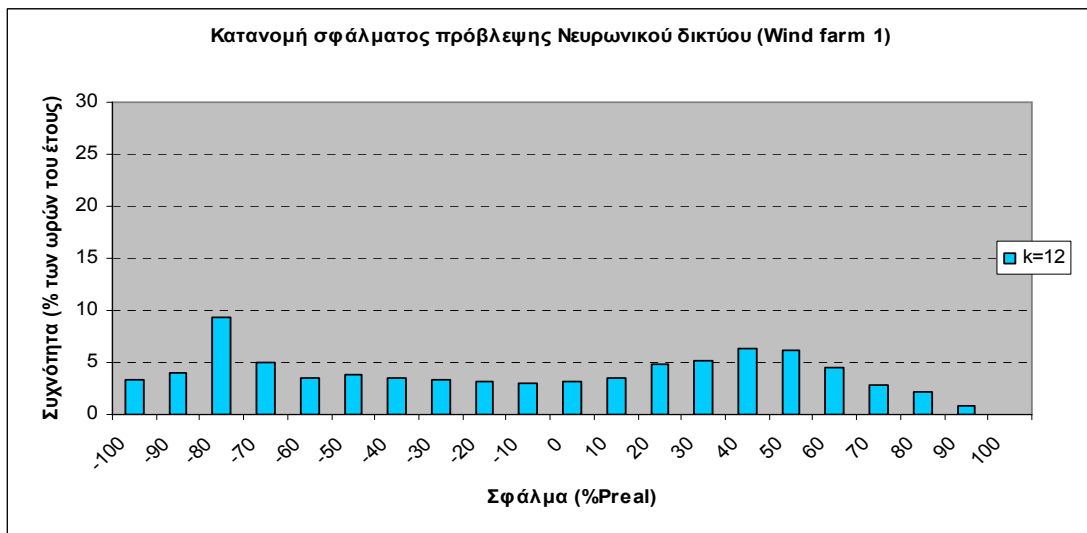
Διάγραμμα 45. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 46. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 10 ωρών

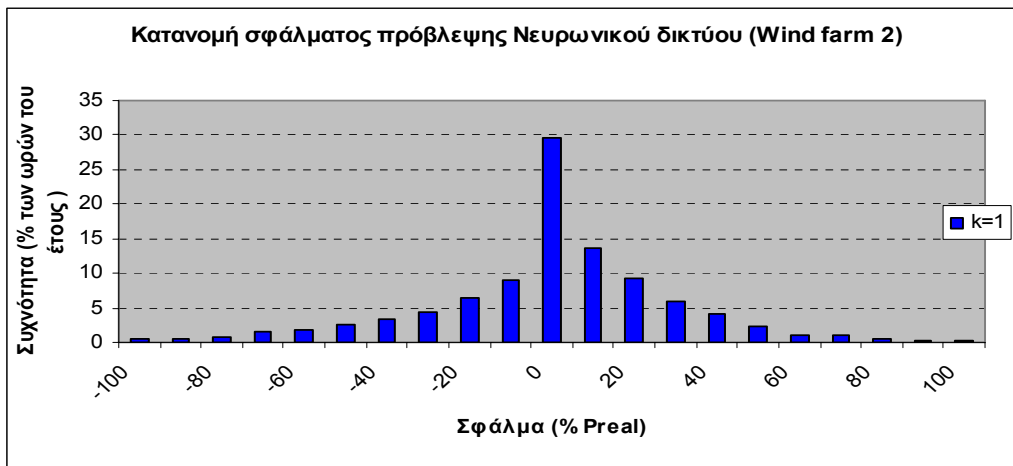


Διάγραμμα 47. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών

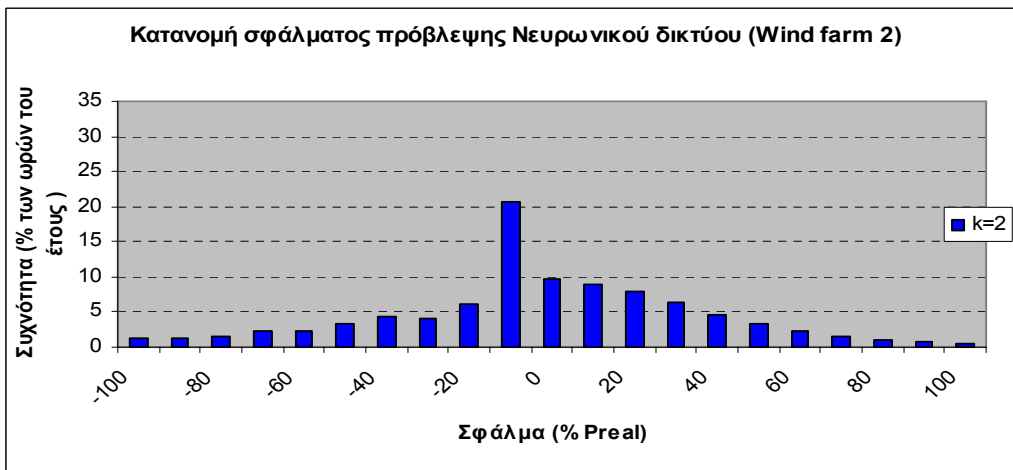


Διάγραμμα 48. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

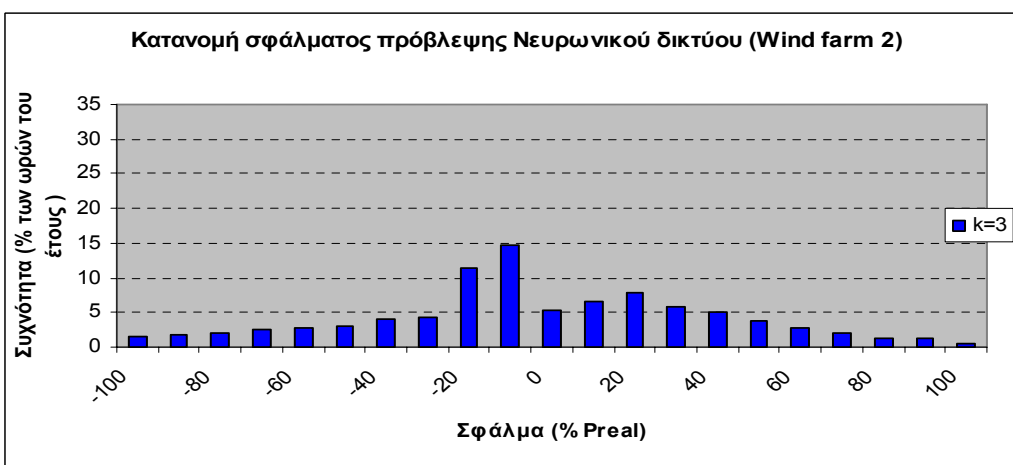
Π.2.2. Αιολικό πάρκο 2



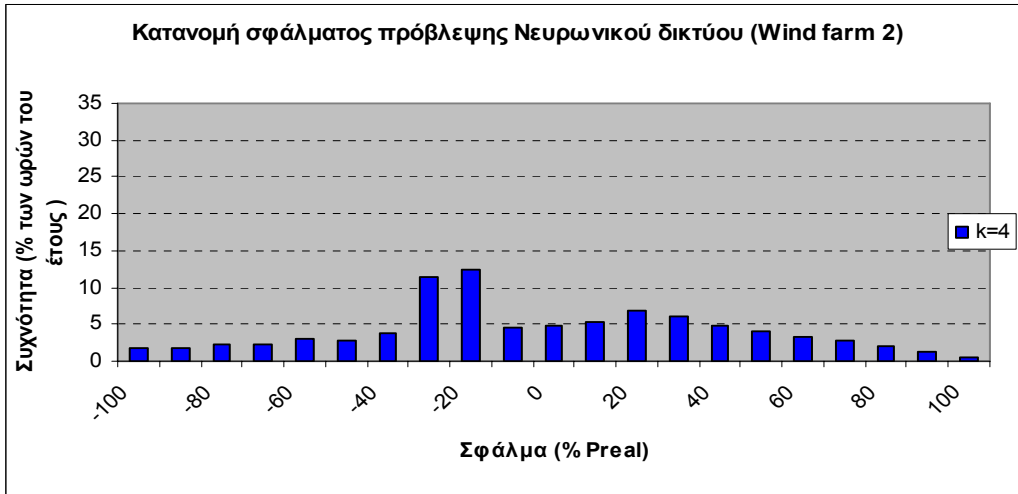
Διάγραμμα 49. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



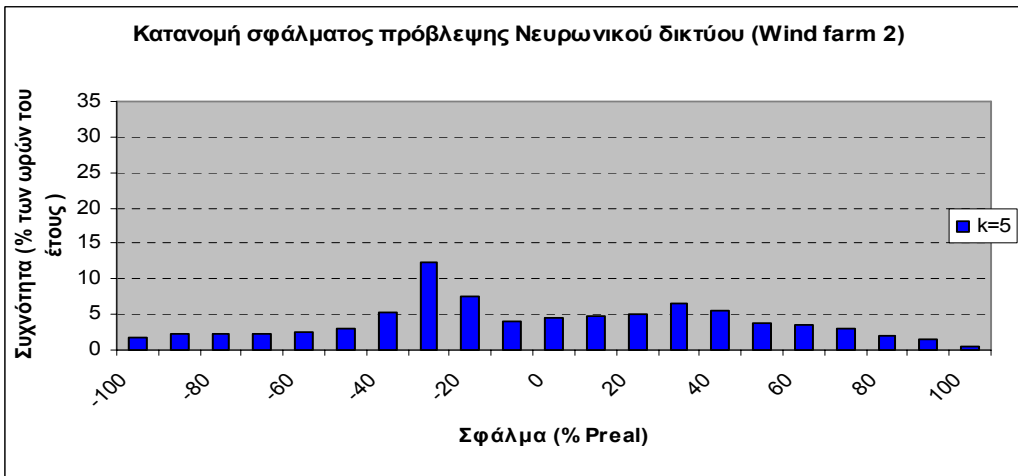
Διάγραμμα 50. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



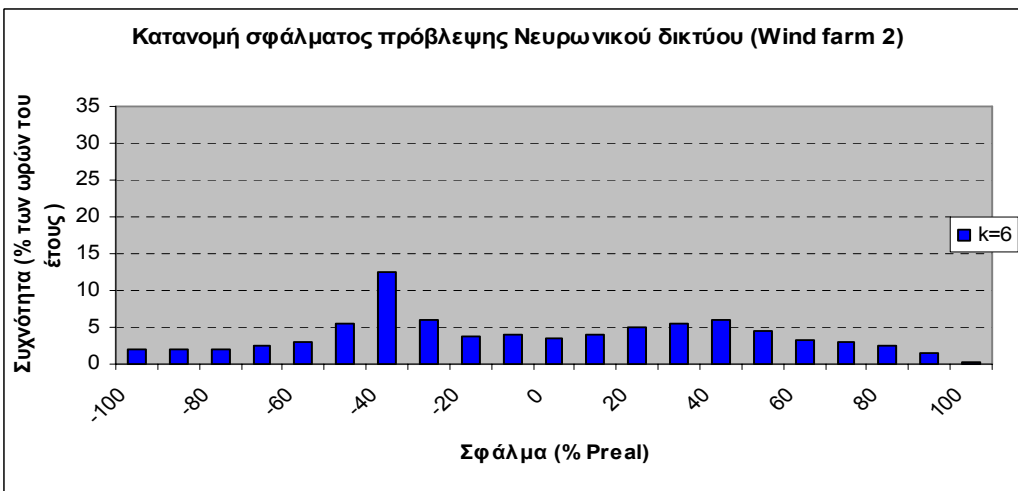
Διάγραμμα 51. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



