ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΟΙΝΗΣ ΩΦΕΛΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΝΟΜΑ: ΠΡΟΜΠΟΝΑΣ ΜΑΡΙΟΣ

A.M: 1110 2007 00 167

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΑΣΗΜΑΚΟΠΟΥΛΟΥ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ

ΑΘΗΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	σελ.10
2.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.10
2.2: ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΙΣΧΥΣ	σελ.10
2.3: ΕΠΩΦΕΛΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ-ΘΕΩΡΙΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ ΔΙΣΚΟΥ-ΟΡΙΟ ΒΕΤΖ	σελ.11
2.4: ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	σελ.14
2.5: ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ	σελ.16
2.6: IEC 61400-12-1	σελ.17
2.7: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	σελ.19
2.7.1: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	σελ.19
2.7.2: ΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	σελ.21
2.8: ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	σελ.21
2.9: АЮЛІКО ПАРКО	σελ.22
2.10: VORTEX GENERATORS	σελ.23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ	σελ.25
3.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.25
3.2: ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	σελ.25
3.3: ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	σελ.27
3.3.1: ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	σελ.27
3.3.2: ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	σελ.28
3.3.3: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ	σελ.29
3.3.4: ΣΙΓΜΟΕΙΔΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	σελ.31
3.3.5: ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΣΤΟΧΟΥ	σελ.31
3.3.6: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΡΩΝ	σελ.32
3.3.6: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΡΩΝ 3.4: BACKPROPAGATION ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ	σελ.32
 3.3.6: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΡΩΝ 3.4: BACKPROPAGATION ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 3.4.1: GRADIENT DESCENT ΜΕΘΟΔΟΣ 	σελ.32 σελ.33 σελ.34
 3.3.6: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΡΩΝ 3.4: ΒΑCKPROPAGATION ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 3.4.1: GRADIENT DESCENT ΜΕΘΟΔΟΣ 3.5: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 	σελ.32 σελ.33 σελ.34 σελ.36

3.7: ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝσελ.39
3.7.1: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥσελ.40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥσελ.41
4.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗσελ.41
4.2: ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-EVALUATIONσελ.42
4.2.1: ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ EVALUATIONσελ.42
4.2.2: ΕΛΕΓΧΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ EVALUATIONσελ.44
4.2.3: ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΣΧΥΟΣσελ.48
4.2.4: ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗσελ.52
4.2.5: ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ
ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥσελ.53
4.3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ-IMPLEMENTATIONσελ.54
4.3.1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΟ IMPLEMENTATIONσελ.54
4.3.2: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ IMPLEMENTATIONσελ.58
4.3.3: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ IMPLEMENTATIONσελ.63
4.4: ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ VGSσελ.65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑσελ.6

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Μέγιστες τιμές εισόδου	σελ.41
Πίνακας 4.2: Σύγκριση τιμών εκπαίδευσης και ελέγχου εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια	σελ.49
Πίνακας 4.3: Σύγκριση ΑΕΡ εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια	σελ.51
Πίνακας 4.4: Τιμές στατιστικών σφαλμάτων στην μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας	σελ.52
Πίνακας 4.5: Τιμές σύγκρισης πραγματικής ανεμογεννήτριας με εξαγόμενο μοντέλο	σελ.59
Πίνακας 4.6: Σύγκριση ΑΕΡ πραγματικής ανεμογεννήτριας με μοντέλου	σελ.62

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Κύριες πηγές καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τα επίσημα

στοιχεία της Eurostat.....σελ. 8

Εικόνα 1.2: Αύξηση δεικτών χρησιμοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε χώρες της Ε.Ε σύμφωνα	
με τα επίσημα στοιχεία της eurostatσε	ελ. 8
Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτριες με 3 πτερύγιασε	ελ. 9
Εικόνα 2.1: Ροϊκός σωλήνας που διατρέχει η αέρια μάζα m την ανεμογεννήτριασελ	λ. 10
Εικόνα 2.2: Λογαριθμική κατατομή του ανέμου σε ύπαιθρο και πόλη (κατακόρυφος άξονας το υψόμετρο	
και οριζόντιος η ταχύτητα του ανέμου)σελ	λ. 11
Εικόνα 2.3: ταχύτητες ανέμου πριν, μετα και δίπλα στον δρομέασελ	. . 11
Εικόνα 2.4: Συντελεστής απόδοσης ισχύος συναρτήσει του λσελ	٨. 13
Εικόνα2.5: Μέρη αιολικής μηχανής οριζόντιου άξονασελ	λ.14
Εικόνα2.6: Δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο ανεμογεννήτριαςσελ	۸. 15
Εικόνα2.7: Μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρικήσελ	λ.15
Εικόνα2.8: καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριαςσελ	λ.16
Εικόνα 2.9: καμπύλη με βάση τη cluster center μέθοδοσελ	λ. 21
Εικόνα 2.10: οι περιοχές στη Β. Αμερική μεσόθερμου κλίματος κατά Koppenσελ	λ.22
Εικόνα 2.11: καμπύλη ισχύος του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται	λ.22
Εικόνα 2.12: Τριγωνικό vortex generatorσελ	λ.23
Εικόνα 2.13: Γωνία προσβολής βσε	:λ.23
Εικόνα 3.1: το κύτταρο του νευρωνικού δικτύου και η συνολική αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου σεί	λ.26
Εικόνα 3.2: (a) η λογιστική συνάρτηση η οποία δεν συνιστάται και (b) η προτεινόμενη	
μορφή της υπερβολικής εφαπτομένηςσε	ελ.31
Εικόνα 4.1: καμπύλες ισχύος δικτύου και πραγματικής ανεμογεννήτριας,	
με ομαλοποιημένη την ταχύτητασεί	λ.43
Εικόνα 4.2: καμπύλες ισχύος του δικτύου και πραγματικής ανεμογεννήτριας	
κατά την διαδικασία ελέγχουσε	:λ.44
Εικόνα 4.3: εικονική καμπύλη ισχύος του δικτύου κατά την διαδικασία ελέγχου	ελ.45
Εικόνα 4.4: πραγματική καμπύλη της ανεμογεννήτριας στην διαδικασία ελέγχου του δικτύου σε	ελ.45
Εικόνα 4.5: Ένταση της τύρβης σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμουσε	ελ.46
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα διασποράς έντασης τύρβης συναρτήσει της ενεργούς ισχύος	ελ.47
Εικόνα 4.7: Ιστόγραμμα πλήθους τιμών ενεργούς ισχύος σε νευρωνικό δίκτυο	
και πραγματική ανεμογεννήτριασελ	λ.48

Εικόνα 4.8: Μέση τιμή δεδομένων ισχύος για πραγματική ανεμογεννήτρια και για μοντέλο	σελ.48
Εικόνα 4.9 : Διάγραμμα διαφορών απόδοσης ισχύος εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια	

	συναρτήσει της	ταχύτητας ανέμου	σελ.50
Εικόνα 4.1	Ι Ο: Χρονική εξέλιξη	απόδοσης εικονικής ανεμογεννήτριας και πραγματικής	σελ.50
Εικόνα4.1	1: Χρονική διαφορά	α απόδοσης ισχύος της εικονικής με την πραγματική ανεμογεννήτρια	σελ.51
Εικόνα 4.1	L 2: Καμπύλες ισχύο	ς πραγματικής ανεμογεννήτριας και εικονικής	σελ.53
Εικόνα 4.1	L 3: καμπύλες ισχύο	ς και συντελεστής απόδοσης ανεμογεννήτριας Cp για	

πραγματική κα	για εικονικήσε	ελ.54
---------------	----------------	-------

1	1	>
EVICYULIEVA AVELLOVEVVI		σελ 5/
ενισχομενή ανεμογεννί		000.57

Εικόνα 4.19: Διάγραμμα διασποράς ένταση τύρβης συναρτήσει ενεργούς ισχύος	.57
Εικόνα 4.20: Ιστόγραμμα απόδοσης ισχύος της πραγματικής ανεμογεννήτριας σε σύγκριση με την εικονική σελ.	58
Εικόνα 4.21: Μέσες τιμές απόδοσης ισχύος και μέγιστες τιμές πραγματικής ανεμογεννήτριας	

και εικονικής......σελ.59

Εικόνα 4.22: Χρονική εξέλιξη των αποδόσεων ισχύος, του μοντέλου και της πραγματικής ανεμογεννήτριας σε	ελ.60
Εικόνα 4.23: Διαφορά χρονικής εξέλιξης των αποδόσεων ισχύος των ανεμογεννητριών	ελ.61
Εικόνα 4.24: Διαφορά απόδοσης των δυο ανεμογεννητριών στις διάφορες ταχύτητες ανέμουσ	τελ.61
Εικόνα 4.25: Καμπύλη ισχύος πραγματικής ανεμογεννήτριας και μοντέλου	ελ.63
Εικόνα 4.26: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών στις μέσες ταχύτητες και καμπύλες συντελεστών	
απόδοσης της πραγματικής και μοντέλουσ	ελ.64

Εικόνα 4.27: Σχετικές συχνότητες ταχυτήτων λειτουργίας ενισχυμένης με Vgs ανεμογεννήτριας και απλής..... σελ.65

Εικόνα 4.28: Ετήσιες παραγωγής ενέργειας για κάθε ταχύτητα ανέμου για ενισχυμένη ανεμογεννήτρια

και απλή (μοντέλο)..... σελ.66

Εν αρχή, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την καθηγήτριά μου κ. Ασημακοπούλου για την εμπιστοσύνη και κατανόηση που επέδειξε στις διάφορες δυσκολίες. Επίσης, τον Βασίλειο Ντούρο για την στήριξη και καθοδήγηση η οποία ήταν καθοριστική και συνάμα εμψυχωτική σε όλη αυτήν την διαδρομή. Χωρίς τις συμβουλές του και την αρωγή τους δεν θα μπορούσα να αντιληφθώ σε βάθος τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου αντικειμένου και να καλύψω επαρκώς το εύρος της βιβλιογραφίας. Συμβουλές που όχι μόνο με βοήθησαν στην εκπόνηση της παραπάνω έρευνας, αλλά και στο σύνολο της πορείας για ολοκλήρωση των σπουδών μου στο τμήμα. Τέλος, τους δικούς μου ανθρώπους που χωρίς αυτούς δεν θα είχα την δύναμη να ανταπεξέλθω στις εκάστοτε υποχρεώσεις μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η σύγκριση και αξιολόγηση της απόδοσης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα μετά την τοποθέτηση γεννητριών στροβίλων (Vortex generators-Vgs). Τα Vgs που τοποθετούνται στις πτέρυγες συγκεκριμένου μοντέλου ανεμογεννήτριας που θα αναλυθεί παρακάτω, ελέγχουν την αποκόλληση της ροής με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την απόδοσή της. Για την ακριβή σύγκριση της με την προγενέστερη της κατάσταση, υπό τις ίδιες ακριβώς μετεωρολογικές και μηχανολογικές συνθήκες για ασφαλή συμπεράσματα, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο μέσω πολυεπίπεδων τεχνητών νευρωνικών δικτύων το οποίο προσωμοιώνει την άθικτη ανεμογεννήτρια. Η μοντελοποίηση ήταν στατική, ακολουθήθηκε δηλαδή διαδικασία στην οποία το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδέυτηκε με αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης (back propagation algorithm) χρησιμοποιώντας επιβλεπόμενα δεδομένα. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση συναρτήσεων ανεξάρτητων του χρόνου. Μια τέτοια είναι και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας που δείχνει την απόδοση ισχύος της στις διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές δεδομένων της ανεμογεννήτριας πριν την εγκατάσταση των Vgs για την εκπαίδευση του μοντέλου, με σκοπό την προσομοίωση της και την δημιουργία καμπυλών ισχύος που θα αντιπαρατεθούν με τις νέες καμπύλες της τροποποιημένης ανεμογεννήτριας που θα δημιουργηθούν ακριβώς στις ίδιες συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο θα έρθουν σε αντιπαραβολή οι δυο ετήσιες παραγωγές ενέργειας που θα υπολογισθούν και κατά συνέπεια θα παρατηρηθεί αν η τροποποίηση στην ανεμογεννήτρια με τα vortex generators βελτιώνει την απόδοσή της. Έπειτα από την επεξεργασία που ακολουθείται παρατηρείται μείωση της αποκόλλησης της ροής η οποία επεκτείνει την λειτουργική διάρκεια της ανεμογεννήτριας και μειώνει τον θόρυβο που προκαλείται λόγω της τυρβώδους ροής, με αποτέλεσμα την σταθερή λειτουργία των πτερυγίων σε πολύ μεγαλύτερη διάρκεια. Θα παρατηρηθεί μεταβολή στην κατανομή του ανέμου και λειτουργία της ανεμογεννήτριας κατά βάση σε μέσες ταχύτητες (περίπου το 75% της λειτουργίας της ενισχυμένης ανεμογεννήτριας σε αυτές τις ταχύτητες) με αποτέλεσμα την βελτίωση στην απόδοση μετά την τοποθέτηση των vortex generators. Βελτίωση θα υπάρχει ακόμα και στις υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο 21°ς αιώνας χαρακτηρίζεται από τεράστιες ανάγκες σε αποθέματα ενέργειας. Η ζήτηση κάθε χρόνο γίνεται όλο και μεγαλύτερη (με βάση την επίσημη ιστοσελίδα του eurostat http://ec.europa.eu/eurostat). Οι διαδεδομένοι τρόποι παραγωγής ενέργειας (1), όχι μόνο δεν αρκούν, για να καλύψουν τις σημερινές ανάγκες, αλλά επιβαρύνουν και το περιβάλλον. Οι λόγοι αυτοί έχουν οδηγήσει στη μελέτη και εξέλιξη άλλων τρόπων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενός από τα πλέον πολύτιμα και βασικά αγαθά της σημερινής εποχής, με αποτέλεσμα την διαφυγή σε άλλες διόδους και διαφορετικές μεθόδους και μορφές ενέργειας. Μια τέτοια είναι η *αιολική ενέργεια.* Από τους ανεμόμυλους, παλαιότερα, μεχρι τις σημερινές ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα, ο άνθρωπος προσπαθεί να εκμεταλλευτεί την μορφή αυτή ενέργειας που βρίσκεται παντού γύρω μας. Μάλιστα, υπάρχουν μνείες πως υπήρχαν μηχανισμοί που εκμεταλλεύονταν τον άνεμο από την αρχαιότητα μέχρι και 3 χιλιετίες πριν, από τους αρχαίους Έλληνες και Ρωμαίους μέχρι και την Φοινίκη. (2) Είναι μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και είχε αποφασιστική συμβολή στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Στην σημερινή εποχή οπου το φάσμα της έλευσης της ενεργειακής κρισης είναι ορατό, η χρησιμοποίησή της είναι επιβεβλημένη, ενώ έρευνες δείχνουν συνεχή αύξηση της στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως (εικόνα 1.2).



Επίσημα στοιχεία έτους 2008

Εικόνα 1.1: Κύριες πηγές καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της eurostat

	2004	2007	2010	2011	2012	2020 target ⁵
EU28	8.3	10.0	12.5	13.0	14.1	20
Belgium	1.9	3.0	5.0	5.2	6.8	13
Bulgaria	9.6	9.4	14.4	14.6	16.3	16
Czech Republic	5.9	7.4	9.3	9.3	11.2	13
Denmark	14.5	17.9	22.6	24.0	26.0	30
Germany	5.8	9.0	10.7	11.6	12.4	18
Estonia	18.4	17.2	24.7	25.0	25.2	25
Ireland	2.4	3.6	5.6	6.6	7.2	16
Greece*	7.2	8.5	9.7	11.8	15.1	18
Spain	8.3	9.7	13.8	13.2	14.3	20
France	9.3	10.2	12.7	11.3	13.4	23
Croatia	13.2	12.1	14.3	15.4	16.8	20
Italy	5.7	6.5	10.6	12.3	13.5	17
Cyprus	3.1	4.0	6.0	6.0	6.8	13
Latvia*	32.8	29.6	32.5	33.5	35.8	40
Lithuania	17.2	16.7	19.8	20.2	21.7	23
Luxembourg	0.9	2.7	2.9	2.9	3.1	11
Hungary*	4.4	5.9	8.6	9.1	9.6	13
Malta*	0.3	0.4	0.4	0.7	1.4	10
Netherlands	1.9	3.1	3.7	4.3	4.5	14
Austria	22.7	27.5	30.8	30.8	32.1	34
Poland	7.0	7.0	9.3	10.4	11.0	15
Portugal	19.2	21.9	24.2	24.5	24.6	31
Romania	16.8	18.3	23.2	21.2	22.9	24
Slovenia	16.1	15.6	19.2	19.4	20.2	25
Slovakia	5.3	7.3	9.0	10.3	10.4	14
Finland	29.2	29.8	32.4	32.7	34.3	38
Sweden	38.7	44.1	47.2	48.8	51.0	49
United Kingdom	1.2	1.8	3.3	3.8	4.2	15
Norway	58.1	60.2	61.2	64.6	64.5	67.5

Share of energy from renewable sources (in % of gross final energy consumption)

Εικόνα 1.2: Αύξηση δεικτών χρησιμοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε χώρες της Ε.Ε σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της eurostat

Είναι μια μορφή ενέργειας ήπια και ανανεώσιμη, μια ασφαλής ενέργεια που δεν επιβαρύνει ή δύναται να επηρεάσει την κλιματική αλλαγή και την ρύπανση που μαστίζει την εποχή μας, αντιθέτως αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνους πόρους ενέργειας, όπως το κάρβουνο και το πετρέλαιο. Είναι μια ανεξάντλητη και άφθονη ενέργεια και έχει το προτέρημα ότι δεν επικεντρώνεται σε συγκεκριμένα σημεία του πλανήτη, γεγονός που δίνει λύση στα ενεργειακά προβλήματα που δημιουργούνται είτε εγχώρια είτε παγκοσμίως. Έχει χαμηλό λειτουργικό κόστος, πράγμα πολύ σημαντικό ιδιαίτερα για την σημερινή εποχή που είναι ζητούμενο η φθηνή ενέργεια και τα φθηνά λειτουργικά έξοδα. (3)

Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας δεν χρειάζεται μόνο η μελέτη της ίδιας αλλά και η δημιουργία όλο και καλύτερων μηχανών που θα την εκμεταλλεύονται. Έτσι, αλληλένδετη με την εκμετάλλευσή της, είναι και η μελέτη των αιολικών μηχανών και η συνεχής βελτίωσή τους για την όλο και καλύτερη απόδοσή τους. Ένας τρόπος βελτίωσης της απόδοσης τους ειναι με την βοήθεια των vortex generators που τοποθετούνται στις ανεμογεννήτριες. Τέτοια προσπάθεια θα γίνει στην εργασία αυτή όπου με συγκεκριμένο μοντέλο αιολικών μηχανών οριζοντίου άξονα σε συγκεκριμένο αιολικό πάρκο που θα περιγραφεί παρακάτω και με ανάλυση, χρησιμοποιώντας, σαν εργαλείο για σύγκριση της πρότερης με την μεταγενέστερη κατάσταση, τα νευρωνικά δίκτυα, θα επιδιωχθεί η αύξηση της απόδοσής τους. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο που είναι αναγκαίο και συγκεκριμένα στην αιολική ενέργεια, την παραμετροποίηση καμπύλης ισχύος, τα vortex generators και τα νευρωνικά δίκτυα και στην συνέχεια θα γίνει η ανάλυση των αποτελεσμάτων νευρωνικού δικτύου για την μοντελοποίηση των ανεμογεννητριών. Θα γίνει με λίγα λόγια, σύγκριση της αρχικής κατάστασης των ανεμογεννητριών. Θα γίνει με λίγα λόγια, σύγκριση της αρχικής κατάστασης των ανεμογεννητριών με αυτήν μετά την τοποθέτηση των vortex generators.



Εικόνα 1.3: ανεμογεννήτριες με 3 πτερύγια (2)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από την μετακίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Είναι αποτέλεσμα της μετατροπής μέρους της ηλιακής ενεργειας (2% περίπου) μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην ατμόσφαιρα και της ανομοιόμορφης θέρμανσης του πλανήτη, η οποία προκαλεί διαφορές πίεσης στα διάφορα μέρη, η οποία με την σειρά της προκαλεί κλίση της πίεσης με συνέπεια την κίνηση των μαζών απο υψηλότερες σε χαμηλότερες πιέσεις. Είναι εύκολα κατανοητό πως ειναι μια ήπια και ακομα πιο σημαντικο, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και αυτός είναι ο λόγος που εδώ και πολλά χρόνια γίνεται προσπάθεια για την χρησιμοποίησή της. Η κινητική ενέργεια από την ροή του αέρα μπορεί να εξαχθεί και να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι η εξέλιξη των ανεμόμυλων που χρησιμοποιούνταν για το άλεσμα σιτιρών ή άντληση νερών. Κύριος σχεδιασμός που έχει επικρατήσει σήμερα στις ανεμογεννήτριες είναι με δρομέα που τοποθετούνται πτερύγια. Τα πτερύγια αυτά περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα Ω γύρω από άξονα οριζόντιο ή κάθετο στο έδαφος. Η ανάγκη για κατανόηση και εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έγινε ακόμη μεγαλύτερη από την στιγμή που οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη γιγαντώνονται ενώ οι επιπτώσεις της χρήσης μη ήπιων μορφών ενέργειας γίνονται όλο και πιο ορατές. Έτσι η ακόμα βαθύτερη μελέτη της αιολικής ενέργειας και των ανεμογεννητριών έχει γίνει αναγκαία.

Το δυσκολότερο όμως εγχείρημα είναι να αξιοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας. Το ποσοστό που αξιοποιείται είναι πολυ μικρό σε σχέση με την διαθέσιμη ενέργεια που προσφέρει ο άνεμος και πάρα πολλές προσπάθειες μέσω επιστημονικών μελετών και πειραμάτων έχουν επικεντρωθεί σε αυτόν τον σκοπό. Συγκεκριμένα, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, απο τη διαθέσιμη ισχύ που προσφέρει το περιβάλλον, η μέγιστη εκμεταλλεύσιμη ισχύς που μπορεί να αξιοποιηθεί είναι ιδεατά το 0,59 (όριο Betz) λόγω της αρχιτεκτονικής των ανεμογεννητριών και αεροδυναμικών περιορισμών τους, μηχανικών τριβών και απωλειών που επιτρέπουν μόνο ένα μέρος της να μετατραπεί σε επωφελούμενη ενέργεια , ενώ η βιομηχανία έχει φτάσει τη μέγιστη απόδοση περίπου στο 0,45 (4) (5) και πασχίζει να το αυξήσει έστω και λίγο. Τέτοια προσπάθεια θα επιχειρηθεί να γίνει και με την βοήθεια των vortex generators.

2.2 ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΙΣΧΥΣ

Η κινητική ενέργεια E μιας αέριας μάζας m είναι (Nm) $E_{\kappa} = \frac{1}{2}mv^2$ (2.1) όπου v η ταχύτητα που έχει αναπτύξει. Αν V ο όγκος που ρέει η μάζα με ύψος S και διατομή A του ροϊκού σωλήνα (**εικόνα 2.1**) που ρέει η μάζα m, $V = A \cdot S$ και $m = \rho \cdot A \cdot S$ με ρ την πυκνότητα της αέριας μάζας, τότε ισχύει μια σχέση που είναι πολύ βασική στην προσπάθεια εκμετάλλευσης στο έπακρο της ενέργειας της μάζας αυτής. Ισχύει για την διαθέσιμη ισχύ:

$$P_{\delta t \alpha \theta} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \qquad (W), \tag{2.2}$$

δηλαδή η ισχύς που προσφέρεται είναι ανάλογη της διατομής στην οποία ρέει η μάζα και ανάλογη του κύβου της ταχύτητας που έχει. (2) Αυτό σημαίνει ότι η διαθέσιμη ισχύς που προσφέρει το περιβάλλον, καθορίζεται από το εμβαδόν της σάρωσης της πτερωτής A=πD²/4=πR² (όπου R η ακτίνα της πτερωτής) της ανεμογεννήτριας, αλλά πολύ περισσότερο από την ταχύτητα του ανέμου που φτάνει στην πτερωτή.



