



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

***Μηχανική Μάθηση για Πρόβλεψη Ανέμου στη Διαχείριση Υποδομών:
Μελέτη Περίπτωσης στο Αιολικό Πάρκο Πλαγιά Ψήλωμα***

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: ***Φλώρα Ιωαννίδη***

Επιβλέπων Καθηγητής: ***Νικόλαος Λαγάρος, Καθηγητής, ΕΜΠ***

Ημερομηνία: ***Οκτώβριος 2025***

Περίληψη

Οι υποδομές αποτελούν έναν από τους πιο θεμελιώδεις άξονες της κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης, καθώς στηρίζουν κρίσιμες λειτουργίες που εξασφαλίζουν την ομαλή και αποδοτική λειτουργία των κοινωνιών. Η διαχείρισή τους απαιτεί αξιοπιστία, προνοητικότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών που βελτιώνουν τη λήψη αποφάσεων. Στο ενεργειακό πεδίο, η μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο και πράσινο μείγμα ενέργειας έχει καταστήσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – και ιδιαίτερα την αιολική – κεντρικό στοιχείο της στρατηγικής ενεργειακής ανάπτυξης σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από ταχεία ανάπτυξη, ωστόσο η στοχαστική φύση του ανέμου δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις για την πρόγνωση και τη διαχείριση της παραγωγής. Οι διακυμάνσεις στην ένταση και κατεύθυνση του ανέμου μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των ανεμογεννητριών, να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος μέσω απρογραμμάτιστων συντηρήσεων και να επηρεάσουν την αξιοπιστία τροφοδοσίας του δικτύου.

Παράλληλα, η μηχανική μάθηση (Machine Learning – ML) έχει γνωρίσει εντυπωσιακή ανάπτυξη, με εφαρμογές σε πλήθος τομέων όπου η ανάλυση σύνθετων και δυναμικών δεδομένων είναι απαραίτητη. Οι τεχνικές ML προσφέρουν την ικανότητα ανάλυσης μη γραμμικών σχέσεων και πρόβλεψης με υψηλή ακρίβεια, καθιστώντας τις ιδιαίτερα χρήσιμες για προβλήματα όπως η πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία επιχειρεί να γεφυρώσει αυτές τις τρεις θεματικές: τη διαχείριση υποδομών, την αιολική ενέργεια και την μηχανική μάθηση. Ο στόχος είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης τεχνικών ML για την πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου και η σύνδεση των προβλέψεων με πρακτικά εργαλεία διαχείρισης υποδομών.

Η κεντρική επιδίωξη της μελέτης είναι διττή: αφενός, να αξιολογήσει την ικανότητα σύγχρονων μοντέλων ML να παράγουν ακριβείς βραχυπρόθεσμες προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου και αφετέρου, να ενσωματώσει αυτές τις προβλέψεις σε ένα πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων που μπορεί να αξιοποιηθεί από διαχειριστές αιολικών πάρκων για τον προγραμματισμό συντήρησης και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα μελέτη επιδιώκει να ενσωματώσει την ερευνητική πρόοδο στη μηχανική μάθηση στις πρακτικές ανάγκες της διαχείρισης ενεργειακών υποδομών.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα SCADA από το αιολικό πάρκο Πλαγιά-Ψήλωμα, το οποίο βρίσκεται στην Περιοχή Δερβενοχώρια της Βοιωτίας. Τα δεδομένα αυτά αφορούν την χρονική περίοδο 2017-2025 και περιείχαν μετρήσεις ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η επεξεργασία των δεδομένων περιλάμβανε μια σειρά από βήματα για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Αρχικά, εντοπίστηκαν και διορθώθηκαν ελλειπείς τιμές (NaNs) και μηδενικές εγγραφές. Στη συνέχεια, η διεύθυνση του ανέμου μετατράπηκε σε ημιτονοειδείς συνιστώσες (ημίτονο και συνημίτονο), ώστε να αποφευχθεί η ασυνέχεια που παρουσιάζει η γωνιακή μέτρηση (π.χ. μετάβαση από 359° σε 0°).