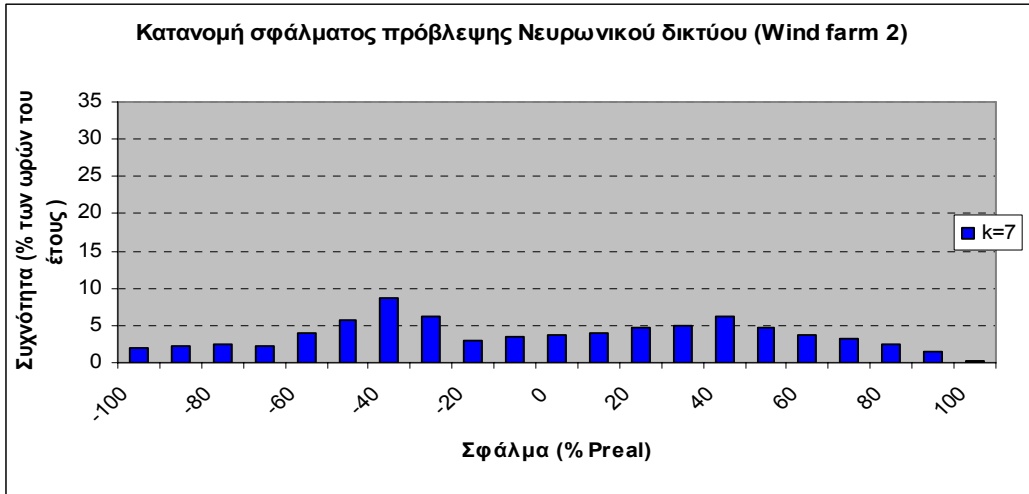
Διάγραμμα 52. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



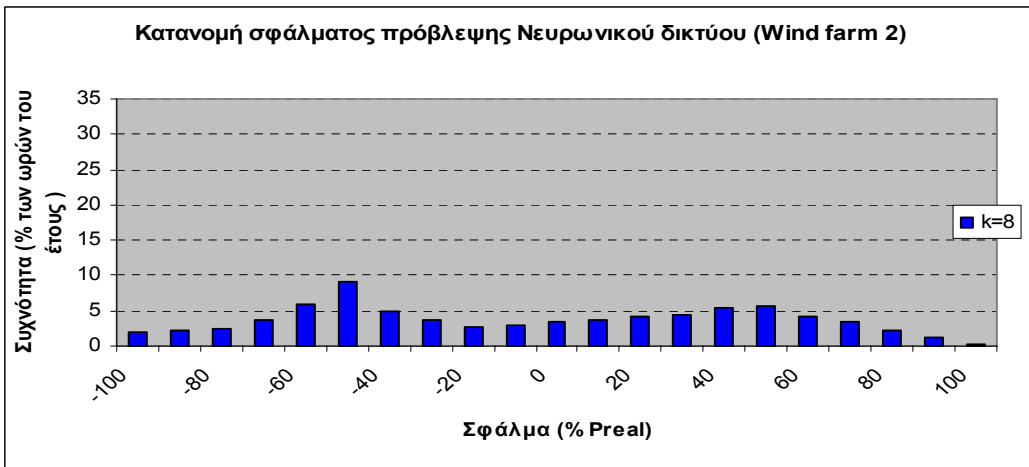
Διάγραμμα 53. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



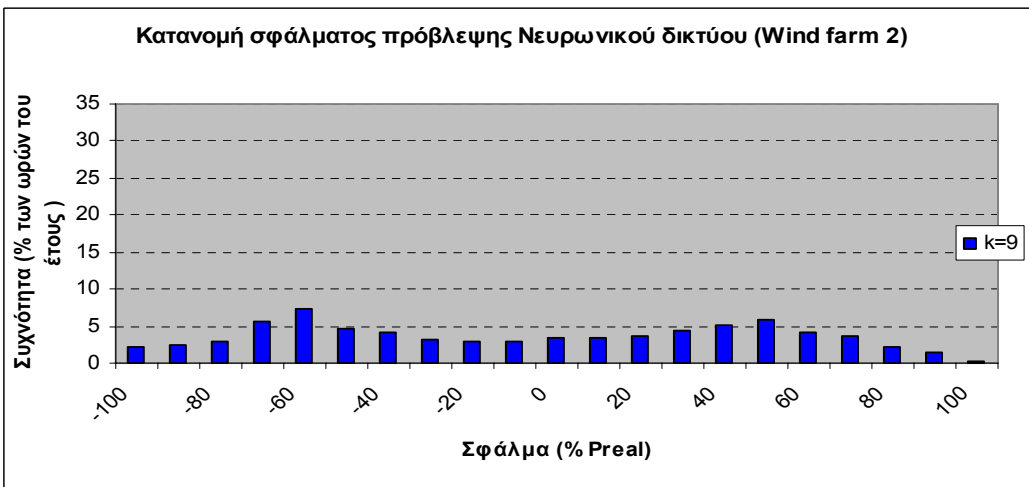
Διάγραμμα 54. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



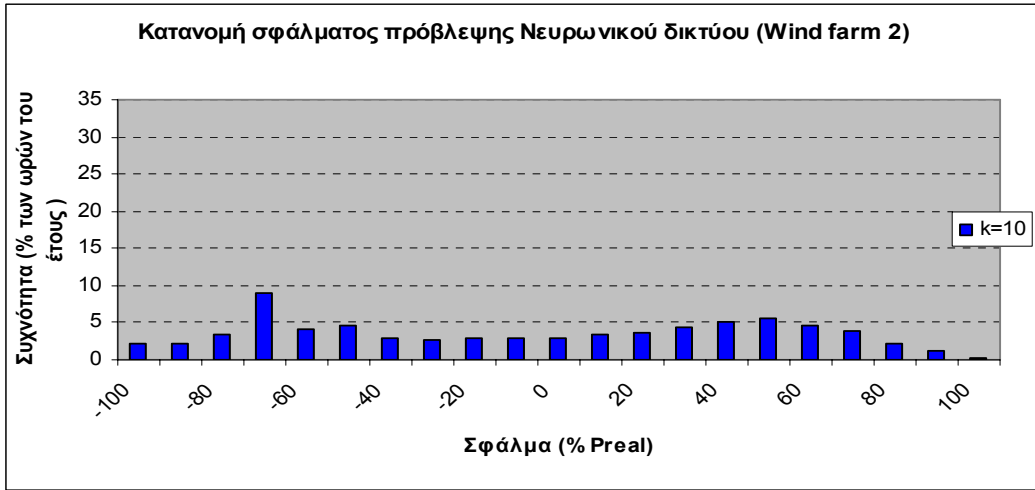
Διάγραμμα 55. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



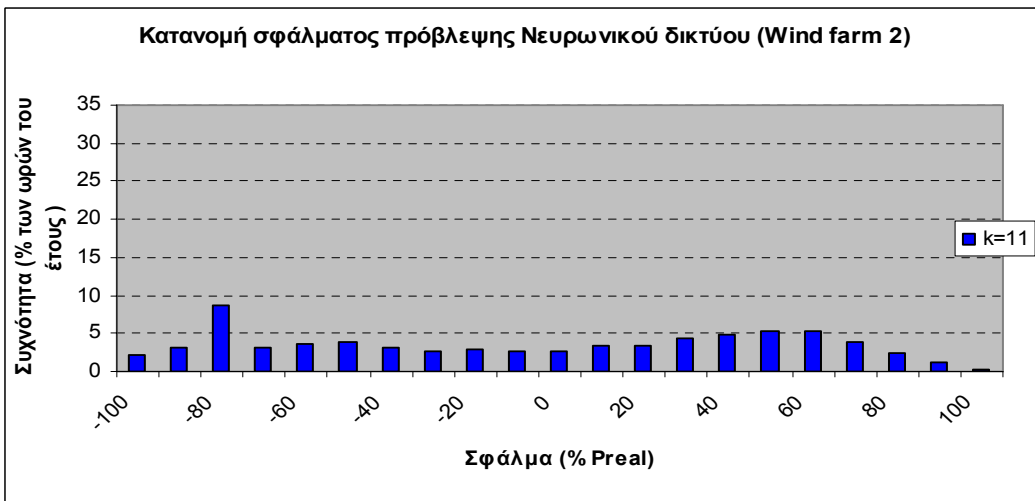
Διάγραμμα 56. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



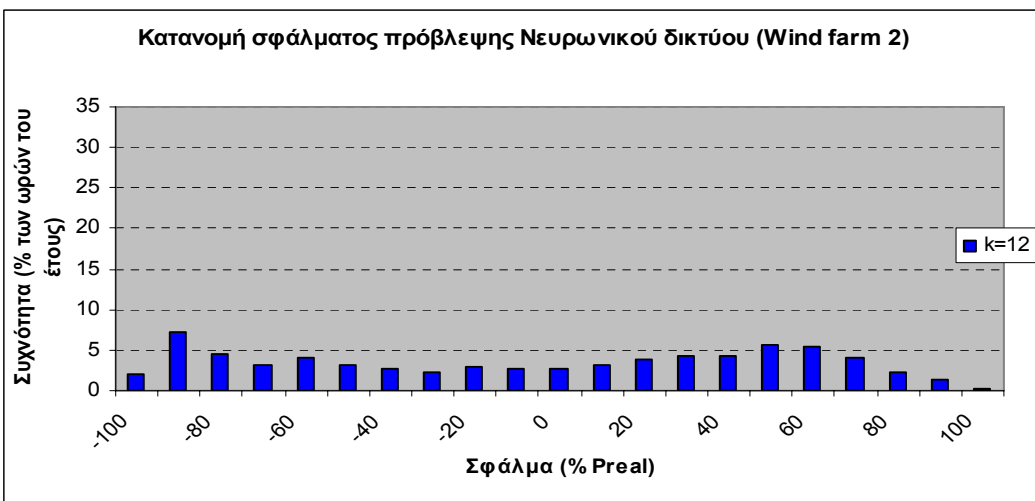
Διάγραμμα 57. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 58. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 10 ωρών