Εικόνα 2.1: ροϊκός σωλήνας που διατρέχει η αέρια μάζα m την ανεμογεννήτρια (4)



Εικόνα 2.2: Λογαριθμική κατατομή του ανέμου σε ύπαιθρο και πόλη (κατακόρυφος άξονας το υψόμετρο και οριζόντιος η ταχύτητα του ανέμου)

Γίνεται κατανοητό εδώ πόσο σημαντική είναι η μελέτη του ανέμου για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας και ειδικά η ταχύτητα και η διεύθυνση του. Η ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή μεταβάλλεται εποχικά (ανάλογα την εποχή), ημερήσια (μπορεί να αλλαζει μέσα στην μέρα) αλλά και ετήσια. Επίσης υπάρχει η πιθανότητα ριπών ανέμου που είναι αιφνίδια και ραγδαία μικρής διάρκειας αυξηση της ταχύτητας. Η ταχύτητα επηρεάζεται και από το ύψος. Η αύξησή της είναι λογαριθμική σε σχέση με το ύψος, δηλαδή κοντά στην επιφάνεια είναι πολύ μικρή λόγω τριβής αυξάνει καθ'ύψος μέχρι σε κάποιο σημείο να σταθεροποιηθεί. Εκτός του ύψους, λόγω τραχύτητας, η ταχύτητα μειώνεται σε περιοχές με εμπόδια (φυσικά ή πόλεις) σε ύψη κοντά στην επιφάνεια και είναι μεγαλύτερη σε αυτές χωρίς εμπόδια ενώ εκεί αυξάνεται και γρηγορότερα συναρτήσει του ύψους.(**εικόνα 2.2**)

2.3 ΕΠΩΦΕΛΟΥΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ-ΘΕΩΡΙΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ ΔΙΣΚΟΥ-ΟΡΙΟ ΒΕΤΖ

Η διαθέσιμη ισχύς όμως, δεν εκμεταλλεύεται στο σύνολό της από τα συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας. Σύμφωνα με τους νόμους της ρευστομηχανικής, η συνολική ενέργεια ενός ρευστού, στην συγκεκριμένη περίπτωση της αέριας μάζας διατομής S όπως στην **εικόνα 2.1** και στατικής πίεσης P που περνά από την αιολική μηχανή, παραμένει σταθερή. Αν δηλαδή αυξηθεί η ταχύτητα της μάζας, μειώνεται η πίεσή της ενώ αν μειωθεί, η πίεση αυξάνεται. Έστω ότι αυτή η μάζα πλησιάζει έναν ιδανικό δίσκο που στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει την πτερωτή της ανεμογεννήτριας (θεωρία ενεργοποιητή δίσκου- actuator disc theory) με ταχύτητα V_1 . Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από την αέρια μάζα, η στατική πίεση πέφτει με αποτέλεσμα η πίεση του αέρα που εξέρχεται από την περιοχή του δίσκου είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική που είχε πριν και την δημιουργία μιας περιοχής που ονομάζεται απόρρευμα (wake). Όταν απομακρυνθεί από τον δίσκο, η στατική πίεση πρέπει να επανέλεθει στα προηγούμενα επίπεδα για να αποκατασταθεί το ισοζύγιο. Αυτό επιτυγχάνεται με την μείωση της ταχύτητας της μάζας εκείνη την στιγμή V_2 , με $V_2 < V_1$ δηλαδή. Λόγω της αρχής διατήρησης της μάζας, θα πρέπει στον ροϊκό σωλήνα, πίσω από τον δίσκο, P_2 η πίεση μετά τον δίσκο, P_{01} και P_{02} οι πιέσεις λίγο πριν και λίγο μετά τον δίσκο, V_1 η ταχύτητα ανέμου πριν και V_2 μετά τον δίσκο, V_0 η ταχύτητα δίπλα στον δίσκο και ρ η πυκνότητα του αέρα, σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli:

$$P_{1} + \frac{1}{2}\rho V_{1}^{2} = P_{01} + \frac{1}{2}\rho V_{0}^{2}$$
$$P_{2} + \frac{1}{2}\rho V_{2}^{2} = P_{02} + \frac{1}{2}\rho V_{0}^{2}$$
(2.3)



Εικόνα2.3: ταχύτητες ανέμου πριν, μετα και δίπλα στον δρομέα (4)

Αν Α η διατομή του δίσκου που σχηματίζουν τα πτερύγια του δρομέα κατά την περιστροφή τους, από την οποία περνάει η μάζα αέρα κάθετα, τότε η δύναμη που ασκείται στον δρομέα μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των πιέσεων λίγο πριν και μετά του δρομέα ή των ορμών αρκετά πριν και μετά του δρομέα:

$$F = A(P_{01} - P_{02}) \tag{2.4}$$

$$F = \rho A V_0 \left(V_1 - V_2 \right)$$
(2.5)

με ρΑ V_0 την μάζα αέρα που περνά από τον δρομέα στην μονάδα του χρόνου. Έτσι η ισχύς που δεσμεύεται από τον δρομέα, δηλαδή από την αιολική μηχανή είναι: $P_{s \pi \omega \varphi} = AV_0 \left(P_{01} - P_{02}\right)$. (2.6)

Όμως $V_0 = \frac{1}{2} (V_1 + V_2)$ οπότε η επωφελούμενη ισχύς γράφεται

όπο

$$P_{\varepsilon\pi\omega\phi} = \frac{1}{2}\rho A (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)$$
(2.7)

και αν οριστούν $a = \frac{V_1 - V_0}{V_1}$, $C_p = 4a(1-a)^2$ και R η ακτίνα των πτερυγίων τότε:

$$P_{\varepsilon\pi\omega\varphi} = \frac{1}{2} \rho A C_p V_1^3 = \frac{1}{2} \rho C_p V_1^3 \pi R^2$$
 (6) (2.8)

Η διαθέσιμη ισχύς που προσφέρει το περιβάλλον $P_{\delta i \alpha \theta}$ δεν είναι ίση με την ισχύ που εκμεταλλεύεται η αιολική μηχανή $P_{\epsilon \pi \omega \phi}$ και ισχύει $P_{\epsilon \pi \omega \phi} < P_{\delta i \alpha \theta}$ καθώς:

- 1. Όταν τα πτερύγια περιστρέφονται, εκτρέπουν ένα μέρος του αέρα με αποτέλεσμα να μην τα διαπερνά.
- Ο άνεμος εξακολουθεί να κινείται με τον δρομέα της ανεμογεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι διατηρεί ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας.
- 3. Ο αέρας δεν είναι ιδανικό ρευστό, ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται από το ιξώδες του (μέτρο της εσωτερικής τριβής). Για το λόγο αυτό κατά την αλληλεπίδρασή του με τις πτέρυγες της μηχανής ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια λόγω τριβών.

Η διαφορά τους εξαρτάται από το C_p που ονομάζεται συντελεστής ισχύος και εκφράζει την απόδοση της αιολικής μηχανής. Ο Betz θεωρώντας κάποιες παραδοχές, όπως άπειρο αριθμό πτερυγίων στον δρομέα, ομοιόμορφη ώθηση σε όλη την περιοχή του δρομέα, μη περιστρεφόμενες ανακλάσεις αέρα, ταχύτητα παντού αξονική,οι συνθήκες πίεσης στα υπήνεμα και προσήνεμα παραμένουν ίδιες και ότι ο αέρας είναι ασυμπίεστο ρευστό για τους παραπάνω υπολογισμούς και χρησιμοποίηση των θεωρημάτων, υπολόγισε τον ιδανικό συντελεστή ισχύος $C_{p_{max}}$, το μέγιστο μέρος δηλαδη της διαθέσιμης ισχύος που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε

$$C_{p} = \frac{P_{a\xi\iota\sigma\pi\sigma\iota\sigma\delta\mu\epsilon\nu\eta}}{P_{\delta\iota\alpha\theta\dot{\epsilon}\sigma\mu\eta}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^{3}}.$$
(2.9)

Το C_p είναι χαρακτηριστικό της κάθε ανεμογεννήτριας από κατασκευής της το οποίο επηρεάζει της ισχύ που εκμεταλλέυεται και το μέγιστο της απόδοσης που μπορεί να φτάσει και από προηγουμένως βρέθηκε ότι είναι

$$C_{p} = 4a(1-a)^{2}$$
(2.10)

Το μέγιστο του C_p είναι για τέτοια α (σχέση δηλαδή του V_1 με V_0) ώστε $\frac{dC_p}{da} = 0$. Οπότε όταν μηδενιστεί η πρώτη παράγωγος του C_p θα ισχύει

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{d\left[4a(1-a)^2\right]}{da} = 4(1-a)^2 - 8a(1-a) = 4(1-a)(1-a-2a) = (1-a)(1-3a) \text{ diad} \frac{dC_p}{da} = 0 \Longrightarrow a = 1$$

kai $a = \frac{1}{2}$.

Για $a = \frac{1}{3}$, δηλαδή για $\frac{V_1 - V_0}{V_1} = \frac{1}{3} \Leftrightarrow 3V_1 - 3V_0 = V_1 \Leftrightarrow 2V_1 = 3V_0 \Leftrightarrow \frac{V_1}{V_0} = \frac{3}{2}$ (η ταχύτητα δίπλα στον δρομέα V_0

είναι τα $\frac{2}{3}$ της ταχύτητας του ανέμου V_1 πριν διαπεράσει τον δρομέα) το C_p γίνεται $C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,593$. (2.11)

Αυτό είναι το όριο του Betz, που είναι και το μέγιστο που θεωρητικά μπορεί να προσεγγίσει μια ανεμογεννήτρια, και επ'ουδενί δεν μπορεί να φτάσει το 1 που σημαίνει πλήρη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου που προσφέρει το περιβάλλον. Μια ανεμογεννήτρια δηλαδή μπορεί θεωρητικά να εκμεταλλευτεί μέχρι και το 59% της διαθέσιμης ισχύος. Αυτός ο αριθμός στην πραγματικότητα δεν μπορει να προσεγγιστεί και όλες οι μελέτες για βελτίωση ανεμογεννητριών πασχίζουν να αυξήσουν το ποσοστό απόδοσης έστω και λίγο. Ο μέγιστος αριθμός που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής στην βιομηχανία είναι περίπου 0,47 (4). Ο περιορισμός αυτός δεν ευθύνεται λόγω κάποιας ανεπάρκειας σχεδιασμού, αλλά εξ'αιτίας του ότι επειδή το ρεύμα του ροϊκού σωλήνα πρέπει να επεκταθεί ανοδικά της επιφάνειας του δίσκου, η ταχύτητα του ανέμου εκέι είναι μικρότερη από την περιοχή του δίσκου. (4) (7) (8)

Ο συντελεστής C_p αποδεικνύεται ότι εξαρτάται από το λόγο, της γραμμικής ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή του $\lambda = \frac{\omega R}{V}$, (2.12)

όπου R η ακτίνα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και V η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα. Η σχέση του λ με το C_p είναι η ταυτότητα της κάθε ανεμογεννήτριας και χαρακτηριστική της αεροδυναμικής της κατασκευής και έχει την εξής μορφή αν θεωρηθεί η κλίση β των πτερυγίων σταθερή:



Εικόνα2.4: $C_p = f(\lambda)$ (4)

Το λ_{opt} είναι το μέγιστο λ της καμπύλης για κάποιο C_p το οποίο βεβαίως είναι μικρότερο του 0,59 (όριο του Betz) και και είναι χαρακτηριστικό της κατασκευής της κάθε ανεμογεννήτριας.

Αν $A = \pi R^2$ και $\lambda = \frac{\omega R}{V}$ λοιπόν, μπορεί να εξαχθεί ο τύπος της επωφελούμενης ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα

 $P_{\varepsilon\pi\omega\varphi} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \omega^3 \qquad (W)$ (2.13)

2.4 ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

περιστροφής της πτερωτής:

Ανεμογεννήτριες ονομάζονται οι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική η μηχανική. Μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονά τους στη ροή του ανέμου, δηλαδή σε οριζοντίου άξονα και κατακόρυφου. Έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα καθώς παρουσιάζουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή. Κύρια μέρη του είναι η θεμελίωση, ο πύργος, η άτρακτος και ο δρομέας. Η θεμελίωση και ο πύργος κρατάνε τον δρομέα και την άτρακτο σταθερά σε ύψος. Στον δρομέα βρίσκονται τα πτερύγια, τα οποία συνήθως είναι 2-4 αλλά προτιμούνται τα 3 καθώς εμφανίζουν μεγάλη στιβαρότητα (λόγος πραγματικής επιφάνειας πτερυγίων προς επιφάνεια σάρωσης δρομέα) και αεροδυναμικό συντελεστή, ενώ στην άτρακτο βρίσκονται βασικά εργαλεία της λειτουργίας όπως ο κύριος άξονας χαμηλών ταχυτήτων, ο άξονας υψηλών ταχυτήτων, το κιβώτιο ταχυτήτων, ο πολλαπλασιαστής στροφών, το δισκόφρενο. το υδραυλικό σύστημα, το έδρανο και ο οδηγός συστήματος προσανατολισμού, η ψύκτρα γεννήτριας



Εικόνα2.5: Μέρη αιολικής μηχανής οριζόντιου άξονα

και η γεννήτρια με την επαγωγική γεννήτρια. (2)

Το πτερύγιο μπορεί να αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα στηριζόμενο στον άξονα και επιπλέον ένα ρυθμιζόμενο ακροπτερύγιο.

Η ολική αεροδυναμική αντίδραση πάνω στην ανεμογεννήτρια αναλύεται σε δυο συνιστώσες δυνάμεων, την άντωση και την οπισθέλκουσα. Η συνισταμένη των δυο δυνάμεων είναι η λεγόμενη δύναμη ώθησης που περιστρέφει τα πτερύγια. Η άντωση είναι κάθετη στην κίνηση του αέρα, προκαλείται λόγω του φαινομένου Bernoulli που μειώνει την πίεση πάνω από την αεροτομή σε σχέση με την πίεση από κάτω, αφού η καμπυλότητα του πάνω μέρους οδηγεί σε μεγαλύτερη ταχύτητα ροής εκεί σε σχέση με το κάτω μέρος με αποτέλεσμα την μείωση της πίεσης, και είναι ο κύριος λόγος περιστροφής των πτερυγίων. Η οπισθέλκουσα είναι στην ουσία η αντίσταση του αέρα στα πτερύγια και ο κύριος λόγος καταπόνησης του πυλώνα. Και οι δυο δυνάμεις εξαρτώνται από την επιφάνεια των πτερυγίων και αεροδυναμικών συντελεστών τους, την πυκνότητα του αέρα και το τετράγωνο της ταχύτητάς του. Έτσι στην προσπάθεια βελτίωσης των ανεμογεννητριών επιδιώκεται η μεγαλύτερη

δυνατή αξιοποίηση της άντωσης και ελαχιστοποίηση της οπισθέλκουσας. (3) Η δύναμη της άντωσης περιγράφεται από

τον συντελεστή άντωσης C_L ενώ αυτή της οπισθέλκουσας από τον αντίστοιχο C_D με τους τύπους



$$= \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A_{L}V^{2}} \text{ kat } C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A_{D}V^{2}}$$
(6) (2.14)

Εικόνα2.6: Δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο ανεμονεννήτριας

Η διαδικασία με την οποία η ανεμογεννήτρια μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο άνεμος κινεί τα πτερύγια του δρομέα χάρη σε ζεύγη δυνάμεων που δημιουργούνται (άντωσης και οπισθέλκουσας), δημιουργείται το μηχανικό έργο μέσω του άξονά του, ο οποίος με μηχανικό σύστημα προσαρμογής συνδέεται με τον άξονα ηλεκτρογεννήτριας με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είτε στέλνεται μέσω δικτύων κατευθείαν προς κατανάλωση είτε αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση.



Εικόνα2.7: Μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική (3)

Σημαντική για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι η εξισορρόπηση της ισχύος, για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, έτσι ώστε αυτή να μην υπερφορτίζεται. Υπάρχουν δυο μέθοδοι ρύθμισης της μηχανικής ισχύος: η ρύθμιση με απώλεια στήριξης (stall control) ή αλλιώς παθητικός έλεγχος στην οποία η μηχανή περιορίζεται κατασκευαστικά να μην υπερβεί την ονομαστική της ισχύ θεωρώντας την γωνιακή ταχύτητα και κλίση πτερυγίων σταθερή, με αποτέλεσμα καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται, η οπισθέλκουσα στα πτερύγια να αυξάνεται σε σχέση με την άντωση και να φρενάρει η μηχανή, και η **ρύθμιση με μεταβολή της γωνίας βήματος** (γωνία προσανατολισμού δηλαδή) **των πτερυγίων (pitch control)** ή αλλιώς ενεργητικός έλεγχος, μέθοδος που

χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες που μελετώνται στην εργασία αυτή (pitch regulated μηχανές). Στο pitch control, μετράται η ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας και συγκρίνεται με την ισχύ αναφοράς με το σφάλμα να τροφοδοτείται σε αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (ο ολοκληρωτικός όρος μηδενίζει το μόνιμο σφάλμα ισχύος για μεταβολές στην μέση ταχύτητα του ανέμου ενώ ο αναλογικός ελαχιστοποιεί τις διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου λόγω του στροβιλισμού του αέρα). Αυτός οδηγεί σε έναν υδραυλικό ενεργοποιητή που μεταβάλλει κατάλληλα την κλίση των πτερυγίων, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής C_p αφού εξαρτάται από την γωνία κλίσης β και

κατά συνέπεια η ισχύς που δημιουργείται από ανέμους με ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής. Όλη αυτή η διαδικασία στηρίζεται σε υδραυλικό σύστημα το οποίο ελέγχεται από σύστημα υπολογιστή. Για να διατηρηθεί μια σταθερή έξοδος ισχύος, το σύστημα ελέγχου προσαρμόζει το βήμα του πτερυγίου κατά ένα κλάσμα στον χρόνο που ισοδυναμεί με μια αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου. Στις pitch regulated μηχανές, τα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονά τους κατά την λειτουργία ενώ πρέπει να έχουν ειδικές γεννήτριες που να επιτρέπουν μια μικρή επιτάχυνση της ταχύτητας για να μπορούν να ακολουθήσουν τις διακυμάνσεις του ανέμου. Με άλλα λόγια, στην περίπτωση μεγάλης ισχύος εξόδου τα πτερύγια του δρομέα ρίχνουν αμέσως στροφές και στρέφονται μακριά από την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ αντίθετα με την πτώση της ταχύτητας του ανέμου τα πτερύγια στρέφονται πάλι προς αυτόν. (9)

2.5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ

Καμπύλη ισχύος ονομάζεται η καμπύλη της επωφελούμενης ισχύος της ανεμογεννητριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.



Οι αιολικές μηχανές μέχρι κάποια ταχύτητα δεν λειτουργούν. Στις πολύ μικρές ταχύτητες δηλαδή η αιολική μηχανή δεν παράγει ενέργεια. Αυτό οφείλεται στην τριβή που εμφανίζεται στον άξονα περιστροφής με αποτέλεσμα να εμφανίζει η ανεμογεννήτρια ισχύ μόνο από μια ορισμένη ταχύτητα και πάνω. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V₀ (cut-in-speed) ή ταχύτητα εισόδου . Είναι χαρακτηριστική για κάθε αιολική μηχανή και συνδυάζεται με την ονομαστική ισχύ P_R. Για ταχύτητες δηλαδή μικρότερες της V₀ δεν εμφανίζεται καθόλου ισχύς. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά:

$$V_{0} = \left[\frac{8\frac{P_{0}}{P_{R}}P_{R}}{\rho\pi C_{p}D^{2}}\right]^{\frac{1}{3}} , \qquad (2.15)$$

όπου D η διάμετρος του δρομέα, P_0 η ισχύς του ανέμου που χάνεται για ταχύτητες μικρότερες της V_0 (δεν υπολογίζεται αλλά είναι γνωστό ότι ο λόγος $\frac{P_0}{P_R} = 0.10$), και ρ η πυκνότητα του αέρα.

- Για ταχύτητες μεγαλύτερες του V_0 και μέχρι μια τιμή V_R παρατηρείται μια συνεχή παράλληλη αύξηση της ισχύος της μηχανής, ενώ μετα την V_R παρατηρείται ότι η παραγόμενη ισχύς γίνεται μέγιστη και παραμένει σταθερή. Η ταχύτητα αυτή V_R ονομάζεται **ονομαστική ταχύτητα(rated-speed)**
- μετά από κάποια ταχύτητα η ανεμογεννήτρια παύει να λειτουργεί. Η ταχύτητα αυτή καλείται ταχύτητα εξόδου V₁ (furling-speed ή cut-out-speed). Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες βέβαια συνήθως δεν φτάνουν στο σημείο της παύσης λειτουργίας γιατί υπάρχει σύστημα που μειώνει την επιφάνεια σάρωσης του δρομέα.
- Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει η ανεμογεννήτρια ονομάζεται ονομαστική ισχύς (rated power).
 (10) (11)

2.6 IEC 61400-12-1 (12)

Είναι μια μέθοδος που περιγράφει τις διαδικασίες που πρέπει να τηρούνται για την δημιουργία ακριβούς καμπύλης ισχύος. Συνδυάζει μια συγκεκριμένη μεθοδολογία για μετρήσεις, ανάλυση δεδομένων και τελική έκθεση αποτελεσμάτων. Δείχνει με λίγα λόγια την ενεργειακή απόδοση των οριζοντίου άξονα ανεμογεννητριων, τα χαρακτηριστικά τους και την εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή ενέργεια τους. Βασίζεται στην μέτρηση του ανέμου που επηρεάζει τον δρομέα, με ανεμόμετρο στην άτρακτο το οποίο δεν επηρεάζει την ροή του αέρα προς τον δρομέα και γύρω από την άτρακτο ούτε την απόδοση της μηχανής. Στη διαδικασια αυτή περιλαμβάνονται μέθοδοι για την υποβολή κάποιων διορθώσεων, οι οποίες όμως αυτόματα αυξάνουν την αβεβαιότητα των μετρήσεων. Το πρόβλημα της αλλοίωσης της ροής και άρα της μέτρησης λόγω της παρεμπόδισης από την άτρακτο και τον δρομέα λύνεται με μια συνάρτηση μεταφοράς (NTF), η οποία έχει δημιουργηθεί πειραματικά. Ακόμα ένα πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι η καμπύλη ισχύος δεν μπορει να ταυτιστεί με αυτην της ΙΕC 61400-12-1 αφού η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να υπάρξει και να λειτουργήσει μόνο όταν η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία (on line), άρα δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στη διαδικασία η διάρκεια που η ανεμογεννήτρια είναι διαθέσιμη αλλά όχι και σε λειτουργία.

Βασική προυπόθεση είναι η γνώση του τοπογραφικού αναγλύφου και η τραχύτητα της περιοχής(terrain classification και κατηγοριοποίηση σε terrain class), του στροβιλισμού και της διεύθυνσης του αέρα της περιοχής καθώς και της πυκνότητας του, όπως επίσης πρέπει να είναι γνωστό για κάθε ανεμογεννήτρια που μελετάμε με αυτή την μέθοδο αν υπάρχουν γειτονικές ανεμογεννήτριες η άλλα εμπόδια. Τέλος πρέπει να γίνει μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η εκάστοτε ανεμογεννήτρια για την χρησιμοποίηση στα δεδομένα.

Η διαδικασία ξεκινάει με την συλλογή των δεδομένων η οποία είναι συνεχόμενη με ρυθμό 1 Ηz ή και περισσότερο και προαιρετική μέτρηση θερμοκρασίας αέρα, πίεσης και κατάστασης ανεμογεννήτριας με μικρότερο ρυθμό, ενώ αυτόματα υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκκλιση και σημειώνονται μέγιστη και ελάχιστη τιμή. Επόμενο στάδιο είναι η απόρριψη τιμών οι οποίες λήφθηκαν σε στιγμές όπου μπορεί η γεννήτρια να σταμάτησε να λειτουργεί για κάποιο λόγο, ο εξοπλισμός μέτρησης να κατέρρευσε, η διεύθυνση του ανέμου να ήταν έξω από τα όρια που έχουν τεθεί, να υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες πέρα από τον άνεμο που είναι έξω από τα όρια που έχουν τεθεί, να υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες πέρα από τον άνεμο που είναι έξω από τα όρια που έχουν τεθεί, να υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες πέρα από τον άνεμο που είναι έξω από τα όρια που έχουν τεθεί, να υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες πέρα από τον άνεμο που είναι έξω από τα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και άλλοι λόγοι που αν κρατηθούν οι τιμές τις χρονικές στιγμές αυτές θα αλλοιωθεί το αποτέλεσμα που επιζητάται. Μετά την απόρριψη των τιμών, ακολουθεί η διόρθωση της ταχύτητας του ανέμου για τυχούσα παραμόρφωση ροής, και της πίεσης του αέρα αν δεν μετριέται στο κέντρο του δρομέα.