Για την πρόγνωση εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα μηχανικής μάθησης, αντιπροσωπευτικά διαφορετικών προσεγγίσεων: το Long Short-Term Memory (LSTM), που ανήκει στην κατηγορία των αναδρομικών νευρωνικών δικτύων και είναι ικανό να συλλαμβάνει μακροχρόνιες εξαρτήσεις σε χρονοσειρές· το Neural Hierarchical Interpolation for Time Series (N-HITS), ένα νεότερο αρχιτεκτονικό σχήμα που βασίζεται σε ιεραρχικά πολλαπλά επίπεδα· και το D-Linear, μια απλούστερη μέθοδος γραμμικής αποσύνθεσης. Τα μοντέλα εκπαιδεύτηκαν και δοκιμάστηκαν σε σύνολα δεδομένων που προέκυψαν μετά την προεπεξεργασία, και η απόδοση τους αξιολογήθηκε με βάση τρεις δείκτες σφάλματος: το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE), την Τετραγωνική Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root Mean Squared Error, RMSE) και το Συμμετρικό Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (symmetric Mean Absolute Percentage Error, sMAPE).

Πέραν της συγκριτικής αξιολόγησης των μοντέλων, αναπτύχθηκε και ένα λογισμικό εργαλείο με τη μορφή Εργαλείου Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Tool – DST). Το εργαλείο αυτό ενσωματώνει τις προβλέψεις που παράγονται από τα μοντέλα, παρέχοντας ένα εύχρηστο περιβάλλον μέσω του οποίου οι διαχειριστές μπορούν να έχουν πρόσβαση σε προβλέψεις, να αντλούν συστάσεις για συντήρηση, να διατηρούν αρχείο ιστορικών δεδομένων και να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα. Η ανάπτυξη του DST αποτελεί κρίσιμη συνεισφορά της εργασίας, καθώς μετατρέπει την ακαδημαϊκή άσκηση πρόβλεψης σε ένα πρακτικό εργαλείο διαχείρισης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι και τα τρία μοντέλα είχαν την ικανότητα να παράγουν χρήσιμες βραχυπρόθεσμες προβλέψεις της ταχύτητας του ανέμου, με διαφορετικό όμως βαθμό ακρίβειας. Το LSTM και το N-HITS παρουσίασαν σχεδόν ταυτόσημη και ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια, με $RMSE \approx 1.56$, ενώ το D-Linear, αν και υπολογιστικά πιο ελαφρύ, εμφάνισε υψηλότερα σφάλματα ($RMSE = 1.66$). Η οπτική σύγκριση των πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών ανέδειξε ότι τα LSTM και N-HITS ήταν σε θέση να ακολουθούν πιο πιστά τις διακυμάνσεις, ενώ το D-Linear είχε τάση να εξομαλύνει τα δεδομένα, υποεκτιμώντας τις ακραίες τιμές. Αυτή η διαφοροποίηση έχει πρακτική σημασία, καθώς η ακρίβεια στην πρόβλεψη αιχμών είναι κρίσιμη για τη λειτουργική ασφάλεια.

Η ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων στο DST επέτρεψε τη μετατροπή των προβλέψεων σε χρήσιμη πληροφορία. Μέσω του εργαλείου, οι διαχειριστές μπορούν να βλέπουν σε πραγματικό χρόνο τις προβλέψεις, να ενημερώνονται για προτεινόμενες ενέργειες και να προσαρμόζουν αντίστοιχα τα σχέδια συντήρησης. Επίσης, τους δίνεται η δυνατότητα διατήρησης αρχείου με σκοπό να έχουν τον πλήρη έλεγχο



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

της υποδομής. Έτσι, το DST δεν αποτελεί απλώς μια οπτικοποίηση αποτελεσμάτων, αλλά ένα εργαλείο που συνδέει τα ερευνητικά ευρήματα με την καθημερινή πρακτική.