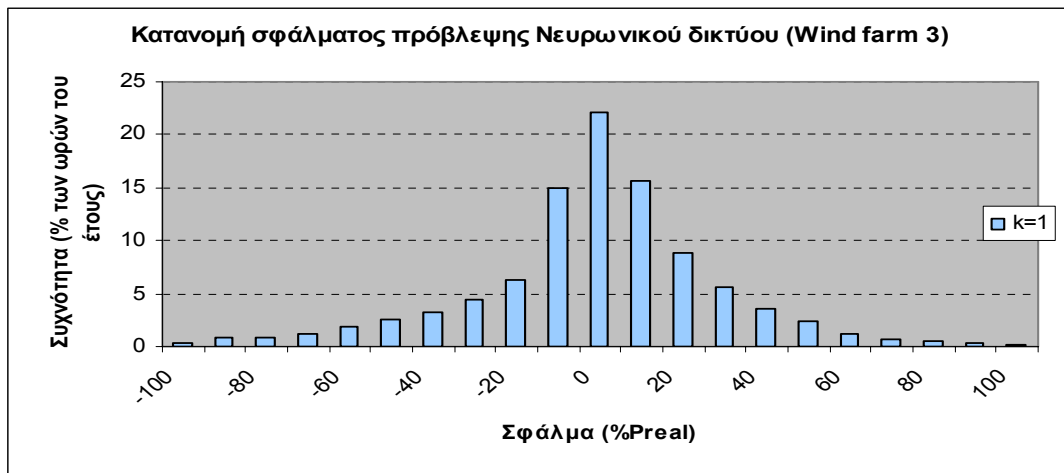


Διάγραμμα 59. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών

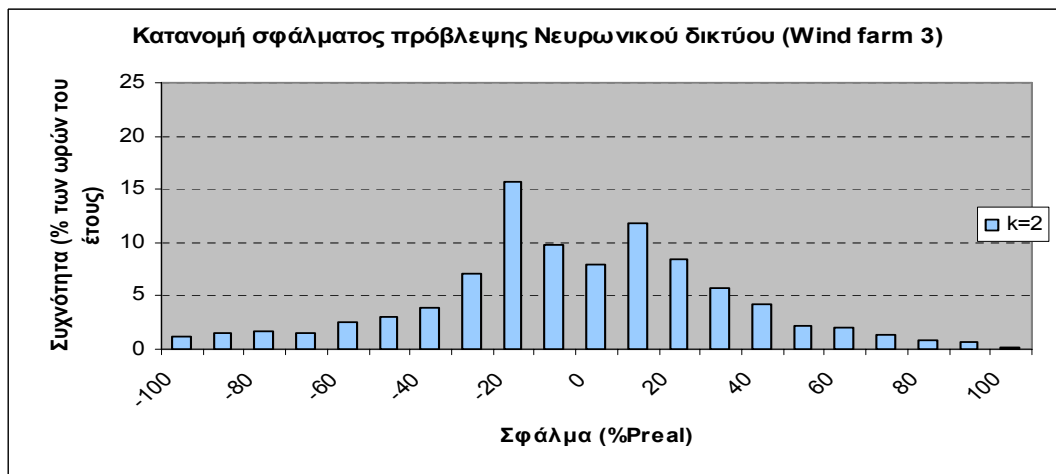


Διάγραμμα 60. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

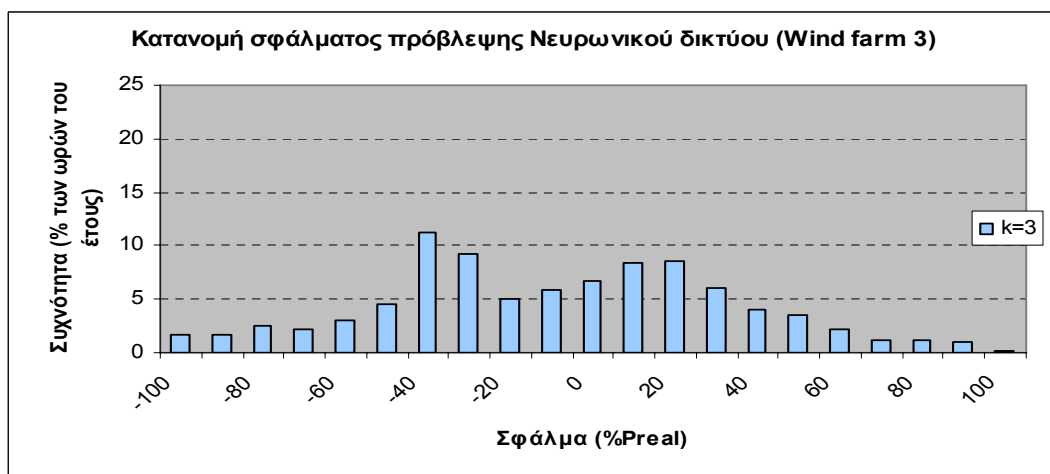
Π.2.3. Αιολικό πάρκο 3



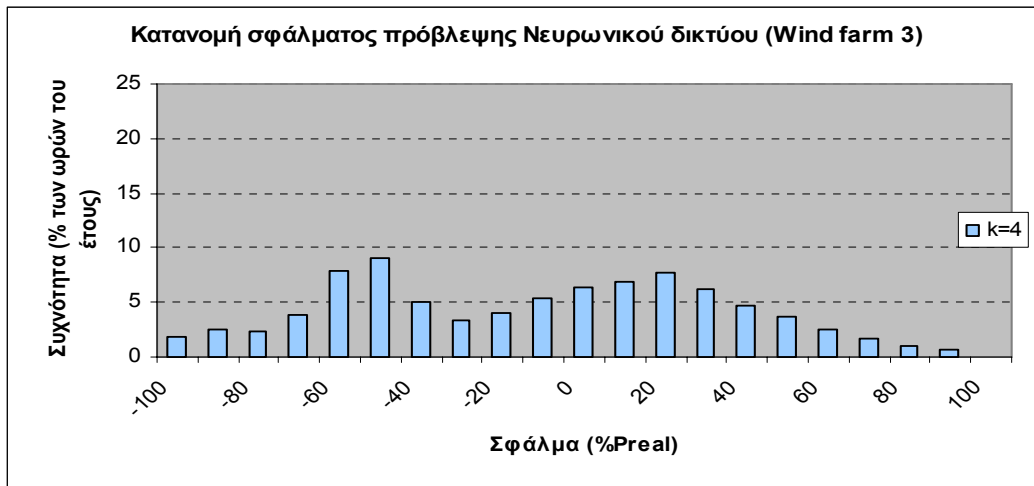
Διάγραμμα 61. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 1 ώρας



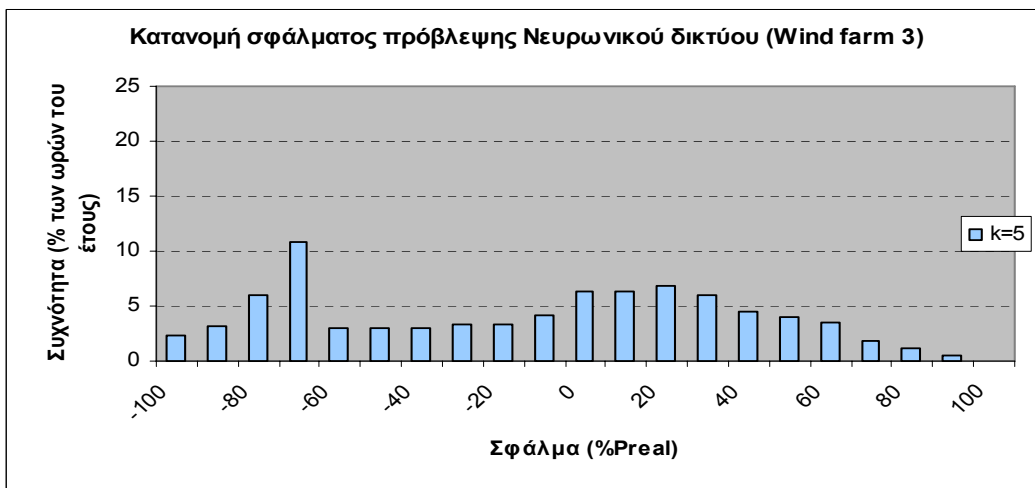
Διάγραμμα 62. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 2 ωρών



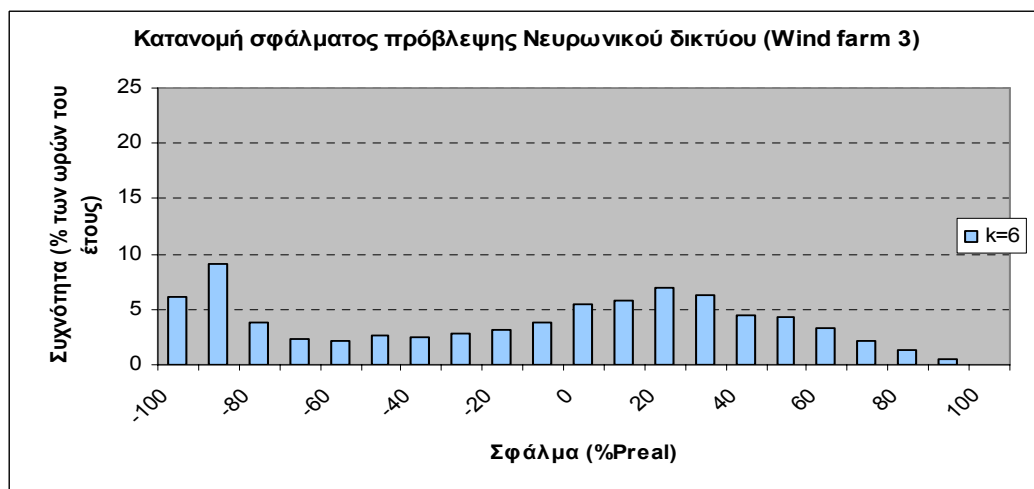
Διάγραμμα 63. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 3 ωρών



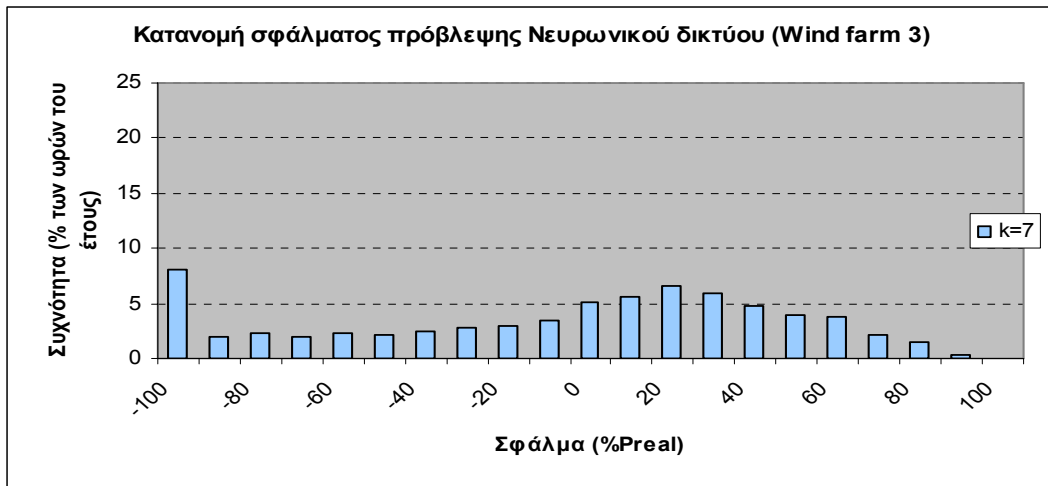
Διάγραμμα 64. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



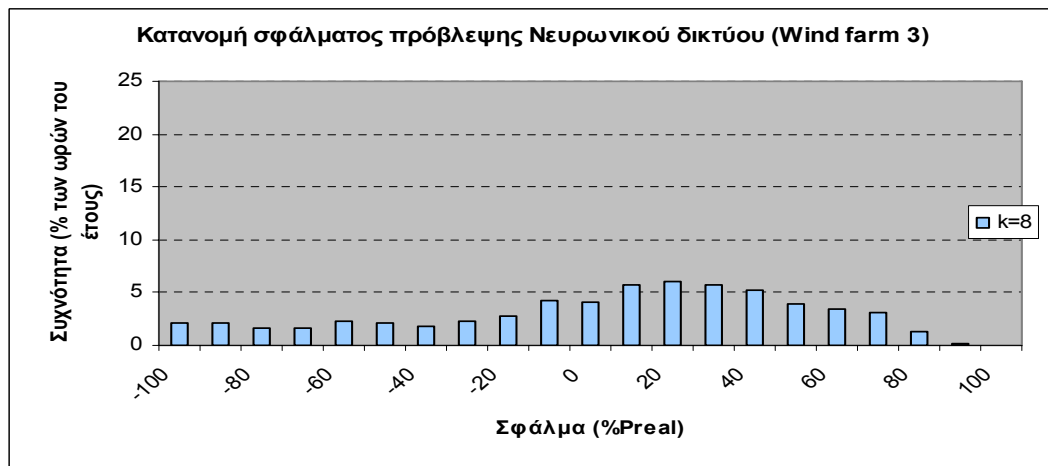
Διάγραμμα 65. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



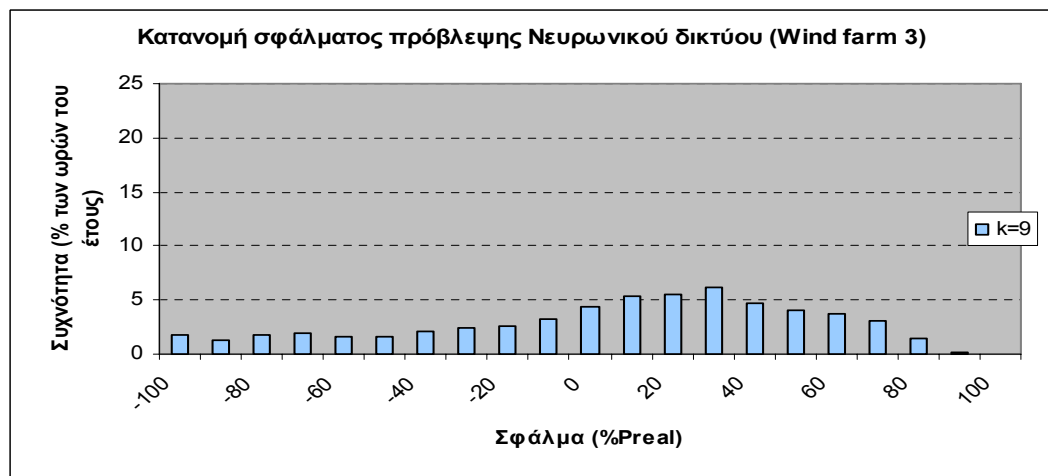
Διάγραμμα 66. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