Για την δημιουργία της βάσης δεδομένων, το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι η ομαλοποίηση των δεδομένων στις δυο πυκνότητες αέρα, στην γνωστή του επιπέδου της θάλασσας 1,225 kg/m³ και σε αυτήν που προκύπτει από τον μέσο όρο των πυκνοτήτων που μετρήθηκαν στην συλλογή δεδομένων η οποία δεν χρειάζεται όταν παίρνει τιμές 1,225 ± 0,05 kg/m³. Η πυκνότητα του αέρα μπορεί να καθοριστεί από τον τύπο:

$$\rho_{10\min} = \frac{B_{10\min}}{R_0 \cdot T_{10\min}} \quad , \tag{2.16}$$

όπου

Για ανεμογεννήτριες ρυθμιζόμενης καμπίνας με σταθερή κλίση και ταχύτητα περιστροφής η ομαλοποίηση γίνεται με βάση την απόδοση ενέργειας που μετρήθηκε σύμφωνα με τον τύπο

$$P_n = P_{10\min} \frac{\rho_0}{\rho_{10\min}}$$
(2.17)

με P_n την ομαλοποιημένη απόδοση ενέργειας και ρ_0 η δοσμένη πυκνότητα αέρα, ενώ για ανεμογεννήτριες με ρύθμιση των πτερυγίων με μεταβολή της γωνίας βήματος (pitch control), η ομαλοποίηση γίνεται μέσω της ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το

$$V_{n} = V_{10\min} \left(\frac{\rho_{10\min}}{\rho_{0}}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(2.18)

με V_n η ομαλοποιημένη ταχύτητα ανέμου και $V_{10\min}$ ο μέσος όρος των μετρήσεων της ταχύτητας ανέμου σε διαστήματα 10 λεπτών.

Τελευταίο βήμα για την δημιουργία της καμπύλης ισχύος είναι η ταξινόμηση των δεδομένων μετά την ομαλοποίηση μέσω της "μεθόδου των κάδων", όπου οι ταχύτητες του ανέμου χωρίζονται σε διαστήματα 0,5 m/s. Χρησιμοποιείται η ομαλοποιημένη ταχύτητα ανέμου και απόδοση ενέργειας για κάθε διάστημα με βάση τους τύπους:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad ,$$
 (2.19)

όπου

 $V_i\,$: η μέση και ομαλοποιημένη ταχύτητα ανέμου στο διάστημα i,

 $V_{n,i,j}:$ η ομαλοποιημένη ταχύτητα ανέμου των δεδομένων j στο διάστημα i,

 N_i : ο αριθμός των δεδομένων για το διάστημα των 10 λεπτων, στο διάστημα i και

$$P_{i} = \frac{1}{N_{i}} \sum_{j=1}^{N_{i}} P_{n,i,j} , \qquad (2.20)$$

όπου

 P_i : η μέση και ομαλοποιημένη απόδοση ενέργειας στο διάστημα i και

 $P_{n,i,j}$: η ομαλοποιημένη απόδοση ενέργειας των δεδομένων j στο διάστημα i

Η διαδικασία για την δημιουργία της καμπύλης ισχύος θεωρείται ολοκληρωμένη αν μετά από την επεξεργασία αυτή τελικώς περιλαμβάνονται δεδομένα 180 ωρών και αν κάθε διάστημα (κάδος) περιλαμβάνει τουλάχιστον δεδομένα 30 λεπτών, όπως επίσης και υπολογιζονται τα C_p για κάθε διάστημα.

2.7 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (13) (14) (15)

Ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο στην έρευνα θεωρείται η παραμετροποίηση όπου δημιουργούνται μοντέλα που αναπαριστούν το ενδιαφερόμενο σύστημα θεωρώντας και θέτοντας παραμέτρους. Η δημιουργία καμπύλης ισχύος χρειάζεται καθώς ο κατασκευαστής παρέχει καμπύλη για την εκάστοτε ανεμογεννήτρια, η οποία όμως δεν λαμβάνει υπ'όψιν την τοποθεσία που θα βρίσκεται (ούτε τους μέγιστης ταχύτητας ανέμους της περιοχής) ούτε την φθορά που δέχεται εκέινη ούτε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Έτσι για μεγαλύτερη ακρίβεια για μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια, η δημιουργία καμπύλης ισχύος μέσω μοντέλων με ελάχιστο σφάλμα είναι απαραίτητη.

Τα μοντέλα μπορούν να διαχωριστούν σε μοντέλα που χρησιμοποιούν θεμελιώδεις εξισώσεις της διαθέσιμης ενέργειας και μοντέλα που βασίζονται στην έννοια της καμπύλης ισχύος, τα οποία είναι λιγότερο πολύπλοκα και πιο ακριβή. Έτσι οι τεχνικές μοντελοποίησης των καμπυλών ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε παραμετρικές και μη παραμετρικές.

2.7.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ MONTEΛΟΠΟΙΗΣΗ (parametric modeling)

Βασίζονται στην επίλυση μαθηματικών εξισώσεων όπου η πραγματική απόδοση ενέργειας μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_{\alpha} = \begin{cases} 0 , \gamma \iota \alpha \ V < V_{\varepsilon \iota \sigma \delta \delta o \upsilon} \ \kappa \alpha \iota \ V > V_{\varepsilon \xi \delta \delta o \upsilon} \\ p(u) , \gamma \iota \alpha \ V_{\varepsilon \iota \sigma \delta \delta o \upsilon} \le V \le V_{o v o \mu \alpha \sigma \tau \iota \kappa \delta} \\ P_{r} , \gamma \iota \alpha \ V_{o v o \mu \alpha \sigma \tau \iota \kappa \delta} \le V \le V_{\varepsilon \xi \delta \delta o \upsilon} \end{cases},$$
 (2.21)

ενέργεια και p(u) η γραμμική περιοχή μεταξύ ταχύτητας εισόδου και ονομαστικής. Κάποιες βασικές μορφές παραμετρικής μοντελοποίησης είναι:

- Γραμμικές εξισώσεις της μορφής P=aV+b που είναι και η πιο απλή μορφή με α την κλίση της ευθείας. Τα δεδομένα τοποθετούνται στα γραμμικά αυτά τμήματα με την βοήθεια της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων η οποία υπολογίζει τους συντελεστές ελαχιστοποιώντας τα τετράγωνα των υπολοίπων.
- Πολυωνυμικές εξισώσεις όπως:
 - 1. Τετραγωνικές καμπύλες ισχύος $P = a + bV + cV^2$ με a,b,c σταθερές που καθορίζονται απο ταχύτητες εισόδου-εξόδου και ονομαστική ενέργεια,
 - 2. Κυβικές καμπύλες ισχύος $P = \frac{1}{2} \rho A C_{p,eq} V^3$ με $C_{p,eq}$ σταθερά που είναι ανάλογη της ενέργειας,
 - 3. Κυβικές κατά προσέγγιση καμπύλες ισχύος $P = \frac{1}{2} \rho A C_{p,max} V^3$ με $C_{p,max}$ την ανώτατη τιμη $C_{p,eq}$,
 - 4. Εκθετική καμπύλη ισχύος $P = \frac{1}{2} \rho A K_p (V^\beta V^\beta_{εισόδου})$ με K_p και β σταθερές,
 - 5. Πολυωνυμικές 9^{ου} βαθμού $P = c_1V^9 + c_2V^8 + c_3V^7 + c_4V^6 + c_5V^5 + c_6V^4 + c_7V^3 + c_8V^2 + c_9V + c_{10}$ με $c_1 - c_{10}$ σταθερές οι οποίες όμως δεν μπορούν να δουλέψουν για όλα τα είδη ανεμογεννητριών το ίδιο έγκυρα,
 - 6. Μοντέλα βασισμένα στις παραμέτρους Weibull $P = a + bV^k$ με $a = \frac{P_{ovoμαστική}}{V_{εισόδου}^k V_{ovoμαστική}^k}V_{εισόδου}^k$

και
$$b = \frac{P_{ovoμαστική}}{V_{ovoμαστική}^{k} - V_{εισόδου}^{k}}$$

Μεγαλύτερη ακρίβεια παρουσιάζουν οι πολυωνυμικές μεγάλου βαθμού.

- Μέθοδος μέγιστης αρχής που προτάθηκε από τον Rauh, βασίζεται στην εμπειρική δημιουργία της καμπύλης με βάση το σημείο που εντοπίζεται η μέγιστη πυκνότητα σημείων της ισχύος σε συγκεκριμένο κάδο ταχύτητας ανέμου, η οποία όμως δεν εμφανίζει μεγάλη ακρίβεια
- Δυναμική καμπύλη ισχύος που έχει σαν βασική ιδέα τον διαχωρισμό της δυναμικής της απόδοσης ενέργειας στο κομμάτι της αιτίας που αφορά την πραγματική συμπεριφορά του δρομέα και στο κομμάτι της τύχης που αφορα τον στροβιλισμό του ανέμου και άλλους εξωγενείς παράγοντες. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη γιατί δεν χρειάζεται πολλα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί και ταιριάζει απόλυτα στην συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί.
- Πιθανολογικό μοντέλο που προτάθηκε από τους Jin και Tian, θεωρεί την απόδοση ενέργειας έναν τυχαίο αριθμό και υπολογίζει την αβεβαιότητα της αιολικής ενέργειας την στιγμή που η ανεμογεννήτρια λειτουργεί ανάμεσα στην V_{εισόδου} και V_{ονομαστική}
- Ιδανική καμπύλη ισχύος στην οποία ο άνεμος φέρεται ιδανικά χωρίς στροβιλισμούς και με σταθερή ροή.
- Λογιστική συνάρτηση τεσσάρων παραμέτρων που το σχήμα της καμπύλης ισχύος δημιουργείται με βάση

τον τύπο $P = \frac{a(1+me^{u/t})}{1+ne^{u/t}}$ με τις παραμέτρους α,m,n,t να υπολογίζονται με την μέθοδο ελαχίστων

τετραγώνων. Η μοντελοποίηση αυτή εμφανίζει μεγάλη ακρίβεια.

 Λογιστική συνάρτηση πέντε παραμέτρων στην οποία ο υπολογισμός των παραμέτρων είναι πολύπλοκος και για την υλοποίησή της χρειάζονται μη παραδοσιακές τεχνικές. Τα μοντέλα αυτής της μεθόδου δίνουν την μεγαλύτερη ακρίβεια από κάθε άλλη μέθοδο.

2.7.2 MH ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ MONTEΛΟΠΟΙΗΣΗ (non-parametric modeling)

Όλες αυτές οι τεχνικές ψάχνουν να βρουν σχέση της μορφής P=f(V). Εδώ περιλαμβάνονται τα νευρωνικά δίκτυα που θα χρησιμοποιηθούν σαν εργαλείο για την άσκηση. Οι κυριότερες τεχνικές είναι:

- Μοντέλο καμπύλης ισχύος copula που ψάχνει να βρει σχέση ανάμεσα σε πολλές εξαρτημένες μεταβλητές.
 Το μοντέλο αυτό για να λειτουργήσει πρέπει να συνδυαστεί με κάποια μέθοδο παραμετρικής μοντελοποίησης.
- Τεχνική κυβικής καμπύλης παρεμβολής η οποία λειτουργεί καλύτερα σε ανεμογεννήτριες με λεία καμπύλη ισχύος
- Νευρωνικά δίκτυα τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω όπως Generalized mapping regressor (GMR), feedforward multi layer perceptron (MLP) και General regression neural network (GRNN). Έχουν την δυνατότητα να συγκρατήσουν και να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων, να εντοπίσουν σφάλματα και

ανωμαλίες λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου καθώς και να αναλύσουν πολύπλοκα συστήματα. Ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που αντιγράφει το δίκτυο νευρώνων στον ανθρώπινο οργανισμό.

- Ασαφείς μέθοδοι οι οποίες ακολουθούν μια προσεγγιστική συλλογιστική βασισμένη όμως σε συγκεκριμένη λογική, με κυριότερη τη μέθοδο cluster center.
- Αλγόριθμοι εξόρυξης δεδομένων οι οποίοι βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων και πληροφοριών μέσα από τεράστιες βάσεις δεδομένων στο πέρασμα του χρόνου.





2.8 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ (11) (16)

Αξίζει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις ατμοσφαιρικές παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Κάποιος θα περίμενε ότι η **ταχύτητα του ανέμου** θα ήταν η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την καμπύλη ισχύος, κάτι που όπως αποδεικνύεται δεν ισχύει καθώς η απόκκλιση που προκαλεί είναι πολύ μικρή. Υπάρχει μια μέση ταχύτητα που η κάθε ανεμογεννήτρια παρουσιάζει μέγιστη απόδοση ενώ όταν η μέση ταχύτητα αυξηθεί η απόδοση μειώνεται. Ανάλογη είναι και η επιρροή της **υγρασίας** η οποία είναι μηδαμινή. Την μεγαλύτερη επιρροή εμφανίζουν η **θερμοκρασία** του αέρα (ιδίως οι υψηλές θερμοκρασίες) και η **πυκνότητά** του αφού επηρεάζουν το η (ιξώδες), το C_p και το Re. Το Re είναι ο αριθμός Reynolds και ισχύει

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho V d}{\eta} \tag{2.22}$$

Σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή πυκνότητα το Re μειώνεται (αφού μειώνονται περιστροφές δρομέα και ροή) και κατά συνέπεια η απόδοση. Ακόμα σημαντικό ρόλο παίζει και η **ευστάθεια** σε συνδυασμό με την θερμοκρασία, καθώς όταν θ≤20° λίγο καλύτερη απόδοση εμφανίζεται σε κατάσταση αστάθειας ενώ όταν θ≥25° αρκετά καλύτερη απόδοση εμφανίζεται σε κατάσταση αστάθειας ενώ όταν θ≥25° αρκετά καλύτερη απόδοση εμφανίζεται σε κατάσταση αστάθειας ενώ όταν θ≥25° αρκετά καλύτερη απόδοση εμφανίζεται σε κατάσταση αστάθειας ενώ όταν θ≥25° αρκετά καλύτερη απόδοση ευστάθειας. Μεγάλη επιρροή υπολογίζεται επίσης ότι έχουν και οι **ριπές ανέμου** και **στροβιλισμός** στα οποία συνυπολογίζονται ανοδικές κινήσεις του αέρα λόγω πιθανής αστάθειας. Διαφορά στην απόδοση της ανεμογεννήτριας προκαλεί και η **διάτμηση του ανέμου** ΄ όσο μεγαλύτερη τόσο καλύτερη η καμπύλη ισχύος. Κάποια επιρροή παρουσιάζει και το υψόμετρο. Τέλος σημαντική ατμοσφαιρική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας και κατά συνέπεια την καμπύλη ισχύος είναι η **βροχόπτωση** που σε χαμηλές θερμοκρασίες μειώνει την απόδοση σε σημαντικό βαθμό καθώς μειώνει την ροή του αέρα στην πτερωτή, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες την αυξάνει καθώς κατευνάζει το οριακό στρώμα και μειώνει τους στροβιλισμούς.

2.9 ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

Το αιολικό πάρκο από το οποίο γίνεται η άντληση των δεδομένων βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με εγκατεστημένη ισχύ 225 MWatt. Τέθηκε σε λειτουργία τον Φεβρουάριο του 2012. Λειτουργούν 90 ανεμογεννήτριες συγκεκριμένου μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί η καθεμία με ονομαστική χωρητικότητα 2,5 Mwatt. Η ενέργεια που παράγεται, μέσω του συστήματος μεταφοράς της εταιρείας, παραδίδεται στην αγορά για κατανάλωση.

Με βάση τη κλιματική ταξινόμηση κατα Koppen, η περιοχή που βρίσκεται το πάρκο, χαρακτηρίζεται από μεσόθερμο κλιμα (mesothermal climate) με $T_{\theta} \ge 10^{o}$ και $-3 \le T_{\psi} \le 18^{o}$ όπως φαίνεται και στις εικόνες 13 και 14. Ακόμα πιο συγκεκριμένα η τοποθεσία αυτή τοποθετείται στα Humid Subtropical Hot-Summer Climates (Cfa) όπου υπάρχει υγρασία όλο τον χρόνο ενώ οι χειμώνες είναι σχετικά ξηροί και τα καλοκαίρια είναι πολύ θερμά και επηρεάζονται από τα πολύ θερμά νερά των ωκεανών. (με βάση την επίσημη ιστοσελίδα ταξινόμησης των περιοχών κατα Koppen http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/usa.htm)



Εικόνα 2.10: οι περιοχές στη Β. Αμερική μεσόθερμου κλίματος κατά Koppen με σκούρο πράσινο χρώμα

Το μοντέλο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο αυτό κατασκευάζεται στις ΗΠΑ, είναι 3πτερο, έχει ονομαστική ισχύ 2500 kW και έχει ως βασικό χαρακτηριστικό ότι ελέγχει την ονομαστική ισχύ με μεταβολή του βήματος της πτέρυγας (pitch control). Είναι δηλαδή pitch regulated ανεμογεννήτρια όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Δεν χρησιμοποιείται σε παράκτιες περιοχές. Το ύψος που φτάνει ο πύργος από ατσάλι είναι τα 80 m. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά (στοιχεία από www.thewindpower.net) είναι:

- **Διάμετρος δρομέα:** 96m
- **Επιφάνεια σάρωσης:** 7.239 m²
- Ελάχιστη ταχύτητα δρομέα: 9,6 rad/min
- Μέγιστη ταχύτητα δρομέα: 15,5 rad/min
- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας: 4 m/s
- Ονομαστική ταχύτητα: 12,5 m/s
- Ταχύτητα εξόδου: 25 m/s
- Μέγιστη ταχύτητα αντοχής: 70 m/s
- Τύπος γεννήτριας: SYNC PM με 4 γεννήτριες
- Τάση εξόδου γεννήτριας: 690 V
- Μέγιστη ταχύτητα εξόδου γεννήτριας:
 στροφές/λεπτό
- Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων: SPUR με 2 επίπεδα



Εικόνα 2.11: καμπύλη ισχύος του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται

2.10 VORTEX GENERATORS (VGs)

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της αύξησης της απόδοσης της ανεμογεννήτριας με την τοποθέτηση vortex generators, τα οποία τοποθετούνται στην πτερωτή και εκμεταλλεύονται ακόμα περισσότερο την ροή του αέρα και τους στροβιλισμούς λόγω της πτερωτής. Έτσι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί και παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας με μικρότερης ταχύτητας ανέμους, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ετήσιας απόδοσης ισχύος, το οποίο είναι και το ζητούμενο. Μεγάλο αρνητικό ήταν η μη αντοχή τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα ή με την πάροδο του χρόνου, και η αποκόλληση τους, πρόβλημα που εκμηδενίστηκε μετά από έρευνα και χρησιμοποίηση κολλητικών μηχανισμών και υλικών που τα συγκρατούν με απίστευτη σταθερότητα και δεν επηρεάζουν την πτερωτή. Στόχος είναι η χρησιμοποίηση vortex generators σε όλο και περισσότερες ανεμογεννήτριες σε σύντομο χρονικό διάστημα για την βελτίωσή τους. (17)



Εικόνα 2.12: Τριγωνικό vortex generator (19)

Τα vortex generators είναι αεροδυναμικές επιφάνειες που συμπεριφέρονται σαν μισά φτερά, αποτελούνται από ένα μικρό πτερύγιο ή εξόγκωμα που δημιουργεί διακριτές δίνες, και συνήθως τοποθετούνται σε συγκεκριμένες διατάξεις. Οι επιφάνειες αυτές, μέσω μεταφοράς ορμής από τις δίνες οι οποίες στέλνουν ενεργητικό-ταχέως κινούμενο αέρα από το αργά κινούμενο οριακό στρώμα προς την πτερωτή που βρίσκεται η ζώνη χαμηλής ορμής, καθυστερούν τον διαχωρισμό ροής και την αεροδυναμική απώλεια στήριξης. Όσο πιο κοντά βρίσκονται στην αρχή του διαχωρισμού, τόσο πιο έντονη επιρροή παρουσιάζουν. Είναι συνήθως ορθογώνια τα οποία λειτουργούν πιο αποτελεσματικά έχοντας μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους ή τριγωνικά που λειτουργούν καλύτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις , περίπου στο 80% του ύψους του οριακού στρώματος και κινούνται σε γραμμές κοντά στο παχύτερο μέρος της πτέρυγας, ενώ τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούν μια γωνία προσβολής (εικόνα 2.13) συναρτήσει της τοπικής ροής του αέρα. Σε υψηλές γωνίες προσβολής, επιτυγχάνεται μικρότερος διαχώρισμός και αύξηση της άντωσης, ενώ μειώνεται και η αντίσταση. (18) Οι μικρές γωνίες προσβολής δημιουργούν μεγαλύτερη αντίσταση, με αποτέλεσμα τα Vgs να τοποθετούνται στο εσωτερικό μέρος των πτερυγίων και όχι στο εξωτερικό. Υπάρχουν και κάποια vortex generators, τα λεγόμενα active Vgs, τα οποία τοποθετούνται στο

εξωτερικό μέρος και χρησιμοποιούνται για σκοπούς ελέγχου αυξάνοντας το $C_{L_{\max}}$ (μέγιστος συντελεστής άντωσης) , τα οποία όμως είναι ικανά, απλά να καθυστερήσουν την αδρανοποίηση της πτερωτής. (9) Με τα Vgs, επιδιώκεται η αύξηση της μέγιστης αναλογίας μεταξύ της άντωσης και της οπισθέλκουσας, δυνάμεων που αναλύθηκαν παραπάνω, μιας αναλογίας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αεροδυναμική απόδοση των πτερυγίων. (19) Σε αρκετά Vgs, η γωνία προσβολής μπορεί να Εικόνα 2.13: Γωνία προσβολής β (18) μεταβληθεί ηλεκτρικά με οδηγούμενες κυκλικές ακραίες πλάκες. (20) Τα





vortex generators έχουν ακριβώς την αντίθετη επίδραση στην συνιστώσα της άντωσης με την τραχύτητα στην επιφάνεια των πτερυγίων (μπορεί να αυξηθεί από εξωγενείς παράγοντες όπως προσκόλληση άμμου από το

περιβάλλον και βρωμιές) οπότε σε περίπτωση αυξημένης τραχύτητας τοποθετούνται σε όλο το μήκος των πτερυγίων για την όσο το δυνατόν καθυστέρηση της γωνίας προσβολής που ξεκινάει ο διαχωρισμός της ροής, με αποτέλεσμα να ανακτάται μέρος της παραγωγής ενέργειας που χάνεται λόγω της τραχύτητας. Συνήθως όμως, τοποθετούνται κοντά στην αιχμή του πτερυγίου.