Η συζήτηση των αποτελεσμάτων ανέδειξε ορισμένα κρίσιμα σημεία. Κατ' αρχάς, η τάση των μοντέλων να υποεκτιμούν ελαφρώς την ταχύτητα του ανέμου έχει μικτές επιπτώσεις: μειώνει τον κίνδυνο υπερεκτίμησης και υπερδέσμευσης ενέργειας στο δίκτυο, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε πιο συντηρητικές στρατηγικές και απώλεια εσόδων. Δεύτερον, η συγκριτική αξιολόγηση έδειξε ότι, παρόλο που τα LSTM και N-HITS είναι ανώτερα σε ακρίβεια, το D-Linear μπορεί να είναι χρήσιμο σε περιβάλλοντα με περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους, λόγω της απλότητας και της ταχύτητάς του. Τρίτον, η σημασία του DST έγκειται στο ότι δεν περιορίζεται στην παρουσίαση προβλέψεων αλλά επιτρέπει την αξιοποίησή τους στο πλαίσιο λήψης αποφάσεων, ενισχύοντας την επιχειρησιακή συνάφεια της έρευνας.

Ορισμένοι περιορισμοί της μελέτης θα πρέπει να αναγνωριστούν. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε δεδομένα ενός μόνο αιολικού πάρκου, γεγονός που ενδέχεται να περιορίζει τη γενικευσιμότητα των αποτελεσμάτων. Εξετάστηκαν αποκλειστικά μετρικές παλινδρόμησης, χωρίς να επεκταθεί η ανάλυση σε μετρικές ταξινόμησης, όπως η υπέρβαση κρίσιμων ορίων (π.χ. ταχύτητες cut-in ή cut-out).

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει την αξιολόγηση σε πρόσθετα σύνολα δεδομένων από διαφορετικές κλιματικές περιοχές και έργα υποδομών, ενσωματώνοντας συνδυαστικές στρατηγικές που αξιοποιούν τα συμπληρωματικά πλεονεκτήματα των LSTM και N-HITS, καθώς και διερευνώντας την ενσωμάτωση νόμων της Φυσικής στη διαδικασία εκπαίδευσης Νευρωνικών Δικτύων (Physics-Informed Neural Networks) ώστε να συνδυαστεί η γνώση του φυσικού πεδίου των αιολικών δυναμικών. Τέτοιες κατευθύνσεις θα ενίσχυαν την ερμηνευσιμότητα, τη γενικευσιμότητα και την πρακτική χρησιμότητα των μοντέλων πρόγνωσης στις εφαρμογές αιολικής ενέργειας.

Η εργασία συμβάλλει σε τρία επίπεδα: (α) σε μεθοδολογικό, δείχνοντας πώς μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά μοντέλα ML σε πραγματικά δεδομένα SCADA· (β) σε πρακτικό, προσφέροντας ένα εργαλείο που γεφυρώνει την έρευνα με την καθημερινή πρακτική· και (γ) σε στρατηγικό, αναδεικνύοντας τη σημασία της πρόγνωσης για τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της αξιοπιστίας και την ενίσχυση της αποδοτικότητας. Συνοψίζοντας, η εργασία δείχνει ότι η μηχανική μάθηση μπορεί να αξιοποιηθεί ως εργαλείο ενίσχυσης της διαχείρισης ενεργειακών υποδομών. Η εφαρμογή των LSTM, N-HITS και D-Linear έδειξε ότι είναι εφικτή η πρόγνωση της ταχύτητας του ανέμου με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ η ανάπτυξη του DST απέδειξε ότι τα αποτελέσματα της έρευνας μπορούν να μετουσιωθούν σε πρακτικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων. Η σύνδεση αυτή μεταξύ ερευνητικής και επιχειρησιακής διάστασης υποστηρίζει τη βελτίωση της αποδοτικότητας των αιολικών πάρκων, ενισχύοντας την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της διαχείρισης υποδομών.

Λέξεις-Κλειδιά: πρόγνωση ταχύτητας ανέμου, μηχανική μάθηση, LSTM, N-HITS, D-Linear, SCADA, υποστήριξη αποφάσεων, διαχείριση υποδομών.