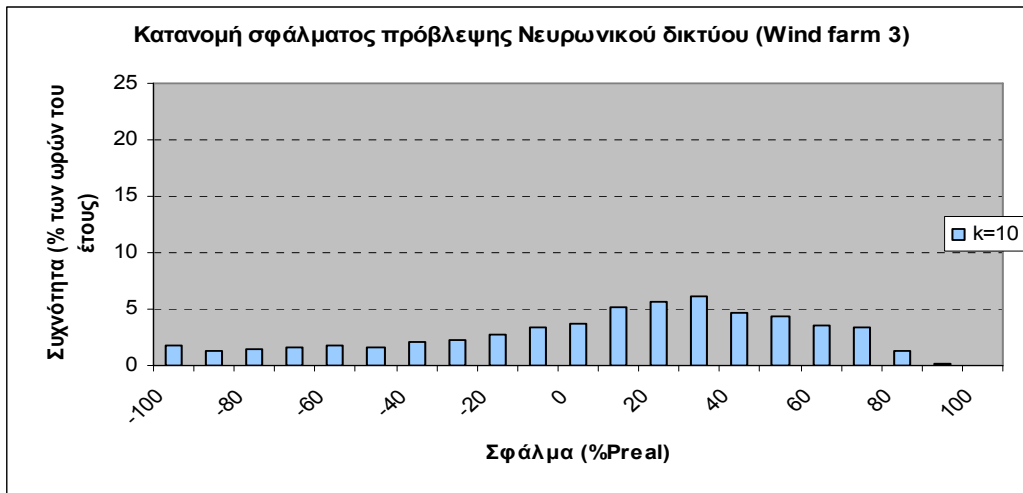
Διάγραμμα 67. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



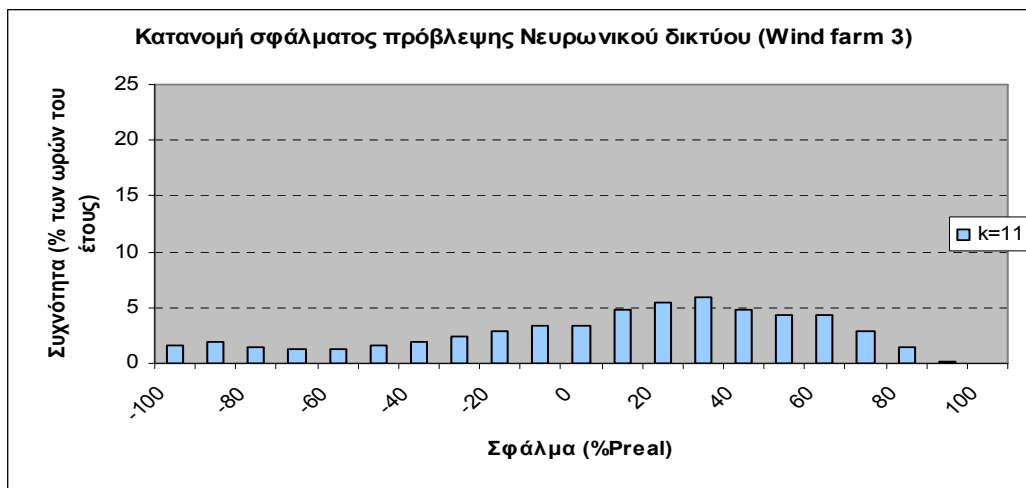
Διάγραμμα 68. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



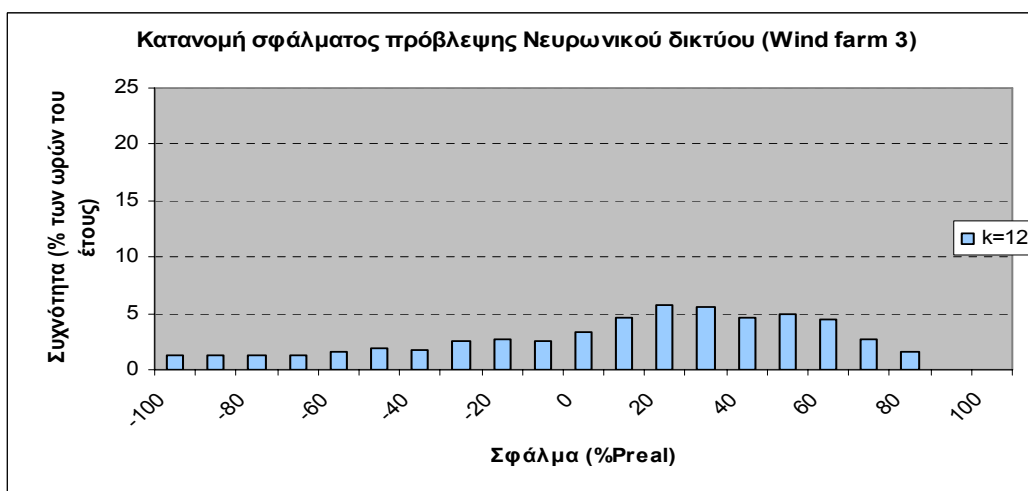
Διάγραμμα 69. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 70. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 10 ωρών



Διάγραμμα 71. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών

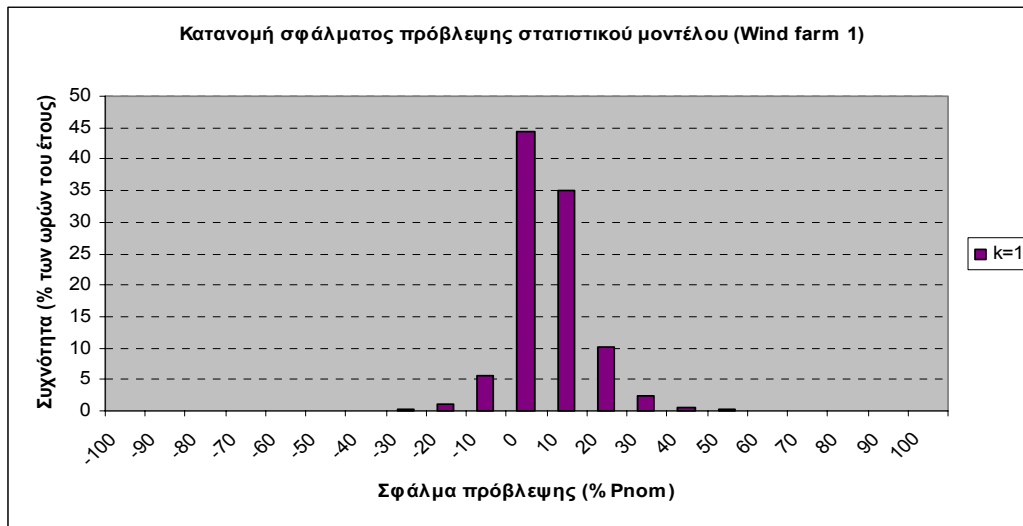


Διάγραμμα 72. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

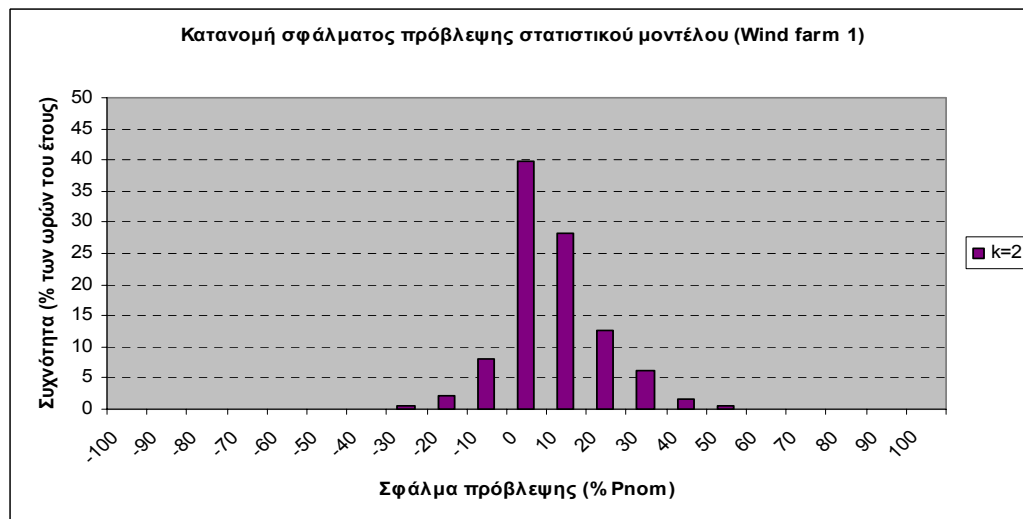
Β. Στατιστικό μοντέλο

Π.1.Κατανομή των επί της εκατό της ονομαστικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης

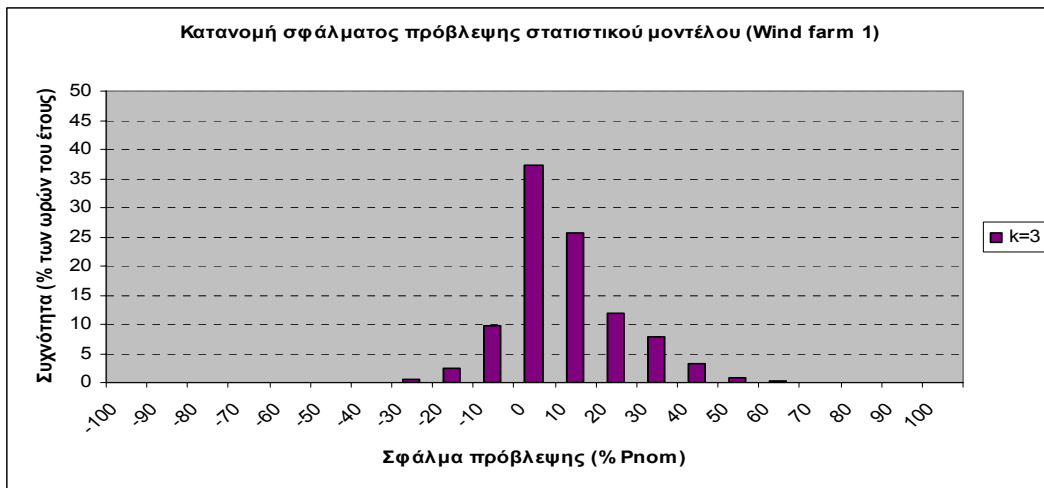
Π.1.1. Αιολικό πάρκο 1



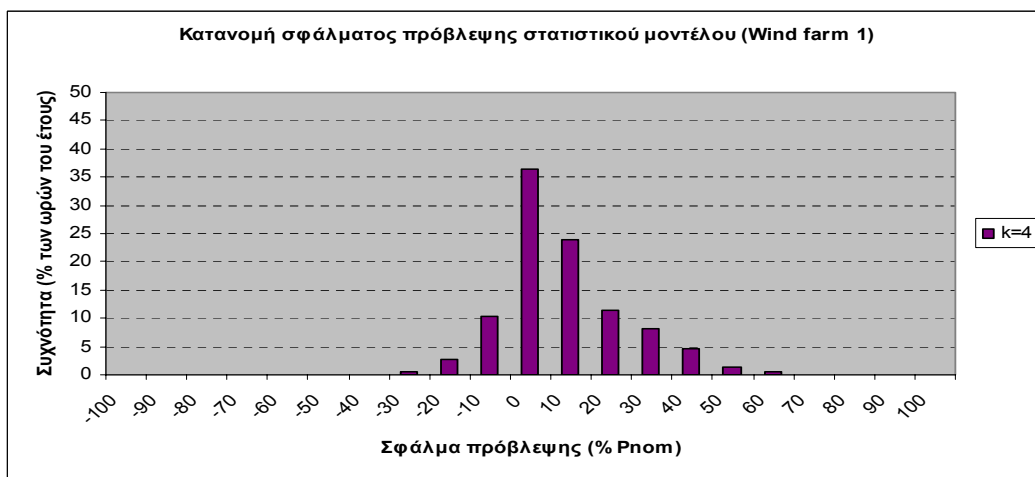
Διάγραμμα 1. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