Οι δυο κύριες διατάξεις των vortex generators είναι η αντίθετη περιστροφή και η όμοια περιστροφή. Στην όμοια περιστροφή τα γειτονικά vortex generators λειτουργούν με την ίδια φορά και γωνίες λόγω της ροής του ανέμου ενώ στην αντίθετη περιστροφή, που με μεγαλύτερη επιτυχία συγκρατεί τον διαχωρισμό της ροής, τα γειτονικά vortex generators λειτουργούν μαζί με ίσες αλλά αντίθετες γωνίες, δηλαδή με αντίθετη φορά και οι δίνες θα απομακρυνθούν από την επιφάνεια τελικώς κάτω από αμοιβαία αλληλεπίδραση. (21) Άλλη μια μορφή διάταξης είναι και η δέλτα που αποσκοπεί στην παραγωγή ισχυρότερων δινών σε ρεύμα και όσο μεγαλύτερα είναι τα vortex generators τόσο ισχυρότερες δίνες παράγουν ενώ έχει παρατηρηθεί επίσης ότι προκαλούν μια τοπική επίδραση στην άμεση γειτνίαση με τα πτερύγια και την ροή του αέρα που υπάρχει το ρεύμα δινών, το οποίο προκαλεί απόκκλιση στην μέτρηση της πίεσης. (22)

Οι δίνες των vortex generators γίνονται ασθενέστερες και αποπροσανατολισμένες, όταν το μέγιστο της στροβιλότητας πέφτει σε μεγαλύτερο ποσοστό απ'ότι η κυκλοφορία λόγω διάχυσης, η οποία είναι μεγαλύτερη για δίνες που δημιουργούνται από χαμηλού προφίλ VGs (h< πάχος οριακού στρώματος δ). Για ένα μόνο VG σε μηδενική κλίση πίεσης η ροή πέφτει γρηγορότερα από VGs με μεγαλύτερη κλίση. (23)

Σε πρόσφατη έρευνα αποδείχθηκε ότι η πιο αποτελεσματική διάταξη στην τοποθέτηση vortex generators στα πτερύγια είναι η εξής:

Θέση χορδής της συστοιχίας των VGs: χ=0,3 x χορδές

Γωνία προσβολής του VG στην ελεύθερη ροή: β=20 μοίρες

Ύψος: h=6mm=δ

Μάκρος: l=3h

Απόσταση ανάμεσα σε ζεύγος Vg: D=11,7h

Απόσταση άκρων μεταξύ του ζεύγους Vg: d=3,7h (23)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks η αλλιώς ANNs) είναι συστήματα διαδικασίας εμπνευσμένα απο το βιολογικό νευρωνικό σύστημα, τα οποία αποτελούνται από κομμάτια όπως και στο βιολογικό, τους λεγόμενους νευρώνες (neurous) που συνδέονται μεταξύ τους στον κόμβο άθροισης (summingjunction). Η χρησιμότητά των νευρωνικών δικτύων δεν είναι για να προγραμματίζονται για κάποια συγκεκριμένη δουλειά, αλλά με οδηγό κάποια βάση δεδομένων να εκπαιδεύονται σε κάποια μοτίβα για έλεγχο ή πρόβλεψη σε επόμενα μοτίβα. Η κύρια λειτουργία τους είναι δηλαδή η αναγνώριση του ενδιαφερόμενου μοτίβου και η παραγωγή προσεγγιστικά κάποιου είδους επιθυμητης λειτουργίας (μοντελοποίηση). Χρειάζονται αρκετά μεγάλη ισχύ και δυνατότητες υπολογιστή ενώ οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως πολύπλοκοι συμπεριλαμβανομένων των λύσεων σύνθετων διαφορικών εξισώσεων.Επίσης ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στους περιορισμούς των εισαγόμενων δεδομένων και των αποτελεσμάτων οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένη μοντελοποίηση. Από την άλλη, διακρίνονται από απλότητα στους κανόνες λειτουργίας τους, έχουν μεγάλη ταχύτητα, είναι γερά ενώ χαρακτηρίζονται και από ανεκτικτικότητα στο λάθος και στα ατελή δεδομένα. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το γεγονός ότι έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν χωρίς απαραίτητα την γνώση της φύσης του συστήματος που μοντελοποιούν (της συνάρτησης f). (24) Η αξία τους αποτυπώνεται στην χρήση τους σε πολλούς και διαφορετικούς κλάδους όπως φαρμακευτική-ιατρική, δίκτυα-σήματα ,ρομποτική, πρόγνωση, αιολική ενέργεια κ.α. (25)

3.2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Τα νευρωνικά δίκτυα διαχωρίζονται σε δυναμικά (dynamic),στα οποία η εκμάθηση γίνεται κατά την διάρκεια της λειτουργίας και στατικά (static feed forward), στα οποία πριν την έναρξη λειτουργίας υπάρχει μια διαδικασία εκμάθησης-εκπαίδευσης (training or learning process). Στην εργασία αυτή θα χρησιμοποιηθεί το static modeling καθώς υπάρχει η θεώρηση ότι η συμπεριφορά του συστήματος παραμένει αναλλοίωτη στον χρόνο και η συμπεριφορά του σε διάφορα ερεθίσματα σταθερή και επαναλαμβανόμενη, κατά κάποιο τρόπο δηλαδή, στατική. Η γενική περιγραφή της σχέσης των ερεθισμάτων και των εξαγομένων στοιχείων του στατικού συστήματος είναι:

$$\Upsilon_m(\mathbf{X}_n, t) = f(\mathbf{P}_u, \mathbf{X}_n, t) \qquad , \tag{3.1}$$

στην οποία

 Υ_m : διάνυσμα εξαγωγής

 \mathbf{X}_n : διάνυσμα δεδομένων εισαγωγής (ερέθισμα)

 \mathbf{P}_u : διάνυσμα παραμέτρων συστήματος και

t : χρόνος

και αφού θεωρείται ότι το στατικό σύστημα δεν επηρεάζεται από τον χρόνο η σχέση μπορεί να γραφεί ως $\Upsilon_m(X_n) = f(P_u, X_n)$. (3.2)

Οι αξίες των εισαγόμενων δεδομένων-ερεθισμάτων πολλαπλασιάζονται με τα λεγόμενα βάρη w (weights) που χαρακτηρίζουν το καθένα και αθροίζονται με τα άλλα δεδομένα. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται από μια συνάρτηση ενεργοποίησης $\varphi(x)$ η οποία παράγει τα αποτελέσματα εξαγωγής κάθε νευρώνα. Η $\varphi(x)$ συνήθως είναι συνδυασμός γραμμικής συνάρτησης και συνάρτησης της μορφής

$$\varphi(x) = 1/(1+e^{-x})$$
(3.3)

ενώ οι νευρώνες συνδυάζονται στην δομή του δικτύου που χωρίζεται σε δυο ζώνες, τη ζώνη εισόδου και ζώνη εξόδου, από τις οποίες υπάρχει η επικοινωνία με τον "έξω κόσμο" όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1. Ανάμεσά τους υπάρχουν κάποιες άλλες ζώνες που αποκαλούνται "κρυμμένες" γιατί δεν είναι απευθείας συνδεδεμένες με την είσοδο και έξοδο ούτε ορατές. Σκοπός τους είναι να μετατρέπουν το σήμα από την είσοδο στην έξοδο και να συνεισφέρουν στις ιδιότητες του συστήματος.



Εικόνα 3.1: το κύτταρο του νευρωνικού δικτύου και η συνολική αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου (25)

Απαραίτητο για την κατανόηση του static modeling είναι η αναφορά στην σχετική ταχύτητα του συστήματος συγκρινόμενο με το μοντέλο. Τέτοια είναι και η υπόθεση στην οποία όπου το μοντέλο που δημιουργήθηκε από τα νευρωνικά δίκτυα είναι πολύ πιο γρήγορο από την απλή λειτουργία διόρθωσης από το ίδιο το μοντέλο. Ισχύει δηλαδη:

$$au_m << au_s$$
 , (3.4)

όπου

 $\tau_{\scriptscriptstyle m}$: η σταθερά χρόνου του μοντέλου και

 τ_{s} :
η σταθερά χρόνου του παρατηρούμενου συστήματος.

Η σχέση αυτή ισχύει πάντα στο static modeling. Χάρη στην μεγάλη διαφορά των σταθερών, η λειτουργία του συστήματος θεωρείται στιγμιαία όπως αναφέρθηκε παραπάνω. (25)

Ο κύριος λόγος της χρησιμοποίησης του static modeling είναι για την περίπτωση που είναι άγνωστη η συνάρτηση f, με δυνατότητα όμως πραγματοποίησης άμεσων η έμμεσων μετρήσεων της απόδοσης του συστήματος, οι οποίες και θα δημιουργήσουν και το μοντέλο μέσω της διαδικασίας εκμάθησης, η οποία σχολιάζεται πιο κάτω.

3.3 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η διαδικασία της εκπαίδευσης-training του νευρωνικού δικτύου που χρειάζεται στην περίπτωση του στατικού συστήματος όπως αναφέρθηκε παραπάνω διαχωρίζεται ανάλογα με το αν γίνεται με βάση γνωστά παραδείγματα μοτίβων (supervised training) ήόχι (unsupervised training). Στο supervised training τα νευρωνικά δίκτυα διαβάζουν τα ζέυγη εισόδου-εξόδου και ο αλγόριθμος εκμάθησης επαναληπτικά αλλάζει τα βάρη (weights).Τα αποτελέσματα τα παίρνει απ'ευθείας το δίκτυο και για κάθε ένα, παράγει ένα αποτέλεσμα εξόδου το οποίο φυσιολογικά διαφέρει από το αποτέλεσμα στόχο. Η διαφορά τους είναι το λεγόμενο σφάλμα. Το σφάλμα αυτό διαδίδεται μέσω του δικτύου στην είσοδο για να γίνει η διόρθωση των βαρών, με σκοπό να μειωθεί το σφάλμα αυτό. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να αναλυθούν όλα τα αποτελέσματα και μετά επαναλαμβάνεται όσες φορές (**εποχές**) χρειάζεται μέχρι το δίκτυο να αποκτήσει την επιθυμητή ακρίβεια, ενώ στην συνέχεια αναλύεται η σταθερότητα της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ο πιο συνηθισμένος αλγόριθμος διόρθωσης των βαρώνς των βαρών στην είσοδο, είναι ο εrror backpropagation αλγόριθμος. (25)

Όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια η διαδικασία της εκπαίδευσης σταματά. Στο σημείο αυτό το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του με καθορισμένη ακρίβεια που έχει οριστεί. Είναι καλή πρακτική εάν δωθεί στο νευρωνικό δίκτυο νέα δεδομένα (test set) προκειμένου να αξιολογηθεί. Στην περιπτωση αυτή ο αλγόριθμος παράγει το σφάλμα της διαδικασίας αξιολόγησης (test error) που είναι μεγαλύτερο από το σφάλμα της εκπαίδευσης.

3.3.1 ΑΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Εκτός από την επιθυμητή ακρίβεια που πρέπει να προσεχθεί και να επιτευχθεί στην διαδικασία εκπαίδευσης του αλγορίθμου, ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί και σε μια ακόμα παράμετρο, την λεγόμενη **ανεκτικότητα εκπαίδευσης**, παράγοντα ιδιαίτερα σημαντικού για την πετυχημένη εκπαίδευση του συστήματος και κατά συνέπεια αλγορίθμου, η οποία διαφοροποιείται σε κάθε αλγόριθμο και καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος. Θέτοντας την επιθυμητή τιμή στην ανεκτικότητα, σημαίνει ότι η διαδικασία εκπαίδευσης θα ολοκληρωθεί μόλις η τιμή εξόδου δεν θα διαφέρει από την τιμή στόχο παραπάνω από το επιθυμητό ποσοστό, που ορίζεται από την τιμή της ανεκτικότητας, της διαφοράς του εύρους των τιμών. Δηλαδή αν η τιμή ανεκτικότητας που έχει οριστεί είναι το 0,1 που χρησιμοποιείται συνήθως, η διαδικασία θα ολοκληρωθεί όταν οι τιμές εξόδου απέχουν λιγότερο απο 10% της διαφοράς της μέγιστης με την ελάχιστη τιμή του εύρους τιμών με την επιθυμητή τιμή. Ισχύει δηλαδή:

$$|y_{i}^{T} - y_{i}| < \Delta_{T} (y_{max} - y_{min}),$$
 (3.5)

για κάθε τιμή ί όπου

 y_i^T : η τιμή στόχος,

 y_i : η τιμή εξόδου της εκπαίδευσης,

 Δ_{T} : η τιμή της ανεκτικότητας και

 $y_{\rm max}$, $y_{\rm min}$: η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του εύρους τιμών στην εκπαίδευση

Συνήθως όμως η τιμή της ανεκτικότητας $\Delta_{\rm T}$ δεν ορίζεται από την διαφορά του εύρους τιμών.

Στην περίπτωση που τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για να προσεγγίσουν μονοπολικές συναρτήσεις, ισχύει πάντοτε: $E_d \leq \Delta_{\rm T}$ (3.6)

με
$$\mathbf{E}_{d}$$
 το απόλυτο σφάλμα και $\mathbf{E}_{i}^{d} = \frac{\left| y_{i} - y_{i}^{T} \right|}{y_{\max}}$ για κάθε τιμή i . (3.7)

Αν το σχετικό σφάλμα ορίζεται
$$E_i^T = \frac{\left| y_i - y_i^T \right|}{y_i^T}$$
 (3.8)

Τότε

$$E_i^T = E_i^d \frac{y_{\text{max}}}{y_i^T} \quad \forall i$$
(3.9)

οπότε τελικώς το σχετικό σφάλμα σε σχέση με την ανεκτικότητα θα είναι:

$$E_i^T \le \Delta_{\rm T} \frac{y_{\rm max}}{y_i^T} \tag{3.10}$$

Η σχέση αυτή δείχνει πως αν η τιμή στόχος y_i^T είναι πολύ μικρότερη της μέγιστης τιμής του εύρους y_{max} , το σχετικό σφάλμα γίνεται πολύ μεγάλο, με συνέπεια τα αποτελέσματα που παράγονται να μην είναι χρήσιμα για τέτοιες μικρές τιμές.Για το λόγο αυτό, για την καλύτερη απόδοση της μοντελοποίησης θα πρέπει το εύρος των τιμών ανάμεσα στα y_{min} και y_{max} να μην είναι πολύ μεγάλο. Οι διαδικασίες δηλαδή αυτές αφορούν συναρτήσεις μικρού εύρους. (25)

Για μεγάλου εύρους συναρτήσεις όπου η ποιότητα της προσέγγισης για την μοντελοποίηση είναι πολύ μεγαλύτερη, με συνέπεια να είναι επιθυμητές, ακολουθείται άλλη διαδικασία για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος με χρησιμοποίηση δυο στρατηγικών. Η πρώτη στρατηγική που βοηθάει την προσέγγιση των συναρτήσεων μεγάλου εύρους είναι η λογαριθμική/αντιλογαριθμική στρατηγική στην οποία λαμβάνονται οι τιμές μέτρησης και λογαριθμίζονται με την log₁₀ συνάρτηση, με τα αποτελέσματα να χρησιμοποιούνται σαν τιμές εισόδου και τιμές στόχο. Η δεύτερη στρατηγική είναι η στρατηγική διαχωρισμού, στην οποία διαχωρίζονται οι τιμές εισόδου και εξόδου σε μικρότερα τμήματα στα οποία ακολουθείται η διαδικασία εκπαίδευσης ξεχωριστά νευρωνικά δίκτυα (υποδίκτυα). Η στρατηγική αυτή δίνει καλύτερα αποτελέσματα και απαιτεί και μεγαλύτερη βάση δεδομένων για εκπαίδευση. (25)

3.3.2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Μια ακόμη παράμετρος που είναι σημαντική στην διαδικασία της εκπαίδευσης, είναι η **σταθερότητα εκπαίδευσης**. Η διαδικασία της εκαίδευσης σε έναν αλγόριθμο αν επαναληφθεί, οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα κάθε φορά. Ο όρος σταθερότητα αφορά το εύρος (band) διαφορετικών αποτελεσμάτων που αναμένονται από την κάθε ξεχωριστή επανάληψη (μέγιστες και ελάχιστες τιμές, τιμές εξόδου). Όσο πιο στενό είναι αυτό το εύρος τόσο πιο σταθερές οι προσεγγίσεις που αναμένονται. Η διαδικασία του καθορισμού εύρους ευστάθειας της εκπαίδευσης είναι η ακόλουθη:

- Εκτέλεση της πρώτης διαδικασίας εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας όλη την βάση δεδομένων και τυχαία επιλογή των βαρών του δικτύου.
- 2. Πραγματοποίηση της μοντελοποίησης με τα νευρωνικά δίκτυα μετά την εκπαίδευση με βάση δεδομένων ανάμεσα στα δεδομένα της εκπαίδευσης. Το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης αυτής ονομάζεται παραπεμπτικό μοντέλο η μοντέλο αναφοράς.Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της άγνωστης συνάρτησης στο διάστημα μεταξύ των μετρημένων τιμών. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός

των σημείων που προσεγγίζονται πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό τωνσημείωνπου δίδονται στο νευρωνικό για την σωστή και επαρκή αξιολόγηση της συνάρτησης.

- 3. Εκτέλεση νέας διαδικασίας εκπαίδευσης με νέα τυχαία επιλογή βαρών του δικτύου.
- 4. Σύγκριση των δυο μοντέλων που δημιουργήθηκαν και σημείωση της συνολικής μέγιστης και ελάχιστης τιμής από όλες που παράχθηκαν. Έτσι δημιουργούνται στην πρώτη ομάδα σταθερότητας τα ανώτερα και κατώτερα όρια.
- 5. Εκτέλεση νέας διαδικασίας εκπαίδευσης με νέα τυχαία επιλογή βαρών του δικτύου.
- 6. Δοκιμή του συστήματος για κάθε προσεγγιστική τιμή για να ελεγχθεί αν πρόσκειται στα όρια που έχουν τεθεί. Αν δεν βρίσκεται, μεγαλώνει τα όρια.
- 7. Επανάληψη των 2 τελευταίων βημάτων μέχρι να επιτευχθεί ο προβλεπόμενος αριθμός επαναλήψεων.

Μόνο μια εκτέλεση της διαδικασίας εκαπίδευσης δεν θα ήταν αρκετή γιατί το λαμβανόμενο μοντέλο δίνει μόνο μια πιθανή λύση και έτσι δεν υπάρχει τίποτα γνωστό στο δίκτυο που μοντελοποιεί σε σχέση με το εκάστοτε πρόβλημα. Έτσι η διαδικασία πρέπει να εκτελείται περισσότερες φορές. Όταν ο έλεγχος της σταθερότητας εκπαίδευσης ολοκληρωθεί, γίνεται γνωστό και το εύρος των πιθανών λύσεων και γίνεται αξιολόγηση της επάρκειας του συστήματος. Στην περίπτωση που όλο το εύρος της σταθερότητας είναι αποδεκτό για την μοντελοποίηση, οποιοδήποτε νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Όταν η ομάδα της σταθερότητας είναι πολύ μεγάλη, μεγαλύτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στην διαδικασία εκπαίδευσης που δίνει την σωστότερη μοντελοποίηση όπου γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να βρεθούν για την εύρεση της καταλληλότερης λύσης.

Στην περίπτωση που ο αριθμός των μετρούμενων τιμών είναι πολύ μεγάλος, η στρατηγική που προτιμάται εδώ είναι αυτή του διαχωρισμούκαι συγκεκριμένα σε δυο ομάδες, με την πρώτη να χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του μοντέλου και την δεύτερη για την αξιολόγηση του μοντέλου. Αν ο αριθμός των τιμών είναι μικρός, τότε όλες οι τιμές χρησιμοποιούνται στην διαδικασία της εκπαίδευσης και στην ανάλυση της σταθερότητας εκπαίδευσης. (25)

3.3.3 ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Βασική προϋπόθεση στην σωστή διαδικασία του static modeling είναι ο καθορισμός των ορίων εισόδου-εξόδου, και αυτό γιατί το εύρος των νευρωνικών δικτύων περιορίζεται στο [0,1] ενώ καμιά φορα στο [-1,1]. Έτσι, οι τιμές εισόδου και εξόδου πρέπει να προκαθοριστούν. Οι δυο βασικές λειτουργίες για να ταιριάξει το πραγματικό σήμα εισόδου με το εύρος αυτό για την αποφυγή του φαινομένου του κορεσμού, είναι το scaling και το offsetting. Αφού εντοπιστούν η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή y_{max} και y_{min} από την βάση δεδομένων (άρα και η διαφορά τους πρέπει να κυμαίνεται στο εύρος αυτό), υπολογίζεται η τιμή y'_i που ταιριάζει με το εύρος μέσω της διαδικασίας offsetting

$$y'_{i} = \frac{y_{i} - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}},$$
 (3.11)

με αντίστροφο μετασχηματισμό την εξίσωση $y_i = y_{\min} + y'_i (y_{\max} - y_{\min})$. (3.12)

Το ίδιο γίνεται και με τις τιμές εισόδου. Αναγκαία όμως είναι και μια παράμετρος s_m που αποτρέπει τον κορεσμό του συστήματος λόγω των μεγάλων τιμών εισόδου, την scaling margin, με την οποία οι διορθωμένες τιμές γίνονται:

$$y'_{i} = \frac{s_{m}}{2} + \frac{(1 - s_{m})(y_{i} - y_{\min})}{y_{\max} - y_{\min}} , \qquad (3.13)$$

με αντίστροφη λειτουργία από την εξίσωση

$$y_{i} = y_{\min} + \frac{(y_{i} - \frac{s_{m}}{2})(y_{\max} - y_{\min})}{(1 - s_{m})}$$
(25)

Η κανονικοποίηση των τιμών εισαγωγής για την εκπαίδευση και την διαδικασία κατασκευής του δικτύου είναι σημαντική. Αυτό διότι η σύγκλιση είναι γρηγορότερη όταν ο μέσος όρος των τιμών εισόδου προσεγγίζει το μηδέν, το οποίο είναι και το επιθυμητό. Για παράδειγμα, αν όλες οι τιμές εισόδου ήταν θετικές (με συνέπεια την θετική τιμή του μέσου όρου) τα βάρη θα αυξάνονταν και θα μειώνονταν όλα μαζί για ένα μοτίβο εισόδου, συνεπώς ένα διάνυσμα βάρους για να αλλάξει κατεύθυνση θα έπρεπε να κάνει ακαθόριστες κινήσεις ζιγκ-ζαγκ οι οποίες είναι ανεπαρκείς και άρα αργές και κατά συνέπεια αργή εκπαίδευση.

Τα βάρη αυξάνονται ή μειώνονται μαζί στην περίπτωση που είναι όλα θετικά ή αρνητικά για τον λόγο ότισε κάποιο συγκεκριμένο κόμβο στο πρώτο στρώμα μεταβάλλονται επηρρεαζόμενα από μια ποσότητα ανάλογη του δx , με δ το βαθμωτό σφάλμα στον κόμβο αυτόν και x το διάνυσμα στην είσοδο.

Με δεδομένο ότι ο μέσος όρος των τιμών εισόδου επιδιώκεται να είναι στο μηδέν, πρέπει και ο μέσος όρος τιμών εξόδου να το προσεγγίζει καθώς θα αποτελέσουν τιμές εισόδου για το επόμενο στρώμα. Έτσι η επιδίωξη αυτή θα πρέπει να εφαρμόζεται σε κάθε στρώμα και τις τιμές τους.Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση της σιγμοειδούς συνάρτησης σαν συνάρτηση ενεργοποίησης για την μετατροπή των τιμών εισόδου, η ανάλυση της οποίας θα γίνει πιο κάτω.

Αν η παραπάνω διαδικασία του scaling και του offsetting δεν δίνει τα απαραίτητα αποτελέσματα τότε προτείνεται η παρακάτω αντίστοιχη διαδικασία.

Η σύγκλιση γίνεται γρηγορότερη όχι μόνο με την παραπάνω μεταβολή των τιμών εισόδου, αλλά και την κλιμακοποίησή τους (scaling)με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν όλες την ίδια συνδιακύμανση C_i η οποία ορίζεται ως

$$C_{i} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^{P} \left(z_{i}^{p} \right)^{2}$$
(3.15)

με P τον αριθμό των παραδειγμάτων εκπαίδευσης, C_i η συνδιακύμανση της $i^{\eta\varsigma}$ μεταβλητής εισόδου και z_i^p η i^η συνιστώσα του p^{ov} παραδείγματος εκπαίδευσης.

Η κλιμακοποίηση (scaling) αυξάνει την εκπαίδευση αφού την βοηθάει να εξισορρροπήσει τον ρυθμό στον οποίο τα βάρη συνδέονται στους κόμβους εισαγωγής. Η τιμή της συνδιακύμανσης σχετίζεται με την σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης. Η εξαίρεση της κλιμακοποίησης όλων των συνδιακυμάνσεων στην ίδια τιμή προκύπτει όταν είναι γνωστό ότι κάποιες τιμές εισαγωγής είναι μικρότερης σπουδαιότητας από άλλες. Σε αυτή την περίπτωση, καλύτερη επιλογή είναι η κλιμακοποίηση των τιμών μικρότερης σπουδαιότητας για να επηρεάζουν λιγότερο την διαδικασία της εκπαίδευσης.

Εκτός από την μεταβολή και την κλιμακοποίηση, χρήσιμη αν και πολύ πιο δύσκολη είναι η διαδικασία της αποσύνδεσης των τιμών εισόδου. Αν οι τιμές δεν συσχετίζονται, το σφάλμα τους κατά την επίλυση είναι πολύ μικρό αφού δεν εξαρτάται η μια από την άλλη. Αν αντίθετα οι τιμές συσχετίζονται, πρέπει να γίνεται ταυτόχρονη επίλυση για κάθε τιμή, που είναι πιο επίφοβη και δύσκολη διαδικασία. Ειδικά στην περίπτωση των γραμμικά εξαρτώμενων τιμών εισόδου, είναι πιθανός ο εκφυλισμός που μειώνει την ταχύτητα εκπαίδευσης. (26)

3.3.4 ΣΙΓΜΟΕΙΔΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ (26)

Μια πολύ συχνή συνάρτηση ενεργοποίησης φ(x) που συναντάται στην εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων είναι η σιγμοειδής. Σαν μη γραμμική συνάρτηση δίνει μη γραμμικές ιδιότητες στο σύστημα. Είναι μονοτονικά αύξουσα, είναι ασύμπτωτη στο $\pm \infty$,με κυριότερα παραδείγματα τις:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} (\sigma \upsilon \mu \beta \alpha \tau \iota \kappa \eta \lambda \rho \iota \sigma \tau \iota \kappa \eta)$$
(3.16)

$$f(x) = \tanh(x)$$
 (υπερβολική εφαπτομένη) (3.17)

Μεγαλύτερη χρησιμότητα έχουν οι συμμετρικές σιγμοειδείς επειδή μπορούν να παράγουν τιμές με μέσο όρο κοντά στο μηδέν (γι'αυτο και η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης είναι πιο γρήγορη και προτιμάται σε σχέση με την συμβατική λογιστική) ενώ μερικές φορές είναι χρήσιμο να τους προστίθεται ένας μικρός γραμμικός όρος για την αποφυγή τυχόν αμετάβλητων σημείων. π.χ:

$$f(x) = \tanh x + ax \tag{3.18}$$

Η προτεινόμενη σιγμοειδής είναι η

$$f(x) = 1,7159 \tanh\left(\frac{2}{3}x\right)$$
 (3.19)

Ο αριθμός 1,7159 προτιμάται γιατί όταν η συνάρτηση θα χρησιμοποιηθεί με τις τροποποιημένες τιμές εισόδου και, έχει την ιδιότητα $f(\pm 1) = \pm 1$, η δεύτερη παράγωγός της έχει μέγιστο στο x=1 και το αποτελεσματικό της κέρδος ισούται με 1, οπότε η συνδιακύμανση και αυτή θα ισούται περίπου με 1 που είναι και η επιθυμητή τιμή. Αφού η tanhx είναι κάποιες φορές ασύμφορη υπολογιστικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσέγγισή της μια αναλογία πολυωνυμικών συναρτήσεων. Με τις σιγμοειδείς συναρτήσεις καλό είναι να αποφεύγονται τα πολύ μικρά βάρη ή τα πολύ μεγάλαλόγω του κορεσμού των σιγμοειδών, μειονέκτημα που καλύπτεται από την πρόσθεση του γραμμικού όρου.



Εικόνα 3.2: (a) η λογιστική συνάρτηση η οποία δεν συνιστάται και (b) η προτεινόμενη μορφή της υπερβολικής εφαπτομένης

3.3.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΙΜΩΝ ΣΤΟΧΟΥ (26)

Αντιστοιχώντας τις τιμές του στόχου στις ασύμπτωτες της σιγμοϊδούςανακύπτουν κάποια μειονεκτήματα. Αρχικά μπορεί να δημιουργηθεί αστάθεια. Η διαδικασία της εκπαίδευσης θα οδηγήσει τα αποτελέσματα στο να προσεγγίσουν τις τιμές στόχο που μπορεί να επιτευχθεί μόνο ασυμπτωτικά, με αποτέλεσμα τα βάρη να οδηγούνται σε όλο και μεγαλύτερες τιμές όπου η παράγωγος της σιγμοειδούς είναι μηδέν. Τα πολύ μεγάλα βάρη αυξάνουν την κλίση, η οποία πολλαπλασιάζεται με μια εκθετικά μικρή παράγωγο της σιγμοειδούς που μπορείο κοντά

στο μηδέν. Έτσι, σαν αποτέλεσμα τα βάρη μπορεί να «κολλήσουν». Εξαίρεση γίνεται, αν πρόστεθεί στην σιγμοϊδή συνάρτηση κάποιος γραμμικός όρος οπότε αποφεύγεται το παραπάνω.

Δεύτερο μειονέκτημα είναι πως όταν τα αποτελέσματα κορεστούν, το δίκτυο δεν δίνει ένδειξη του επιπέδου εμπιστοσύνης. Όταν ένα μοτίβο εισόδου πέσει πάνω σε κάποιο όριο, η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι αβέβαιη. Ιδανικά, αυτό θα έπρεπε να αντικατοπτρίζεται στο δίκτυο με μια τιμή εξόδου η οποία βρίσκεται ανάμεσα σε δυο πιθανές τιμές στόχο, δηλαδή μακριά από τις ασύμπτωτες. Παρ'ολα αυτά, τα μεγάλα βάρη τείνουν να μετατοπίσουν όλες τις τιμές εξόδου προς τις ουρές της σιγμοειδούς,ανεξάρτητα από την αβεβαιότητα. Έτσι, το δίκτυο μπορεί να προβλέψει λάθος επίπεδο χωρίς να δίνει ένδειξη του μικρού επιπέδου εμπιστοσύνης στο αποτέλεσμα. Τα μεγάλα βάρη που προκαλούν κορεσμό στους κόμβους κάνουν αδύνατη την διαφοροποίηση των τυπικών και των μη τυπικών παραδειγμάτων.

Λαμβάνοντας υπ'όψιν τα παραπάνω μειονεκτήματα, οι τιμές στόχοι βρίσκονται μέσα στις σιγμοειδέις και όχι στις ασύμπτωτές τους. Δεν αρκεί όμως μόνο αυτό καθώς πρέπει ο κόμβος να μην είναι περιορισμένος μόνο στο γραμμικό κομμάτι της σιγμοειδούς. Θέτοντας τις τιμές στόχου την τιμή της μέγιστης δεύτερης παραγώγου της σιγμοειδούς, είναι ο καλύτερος τρόπος να εκμεταλλευτούν την μη γραμμικότητα χωρίς τον κορεσμό των τιμών εξόδου.

3.3.6 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΡΩΝ (26)

Οι αρχικές τιμές των βαρών επηρεάζουν όλη την διαδικασία της εκπαίδευσης. Τα βάρη πρέπει να επιλέγονται τυχαία, αλλά με τέτοιον τρόπο που η σιγμοειδής συνάρτηση να ενεργοποιείται στη γραμμική περιοχή της. Αν τα βάρη είναι πολύ μεγάλα, τότε η σιγμοειδής θα κορεστεί και θα οδηγήσει σε μικρές κλίσεις και άρα στην αργή εκπαίδευση. Αν τα βάρη είναι πολύ μικρά, τότε και οι κλίσεις θα είναι μικρές. Οι ενδιάμεσες τιμές που κυμαίνονται πάνω στην γραμμική περιοχή των σιγμοειδών έχουν το πλεονέκτημα ότι οι κλίσεις είναι μεγάλες και ότι το δίκτυο θα μάθει τη γραμμική περιοχή πριν την πιο δύσκολη μη γραμμική. Έστω ότι η κατανομή των τιμών εξόδου κάθε κόμβουέχει μια τυπική απόκκλιση σ περίπου ίση με 1 το οποίο επιτυγχάνεται από το στρώμα εισόδου με την ομαλοποίηση των δεδομένων στην εκπαίδευση όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Για να επιτευχθεί τυπική απόκκλιση ίση με 1 στις τιμές εξόδου της πρώτης κρυμμένης ζώνης χρειάζεται η προτεινόμενη σιγμοειδής μαζί με την προϋπόθεση ότι οι τιμές εισαγωγής στην σιγμοειδή έχουν επίσης τυπική απόκκλιση σ, με την σιγμοειδή έχουν επίσης τυπική απόκκλιση του τιμές εισάδου χ_μ στην σιγμοειδή τοι τυμές εισαγωγής στην σιγμοειδή έχουν επίσης τυπική απόκκλιση του τιμές εισόδου με την σιγμοειδή έχουν επίσης τυπική απόκκλιση τοι τιμές εισόδου της πρώτης κρυμμένης ζώνης χρειάζεται η προτεινόμενη σιγμοειδής μαζί με την προϋπόθεση ότι οι τιμές εισαγωγής στην σιγμοειδή έχουν επίσης τυπική απόκκλιση σ_μ

αθροίσματος των στοιχείων των βαρών θα είναι $\sigma_{yi} = \left(\sum_{j} w_{ij}^2\right)^{\frac{1}{2}}$ (3.20)

και για να εξασφαλιστεί ότι ισούται με 1 περίπου, τα βάρη θα πρέπεινα επιλεγούν τυχαία από μια κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκκλιση:

$$\sigma_w = m^{-\frac{1}{2}}$$
 (3.21)

όπου mο αριθμός των τιμών εισόδου στο στοιχείο (των συνδέσεων που τροφοδοτούν τον κόμβο).

3.4 Backpropagation ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Είναι η διαδικασία κατά την οποία υπολογίζονται τα νέα βάρη που προαναφέρθηκαν, προσαρμοσμένα από την descent gradient μεθοδολογία και τις παραγώγους μιας συνάρτησης σφάλματος. Αποτελείται από δυο φάσεις, την μετάδοση προς τα εμπρός (forward transmission)και την μετάδοση προς τα πίσω (backward transmission).Κατά το forward transmission, εισάγεται μοτίβο εκμάθησης στο επίπεδο εισόδου και η πληροφορία μεταφέρεται από επίπεδο σε επίπεδο μέχρι να δημιουργηθει το μοτίβο εξόδου σαν αποτέλεσμα της εισόδου.

Αν έστω K ο αριθμός των επιπέδων και n_i το σύνολο των νευρώνων στο κάθε l επίπεδο, ισχύει δηλαδή $0 \le l \le K$ με 0 το επίπεδο εισόδου και K το επίπεδο εξόδου ενώ τα υπόλοιπα l τα κρυμμένα επίπεδα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1, τότε στην φάση αυτή θα ισχύει ότι η πληροφορία j που μεταφέρεται στον νευρώνα l είναι μια γραμμική συνάρτηση των τιμών ενεργοποίησης y_i^{l-1} , των νευρώνων στο στρώμα l-1 που συνδέονται με τον νευρώνα j, και είναι της μορφής:

$$\chi_{j}^{l} = \sum_{i} w_{ji}^{l} y_{i}^{l-1} , \qquad (3.22)$$

με w_{ji}^l το βάρος που συνδέει νευρώνα *i* στο στρώμα l-1 και νευρώνα *j* στο στρώμα l, θεωρώντας τιμή ενεργοποίησης του νευρώνα *j* στο στρώμα $l: y_j^l = f\left(\chi_j^l - \theta_j^l\right)$ όπου f συνάρτηση ενεργοποίησης και θ_j^l μια πιθανή τιμή που μπορεί να αντιπροσωπευθεί από βάρη που προέρχονται απόεικονικούς νευρώνες και έχουν μια σταθερή τιμή εξόδου ίση με -1.

Εάν το μοτίβο εξόδου είναι διαφορετικό του στόχου, δημιουργείται ένα σφάλματο οποίο διαδίδεται προς τα πίσω προς το στρώμα εισόδου ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλονται τα βάρη και τα forward transmission και backward transmission εναλλάσονται με σκοπό την μείωση του σφάλματος το οποίο εκφράζεται ως:

$$E_0 = \frac{1}{2} \sum_{d=1}^{D} \sum_{j=1}^{n_K} \left(y_{jd}^K - o_{jd} \right)^2$$
(3.23)

όπου

 $O_{\it id}$: η επιθυμητή τιμή εξόδου του νευρώνα j

 y_{id}^{K} : η πραγματική τιμή του j και

D: ο αριθμός των μοτίβων εισαγωγής

Στο αλγόριθμο οπισθοδιασκέδασης μπορούν να υποβληθούν διάφορες στρατηγικές εκμάθησης για την βελτίωση

των βαρών, χρησιμοποιώντας τις παραγώγους της συνάρτησης κόστους
$$E_{01} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_K} \left(y_j^K - o_j \right)^2$$
. (3.24)

• Για τα κρυφά στρώματα l (όπου 0 < l < K): $w_{ji}^{l}(t+1) = w_{ji}^{l}(t) + \eta \delta_{j}^{l} y_{i}^{l-1}$ (3.25)

$$\mu \varepsilon \, \delta_j^l = \frac{dy_j^l}{dx_j^l} \sum_s \delta_s^{l+1} w_{sj}^{l+1}$$
(3.26)

• Για το στρώμα εξόδου K:

$$w_{ji}^{K}(t+1) = w_{ji}^{K}(t) + \eta \left(-\nabla_{w_{ji}^{K}} E_{01}\right) = w_{ji}^{K}(t) + \eta \frac{dy_{j}^{K}}{dx_{j}^{K}} \left(y_{j}^{K} - o_{j}\right) y_{j}^{K-1} = w_{ji}^{K}(t) + \eta \delta_{j}^{K} y_{i}^{K-1}$$
(3.27)

$$\mu \varepsilon \ \delta_j^K = \frac{dy_j^K}{dx_j^K} \left(y_j^K - o_j \right)$$
(3.28)

Οι 2 εξισώσεις αυτές βελτιώνουν τα βάρη για κάθε μοτίβο εκμάθησης που εισάγεται στο δίκτυο και τρέχοντάς τα πολλές φορές φτάνουμε στο επιθυμητό επίπεδο. (27) (28)

3.4.1 Gradient descent ME $OO\Delta O\Sigma$

Η μέθοδο ςgradient descent είναι υποπερίπτωση των gradient methods, αλγόριθμων που λύνουν προβλήματα της μορφής $\min_{u \in U_{ad}} F(u)$, την ελαχιστοποίηση δηλαδή της συνάρτησης F με περιορισμούς βάσει ενός κλειστού και κυρτού χώρου U_{ad} στον χώρο Hilbert H (29). Είναι μια γενική δομή που αποτελεί την βάση πολλών αλγόριθμων εκμάθησης και γνωστικών ανακαλύψεων, με μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορεί να εκτελεί την διαδικασία των δεδομένων εισόδου σε μια σειρά την φορά, με τέτοιον τρόπο ώστε οι απαιτήσεις της μνήμης να είναι χαμηλές αφού μόνο οι φορείς βάρους και η σειρά χρειάζεται να αποθηκευτούν κατα τον υπολογισμό στην διάρκεια της διαδικασίας αυτής. (27) Στη μέθοδο gradient descent ισχύει:

Υπάρχει θετική, κυρτή, ημισυνεχής και εξαναγκαστική συνάρτηση Φ που ισχύει $Dom(\Phi) \neq \emptyset$, και συνάρτηση F δεσμευμένη από κάτω και ημισυνεχής με $F(u) \ge 0, \forall u \in H$, $||F'(u) - F'(u')|| \le L ||u - u'||, \forall u, u' \in H$ όπου L σταθερά ενώ αν u^{n_j} μια ακολουθία και u^n συγκλίνει στο u έτσι ώστε $\{\Theta(u^n)\}$ φθείνει μονότονα τότε $\{F'(u^{n_j})\} \rightarrow F'(u)$. Έτσι αν η ακολουθία u^n καθορίζεται από την εξίσωση:

$$u^{n+1} = J_{s^{n}}\left(u^{n}\right) = \arg\min_{u \in H} \Theta_{s^{n}}\left(\upsilon, u_{n}\right) = P_{\frac{1}{s^{n}}\Phi}\left(u^{n} - \frac{1}{s^{n}}F'(u^{n})\right),$$
(3.29)

όπου J_s ο χειριστής που στέλνει το u στο Θ_s και $P_{\frac{1}{s}\Phi}$ ο χειριστής του $\frac{1}{s}\Phi$ με $P_{\lambda\Phi}(u) = \arg\min_{u\in H} \left(\frac{||u-v||}{2} + \lambda\Phi(u)\right)$ (λ>0), τότε θα ισχύει (3.30)

$$\Theta\left(u^{n+1}\right) \le \Theta_{s^{n}}\left(u^{n+1}, u^{n}\right)$$
(3.31)

με κάθε ασθενές σημείο συσσώρευσης u^* του $\{u^n\}$ να είναι στάσιμο σημείο του Θ . (30) Έτσι ο αλγόριθμος της gradient descent method θαείναι: **Είσοδος**: αρχική υπόθεση u^0 : $\Phi(u^0) < \infty, \mu \in (1, \infty), s^0 \in [s, \overline{s}] (0 < \underline{s} \le L / \mu \le \overline{s})$

1. for n=0,1,2,... do 2. Repeat 3. $u^{n+1} \leftarrow P_{\Phi \frac{1}{s^n}}(u^n - \frac{1}{s^n}F'(u^n))$ 4. If $\Theta(u^{n+1}) \leq \Theta_{s^n}(u^{n+1}, u^n)$ then 5. $s^n \leftarrow s^n . \mu$ 6. end if 7. until $\Theta(u^{n+1}) \leq \Theta_{s^n}(u^{n+1}, u^n)$ or $s^n \notin [s, \overline{s}]$ 8. Compute an initial guess for s^{n+1} 9. end for [Eξoδog : $u = \lim u^n$ (29)

Για κάθε gradient descent method και γνωστή συνάρτηση σφάλματος $e: \Re^2 \to \Re$, το συνολικό σφάλμα Ε μεταξύ του στόχου y_i και των προβλεπόμενων τιμών εξόδου $f(x_i) = f(x_{i,1}, x_{i,2}, ..., x_{i,m})$ θα είναι:

$$E = \sum_{i=1}^{N} e\left(f\left(x_{i}\right), y_{i}\right)$$
(3.32)

Η συνάρτηση σφάλματος αυτή προσφέρει τα μέσα που καθορίζουν τον τρόπο εκτέλεσης πιο απότομης descent. Όσο η συνάρτηση κόστους είναι μερικώς διαφορίσιμη,

όπως η $E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} (y_i - f(x_i))^2$ στην περίπτωση του αλγορίθμου οπισθοδιασκέδασης Back propagation,

η συνάρτηση μεταβολής των βαρών μπορεί να διαφοριστεί για την αποτελεσματική εκτέλεση του gradient descent. Αυτή περιλαμβάνει και αλγόριθμους εκπαίδευσης με πολύπλοκες συναρτήσεις σφάλματος.

Οι gradient descent μέθοδοι χωρίζονται σε τυπική **(standard)** και στοχαστική **(stochastic)**. Στις standard, τα δεδομένα επεξεργάζονται σε κάθε επανάληψη για να καθορίσουν πιο απότομη descent.Αν τα δεδομένα είναι γραμμικά διαχωρίσιμα, τότε το σφάλμα μπορεί να γίνει ελάχιστο.Αν όχι, η μέθοδος αυτή δεν θα συγκλίνει ποτέ, γεγονός που την κάνει να μην προτιμάται σε σχέση με την stochastic. Ένας άλλος λόγος είναι ότι σε όρους υπολογιστικής πολυπλοκότητας, χρειάζονται όλα τα δεδομένα να εκτελεστούν σε κάθε επανάληψη, γεγονός που προκαλεί πολλούς πρακτικούς περιορισμούς σε περίπτωση μεγάλης βάσης δεδομένων. Στις stochastic που στην ουσία είναι η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται, σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιείται μόνο μια τιμή της βάσης δεδομένων για να καθορίσει την πιο απότομη ελαχιστοποίηση (**descent**) και την επεξεργασία των φορέων βάρους. Έτσι, έχει σαν πλεονέκτημα ότι είναι μια μέθοδος που θα συγκλίνει και σε πολύ πιο γρήγορο ρυθμό ακόμα και όταν τα δεδομένα δεν είναι γραμμικά διαχωρίσιμα. Ακόμα, μεγάλο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να εισαγωγής σε μια σειρά την φορά, γεγονός που την κάνει κα χρειάζεται μικρό αποθηκευτικό χώρο, καθώς για την διαδικασία του υπολογισμού χρειάζονται να αποθηκευτούν μόνο οι σειρές και οι φορείς βάρους. (28)

3.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ (25)

Η διαδικασία είναι η εξής:

- Αρχικά επιλέγεται το σύνολο των δεδομένων της εκαπίδευσης στο οποίο θα υπάρχει επαρκής δειγματοληψία έτσι ώστε τα επιλεγμένα δεδομένα θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν πλήρως το παρατηρούμενο πρόβλημα, ενώ πρέπει να ορίζονται οι παράμετροι εισόδου και εξόδου (στόχος).
- 2. Στην συνέχεια πρέπει να γίνει έλεγχος των διαφορών μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών στα δεδομένα εκπαίδευσης. Αν η διαφορά είναι πολύ υψηλή, τα δεδομένα θα πρέπει να διαχωριστούν σε τμήματα η να λογαριθμιστούν όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και πρέπει να σχεδιαστεί εκ νέου νευρωνικό δίκτυο (για κάθε τμήμα ξεχωριστά).
- 3. Έπειτα, στο πρώτο δίκτυο (που αποτελείται από τις 3 ζώνες εισόδου-κρυμμένη-εξόδου) ορίζεται η παράμετρος ανεκτικότητας εκπαίδευσης που ικανοποιεί της ανάγκες της μοντελοποίησης και επιλέγεται ένας αυθαίρετος αριθμός των νευρώνων στο κρυμμένο στρώμα πριν αρχίσει η διαδικασία εκπαίδευσης. Αν η διαδικασία εκπαίδευσης παρουσιάζει σταθερή μείωση του παραγόμενου σφάλματος εκπαίδευσης, ο αυθαίρετος αριθμός των νευρώνων είναι αρκετός για την κατασκευή του μοντέλου. Αν το σφάλμα είναι ασταθές και δεν μειώνεται με την πάροδο των επαναλήψεων, τότε ο αυθαίρετος αριθμός των νευρώνων είναι αρκετός για την κατασκευή του μοντέλου. Αν το σφάλμα είναι ασταθές και δεν μειώνεται με την πάροδο των επαναλήψεων, τότε ο αυθαίρετος αριθμός των νευρώνων είναι αρκετός για την κατασκευή του μοντέλου. Αν το σφάλμα είναι ασταθές και δεν μειώνεται με αργούς ρυθμούς, πρέπει να εισαχθεί επιπλέον κρυμμένο στρώμα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η αύξηση των νευρώνων σε ένα κρυμμένο στρώμα δεν σημαίνει απαραίτητα και αύξηση της ταχύτητας της εκπαίδευσης, ούτε απαραίτητα η αύξηση του αριθμού των κρυμμένων ζωνών. Υπάρχει ένα συγκεκριμένο όριο στην ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί με βέλτιστη διαμόρφωση, το οποίο εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα.
- 4. Τελευταίο βήμα είναι η εκτέλεση της διαδικασίας της σταθερότητας εκπαίδευσης η οποία δείχνει αν χρειάζεται περαιτέρω βελτιστοποίηση.

Αν μια από τις παραμέτρους της μοντελοποίησης αποτελεί ο χρόνος, τότε μια από τις εισόδους αντιπροσωπεύει τον χρόνο που ελήφθησαν οι τιμές των δεδομένων.