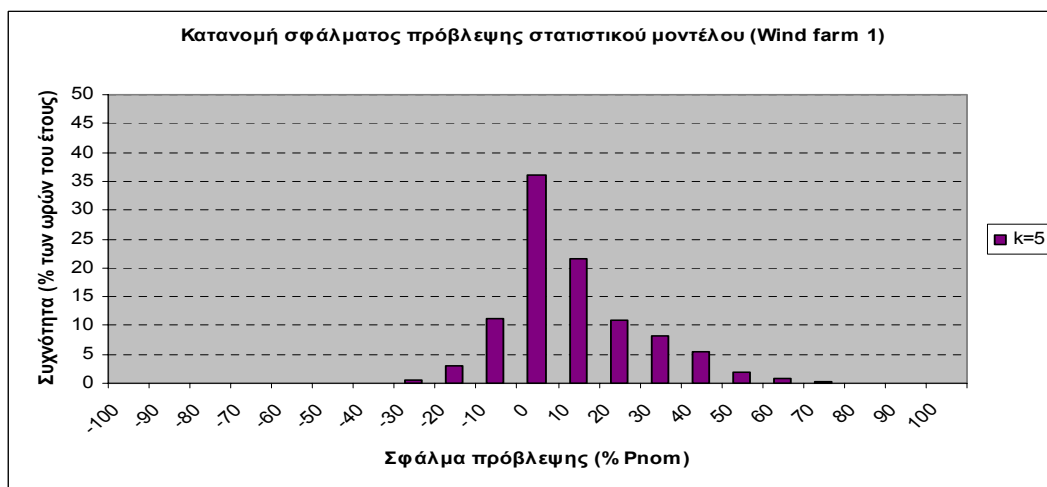
Διάγραμμα 2. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



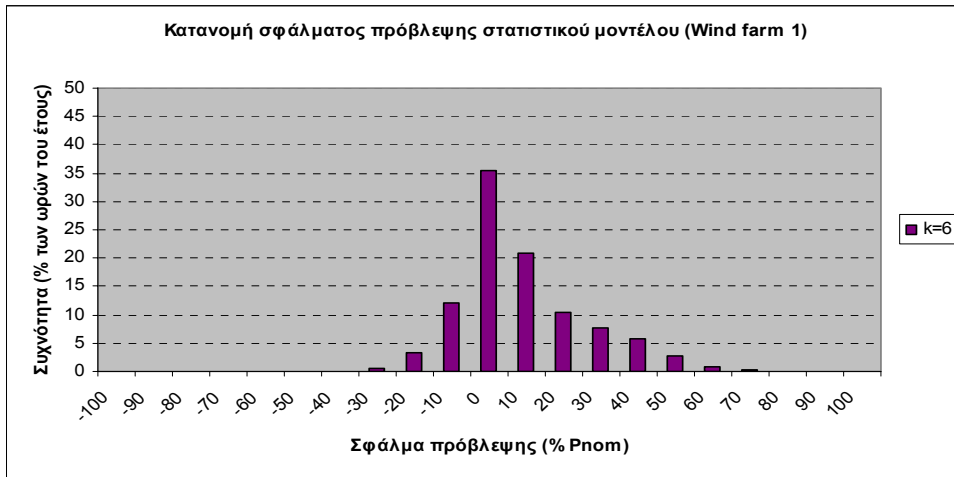
Διάγραμμα 3. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



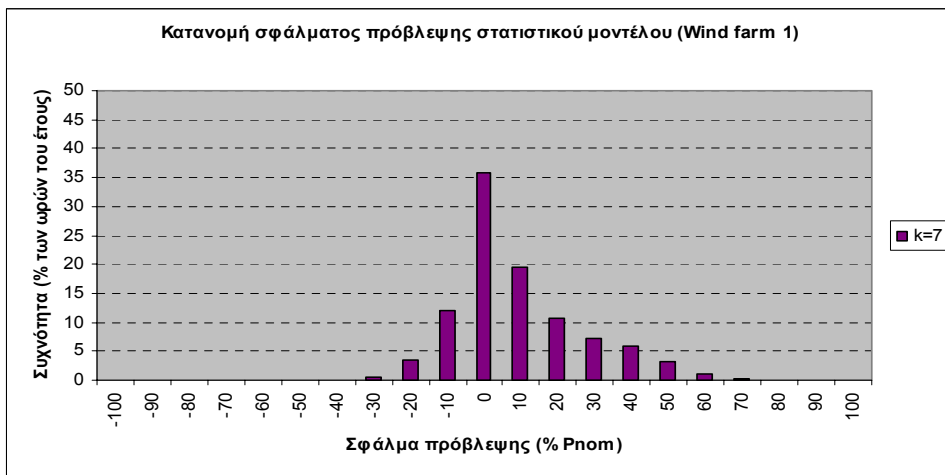
Διάγραμμα 4. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



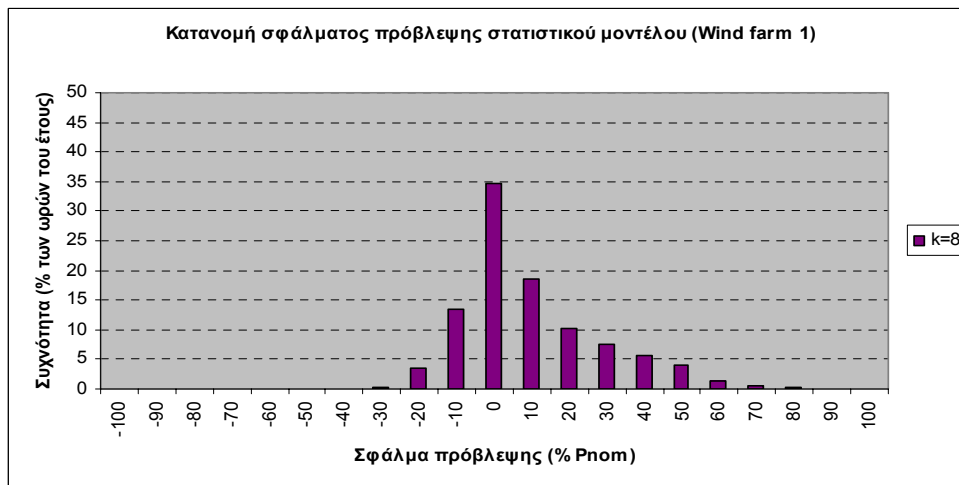
Διάγραμμα 5. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



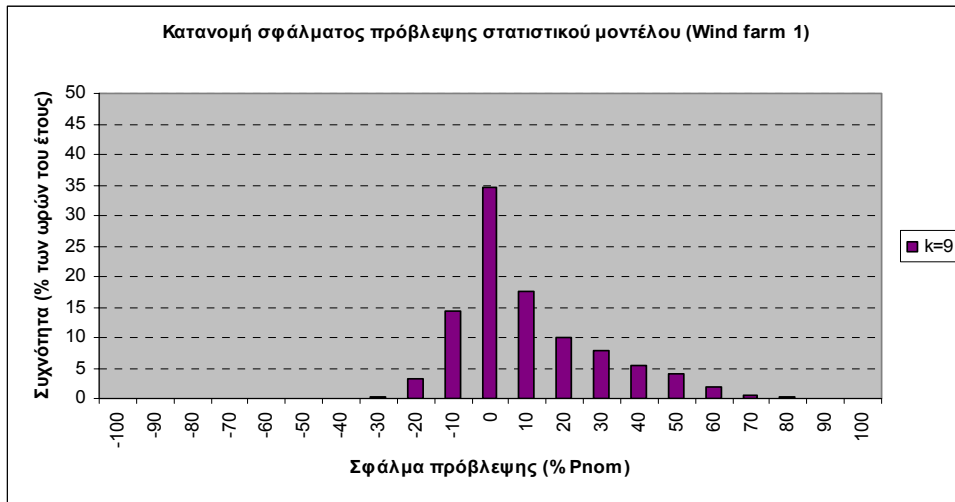
Διάγραμμα 6. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 64 ωρών



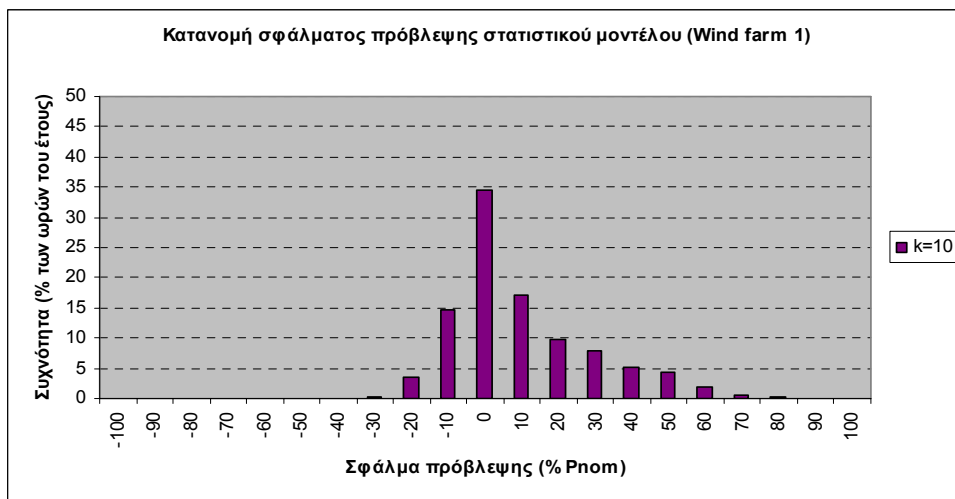
Διάγραμμα 7. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



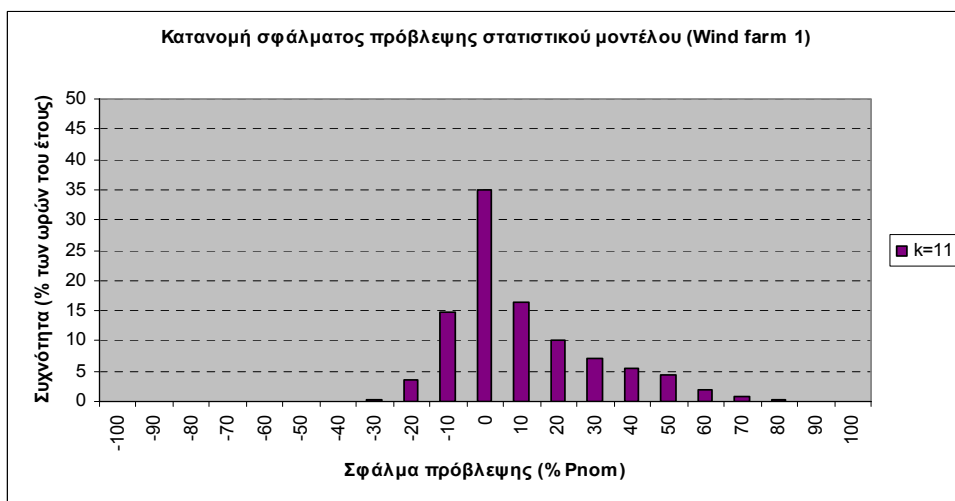
Διάγραμμα 8. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 8 ωρών