3.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μελέτη και εξέλιξη των τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχει αναπτύξει νέες μεθοδολογίες και τεχνικές σε πολύ μικρότερο χρόνο, εργαλεία που έχουν βοηθήσει στην επίλυση πολλών και δύσκολων προβλημάτων σε διάφορους τομείς όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γενικά, νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί για μοντελοποίηση ηλιακής γεννήτριας ατμού, συστήματα ηλιακού θερμοσίφωνα, φωτοβολταικά, στη μελέτη ενεργειακών κτηρίων και πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας (30), ενώ ειδικότερα στον τομέα της αιολικής ενέργειας και κατά συνέπεια και των αιολικών μηχανών που την εκμεταλλευονται, που είναι και το αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής, εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων είτε για πρόβλεψη είτε για έλεγχο είτε για αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί για αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί για αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί και αξιοποιηθεί για χροι είτε για αξιολόγηση έχουν χρησιμοποιηθεί και αξιοποιηθεί για (24):

Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της αιολικής ισχύος: Επιτυγχάνεται με εκπαίδευση απο backpropagation algorithm και ανάλυση κύριων συνιστωσών που επηρεάζουν την αιολική ισχύ, δηλαδή μεταβλητών, με 3 μεθόδους, με εισαγωγή ταχύτητας ανέμου, με εισαγωγή ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου ή με ταχύτητα ανέμου και θερμοκρασία αέρα. Υπάρχουν και υβριδικές τεχνικές που συνδυάζουν νευρωνικά δίκτυα και άλλες προγραμματιστικές μεθόδους όπως μετασχηματισμούς Hilbert-Huang, μετασχηματισμούς wavelet και Particles warm optimization. Υπάρχουν και περιπτώσεις, που έχουν συνδυαστεί η πρόβλεψη της ισχύος με την πρόβλεψη ταχύτητας του ανέμου, με εκπαίδευση από backpropagation algorithm και σαν βάση

δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν 2 διαφορετικές, ταχύτητες ανέμου από μη ανεμογενή περιοχή και από ανεμογενή.

- Πρόβλεψη ταχύτητας του ανέμου: Για την πρόβλεψη αυτή χρησιμοποιούνται εφαρμογές νευρωνικών • δικτύων πολλών ζωνών με εκπαίδευση, με backpropagation algorithms μέσω gradient descents, από δεδομένα ταχύτητας και κατέυθυνσης ανέμου, συνήθως από πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς και σχετικά μεγάλη περίοδο. Σε μία έρευνα δεδομένα εισόδου έχουν χρησιμοποιηθεί και σχετική υγρασία, θερμοκρασία αέρα και πίεση με μεγάλη επιτυχία. Σαν εργαλεία έχουν χρησιμοποιηθεί και πολλές στατιστικές τεχνικές όπως curve fitting και εξαγωγή περιοδικής συνάρτησης σε συνδυασμό με τα νευρωνικά δίκτυα. Πολλές φορές χρησιμοποιήθηκαν υβριδικές τεχνικές για την πρόβλεψη της ταχύτητας ανέμου, με συνδυασμούς Particles warm optimization και Wavelet-Genetic algorithm με συναρτήσεις ενεργοποίησης για τις κρυμμένες ζώνες και ζώνη εξόδου την tanh και την γραμμική, συνδυασμό backpropagation algorithm μέσω των δικτύων με μια εκθετική προσαρμογή που απαλοίφει τις εποχικές επιδράσεις στον άνεμο (επετέυχθη η πρόβλεψη του ημερήσιου μέσου όρου του ανέμου μέχρι ένα χρόνο), συνδυασμός των νευρωνικών δικτύων SOM (Self Organizing Maps)για την ομαδοποίηση των δεδομένων εισόδου (ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου και θερμοκρασία) και MLP (MultiLayer Perceptron) για την πρόβλεψη κ.α. Μεγάλη χρήση εμφανίζει και η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Η αξιολόγηση των μεθόδων αυτών πραγματοποιούνται συνήθως με την βοήθεια του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, του μέσου απόλυτου σφάλματος, του μέσου απόλυτου σφάλματος επί τοις εκατό (MAPE), του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) και του συντελεστή συσχέτισης (R).
- Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση ταχύτητας ανέμου: Συνήθως χρησιμοποιούνται δεδομένα εισαγωγής βραχυπρόθεσμων τιμών της ταχύτητας του ανέμου της ενδιαφερόμενης περιοχής και πιο μακροπρόθεσμων γειτονικών περιοχών η μόνο των βραχυπρόθεσμων. Υπάρχουν και έρευνες που συνδυάζουν νευρωνικά δίκτυα με μοντέλα πρόγνωσης καιρού και σαν δεδομένα χρησιμοποιουν εκτός από τις τιμές των ταχυτήτων,και τιμές θερμοκρασίας. Μια βελτιωμένη προσέγγιση πρόγνωσης είναι η WTT-SAM-RBFNN που εφαρμόζει την τεχνική wavelet transform σε ένα υβριδικό μοντέλο αποτελούμενο από τα radial basis function νευρωνικά δίκτυα και την μέθοδο εποχικής προσαρμογής με σκοπό την απεμπλοκή των αποτελεσμάτων από τους εποχικούς παράγοντες και τον θόρυβο και κατά συνέπεια πιο έγκυρες προγνώσεις.
- Εκτίμηση αιολικής ισχύος: Συνήθως τα νευρωνικά δίκτυα εδώ χρησιμοποιούν σαν δεδομένα εισαγωγής τη σχετική υγρασία, τη ταχύτητα-κατεύθυνση ανέμου και τις ώρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας ενώ γίνεται εκπαίδευση με τα backpropagation algorithms. Υπάρχουν και μέθοδοι που συνδυάζουν τα δίκτυα με υπολογιστική δυναμική ρευστών και μοντέλα προγνώσης καιρού.
- Πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου: Για την πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε πολύ μικρή κλίμακα, χρησιμοποιούνται τα νευρωνικά δίκτυα με εκπαίδευση από backpropagation algorithms και τα αποτελέσματα τροποποιούνται σύμφωνα με τα μοτίβα μακράς διάρκειας που εφαρμόζεται η αλυσίδα του Markov για τον υπολογισμό της μετάβαλλόμενης πιθανότητας των προβλεπόμενων τιμών, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και γραμμική παλινδρόμηση για περαιτέρω διόρθωση των αποτελεσμάτων. Επίσης, στα δίκτυα μπορούν να εφαρμοστούν wavelet-based δίκτυα για καλύτερη απόδοση του συστήματος. Συνήθως συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η σιγμοειδής.
- Μακροπρόθεσμη πρόβλεψη ταχύτητας ανέμου: Χρησιμοποιούνται επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα πολλών ζωνών που βασίζονται σε αλγόριθμο πρόβλεψης αναδρομικού σφάλματος. Μια μέθοδος που εφαρμόστηκε με επιτυχία είναι η εφαρμογή δυο δικτύων σε συνάρτηση σφάλματος βάρους χρησιμοποιώντας δεδομένα ταχύτητας-κατεύθυνσης ανέμου ενώ για την εκπαίδευσή τους χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος με συναρτήσεις ενεργοποίησης την tanh και την σιγμοειδή και σκοπό την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας.
- Πρόβλεψη αναλογικού (k_P) και ακέραιου (k_l) κέρδους του SVC (στατικός αντισταθμιστής) για τον αντιδραστικό έλεγχο ισχύος:Συνήθως σε υβριδικό σύστημα ισχύος ανέμου-diesel, χρησιμοποιούνται νευρωνικά δίκτυα που εκπαιδεύονται από backpropagation algorithms και έχουν ως δεδομένα εισαγωγής το μοντέλο φορτιου (η παράμετρος n_q) με στοιχεία εξαγωγής το αναλογικό και το ακέραιο κέρδος του SVC.

- Πρόβλεψη γωνίας κλυδωνισμών και έλεγχος για την πτερωτή στην ανεμογεννήτρια: Επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικών μεθόδων και συνεργασίας διάφορων νευρωνικών δικτύων, συνήθως multilayer perceptron και radial basis function, ενώ γίνεται έρευνα για την προσαρμογή και καταλληλότητά τους σε διάφορες συνθήκες ανέμου. Ο χειρισμός από τα δίκτυα αποσκοπεί στην εκμετάλευση της μέγιστης δυνατής ισχύος του συστήματος. Στην εκπαίδευση τους προτιμώνται σαν συναρτήσεις ενεργοποίησης οι radial basis. Δεδομένα εισαγωγής χρησιμοποιούνται η ταχύτητα του ανέμου ν και η ταχύτητα του δρομέα w_m με εξαγωγή αποτελεσμάτων την επιθυμητή γωνία κλυδωνισμού β.
- Μοντέλα ελέγχου για εντοπισμό σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) στην ανεμογεννήτρια: Το δίκτυο εκπαιδεύεται offline για την εκμάθηση των χαρακτηριστικών της τουρμπίνας, του ανέμου και της στροφορμής, για την εφαρμογή του απαιτείται δηλαδή η γνώση της ταχύτητας του ανέμου και του δρομέα και η χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της κάθε ανεμογεννήτριας, ενώ μετά εκπαιδεύεται online για την εκτίμηση της τρέχουσας αξίας με σκοπό την βέλτιστη απόδοση σε διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου.
- Έλεγχος συχνότητας και τάσης στην ανεμογεννήτρια: Για τον έλεγχό τους δημιουργούνται χειριστές μέσω νευρωνικών δίκτύων που ρυθμίζουν τον πυκνωτή τάσης και την τάση εξόδου.
- Βέλτιστο έλεγχο στην ανεμογεννήτρια: Σχεδιάζονται νευρωνικά δίκτυα με βάση τις βέλτιστες αξίες και τις ταχύτητες ανέμου της περιοχής που εξετάζεται και εκπαιδεύονται offline. Το σύστημα της ανεμογεννήτριας προσομοιώνεται μέσω του PSCAD λογισμικού για την απόδειξη της βελτίωσης της προσωρινής απόδοσης, χρησιμοποιώντας και συγκρίνοντας κάποια μοντέλα, ενώ τα δίκτυα δυναμικά μεταβάλλουν τις βέλτιστες αξίες ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.
- Αναλογία ταχύτητας άκρων και πρόβλεψη συντελεστή ισχύος: Έχουν σχεδιαστεί νευρωνικά δίκτυα που δίνουν σαν αποτελέσματα την αναλογία ταχύτητας των άκρων και τον συντελεστή ισχύος και χρησιμοποιούν σαν δεδομένα εισόδου τον αριθμό πτερυγίων, τον συντελεστή Schmitz, την απώλεια των πτερυγίων και το τέλος απωλειών της γεννήτριας. Για την εκμάθησή τους χρησιμοποιύνται backpropagation algorithms με σιγμοειδή συνάρτηση.
- Προσδιορισμό της λανθασμένης διάγνωσης για αξιολόγηση: Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αξιολόγηση σε ένα σύστημα και για αυτό τον λογο δημιουργήθηκαν μοντέλα προσδιορισμού λανθασμένης διάγνωσης.
 Έτσι σχεδιάστηκαν αυτοεξελισσόμενα νευρωνικά δίκτυα με βάση αλγόριθμους, οι οποίοι τα κρατούν σε επαφή με τις συνθήκες της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας που συνεχώς αλλάζουν.
- Πρόβλεψη δυναμικής για τις αντιδράσεις της ανεμογεννήτριας σε ανέμους με πολλές ριπές: Ο σχεδιασμός τέτοιου μοντέλου μέσω των νευρωνικών δικτύων, επιτρέπει την απαλοιφη δυο προβλημάτων όπως είναι η μη γραμμικότητα του συστήματος και η αβεβαιότητα των παραμέτρων. Τα δίκτυα αυτά εκπαιδεύονται με backpropagation algorithms με σιγμοειδείς συναρτήσεις σε σύνδεση με την ανεμογεννήτρια, καθώς εκπαιδεύονται με πραγματικές τιμές, και αργότερα καθορίζεται και αποτυπώνεται σε αυτά η δυναμική της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιεί το μοντέλο.
- Ενίσχυση προσωρινής σταθερότητας συστήματος ανεμογεννήτριας: Πραγματοποιείται με τον σχεδιασμό νευρωνικών δικτύων ελέγχου αποθήκευτικού χώρου υπεραγώγιμης μαγνητικής ενέργειας (SMES), που ταυτίζεται με τις ρυθμίσεις ελέγχου απλού μετατροπέα πηγής τάσης και βασίζεται σε πλάτος συντονισμού ημιτονοειδούς παλμούμετατροπέα πηγής τάσης και σε δίκτυο ελέγχου μετατροπέα DC-DCchopper. Σαν δεδομένα εισαγωγής χρησιμοποιούνται πραγματικές τιμές ταχύτητας ανέμου ενώ η εκπαίδευση γίνεται με αλγόριθμο με προσαρμογή Widrow-Hoff και σιγμοειδη με εφαπτομένη συνάρτηση ενεργοποίησης.
- Ανάλυση ευαισθησίας της απόδοσης ανεμογεννήτριας σε παραμέτρους: Για την εκπαίδευση και δοκιμή νευρωνικών δικτύων, χρησιμοποιήθηκαν οι μηνιαίες ώρες λειτουργίας ανεμογεννήτριας η αιολικού πάρκου,η εγκατεστημένη αντιδραστική ισχύς και ενέργεια που καταναλώθηκε στον μήνα αυτό καθώς και η χωρητικότητα σε KW. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων στην εξαγωγή έδειξαν ότι μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζει η απόδοση της ανεμογεννήτριας στην χωρητικότητα και στις ώρες λειτουργίας της.
- Υπολογισμό τρεμοπαιξίματος της ανεμογεννήτριας: Με πολύ μικρή απόκκλιση αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε μοντέλο υπολογισμού του τρεμοπαιξίματος με την βοήθεια δικτύων με εκπαίδευση από backpropagation algorithms με συνάρτηση ενεργοποίησης την σιγμοειδή ενώ δεδομένα εισαγωγής

χρησιμοποιήθηκαν η μέση ταχύτητα ανέμου, η ένταση στροβιλισμού, η γωνία πτερωτής και το επίπεδο του φορτίου. Η πρόβλεψη αφορά φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας.

Έλεγχο ισχύος της ανεμογεννήτριας: Πολλά μοντέλα με βάση τα νευρωνικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για τον έλεγχο της ισχύος της ανεμογεννήτριας με σκοπό την μέγιστη εξαγωγή ενέργειας. Σε ένα μοντέλο που έχει σαν αποτέλεσμα εξόδου την επιτάχυνση του ανέμου, υπολογίζεται η ταχύτητα ανέμου για τον υπολογισμό της εξαγόμενης αιολικής ισχυος. Σαν δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν η ισχύς της γεννήτριας και η ταχύτητα της πτερωτής ωr. Ένα άλλο μοντέλο χρησιμοποιεί δεδομένα εισαγωγής την ταύτητα της πτερωτής, την ισχύ της γεννήτριας και την γωνία κλυδωνισμών και εξάγει την εκτιμώμενη ταχύτητα του ανέμου. Τα μοντέλα αυτά εκπαιδεύονται με backpropagation και momentum algorithms ενώ σαν συναρτήσεις ενεργοποίησης χρησιμοποιούνται η γραμμική και η σιγμοειδής με εφαπτομένη.

Ασφαλώς και στην χρησιμοποίηση των νευρωνικών δικτύων στην αιολική ενέργεια υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί που πρέπει να επιβάλλονται, όπωςστον αριθμό επαναλήψεων και δεδομένων της εκμάθησης που δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλος, στο εύρος των δεδομένων εκμάθησης που πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό της λειτουργίας για την αποφυγή ή μείωση των σφαλμάτων εξαγωγής, καθώς και στις παραμέτρους τους όπως τα στρώματα (εισαγωγής, κρυφα και εξόδου),το ρυθμό εκμάθησης, τον αριθμό νευρώνων στα κρυφά στρώματα και τον συντελεστή ορμής. Π.χ. θεωρείται ότι ο βέλτιστος αριθμός νευρώνων στα κρυφά στρώματα είναι $\sqrt{m+n} + a$ με $a \in [1,10]$, όπου m ο αριθμός νευρώνων εισαγωγής, n ο αριθμός των νευρώνων εξαγωγής και α μια προσαρμοσμένη μεταβλητή. (24)

3.7 ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μελετάται στην εργασία αυτή η ανεμογεννήτρια που φέρει τον κωδικό 005. Τα VGs εγκαταστήθηκαν στα πτερύγιά της στις 21 Απριλίου 2014.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από το σύστημα παρακολούθησης και συλλογης δεδομένων της ανεμογεννήτριας, SCADA, μεταξύ της περιόδου 15 Οκτωβρίου 2013 – 24 Ιουλίου 2014. Συλλέχθηκαν μηχανολογικής και περιβαλλοντικής φύσης δεδομένα, όπως επίσης και η περιγραφή της κατάστασης της ανεμογεννήτριας. Κάθε σειρά δεδομένων αποτελείται από μία τιμή σε μορφή .csv είτε σε .pcl και τον χρόνο καταγραφής του. Η συλλογή δεδομένων γίνεται κάθε δέκα δευτερόλεπτα.

Οι παραπάνω τιμές πάρθηκαν από τους αισθητήρες μέτρησης που υπάρχουν στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας και όχι από μετεωρολογικό ιστό. Όσα από τα δεδομένα ήταν "Nanvalues" διαγράφηκαν. Επίσης διεγράφηκαν όσα δεδομένα χαρακτηρίζονται "Comm Error", "Maintenance", "Fault", και "Curtailed" ενώ όσα χαρακτηρίζονται ως "Normal Operations", "Generating", ή "Ready" χρησιμοποιήθηκαν.Επίσης διεγράφησαν δεδομένα που δημιούργούσαν μια διακεκριμένη μπάντα ισχύος στα 2MW και δεδομένα με μηδενική τιμή.Από τα δεδομένα με μηδενική τιμή δεν διεγράφηκε ένα μικρό κλάσμα στην περιοχή της ταχύτητας εισόδου για την καλύτερη διαχείρηση από το νευρωνικό δίκτυο των δεδομένων. Τα υπόλοιπα κανονικοποιήθηκαν στην κλίμακα 0 εως 1 διαιρώντας με την μέγιστη τιμή του σετ, κάθε ένα.

Ως δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν: Ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του ανέμου της προηγούμενης στιγμής, η πίεση, η θερμοκρασία, το σφάλμα διεύθυνσης του δρομέα, οι γωνίες βήματος και των τριών πτερυγίων, η ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας, η ένταση της τύρβης και η πυκνότητα του αέρα. Στόχος του νευρωνικού δικτύου ήταν η παραγόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια.

Το νευρωνικό δίκτυο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας γράφθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python 2.7 και χρησιμοποιηθηκε η βιβλιοθήκη Pybrain, κατάλληλη για αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε τη βιβλιοθήκη

pandas, ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με τη βοήθεια των βιβλιοθηκών numpyκαι scipy. Οι γραφικές παραστάσεις βασίστηκαν στην βιβλιοθηκη matplotlib.

3.7.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου διαμορφώνεται από 6 εσωτερικά επίπεδα με 20 νευρώνες το κάθε ένα, ενώ στα τέσσερα από τα έξι η σιγμοϊδής συνάρτηση είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης και στα άλλα δύο η υπερβολική εφαπτομένη. Η αρχιτεκτονική,ως η καρδιά του αλγορίθμου του μοντέλου, έτσι όπως γράφτηκε στον κώδικα παρουσιάζεται παρακάτω:

n = FeedForwardNetwork() inLayer = LinearLayer(trndata.indim) hiddenLayer1 = TanhLayer(20) hiddenLayer2 = SigmoidLayer(20) hiddenLayer3 = TanhLayer(20) hiddenLayer4 = SigmoidLayer(20) hiddenLayer5 = SigmoidLayer(20) hiddenLayer6 = SigmoidLayer(20) outLayer = SigmoidLayer(1) n.addInputModule(inLayer) n.addModule(hiddenLayer1) n.addModule(hiddenLayer2) n.addModule(hiddenLayer3) n.addModule(hiddenLayer4) n.addModule(hiddenLayer5) n.addModule(hiddenLayer6) n.addOutputModule(outLayer) in to hidden1 = FullConnection(inLayer, hiddenLayer1) hidden1_to_hidden2 = FullConnection(hiddenLayer1,hiddenLayer2) hidden2 to hidden3 = FullConnection(hiddenLayer2,hiddenLayer3) hidden3_to_hidden4 = FullConnection(hiddenLayer3,hiddenLayer4) hidden4 to hidden5 = FullConnection(hiddenLayer4, hiddenLayer5) hidden5_to_hidden6 = FullConnection(hiddenLayer5,hiddenLayer6) hidden6_to_out = FullConnection(hiddenLayer6, outLayer) n.addConnection(in to hidden1) n.addConnection(hidden1_to_hidden2) n.addConnection(hidden2 to hidden3) n.addConnection(hidden3_to_hidden4) n.addConnection(hidden4_to_hidden5) n.addConnection(hidden5 to hidden6) n.addConnection(hidden6_to_out) n.sortModules()

Εκπαίδευση του δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου που χρησιμοποιήθηκε και τοποθετήθηκαν τα vortex generators είναι η NO: 005 με εμαδόν σάρωσης του δρομέα στα 7238 m^2 . Η περίοδος συλλογής δεδομένων διήρκησε από τις 15/10/13 μέχρι τις 24/07/14. Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση-περίοδος συλλογής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση και τον έλεγχο (evaluation) του μοντέλου του νευρωνικού δικτύου διήρκησε από τις 15/10/13 μέχρι τις 21/04/14 ενώ η εφαρμογή του ως εικονική ανεμογεννήτρια (implementation) βασίστηκε στα δεδομενα που συλλέχθηκαν από τις 21/04/14 μέχρι τις 24/07/14. Τα δεδομένα εισόδου που χρειάζονται για την εξαγωγή των δεδομένων ισχύος είναι:

Δεδομένα εισόδου

Ατμοσφαιρικά	Μηχανικά
Ταχύτητα Ανέμου	Ταχύτητα Γεννήτριας
Πίεση	Σφάλμα Διεύθυνσης
Θερμοκρασία	Γωνία Βήματος Πτέρυγας 1
Πυκνότητα Αέρα	Γωνία Βήματος Πτέρυγας 2
Ένταση Τύρβης	Γωνία Βήματος Πτέρυγας 3
Προηγούμενη χρονικά τιμή ταχύτητας ανέμου	

<u>Δεδομένα Εξόδου</u>

Τιμή Στόχου: Ισχύς

Ενώ οι μέγιστες τιμές δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

А/Г	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (hPa)	Πυκνότητα (kgr/m³)	Ταχύτητα Γεννήτριας (rpm)	Ένταση Τυρβης (αδιάστατο)	Σφάλμα Διεύθυνσης Δρομέα (μοίρες)	Γωνία Βήματος Πτερυγιων 1,2,3
005	27,6	2656	49,6	982,8	1,214	1241,4	0,61	180°	270° ,270° 246,4°

Πίνακας 4.1: Μέγιστες τιμές εισόδου

Παρουσιάζονται οι μέγιστες γωνίες βήματος των πτερυγίων λόγω του pitch control ενώ λαμβάνονται επίσης πέρα από την ταχύτητα του ανέμου και μετρήσεις για την θερμοκρασία, την πίεση και πυκνότητα του αέρα (1225 kg / m³) και την ένταση της τύρβης, της στροφές ανά λεπτό της γεννήτριας καθώς και μετρήσεις της απόκλισης του δρομέα από την επικρατούσα διεύθυνση ανέμου των οποίων οι μέγιστες τιμές καταγράφονται στον παραπάνω πίνακα 4.1.

4.2 ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-EVALUATION

To evaluation έγινε με δεδομένα που συλλέχθηκαν πριν την τοποθέτηση των vortex generators, με σκοπό την ανάπτυξη ενός ακριβούς μαθηματικού αναλόγου, μέσω ενός νευρωνικού δικτύου της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο, θα μιμηθεί την ανεπηρέαστη ανεμογεννήτρια και αφού κριθεί κατά την φάση της αξιολόγησής του (evaluation phase) πως προσομοιώνει ικανοποιητικά την αιολική μηχανή, ύστερα χρησιμεύει στη σύγκριση με ακρίβεια της πρότερης κατάστασης της ανεμογεννήτριας με εκείνη μετά την τοποθέτηση των VGs (implementation phase-τοποθετούνται στη διαδικασία του implementation που θα αναλυθεί παρακάτω). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται οι δυο καταστάσεις να εξετάζονται κάτω υπό την ίδια μηχανολογική κατάσταση της ανεμογεννήτριας αλλά και μετεωρολογικές συνθήκες.

Έτσι, αναπτύχθηκε ένα πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο που προσομοιώνει την συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας πριν την τοποθέτηση των vortex generators, με σκοπό την μοντελοποίηση των καμπυλών ισχύος που δημιουργούνται και μετέπειτα χρησιμοποιούνται ως μοντέλο αναφοράς για σύγκριση. Έτσι, με λίγα λόγια δημιουργείται ένα εικονικό μοντέλο ανεμογεννήτριας.

4.2.1 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ EVALUATION

Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται με δεδομένα της περιόδου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας πριν την εγκατάσταση των Vg's, κατά τις αρχές της στατικής μοντελοποίησης όπως έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η στατική μοντελοποίηση έχει την δυνατότητα να παράγει συναρτήσεις μη εξαρτώμενες από τον χρόνο, όπως είναι οι καμπύλες ισχύος. Η καμπύλη ισχύος που παράγεται κατά την εκπαίδευση είναι αυτή όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα διασποράς (**εικόνα 4.1**), στην οποία η παραγόμενη καμπύλη έρχεται σε αντιπαραβολή με την καμπύλη πραγματικής ανεμογεννήτριας.

Συγκρίνοντας τις δυο καμπύλες φαίνεται ότι το δίκτυο προσεγγίζει την πραγματική ανεμογεννήτρια με την κύρια διαφορά ότι η καμπύλη της πραγματικής ανεμογεννήτριας εμφανίζει αρκετά περισσότερες τιμές που απομακρύνονται από τις υπόλοιπες συγκεντρωμένες, κάτι που δεν συμβαίνει σε έντονο βαθμό στην καμπύλη της εικονικής ανεμογεννήτριας (όπως φαίνεται από τις διάσπαρτες απομακρυσμένες από τον κύριο όγκο κουκκίδες), ενώ κοιτάζοντάς τες ταυτόχρονα φαίνεται ότι το δίκτυο προσπαθεί να προσεγγίσει τον μέσο όρο των τιμών της πραγματικής ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται ξεκάθαρα ιδιαίτερα στην περιοχή της ονομαστικής ταχύτητας:



Εικόνα 4.1: καμπύλες ισχύος δικτύου με μπλε και πραγματικής ανεμογεννήτριας με πράσινο, με ομαλοποιημένη την ταχύτητα

4.2.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ EVALUATION

Ο έλεγχος είναι το τελικό στάδιο της διαδικασίας του evaluation στον οποίο εξετάζεται η επιτυχία του μοντέλου και η έγκρισή του για την συνέχιση της διαδικασίας και μετέπειτα εφαρμογή του. Κατα τον έλεγχο παράγεται η συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος με ονομαστική ταχύτητα περίπου τα 12 m/s ενώ η ταχύτητα εισόδου 2 m/s:



Εικόνα 4.2: καμπύλες ισχύος του δικτύου με μπλε και πραγματικής ανεμογεννήτριας με κόκκινο κατά την διαδικασία ελέγχου

Στην σύγκριση των δυο καμπυλών, όπως και πριν η εικονική ανεμογεννήτρια εμφανίζει λιγότερες απομακρυσμένες τιμές με το δίκτυο να προσεγγίζει κυρίως τον μέσο όρο της πραγματικής ανεμογεννήτριας στην αρχή της ταχύτητας εισόδου και στην περιοχή της ονομαστικής ταχύτητας ενώ σε μια περιοχή μεταξύ ταχύτητας εισόδου και ονομαστικής εμφανίζονται αρκετές απομακρυσμένες τιμές και στις δυο καμπύλες. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι δυο αυτές καμπύλες κατά την διαδικασία ελέγχου, ξεχωριστά για καλύτερη παρατήρηση με ονομαστική ταχύτητα 12 m/s:



Εικόνα 4.3: εικονική καμπύλη ισχύος του δικτύου κατά την διαδικασία ελέγχου



Εικόνα 4.4: πραγματική καμπύλη της ανεμογεννήτριας στην διαδικασία ελέγχου του δικτύου

Καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή συμπερασμάτων και προσέγγιση ενός ικανοποιητικού μοντέλου αποτελεί η κατανόηση και ο υπολογισμός της τύρβης. Η ένταση της τύρβης επηρεάζει και την απόδοση ισχύος της ανεμογεννήτριας άρα επηρεάζει κατά συνέπεια και την εξαγωγή δεδομένων για την μοντελοποίηση της εργασίας. Τυρβώδης ροή ονομάζεται η ροή του αέρα στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ), το χαμηλότερο μέρος της τροπόσφαιρας δηλαδή που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της γης και επηρεάζεται πολύ έντονα από αυτήν, η οποία χαρακτηρίζεται από χαώδεις μεταβολές της ροής του αυτής. Γι'αυτον τον λόγο και η μελέτη της τύρβης γίνεται μόνο με τα στατιστικά χαρακτηριστικά της καθώς δεν είναι εύκολη η μελέτη της λόγω των τυχαίων και απότομων αλλαγών και της συνεχούς μεταβολής της. Η ύπαρξη της τύρβης προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου που επηρεάζουν την περιστροφή των πτερυγίων. Εμφανίζονται μέχρι και ριπές ανέμου που αποσταθεροποιούν την ομαλή λειτουργία και περιστροφή. Στις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου που προσεγγίζουν την ταχύτητα εξόδου ενεργοποιείται το pitch control σαν προσπάθεια της ανεμογεννήτριας να αντισταθεί στις υψηλές ταχύτητες και να συνεχίζει την λειτουργία της με αποτέλεσμα να εμφανίζει η περιστροφή των πτερυγίων αποταθεροποίηση.

Οι διαταράξεις στην ομαλή περιστροφή και λειτουργία των πτερυγίων φαίνεται στο διάγραμμα 4.5, στο οποίο εμφανίστηκαν κυρίως στις πιο υψηλές ταχύτητες γύρω από την ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, λόγω της ενεργοποίησης του pitch control μετά τα 12 m/s, όπως φαίνεται στην μεγαλύτερη πυκνότητα μετρήσεων αλλά με μικρότερες τιμές, ενώ στις χαμηλότερες ταχύτητες λόγω της τυρβώδους ροής που όμως είναι σχετικά μικρότερες με εξίσου όμως μεγάλη, ίσως και λίγο μεγαλύτερη ένταση. Δεν έχει καταγραφεί η τύρβη για δεδομένα πριν τα 2 m/s αφου είναι η ταχύτητα εισόδου και δεν έχει αρχίσει ο δρομέας να περιστρέφεται. Το διάγραμμα εμφανίζει σχήμα καμπάνας.



Εικόνα 4.5: Ένταση της τύρβης σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα διασποράς της έντασης της τύρβης σε συνάρτηση με την ενεργή ισχύ της ανεμογεννήτριας στην παρακάτω εικόνα, τύρβη εντοπίστηκε κυρίως στις χαμηλές και τις υψηλές τιμές της ισχύος ενώ στις μέσες τιμές σε μικρότερη συχνότητα. Στις τιμές δηλαδή, όπως και πριν της ισχύος που παράχθηκε από ταχύτητες κοντά στην εισόδου και κυρίως στην ονομαστική με την μεγαλύτερη ένταση τύρβης να εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα διασποράς έντασης τύρβης συναρτήσει της ενεργούς ισχύος

Μέσω των διαγραμμάτων αυτών, γίνεται αντιληπτό ότι σε μια σημαντική περίοδο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, υπάρχουν παρεμβολές στην ομαλή περιστροφή των πτερυγίων της και κατά συνέπεια εκπτώσεις στην αποδιδόμενη ενέργεια είτε λόγω της τυρβώδους ροής που οφείλεται σε φυσικά αίτια της κίνησης του ανέμου στα χαμηλά ύψη, είτε λόγω του pitch control που είναι μηχανικός παράγοντας, αναγκαίος για την διεύρυνση του εύρους των ταχυτήτων του ανέμου που θα εκμεταλλευτεί η ανεμογεννήτρια, ο οποίος όμως αποσταθεροποιεί την συνέχεια στην λειτουργία του. Οπότε ιδιαίτερη προσοχή για την βελτίωση της απόδοσης των ανεμογεννητριών, δίνονται και στην αντιμετώπιση αυτής της παραμέτρου, η οποία επηρεάζει το συγκεκριμένο μοντέλο που προσομοιώνει την απλή ανεμογεννήτρια, σε μεγάλο βαθμό.

4.2.3 ΕΞΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Ο έλεγχος του μοντέλου για την καλή προσέγγιση της ανεμογεννήτριας (και αν αυτό είναι ικανοποιητικό για την μετέπειτα εφαρμογή του) επιβεβαιώνεται από την εξαγωγή των δεδομένων ισχύος του δικτύου και αν αυτά προσεγγίζουν τα δεδομένα της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Το πλήθος των δεδομένων που πάρθηκαν και εξήχθησαν και η διαφορά που παρουσίασε το δίκτυο με την πραγματική ανεμογεννήτρια φαίνεται στο παρακάτω ιστόγραμμα.



Εικόνα 4.7: Ιστόγραμμα πλήθους τιμών ενεργούς ισχύος σε νευρωνικό δίκτυο με μπλε και πραγματική ανεμογεννήτρια με κόκκινο

Το πλήθος των δεδομένων είναι παρόμοιο στις περισσότερες τιμές της ενεργούς ισχύος με μικρές διαφορές σε κάποιες τιμές εκτός από πέρα από τα 2500 KW όπου το δίκτυο δεν εξήγαγε τιμές καθώς αποτελεί την ονομαστική ενέργεια της εικονικής ανεμογεννήτριας με αποτέλεσμα να μην παράγει ενέργεια πέρα από αυτή την τιμή. Το μοντέλο δηλαδή σε αυτόν τον τομέα κρίνεται αντιπροσωπευτικό στην προσομοίωση μιας πραγματικής ανεμογεννήτριας. Η διάμεσος των τιμών είναι κοντά στα 1700 KW και για το μοντέλο και για την πραγματική ανεμογεννήτριας με συτόν των τιμών είναι κοντά στα 1700 KW και για το μοντέλο και για την πραγματική



Εικόνα 4.8: Μέση τιμή δεδομένων ισχύος για πραγματική ανεμογεννήτρια και για μοντέλο

νευρωνικού δικτύου αποτυπώνεται στο σχήμα 4.8 με την τιμή να είναι περίπου ίδια κοντά στα 1500 KW, και πιο συγκεκριμένα 1432,7 KW για την εικονική ανεμογεννήτρια που προσομοιώνει το μοντέλο και 1427,54 KW για την πραγματική ανεμογεννήτρια, γεγονός που ενισχύει την αρχική εκτίμηση από την συλλογή των δεδομένων ισχύος ότι η προσέγγιση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Η παρατήρηση της μη ύπαρξης τιμών από το δίκτυο πάνω από 2500 KW φαίνεται και εδώ.

Με βάση τις παρατηρήσεις των παραπάνω διαγραμμάτων συμπληρώνεται ο πίνακας 4.2 στον οποίο φαίνονται οι διαφορές ισχύος της εικονικής ανεμογεννήτριας του δικτύου με την πραγματική στην μέση τιμή εκπαίδευσης, μέση τιμή και διάμεσο ελέγχου, τυπική απόκκλιση ελέγχου, συντελεστή μεταβλητότητας ελέγχου, ενδοτεταρτημοριακό εύρος ελέγχου και ελάχιστο με μέγιστο. Μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζει το ενδοτεταρτημοριακό εύρος ελέγχου της τάξης του 1,66% με μεγαλύτερο το εύρος της εικονικής ανεμογεννήτριας ενώ μικρότερη διαφορά εμφανίζεται στην μέση τιμή ελέγχου της τάξης του 0,36% με μεγαλύτερη την μέση τιμή και πάλι της εικονικής ανεμογεννήτριας. Τα υπόλοιπα στοιχεία εμφανίζουν διαφορές κοντά στο 1%. Η σύγκριση των στοιχείων αυτών είναι κομβικής σημασίας για τον έλεγχο του μοντέλου. Οι ποσοστιαίες διαφορές εκφράζονται με + (συν) όταν μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στην πραγματική ανεμογεννήτρια ενώ με – (πλην) όταν μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στην εικονική ανεμογεννήτρια (μοντέλο). Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης ελέγχου r είναι 0,9916.

	Εικονική Ανεμογεννήτρια	Πραγματική Ανεμογεννητρια	Διαφορά
	(Kw)	(Kw)	
Μέση Τιμή Εκπαίδευσης	1190.11	1177.89	-1.03%
Μέση Τιμή Ελέγχου	1432.70	1427.54	-0.36%
Διάμεσος Ελέγχου	1692.21	1677.99	-0.85%
Τυπική Απόκλιση Ελέγχου	911.07	919.96	0.97%
Συντελεστής Μεταβλητότητας Ελέγχου	0.636	0.644	
Ενδοτεταρτημοριακό Εύρος Ελέγχου	1906.13	1874.99	-1.66%
Ελάχιστο Ελέγχου	5.93	0	
Μέγιστο Ελέγχου	2499.34	2633.99	
Συντελεστής Αυτοσυσχέτισης Ελέγχου r	0.9916		

Πίνακας 4.2: Σύγκριση τιμών εκπαίδευσης και ελέγχου εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι διαφορές της απόδοσης της εικονικής με την πραγματική ανεμογεννήτρια στις διάφορες ταχύτητες του ανέμου όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται μεταξύ των 10 m/s και 12m/s, λίγο πριν δηλαδή την ονομαστική ταχύτητα. Παρόμοιο πλήθος διαφορών βέβαια εντοπίζεται σε όλο το εύρος των ταχυτήτων.



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα διαφορών απόδοσης ισχύος εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου

Η χρονική εξέλιξη της απόδοσης ισχύος των δυο ανεμογεννητριών αποτυπώνεται στην επόμενη εικόνα. Όπως φάινεται ακολουθούν την ίδια χρονική πορεία με μικρές τιμές στην αρχή μέχρι να αυξηθεί η ταχύτητα ανέμου για να φτάσει την ονομαστική και μετέπειτα ίδιες και μεγάλες πτώσεις και εξάρσεις με ακριβώς ίδια συχνότητα με λίγες διαφορές σε κάποιες τιμές. Ακόμα καλύτερα αποτυπώνεται η διαφορά τους στην πιο κάτω εικόνα.



Εικόνα 4.10: Χρονική εξέλιξη απόδοσης εικονικής ανεμογεννήτριας με μπλε και πραγματικής με κόκκινο



Εικόνα 4.11: Χρονική διαφορά απόδοσης ισχύος της εικονικής με την πραγματική ανεμογεννήτρια

Σκοπός της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες είναι η παραγωγή ενέργειας και πιο ολοκληρωμένη εικόνα αυτής είναι η ετήσια παραγωγή ενέργειας (AEP), η οποία μετράται σε κιλοβατώρες (KWh). Έτσι, επιβεβλημένη για τον έλεγχο του μοντέλου του δικτύου είναι και η σύγκριση των τιμών του AEP που καταμετρείται για την πραγματική ανεμογεννήτρια και που υπολογίζεται για το μοντέλο που προσομοιώνει την εικονική ανεμογεννήτρια. Η ετήσια παραγωγή ενέργειας υπολογίστηκε με μέση ταχύτητα ανέμου 8,274 m/s στο εύρος 2,07-16,3 m/s και πυκνότητα αέρα ρ=1,225 kg/m^3. Η πραγματική ανεμογεννήτρια έχει AEP 8068141,79 KWh ενώ η εικονική 8126024,75 KWh, κατά 57882,96 KWh δηλαδή παραπάνω από την πραγματική. Το πηλίκο της διαφοράς των AEP των ανεμογεννητριών με το AEP της πραγματικής ανεμογεννήτριας, δηλαδή AEP διαφορά / AEP πραγματικής ανεμογεννήτριας, ονομάζεται σχετικό AEP και βρίσκεται στο -0,71%. Στις ταχύτητες από 14-16,3 m/s τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά με το μοντέλο να προσεγγίζει πολύ καλύτερα την ανεμογεννήτρια, αφού σε αυτό το εύρος ταχυτήτων, τα AEP των δυο ανεμογεννητριών έχουν πολύ μικρότερη διαφορά και ίση με 367,74 KWh. Εδώ τα AEP είναι πολύ μειωμένα σε σχέση με το εύρος ταχυτήτων 2,07-16,3 m/s με μεγαλύτερο αυτό της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Τα στοιχεία αυτά παραθέτονται συγκεντρωμένα στον παρακάτω πίνακα:

	Εικονική Ανεμογεννήτρια	Πραγματική Ανεμογεννήτρια	
AEP	8126024.75 KWh	8068141.79 KWh	
ΑΕΡ διαφορά (πραγματικη-εικονική)	-57882.96 KWh (57.9 MWhσε απόλυτη τιμή)		
ΑΕΡ σχετικό (διαφορά/πραγματική)	-0.00712 or -0.71%		
AEP [14m/s – 16.3m/s]	1253963.44 kWh	1254331.19 kWh	
ΑΕΡ διαφορά [14m/s – 16.3m/s]	367.74 kWh	I	
ΑΕΡ σχετικό [14m/s – 16.3m/s]	0.00029 or 0.03%		

Πίνακας 4.3: Σύγκριση ΑΕΡ εικονικής με πραγματική ανεμογεννήτρια

4.2.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ (31)

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των εξαγωγών του μοντέλου και της πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας ανεμογεννήτριας απαιτείται η σύγκρισητων τιμών που εξήχθησαν με πραγματικές τιμές που δίνονται από τις μετρήσεις και την μελέτη μιας ανεμογεννήτριας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στατιστικά σφάλματα που περιγράφουν τις μέσες αποκλίσεις μεταξύ προβλέψεων και μετρήσεων. Ο μέσος όρος λαμβάνεται κανονικά για χρονικό διάστημα πάνω από ένα έτος έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι εποχές και να καλυφθούν θεωρητικά όλες οι μετεωρολογικές καταστάσεις. Η χρησιμοποίηση των σφαλμάτων αυτών απαιτεί ότι τα δεδομένα έχουν ήδη καταγραφεί πάνω από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα ώστε να λαμβάνει υπ'όψιν το παρελθόν το οποίο αντιπροσωπεύεται από το σφάλμα πρόβλεψης ενώ η αβεβαιότητα θεωρητικά το σφάλματα των μελλοντικών προβλέψεων το οποίο είναι εξ'ορισμού άγνωστο. Αν τα στατιστικά αυτά σφάλματα είναι στάσιμα,τότε το σφάλμα πρόβλεψης χρησιμοποιείται ως εκτίμηση της αβεβαιότητας.

Τα σφάλματα που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση, αξιολόγηση και εκτίμηση βαθμού ομοιότητας δυο χρονικών σειρών βασίζεται στην διαφορά της πρόβλεψης από το μοντέλο χ_p με τις μετρήσεις που υπάρχουν χ_m , στην συγκεκριμένη περίπτωση από την ανεμογεννήτρια που μελετάται, διαφορά η οποία υπολογίστηκε προηγουμένως, δηλαδή:

$$\varepsilon = \chi_p - \chi_m \tag{4.1}$$

Σημαντικό για την αξιολόγηση της ακρίβειας ενός αποτελέσματος είναι το σφάλμα rmse (ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος) το οποίο υπολογίστηκε 119.26 KW ορίζεται :

$$rmse = \sqrt{\varepsilon^2}$$
(4.2)

Eνώ ισχύει ο τύπος
$$rmse^2 = bias^2 + sde^2 = bias^2 + sd(bias)^2 + dispersion^2$$
 (4.3)

με μέση τιμή σφάλματος $bias = \varepsilon$, την διακύμανση $sde = \sigma(\varepsilon)$, σφάλματα πλάτους που αφορούν τα σημεία που ενώ έχουν απεικονισθεί με σωστή την ταχύτητα του ανέμου στο διάγραμμα, δεν ταυτοποιείται στην σωστή τιμή απόδοσης ισχύος $sd(bias) = \sigma(\chi_p) - \sigma(\chi_m)$ και η διασπορά (σφάλματα φάσης, το αντίστροφο των σφαλμάτων πλάτους, που αφορούν δηλαδή σημεία που έχουν σωστή τιμή απόδοσης ισχύος αλλά όχι ταχύτητα ανέμου στο διάγραμμα) $dispersion = \sqrt{2\sigma(\chi_p)\sigma(\chi_m)(1-r_{p,m})}$, με $r_{p,m}$ ο συντελεστής συσχέτισης των δυο χρονοσειρών. Με βάση όλων των παραπάνω εξάγεται ο παρακάτω πίνακας 4.4. Το συνολικό σφάλμα του back propagation είναι 0.06%.

		Ανα Μέγιστη Απόλυτη Τιμή [Power]
Back Propagation's total error	0.000693351132216 ή 0.06 %	
Root Mean Square Error	119.26 (Kw)	0.0449 or 4.5%
Mean Absolute Error	76.44 (Kw)	0.0288 or 2.9%

 Πίνακας 4.4: Τιμές στατιστικών
 Error Variance= sde² =14195.32

 σφαλμάτων στην μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας
 RMSE²
 Bias²
 Sd(Bias)²
 Dispersion²

 14221.91
 26.58
 79.04
 14116.28

4.2.5 ΚΑΜΠΎΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΕΙΚΟΝΙΚΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Εξάγοντας τα δεδομένα ισχύος του νευρωνικού δικτύου, μπορεί να σχηματιστεί η καμπύλη ισχύος της εικονικής ανεμογεννήτριας για το τελικό στάδιο του ελέγχου του δικτύου. Συγκεντρώνοντας τα δεδομένα σχηματίζεται η καμπύλη, η οποία έρχεται σε αντιπαραβολή με την καμπύλη της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι δυο καμπύλες ισχύος σχεδόν ταυτίζονται, με κάποιες μικρές διαφορές στα 6 m/s και λίγο πιο πάνω από τα 12 m/s οι οποίες δεν χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας. Στην αμέσως επόμενη εικόνα, σε συνδυασμό με τις καμπύλες ισχύος φαίνονται και οι δυο συντελεστές απόδοσης ισχύος C_n , θεμελιώδες μέγεθος που έχει αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια το οποίο μεταβάλλεται με την ταχύτητα και συγκεκριμένα είναι αντιστρόφως ανάλογα λόγω της παρουσίας της ταχύτητας του ανέμου στον παρονομαστή του συντελεστή στην σχέση 2.9, που όπως αποτυπώνονται στο διάγραμμα, ειδικά στις μεγαλύτερες ταχύτητες ταυτίζονται απόλυτα και εμφανίζουν μια σχετική γραμμικότητα. Αντίθετα στις ταχύτητες 8-10 m/s, εμφανίζουν μια κυματοειδή συμπεριφορά, δηλαδή όχι σταθερή μείωση του συντελεστή με την αύξηση της ταχύτητας. Αυτό συμβαίνει καθώς ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται από τον λόγο της γραμμικής ταχύτητας των ακροπτερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου. Οπότε με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου μειώνεται ο λόγος και κατά συνέπεια ο συντελεστής. Στις ταχύτητες όμως που εμφανίζει κυματοειδή συμπεριφορά, οι παρεμβολές στην ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας μέσω της μη ομαλής περιστροφής των πτερυγίων εξ'αιτίας της έντονης επιρροής της τυρβώδους ροής και των θορύβων, διαταράσσουν την γραμμικότητα. Ελέγχοντας εν κατακλείδει τις δυο καμπύλες ισχύος, το εικονικό μοντέλο που δημιούργησε το νευρωνικό δίκτυο κρίνεται αντιπροσωπευτικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο στάδιο που είναι το implementation.