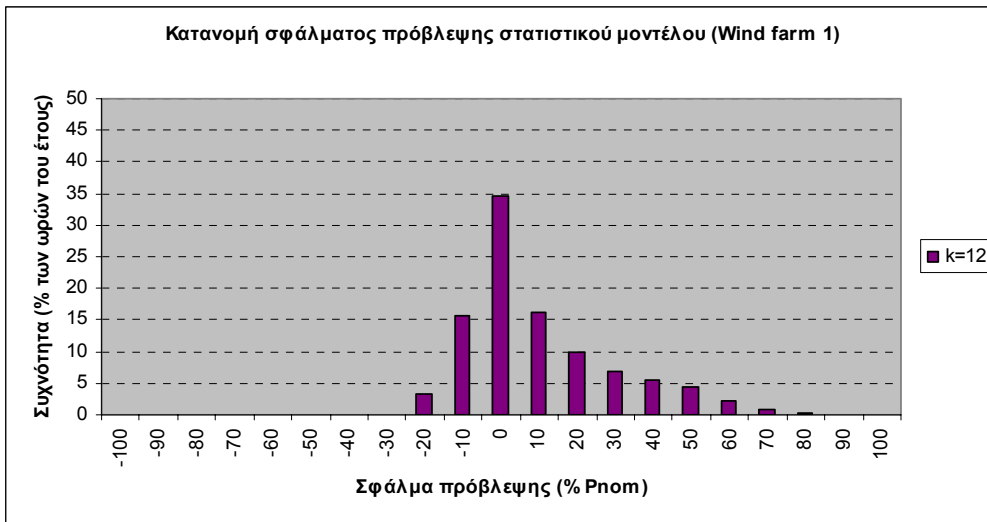
Διάγραμμα 9. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 10. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 10 ωρών



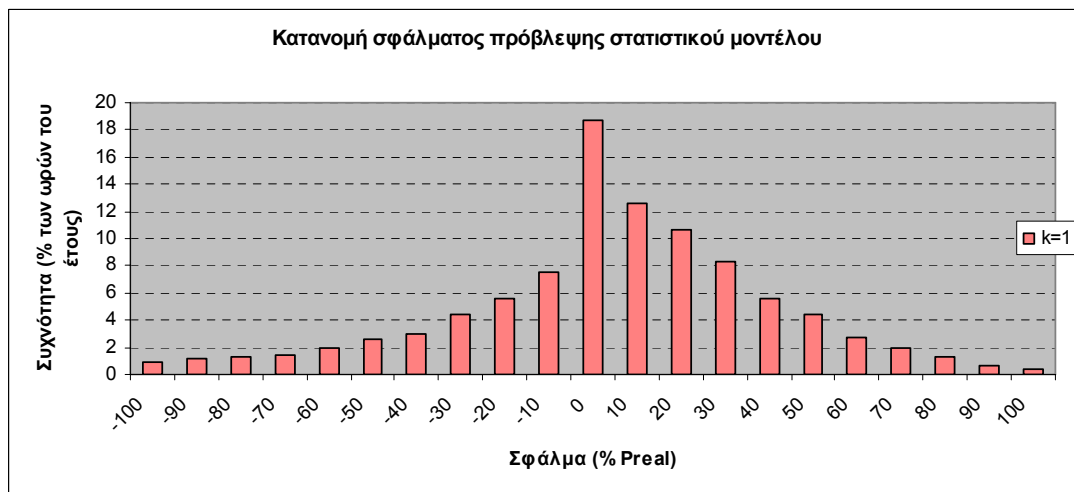
Διάγραμμα 11. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών



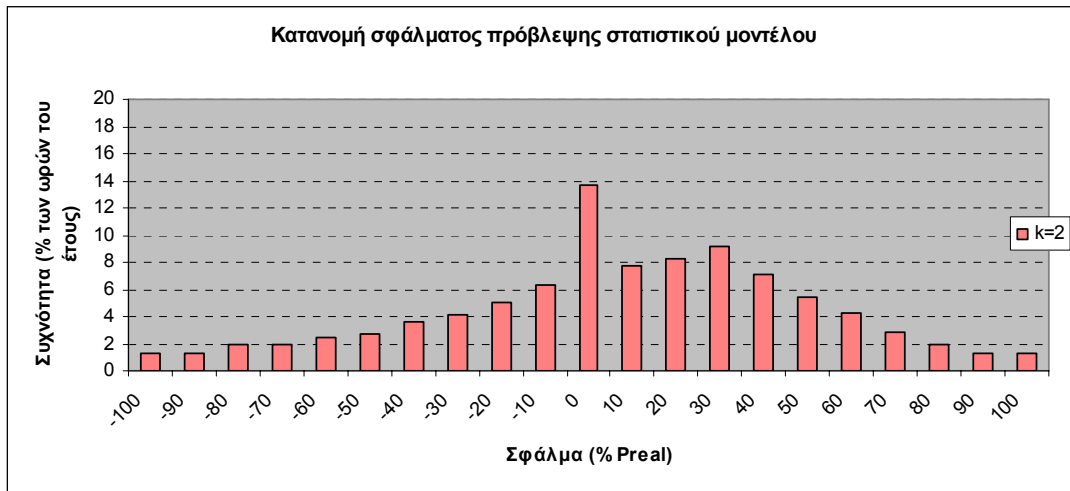
Διάγραμμα 12. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

Π.2. Κατανομή των επί τοις εκατό της πραγματικής ισχύος σφαλμάτων πρόβλεψης

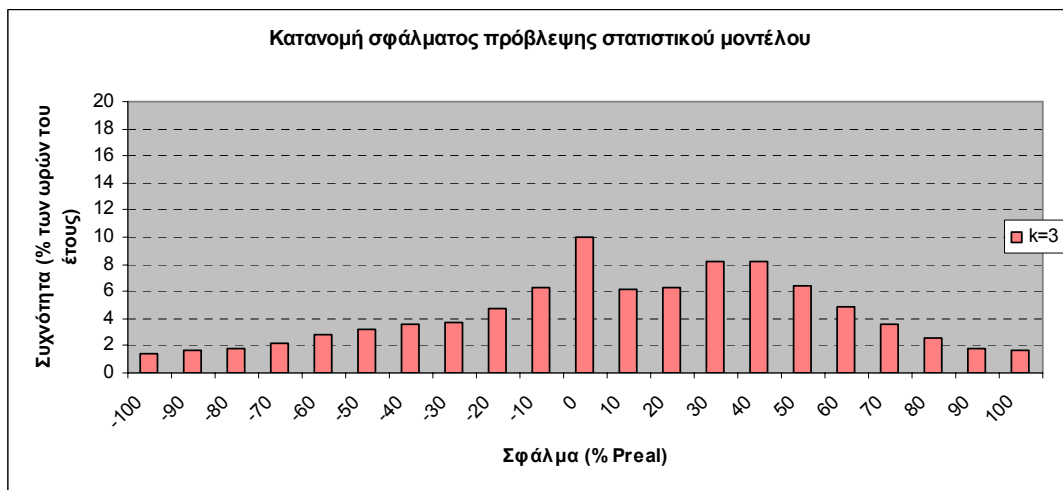
Π.2.1 Αιολικό πάρκο 1



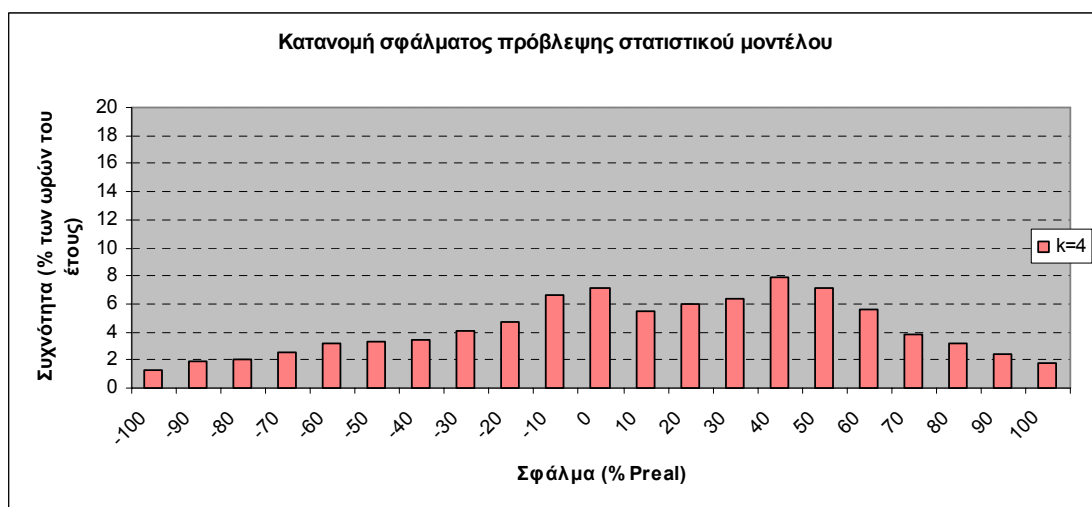
Διάγραμμα 13. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 1 ώρας



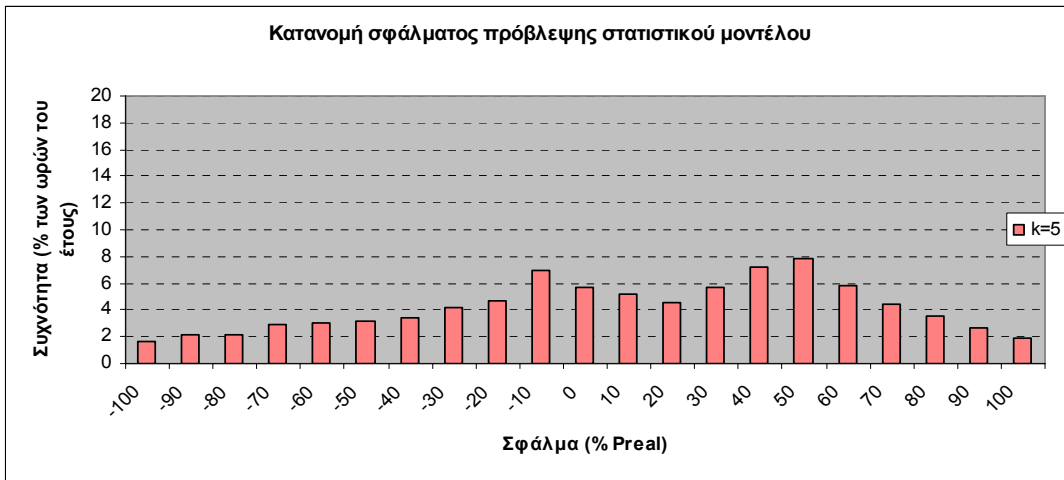
Διάγραμμα 14. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 2 ωρών



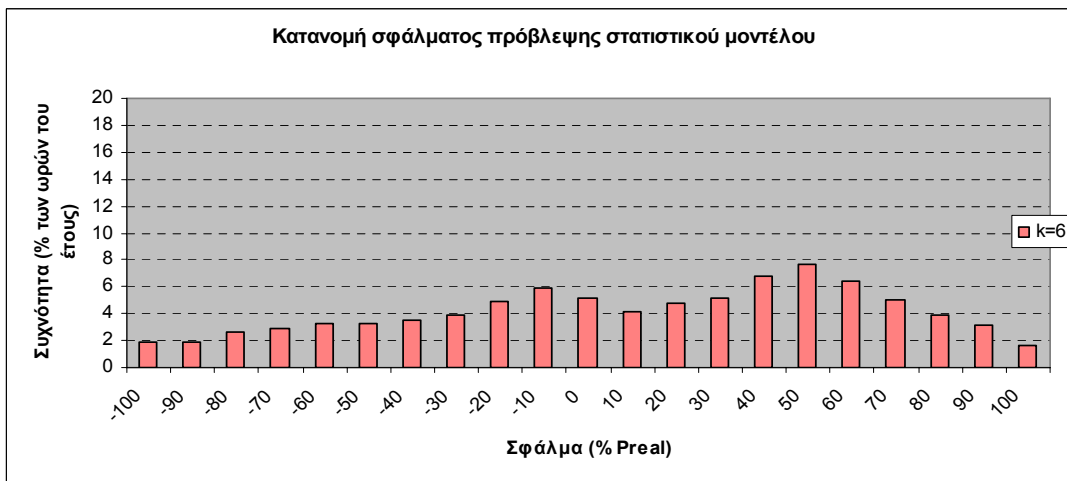
Διάγραμμα 15. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 3 ωρών



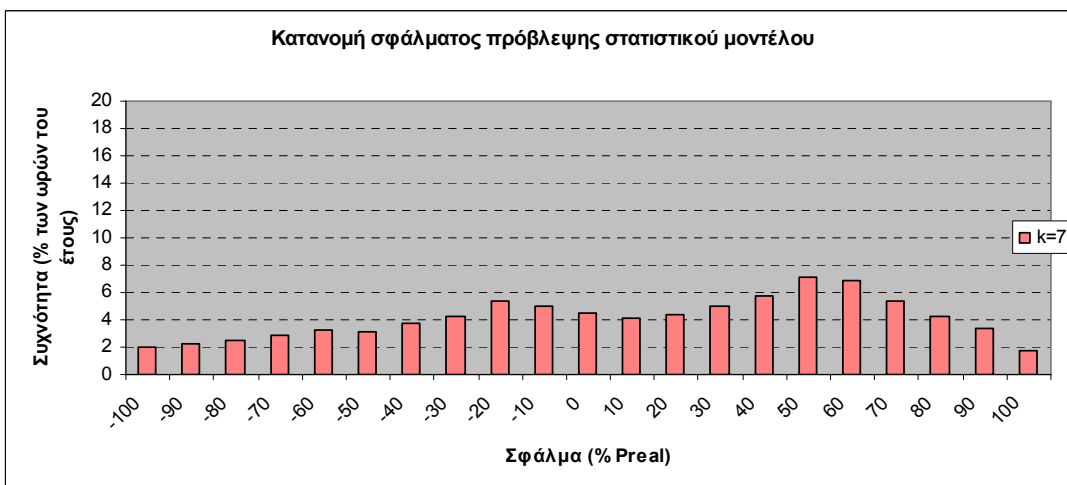
Διάγραμμα 16. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 4 ωρών



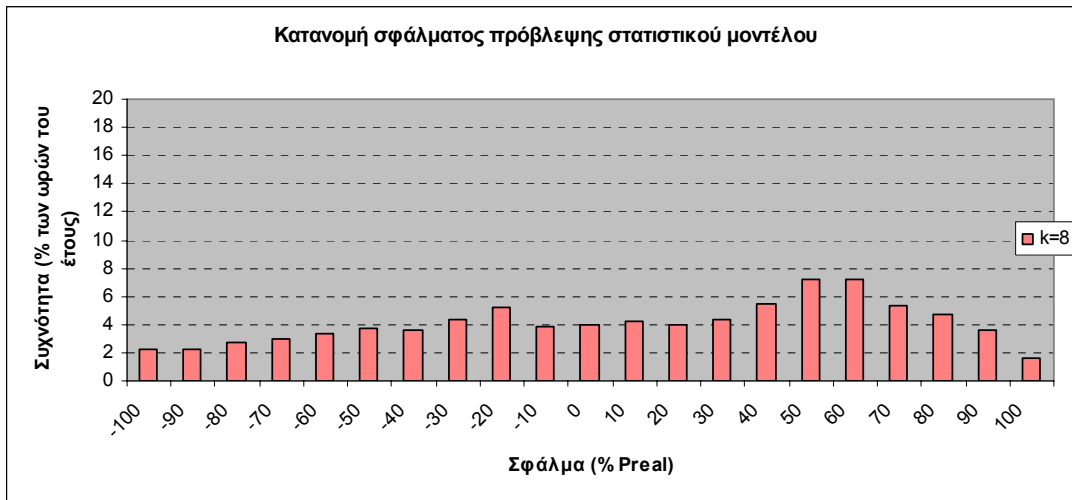
Διάγραμμα 17. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 5 ωρών



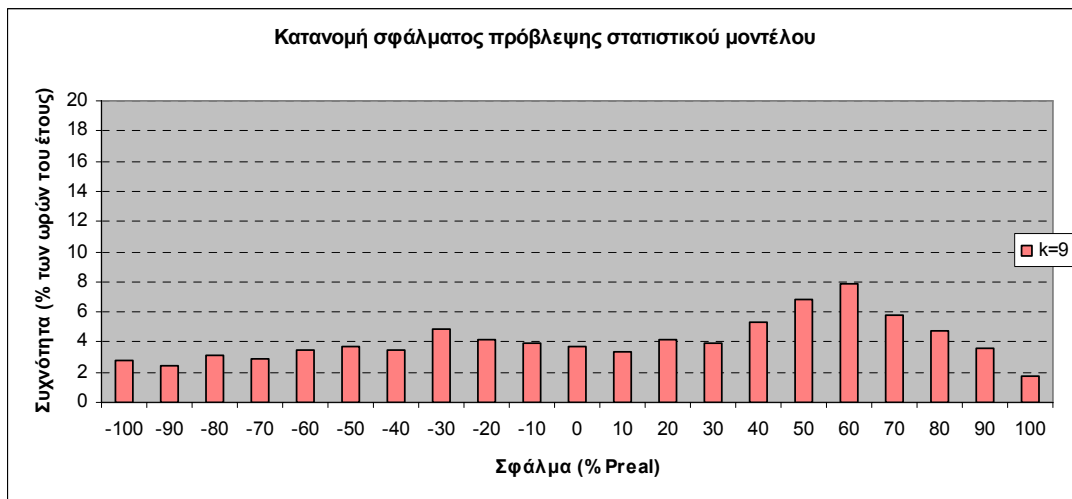
Διάγραμμα 18. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 6 ωρών



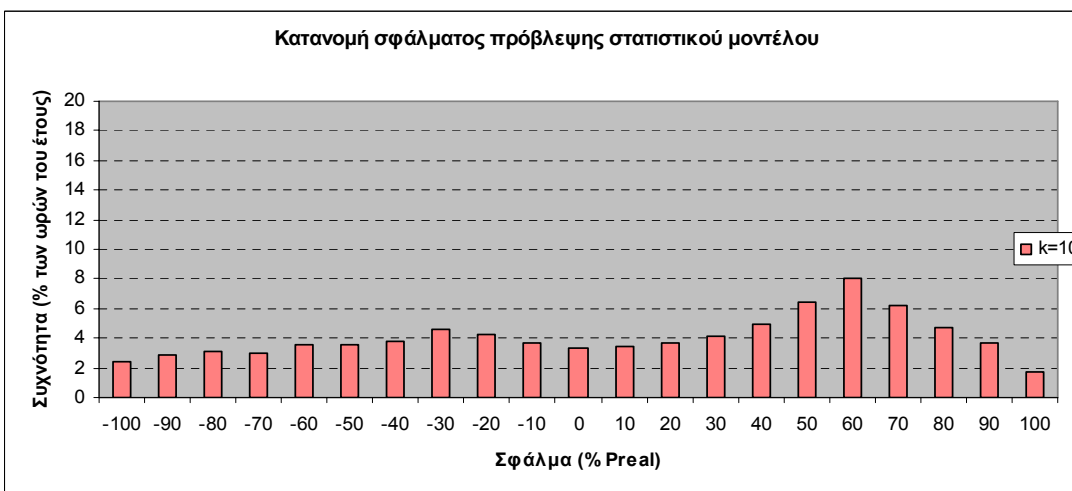
Διάγραμμα 19. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζοντα πρόβλεψης 7 ωρών



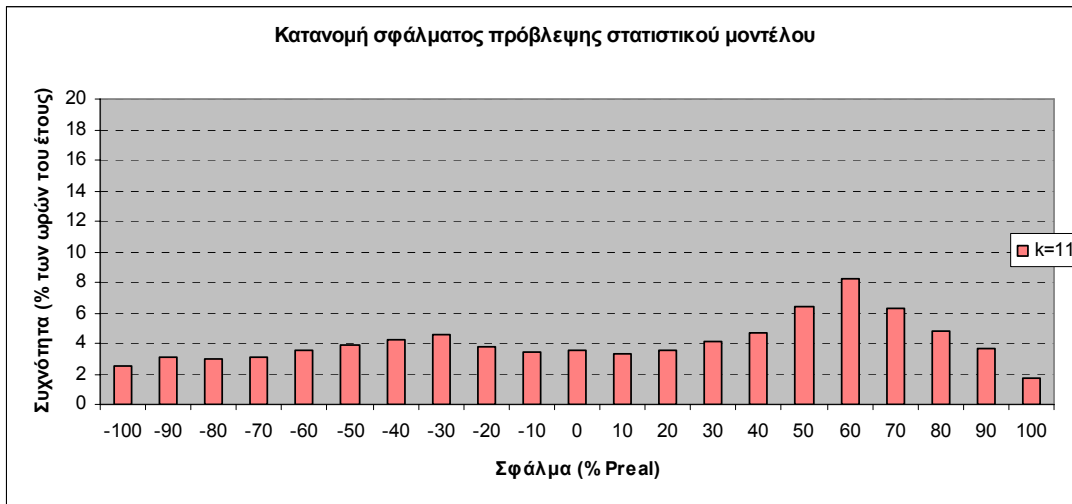
Διάγραμμα 20. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 8 ωρών



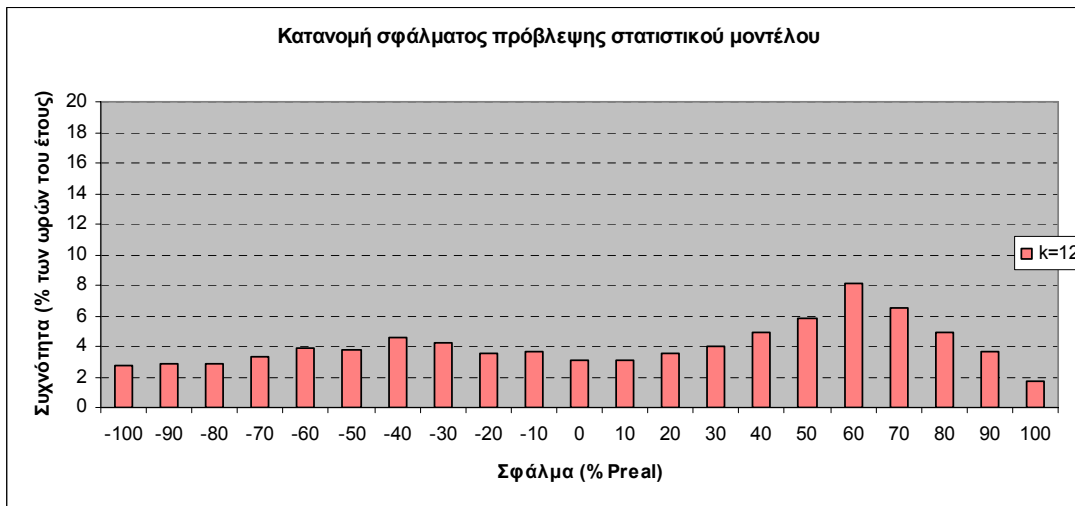
Διάγραμμα 21. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 9 ωρών



Διάγραμμα 22. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για οριζόντια πρόβλεψης 10 ωρών