Εικόνα 4.13: καμπύλες ισχύος και συντελεστής απόδοσης ανεμογεννήτριας Cp με διακεκομμένη, κόκκινη για πραγματική και μπλε για εικονική

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ-IMPLEMENTATION

4.3.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΤΟ IMPLEMENTATION

Μετά τον έλεγχο του μοντέλου έπεται το επόμενο στάδιο της διαδικασίας, το implementation, η εφαρμογή του μοντέλου σε μετά-vg δεδομένα. Χρησιμοποιούνται τα ίδια δεδομένα εισόδου δηλαδή που καταγράφηκαν στην πραγματική ανεμογεννήτρια μετά την τοποθέτηση των vortex generators, στο μοντέλο με αποτέλεσμα να γίνει σύγκριση της πραγματικής ανεμογεννήτριας με την άθικτη χωρίς vortex generators εικονική, υπό τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, θα επιβεβαιωθεί αν επηρεάζει την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας η τοποθέτηση των vortex generators, στο μοντέλο με αποτέλεσμα να γίνει σύγκριση τον τρόπο, συ τρόπο, θα επιβεβαιωθεί αν επηρεάζει την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας η τοποθέτηση των vortex generators, σε τι βαθμό και με ποιο τρόπο.

Το νέο διάγραμμα διασποράς εκπαίδευσης του μοντέλου είναι το εξής:



Εικόνα 4.14: Διάγραμμα διασποράς εκπαίδευσης μοντέλου με μπλε με τα νέα δεδομένα εισόδου σε σχέση με πραγματική ανεμογεννήτρια με vortex generators με πράσινο

Ενώ μετά την εκπαίδευση το νέο διάγραμμα διασποράς των δυο ανεμογεννητριών θα είναι:



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα διασποράς πραγματικής ανεμογεννήτριας με Vgs με κόκκινο και εικονικής του μοντέλου με μπλε

Όπως φαίνεται από τα δυο διαγράμματα,ενώ έχουν οι δυο ανεμογεννήτριες αρκετές κοινές τιμές, η ενισχυμένη με vortex generators ανεμογεννήτρια (πραγματική ανεμογεννήτρια), σε τιμές της ταχύτητας μεγαλύτερες της ονομαστικής εμφανίζει πολλές τιμές μεγαλύτερης απόδοσης από την απλή εικονική και κάποιες τιμές μικρότερης απόδοσης σε σχέση με την εικονική στις χαμηλές ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα εισόδου.

Για την ακόμα καλύτερη παρατήρηση των διαγραμμάτων που σχηματίζονται για την κάθε ανεμογεννήτρια, παρακάτω παραθέτονται τα δυο διαγράμματα ξεχωριστά:



Εικόνα 4.16: Διάγραμμα διασποράς της εικονικής ανεμογεννήτριας που δημιουργήθηκε από το μοντέλο



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα διασποράς πραγματικής ανεμογεννήτριας ενισχυμένη με τα vortex generators

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ένταση της τύρβης μετά την τοποθέτηση των vortex generators. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά του διαγράμματος διασποράς της έντασης με το αντίστοιχο πριν την τοποθέτηση των Vgs καθώς το σχήμα καμπάνας που υπήρχε πριν έχει δώσει την θέση του σε ένα συνεχές και πιο ομοιόμορφο μοτίβο. Από τα νέα διαγράμματα διασποράς της έντασης της τύρβης συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και συναρτήσει της απόδοσης ενέργειας που εξήχθησαν, παρατηρείται η τεράστια αύξηση της εμφάνισής της σε όλες τις ταχύτητες και αποδόσεις.



Εικόνα 4.18: Διάγραμμα διασποράς έντασης τύρβης συναρτήσει της ταχύτητας στην ενισχυμένη ανεμογεννήτρια



Εικόνα 4.19: Διάγραμμα διασποράς ένταση τύρβης συναρτήσει ενεργούς ισχύος

4.3.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟ IMPLEMENTATION

Οι διαφορές στην απόδοση ενέργειας της ενισχυμένης ανεμογεννήτριας με την απλή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Όπως παρατηρείται η εφοδιασμένη με Vgs ανεμογεννήτρια εμφανίζει περισσότερες τιμές στις χαμηλές ενέργειες (0-500 Kw), δουλεύει δηλαδή καλύτερα η ανεμογεννήτρια στις χαμηλές ταχύτητες και αποδίδει ισχύ που είναι και το ζητούμενο εκμεταλλευόμενη και σε πολύ καλύτερο βαθμό και την τυρβώδη ροή στις χαμηλές ταχύτητες. Επίσης φαίνεται να εμφανίζει και ενέργειες σε τιμές πάνω από τα 2500 Kw (2500-2600 Kw) σε αντίθεση με την απλή ανεμογεννήτρια. Αυτό οφείλεται στο saturation, φαινόμενο που προκύπτει λόγω της αδυναμίας του νευρωνικού δικτύου να αντιληφθεί ότι η βελτιωμένη με τα vortex generators ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε χαμηλότερες ταχύτητες οπότε εμφανίζεται αυτό το αποτέλεσμα για την πραγματική ανεμογεννήτρια και αντιμετωπίζεται με διάφορους τρόπους. Γεγονός είναι πως η ενισχυμένη ανεμογεννήτρια λειτουργεί πλέον σε μέσες ταχύτητες πολύ πιο έντονα αποδίδοντας και τις αντίστοιχες τιμές ισχύος σε μεγαλύτερη συχνότητα, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό καθώς έτσι αποφεύγεται το pitch control και άρα η αποσταθεροποίηση της λειτουργίας.



Εικόνα 4.20: Ιστόγραμμα απόδοσης ισχύος της πραγματικής ανεμογεννήτριας με κόκκινο σε σύγκριση με την εικονική με μπλε

Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στην παρακάτω εικόνα με την αύξηση της μέγιστης τιμής της απόδοσης στην πραγματική ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 4.21: Μέσες τιμές απόδοσης ισχύος και μέγιστες τιμές πραγματικής ανεμογεννήτριας και εικονικής

Όλα τα παραπάνω στοιχεία καταγράφονται με αριθμούς, συγκριτικά για την πραγματική ανεμογεννήτρια με τα vortex generators που έχουν ληφθεί τα στοιχεία και για το μοντέλο που εξήγαγε τα αποτελέσματα για ανεμογεννήτρια χωρίς τα vortex generators κάτω από τις ίδιες συνθήκες, στον παρακάτω πίνακα. Μεγαλύτερη διαφορά εμφανίζεται στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος σύγκρισης της τάξης του 4.06% με μεγαλύτερο αυτό του μοντέλου. Η μέση τιμή εκπαίδευσης του μοντέλου είναι 1307.32 και της ανεμογεννήτριας 1298.41, εμφανίζεται μια μικρή διαφορά της τάξης του 0.69%. στο μοντέλο εμφανίζονται και μεγαλύτερη μέση τιμή και διάμεσο σύγκρισης, κατά 2.26% και 2.88% αντίστοιχα σε σχέση με την ενισχυμένη ανεμογεννήτρια. Μεγαλύτερη τιμή εμφανίζει το μοντέλο και στην τυπική απόκλιση σύγκρισης, κατά 0.55% μεγαλύτερη από την ενισχυμένη ανεμογεννήτρια. Οι τιμές αυτές όμως των διαφορών δεν είναι οι τελικές καθώς πρέπει να διορθωθούν με βάση τις τιμές των διαφορών που είχαη προκύψει στο evaluation και πρέπει να προσμετρηθούν στο αποτέλεσμα ως offset. Έτσι προκύπτουν οι αναπροσαρμοσμένες διορθωμένες διαφορές. Μεγαλύτερη μεταβολή εμφανίζεται στο ενδοτεταρτημοριακό εύρος σύγκρισης με διορθωμένη διαφορά να διαμορφώνεται στο -1.59%. Στην μέση τιμή εκπαίδευσης η νέα διαφορά αλλάζει πρόσημο υπέρ της τροποποιημένης γεννήτριας και γίνεται 0.25% ενώ η διαφορά στη μέση τιμή σύγκρισης διαμορφώνεται στο -1.73%, στην διάμεσο σύγκρισης -1.12% και στην τυπική απόκλιση σύγκρισης -1.67%. Η ανεμογεννήτρια εμφανίζει μεγαλύτερο συντελεστή μεταβολής σύγκρισης με τιμή 0.817 έναντι 0.803 του μοντέλου, ενώ παρουσιάζει ελάχιστο σύγκρισης 0 και μέγιστο 2656, με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου να είναι 6.48 και 2500.79, τιμές δηλαδή αρκετά μικρότερες της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Τέλος, ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης σύγκρισης r είναι 0.9915.

	Μοντέλο	Τροποποιημένη Ανεμογεννήτρια	Διαφορά	Διορθωμένη
	(Kw)	(Kw)		Διαφορά
Μέση Τιμή Εκπαίδευσης	1307.32	1298.41	-0.69%	+0.25%
Μέση Τιμή Σύγκρισης	997.69	975.68	-2.26%	-1.73%
Διάμεσος Σύγκρισης	830.27	807.00	-2.88%	-1.12%

Τυπική Απόκλιση Σύγκρισης	801.64	797.25	-0.55%	-1.67%
Συντελεστής Μεταβολής	0.803	0.817		
Συγκρισης				
Ενδοτεταρτημοριακό Εύρος	1309.65	1258.50	-4.06%	-1.59%
Σύγκρισης				
Ελάχιστο Σύγκρισης	6.48	0		1
Μέγιστο Σύγκρισης	2500.79	2656		
Συντελεστής Αυτοσυσχέτισης	0.9915			
Σύγκρισης r				

Πίνακας 4.5: Τιμές σύγκρισης πραγματικής ανεμογεννήτριας με εξαγόμενο μοντέλο

Οι δυο ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν παρόμοιες χρονικές εξελίξεις στην απόδοση ισχύος τους όπως φαίνεται στην εικόνα 4.23. Οι αποδόσεις ισχύος αυξομειώνονται με παρόμοια συχνότητα με μικρές διαφορές με την πάροδο του χρόνου, οπότε η τοποθέτηση των vortex generators δεν επηρεάζει τόσο τον τρόπο που μεταβάλλεται η απόδοση ισχύος αλλά κυρίως την τιμή της απόδοσης.







Εικόνα 4.23: Διαφορά χρονικής εξέλιξης των αποδόσεων ισχύος των ανεμογεννητριών

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις διαφορές της ανεμογεννήτριας μετά την τοποθέτηση των vortex generators με το μοντέλο στην απόδοση ισχύος στις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Οι διαφορές εστιάζονται κυρίως κοντά στις ταχύτητες των 12 m/s που είναι και η ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Κυριότερος λόγος εμφάνισης των διαφορών, κυρίως σε ταχύτητες γύρω από την ονομαστική είναι το pitch control που με την



Εικόνα 4.24: Διαφορά απόδοσης των δυο ανεμογεννητριών στις διάφορες ταχύτητες ανέμου

τοποθέτηση των Vgs δεν ενεργοποιείται, καθώς αυτά διορθώνουν την αεροδυναμική αστάθεια των πτερυγίων με αποτέλεσμα να μην διακόπτεται η ομαλή περιστροφή τους.

Οι ετήσιες παραγωγές ενέργειας (AEP) του μοντέλου σε σχέση με την ενισχυμένη ανεμογεννήτρια που με μελετάται διαφέρουν. Το AEP του της πραγματικής ανεμογεννήτριας μετρημένο με μέσο άνεμο 8.274 m/s στο εύρος 2.07-16.3 m/s και πυκνότητα αέρα 1.225 kg/m³, υπολογίστηκε 7632685 KWh, ενώ το αντίστοιχο του μοντέλου 7789846.5 KWh. Παρατηρήθηκε δηλαδή ότι το AEP του μοντέλου είναι μεγαλύτερο κατά περίπου 157.2 MWh, γεγονός που οφείλεται στο saturation. Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει αυτή η διαφορά και μάλιστα η πραγματική ανεμογεννήτρια υπερτερεί αφου αποδίδει πολύ καλύτερα σε μικρότερες ταχύτητες. Η διαφορά τους δηλαδή (AEP πραγματικής – AEP μοντέλου) είναι -157.2 KWh, ενώ το AEP σχετικό, που ορίζεται ως AEP διαφορά/AEPπραγματικής, ισούται με -0.0206 ή αλλιώς -2.06% με διορθωμένη λόγω εκπαίδευσης στο evaluation - 1.3%. Οι αντίστοιχες τιμές σε ταχύτητες 14-16.3 m/s, μεγαλύτερες δηλαδή ταχύτητες ανώτερες από την ονομαστική μέχρι την ταχύτητα εξόδου, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά υπέρ της πραγματικής ανεμογεννήτριας. Το μοντέλο εμφανίζει AEP 1274548.39 KWh ενώ η ενισχυμένη με Vgs ανεμογεννήτρια 1276761.11 KWh, η τοποθέτηση των Vgs δηλαδή επέφερε σε αυτές τις ταχύτητες μια αύξηση στο AEP των 2212.71 KWh. Το αντίστοιχο σχετικό AEP υπολογίστηκε 0.00173 ή αλλιώς 0.17%, με πρόσημο δηλαδή θετικό σε σχέση με το αντίστοιχο στις μέσες ταχύτητες και τελική διορθωμένη διαφορά 0.15%.

	Μοντέλο	Πραγματική Ανεμογεννήτρια	
AEP	7789846.5 KWh	7632685.9 KWh	
ΑΕΡ διαφορά	- 157160.56 KWh (157.2 MWh σε απόλυτη τιμή)		
ΑΕΡ σχετικό(ΑΕΡδιαφορά/ΑΕΡ πραγματικής)	-0.0206 or -2.06%	Διορθωμένη διαφορά -1.3%	
AEP [14m/s – 16.3m/s]	1274548.39 kWh	1276761.11 kWh	
ΑΕΡ διαφορά [14m/s – 16.3m/s]	2212.71 kWh		
ΑΕΡ σχετικό [14m/s – 16.3m/s]	0.00173 or 0.17%	Διορθωμένη διαφορά 0.15%	

Πίνακας 4.6: Σύγκριση ΑΕΡ πραγματικής ανεμογεννήτριας με μοντέλου

4.3.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ IMPLEMENTATION

Ο καλύτερος τρόπος για την παρατήρηση των διαφορών της ανεμογεννήτριας με την τοποθέτηση των vortex generators είναι η δημιουργία των καμπυλών ισχύος. Με τον σχεδιασμό τους και την σύγκρισή τους παρατηρείται διαφορά αρκετά εντονότερη από τις καμπύλες στο evaluation που δεν υπήρχαν Vgs. Η διαφορά εστιάζεται κυρίως στις μέσες ταχύτητες και στις ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα εξόδου. Όπως παρατηρήθηκε προηγουμένως, η καμπύλη του μοντέλου υπερισχύει της πραγματικής στις μέσες ταχύτητες ενώ στις υψηλές το αντίθετο. Εμφανής διαφορά παρουσιάζεται και στις καμπύλες των συντελεστών απόδοσης όπου και εκει το μοντέλο στις μέσες ταχύτητες εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές και στις υψηλές ταχύτητες ταυτίζονται, ενώ σε σχέση με το evaluation έχουν χάσει την κυματοειδή συμπεριφορά που εμφάνιζαν στις ταχύτητες 8-10 m/s, τα vortex generators βοήθησαν δηλαδή στην ελαχιστοποίηση της επίδρασης της τυρβώδους ροής στα πτερύγια και στην ομαλοποίηση της περιστροφής τους.



Εικόνα 4.25: Καμπύλη ισχύος πραγματικής ανεμογεννήτριας με κόκκινο και μοντέλου με μπλε



Εικόνα 4.26: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών στις μέσες ταχύτητες και καμπύλες συντελεστών απόδοσης με διακεκομμένη της πραγματικής με κόκκινο και μοντέλου με μπλε

4.4 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ VGS

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.27) παρουσιάζεται η συχνότητα με την οποία λειτουργεί η ανεμογεννήτρια για κάθε τιμή ταχύτητας ανέμου, πριν και μετά την τοποθέτηση των vortex generators. Είναι εύκολα αντιληπτό από το διάγραμμα ότι η ενισχυμένη με τα Vgs ανεμογεννήτρια λειτουργεί με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα στις μικρές και μέσες ταχύτητες σε σχέση με την απλή ανεμογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, το 75% σχεδόν των ταχυτήτων που παρατηρήθηκαν είναι μικρότερο των 10 m/s. Στο αντίστοιχο διάγραμμα της ετήσιας παραγωγής ενέργειας (AEP) για κάθε ταχύτητα ανέμου (εικόνα 4.28) εξάγεται το ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή τα vortex generators βοηθούν την ανεμογεννήτρια το ίδιο συμπέρασμα, ότι δηλαδή τα vortex generators βοηθούν την ανεμογεννήτρια να λειτουργεί περισσότερο στις μέσες ταχύτητες με συνέπεια να παράγεται και περισσότερη ενέργεια στις ταχύτητες αυτές και πιο συγκεκριμένα, στις ταχύτητες μέχρι 10 m/s υπάρχει 44.7% αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Έτσι φαίνεται ότι τα Vgs μεταβάλλουν την κατανομή του ανέμου.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι άκρως σημαντική καθώς λειτουργώντας η ανεμογεννήτρια αποδοτικότερα σε μικρότερες ταχύτητες, αποδίδει περισσότερη ενέργεια σε ταχύτητες που δεν εκμεταλλευόταν πριν και επικρατούν για μεγάλα διαστήματα, άρα η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία. Επίσης, στις υψηλές ταχύτητες για να συνεχίσουν να εκμεταλλεύονται τον άνεμο και να περιστρέφονται τα πτερύγια, ενεργοποιείται το pitch control, το οποίο τώρα αποφεύγεται με αποτέλεσμα να συνεχίζεται ομαλά η περιστροφή του δρομέα χωρίς παρεμβολές.



Εικόνα 4.24: Σχετικές συχνότητες ταχυτήτων λειτουργίας ενισχυμένης με Vgs ανεμογεννήτριας με κόκκινο και απλής με μπλε



Εικόνα 4.25: Ετήσιες παραγωγής ενέργειας για κάθε ταχύτητα ανέμου για ενισχυμένη ανεμογεννήτρια με κόκκινο και απλή (μοντέλο) με μπλε

Συνοψίζοντας, με την τοποθέτηση των vortex generators στα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, παρατηρείται μείωση της αποκόλλησης της ροής με αποτέλεσμα την μείωση των ριπών ανέμου και θορύβων και ομαλότερη περιστροφή των πτερυγίων. Με την πιο σταθερή αυτή περιστροφή επεκτείνεται η λειτουργική διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας και πολύ μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας σε μικρότερες ταχύτητες κάτω από 10 m/s (περίπου το 75% της λειτουργίας της) με την αύξηση της απόδοσης ενέργειας να υπολογίζεται πάνω από 44%. Υπενθυμίζεται ότι η ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας είναι περίπου 12 m/s. Ακόμα και στις ταχύτητες μεγαλύτερες των 14 m/s παρουσιάστηκε αύξηση της απόδοσης ενέργειας κατά 2212.71 KWh. Με την λειτουργία σε μικρότερες ταχύτητες αποφεύγεται η ενεργοποίηση του pitch control. Έτσι η ανεμογεννήτρια κερδίζει σε χρόνο λειτουργίας και αποδίδει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό.

Βιβλιογραφία

1. *Κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα.* **Κουσκουρίδης, Δημητρης.** s.l. : Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας-cemcon constructions.

2. Hau, Eric. Wind turbines. Munich : Springer, 2006.

3. **Ζωγογιάννη, Χαρούλα.** Σύνδεση ανεμογεννητριών μικρής ισχύος με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013. 356.

4. Tony Burton, Nick Jenkins, David Sharpe and Ervin Bossanyi. *Wind energy handbook.* s.l. : John Wiley & Sons, 2011.

5. engineering, The royal academy of. Wind Turbine Power Calculations. s.l. : npower renewables.

6. J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers. *Wind energy explained*. s.l. : Wiley, 2009.

7. A. Cuerva, A. Sanz-Andre's. The extended Betz-Lanchester limit. Madrid, spain : ELSEVIER, 2004.

8. *Performances of ideal wind turbine*. Haibo Jiang, Yanru Li, Zhongqing Cheng. Tianjin 300450, China : Elsevier, 2015.

9. Scott J. Johnson, C.P. "Case" van Dam and Dale E. Berg. *Active Load Control Techniques for Wind Turbines*. California : Sandia National Laboratories, 2008.

10. Bruce Stephen, Stuart J. Galloway, David McMillan, David C. Hill, and David G. Infield. *A Copula Model of Wind Turbine Performance*. s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, MAY 2011.

11. **Eichhorn, Katharina.** *The change of power curves as a function of various meteorological parameters.* Innsbruck : s.n., September 2013.

12. Internanational standards IEC 61400 power curve. s.l. : International Electrotechnical Commission.

13. **M S Mohan Raj, M Alexander and M Lydia.** *Modeling of Wind Turbine Power Curve.* India : IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011.

14. *Critical analysis of methods for mathematical modelling of wind turbines.* **Vinay Thapar, Gayatri Agnihotri , Vinod Krishna Sethi.** India : Elsevier, 2011.

15. **M. Lydia, S.Suresh Kumar, A.Immanue ISelva kumar, G.Edwin Prem Kumar.** *A comprehensive review on wind turbine powe rcurve modeling techniques.* Tamil Nadu, India : Elsevier, 2013.

16. **M.Jafarian, A.Soroudi and M.Ehsan.** *The effects of enviromental parameters on wind turbine power pdf curve.* Tehran, Iran : s.n.

17. Proving the value of Vortex Generators. San Diego, USA : Upwind solutions, 2014.

18. *Separation control by vortex generator devices in a transonic.* **Reynald Bur, Didier Coponet. Yves Carpels.** s.l. : Springer-Verlag, 2009.

19. Velte, Clara Marika Hansen, Martin Otto Laver Cavar, Dalibor. Flow analysis of vortex generators on wing sections by stereoscopic particle image velocimetry measurements. Kongens Lyngby, Denmark : Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, 2008.

20. L., Popelka. *Wind tunnel test section for airfoils and bodies.* Prague : Research Programme feasibility studies, Conference topical problems of Fluid Mechanics, Institute of Thermomechanics AS CR, 2008.

21. Linyue Gao, Hui Zhang, Yongqian Liu, Shuang Han. *Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines.* beijing : Elsevier, 2014.

22. Amanullah Choudhry, Maziar Arjomandi, Richard Kelso. *Methods to control dynamic stall for wind turbine applications*. Adelaide : Elsevier, 2015.

23. **Marinos Manolesos, Spyros Voutsinas.** *Experimental investigation of the flow past passive vortex generators on an airfoil experiencing three-dimensional separation.* Athens : Elsevier, 2015.

24. **Ata, Rasit.** *Artificial neural networks applications in wind energy: a review.* Manisa, Turkey : Celal Bayar University, Department of Electrical & Electronic Engineering, 15 April 2015.

25. Belič, Igor. Neural Networks and Static Modelling. Slovenia : Institute of Metals and Technology.

26. Yann LeCun, Leon Bottou, Genevieve B.Orr, Klaus Robert Muller. *Efficient Backprop.* Salem, USA : Springer, 1998.

27. Li Wan, Shuguo Han, Wee Keong Ng, Vincent C. S. Lee. *Privacy-Preservation for Gradient Descent Methods*. San Jose, California, USA. : s.n., August 12 2007.

28. **Shuguo Han, Wee Keong Ng, Li Wan, Vincent C.S. Lee.** Privacy-Preserving Gradient-Descent Methods. *IEEE TRANSACTIONS ON KNOWLEDGE AND DATA ENGINEERING.* JUNE 2010, Tóμ. 22.

29. Descent gradient methods for nonsmooth minimization problems in ill-posed problems. Pham Quy Muoia, Dinh Nho Hàob, Peter Maassc, Michael Pidcock. s.l. : Elsevier, 15 September 2015.

30. **Kalogirou, Soteris A.** *Artificial neural networks in renewable energy system applocations:a review.* Nicosia 2152, Cyprus : Department of Mechanical and Marine Engineering, Higher Technical Institute, 30 March 2001.

31. On the Uncertainty of Wind Power Predictions- Analysis of the Forecast accuracy and statistical distribution of *Errors*. Lange, Matthias. Oldenburg, Germany : Solar Energy Engineering, 2005.

32. Rojas, R. The Backpropagation Algorithm, Neural Networks. Berlin : Springer-Verlag, 1996.

33. Jiangshe Zhang, Nannan Ji, Junmin Liu, Jiyuan Pan, Deyu Meng. *Enhancing performance of the backpropagation algorithm via sparse response regularization*. Xian, China : M.T.Manry, 2 December 2014.