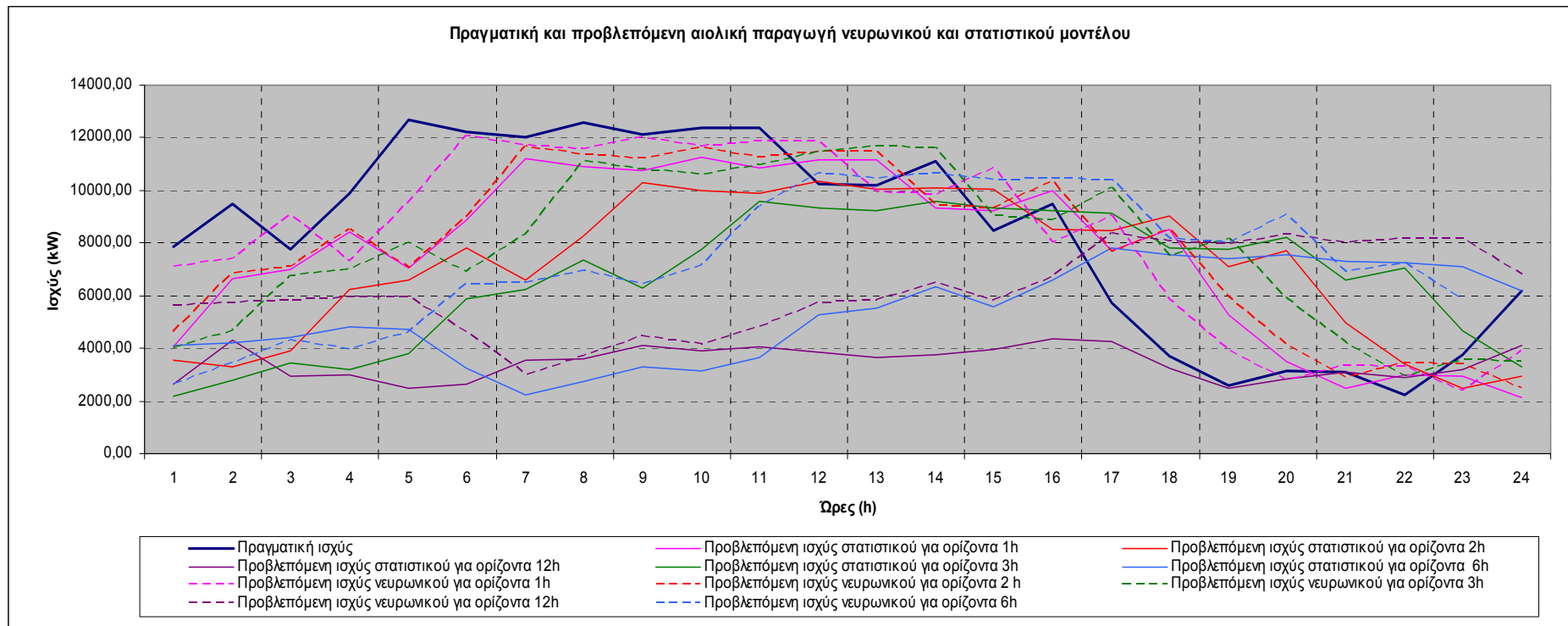


Διάγραμμα 23. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 11 ωρών



Διάγραμμα 24. Κατανομή σφάλματος πρόβλεψης για ορίζοντα πρόβλεψης 12 ωρών

Στο διάγραμμα 25. παρουσιάζεται η πρόβλεψη ενός τυχαίου 24ώρου όπως προκύπτει από το νευρωνικό και το στατιστικό μοντέλο για ορίζοντα πρόβλεψης 1, 2, 6 και 12 ωρών, συγκριτικά με την πραγματική ισχύ.



Διάγραμμα 25. Πραγματική και προβλεπόμενη αιολική παραγωγή νευρωνικού και στατιστικού μοντέλου 24 ωρών

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Powering Change, EWEA 2006 Annual Report
- [2] EWEC 2007 Milan, review, Wind directions May/June 2007
- [3] Wind Energy, The facts: an analysis of wind energy in the EU-25, Executive Summary, EWEA
- [4] The State-of-the art in short term prediction of wind power - A literature Overview, Version 1.1., Position Paper for the Anemos Project
- [5] L. Landberg, G. Kariniotakis, G. Giebel, R. Brownsword: State-of-the art on methods and software tools for short-term prediction of wind energy production, EWEC 2003, Madrid, Spain, June 16-19, 2003
- [6] Lars Landberg: Short-term Prediction of Local Wind Conditions. PhD-Thesis, Riso-R-702(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1994, ISBN 87-550-1916-1
- [7] L. Landsberg: Prediktor – an on-line prediction system. Poster on EWEC Special Topic Conference, Kassel, Germany, September 25-27, 2000
- [8] www.prediktor.dk
- [9] G. Giebel, G. Kariniotakis, C. Bjerger, M.H. Donovan, A. Juhl, K. Gram- Hansen, H.- P. Waldl, T. Pahlke, j. Giebhardt, M. Rebbeck, R. Ruffle, O. Brady: CleverFarm- First Results from an intelligent wind farm. Paper presented at the European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, Spain, 16-19 June 2003.
- [10] www.awstruwind.com
- [11] www.previento.de
- [12] U. Focken, M. Lange, H.-P. Waldl: Previento- A Wind Power Prediction System With an Innovative Upscaling Algorithm, Proceedings of the European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 June 2001, pp. 826-829, ISBN 3-936338-09-4
- [13] U. Focken, M. Lange, H.-P. Waldl: Previento-Regional wind power prediction with risk control. In Proceedings of the Global Wind Power Conference, Paris 2002.
- [14] J. Jörgensen, C. Möhrlein, B.Ö. Gallagher, K. Sattler and E McKögh: HIRPOM: Description of an operational numerical wind power prediction model for large scale integration of on- and off-shore wind power in Denmark. Global Wind Power Conference and Exhibition, Paris, France, 2-5 April 2002.

- [15] J. Jörgensen, C. Möhrten, K. Sattler: HIRPOM- WAM: An on- and offshore prediction System for real time prediction and climatic studies, EWEA Special Topic Offshore Wind Energy, Brussels, February 2002
- [16] Thomas Ackerman: Wind Power in Power Systems, 2005 Wiley
- [17] I. Sanchez, J. Usaola, O. Ravelo, C. Velasco, J. Dominguez, M. G. Lobo, G. Gonzalez, F. Soto, b. Diaz- Guerra, M. Alonso: SIPREOLICO- A wind power prediction system based on flexible combination of dynamic models. Proceedings of the first IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques, Norrköping, Swede, December 200, pp.197-214
- [18]B. Ernst, K. Rohrig: On- Line Monitoring and Prediction of Wind Power in German Transmission System Operation Centres, Intitut für Solare Energievorschumdstechnik e.V., Kassel
- [19]K. Rohrig: Entwicklung eines Rechenmodells zur Windleistungsprognose für das Gebiet des Deutschen Verbundnetzes, 13. Internationales Sonnenforum, Intitut für Solare Energievorschumdstechnik e.V., Kassel
- [20] www.cenerg.cma.fr/more-care
- [21] I. Marti, D. Cabezón, J. Villanueva, M.J. Sanisidro, Y.Loureiro, E. Cantero, J. Sanz : LocalPred and RedioPred. Advanced Tools for wind energy Prediction in complex terrain, European Wind Energy Conference and Exhibition, Madrid, Spain, 16-19 June 2003
- [22] G. Giebel, L. landberg, T.S. Nielsen, H. Madsen: The Zephyr Project. The Next Generation Prediction System, EWEC 2001, Copenhagen, Denmark, July 2-6, 2001
- [23] T.S. Nielsen, H. Madsen, H. Aa. Nielsen: Zephyr – The prediction Models, EWEC Special Topic Canference, Kassel, Germany, September 25-27, 2000
- [24] G. Sideratos, N.D. Hatziargyriou: An Advanced Statistical Method for Wind Power Forecasting, IEE Transactions on Power Systems, Volume 22, Issue 1. pp. 258-265, February 2007
- [25] Madsen H., Kariniotakis G., Nielsen H.Aa., Nielsen T.S., Pinson P. : A Protocol for Standardising the Performance Evaluation of Short- Term Wind Power Prediction Models, www.anemos.cma.fr
- [26] M. Lange: Analysis of the uncertainty of wind Power Predictions, PhD Thesis, October 2003, University of Oldenburg
- [27] L. Landberg: Short- term Prediction of Local Wind Conditions. Technical Report Risø-R-7202, Risø National Laboratory, 1994

- [28] G. Giebel: On the Benefits Distributed Generation of Wind Energy in Europe, volume 444 of Fortschritt- Berichte VDI Reihe 6. VDI Verlag Düsseldorf, 2001
- [29] M. Lange: On the uncertainty of wind power prediction, EWEC 2001, Copenhagen
- [30] P. Pinson, G. Kariniotakis, D. Mayer: Uncertainty and Prediction Risk Assessment of Short- term Wind Power Forecasts, Special Topic Conference: The science of making Torque from Wind, Delft. The Netherlands, April 19-21, 2004
- [31] S. Bofinger, A. Luig, H.G. Beyer: Qualification of Wind Power Forecasts, Global Wind power Conference and Exhibition, Paris, France, 2-5 April, 2002
- [32] P. Pinson: Estimation of the Uncertainty in Wind Power Forecasting. PhD Thesis, Ecole des Mines de France, March 2006
- [33] Marti et al : Evaluation of advanced wind power forecasting models, EWEC 2006, Athens, Greece, 23.2-2.3.2006
- [34] G. Kariniotakis et al: What a performance can be expected by short-term wind power prediction models depending on site characteristics?, EWEC 2004, London UK, November 22-25, 2004
- [35] M. Lange, H.-P. Waldl: Assessing the uncertainty of wind power prediction with regard to specific weather situations, EWEC 2001, Copenhagen, Denmark, pp.695-698, June 2004
- [36] U. Focken, M. Lange, K. Mönnich, H.-P. Waldl, H.-G. Beyer, A. Luig: A statistical analysis of the reduction of the wind power prediction error by spatial smoothing effect, 2001
- [37] M. Lange, D. Heinemann: Relating the uncertainty of short-term wind speed predictions to meteorological situations with methods from synoptic climatology, EWEC 2003, Madrid, Spain, June 16-19, 2003
- [38]K. Mönnich: Vorhersage der Leistungsabgabe netzeinspeisender Windkraftanlagen zur Unterstützung der Kraftwerkeinsatzplanung, Dissertation, Universität Oldenburg, 07.09.2000
- [39] G. Kariniotakis et al.: Next generation Short-Term Forecasting of Wind Power- Overview of the ANEMOS Project, EWEC 2006, Athens, Greece, 27/2-2/3/2006
- [40] J. Jorgensen, C. Moehren: HONEYMOON- A High resOlution Numerical wind EnergY Model for On- and Offshore forecasting using eNsemble predictions, Special Project Final Report, 28.06.2006

- [41] T.S. Nielsen (Ed): Using meteorological forecasts in on-line predictions of wind power, Technical Report, Institute of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 7.09.1999
- [42] T.S. Nielsen, H. Madsen: Statistical Methods for Predicting Wind Power, JOULE III
- [43] Madsen et al.: Experiences With Statistical Methods for Predicting Wind Power, JOULE III
- [44] T.S. Nielsen, H. Madsen, H. Aa. Nielsen, P. Pinson, G.Kariniotakis, N. Siebert, I. Marti, M. Lange, U. Lange. L. von Bremen, P. Louka, G. Kallos, G. Galanis: Short-term Wind Power Forecasting Using Advanced Statistical Methods
- [45] P. Pinson, N. Siebert, N. Kariniotakis: Forecasting of Regional Wind Generation by a Dynamic Fuzzy-Neural Networks Based Upscaling Approach, EWEC 2003, Madrid, Spain, 16-19 June 2003
- [46] C. Perez-Llera, M.C. Fernandez-Baizan, J.L. Feito, V. Gonzalez del Valle : Local Short-Term Prediction of Wind Speed : A Neural Network Analysis, University of Oviedo, LIFE Environmental Research Project
- [47] www.sotaventogalicia.com

