



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΩΔΟΜΗΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ
ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι. ΤΣΙΚΟΥΡΑΚΗ

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΩΔΟΜΗΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ
ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
του
ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι. ΤΣΙΚΟΥΡΑΚΗ

Επιβλέπων: **Χάρης Ι. Γαντές**
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Χ. Γαντές
Δ. Βαμβάτσικος
Α. Παπαδημητρίου

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
MSc IN ANALYSIS AND DESIGN OF STRUCTURES
LABORATORY OF STEEL STRUCTURES

**IMPROVED NUMERICAL SIMULATION FOR THE
STRUCTURE – FOUNDATION INTERACTION OF
WIND TURBINES**

POSTGRADUATE THESIS
by
GEORGIOS I. TSIKOURAKIS

Supervisor: **Charis I. Gantes**
Professor N.T.U.A.

Three – member examination committee:

C. Gantes
D. Vamvatsikos
A. Papadimitriou

Athens, October 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες καταρχήν στον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και μέντορά μου, κ. Χάρη Γαντέ, Καθηγητή στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.), για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τις καιρίες συμβουλές του στα “λεπτά” σημεία του σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών.

Πολύτιμη ήταν και η βοήθεια του κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Επίκουρου Καθηγητή στον Τομέα Γεωτεχνικής της ίδιας σχολής του Ε.Μ.Π., ο οποίος αποσαφήνισε θέματα γεωτεχνικής φύσεως που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Πέραν του στενού ακαδημαϊκού κύκλου, οφείλω να ευχαριστήσω όλους τους φίλους που φρόντισαν να διατηρήσουν τις ισορροπίες στην καθημερινότητά μου και να με στηρίξουν με την παρουσία και την ενέργειά τους.

Το μεγαλύτερο όμως ευχαριστώ αισθάνομαι την βαθειά ανάγκη να απευθύνω στην οικογένειά μου που ανέκαθεν έκανε ο,τιδήποτε καθίστατο δυνατό προκειμένου να μου εξασφαλίσει, τόσο από πρακτικής, όσο και από πνευματικής απόψεως, όλα τα απαραίτητα εφόδια για την απρόσκοπτη συνέχεια των σπουδών μου, τόσο σε προπτυχιακό, όσο και μεταπτυχιακό επίπεδο. Η εργασία αυτή ανήκει και σε εσάς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η βελτίωση των μέχρι στιγμής διαθέσιμων τρόπων αριθμητικής προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης ανωδομής - θεμελίωσης σε πυλώνες ανεμογεννητριών.

Ο σχεδιασμός ανεμογεννητριών αποτελεί εκ φύσεως ένα πολυσχιδές πρόβλημα πολιτικού μηχανικού εξαιτίας της δυναμικότητας των φορτίσεων ως προς το είδος, το μέγεθος και τη θέση εφαρμογής, αλλά και εξαιτίας των απαιτήσεων της κατασκευής σε αποτελεσματικότητα, οικονομία και αντοχή στον χρόνο.

Για τον λόγο αυτό, η προσομοίωση και ανάλυση των φορέων των ανεμογεννητριών με συμβατικές μεθόδους και προγράμματα δεν κρίνεται επαρκής. Αντιθέτως, νέα εξειδικευμένα υπολογιστικά εργαλεία αναπτύχθηκαν τα τελευταία έτη και συνεχίζουν ακόμα να εξελίσσονται, για την προσομοίωση της συζευγμένης δυναμικής απόκρισης ανεμογεννητριών. Τα εργαλεία αυτά αποτελούνται κατά κανόνα από επιμέρους αεροδυναμικά και υδροδυναμικά μοντέλα, καθώς και μοντέλα δομοστατικής δυναμικής και δυναμικής των συστημάτων ελέγχου και ηλεκτρικών συστημάτων. Για να καταστεί δυνατή η καθολική, μη-γραμμική ανάλυση του φορέα, υπάρχει συνήθως ένας ενιαίος κώδικας, ο οποίος καλεί και συνδυάζει τις επιμέρους υπορουτίνες στο πεδίο του χρόνου.

Κρίσιμο σημείο στην προσπάθεια για λεπτομερέστερη και ρεαλιστικότερη προσομοίωση των φορέων των ανεμογεννητριών αποτελεί η αλληλεπίδραση της ανωδομής τους με τη θεμελίωση και το υποκείμενο έδαφος έδρασης. Η σημαντικότητα του παράγοντα αυτού είναι γνωστή και αναγνωρισμένη σε όλες τις κατασκευές πολιτικού μηχανικού, γίνεται όμως ιδιαίτερα αντιληπτή στην περίπτωση των ανεμογεννητριών εξαιτίας του ισοστατικού (ή με λίγους βαθμούς υπερστατικότητας) φορέα των.

Παρόλη τη βαρύτητα που φαίνεται να κατέχει ο παράγοντας της αλληλεπίδρασης εδάφους - κατασκευής όμως, τα περισσότερα σύγχρονα εργαλεία αριθμητικής προσομοίωσης υστερούν στον συγκεκριμένο τομέα. Η συνήθης πρακτική είναι να θεωρείται ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας πακτωμένος στη βάση του, συνθήκη που μπορεί να απέχει κατά πολύ από την πραγματικότητα.

Η παραπάνω αδυναμία των προγραμμάτων προσομοίωσης οφείλεται κυρίως στον υπολογιστικό κόπο που απαιτεί η ελευθερία επιλογής των ελευθεριών κίνησης της βάσης του πυλώνα από τον εκάστοτε χρήστη. Η κατάλληλη τροποποίηση των μητρώων των υπορουτίνων, αλλά και η κατάλληλη σύζευξη μεταξύ τους, αποτελεί μιν εφικτό στόχο, αλλά απαιτητικό κατά τη δόμηση του αλγορίθμου του κώδικα. Συνεπώς, η εξέλιξη αυτή προβλέπεται να συμπεριληφθεί εν καιρώ στις δυνατότητες των διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων, όχι όμως στο προσεχές μέλλον.

Το γεγονός αυτό προκαλεί αβεβαιότητα για την ακρίβεια και την ασφάλεια του σχεδιασμού ανεμογεννητριών σε μία περίοδο έντονης κατασκευαστικής δραστηριότητας στον τομέα, αλλά και επιτακτικής κοινωνικής ανάγκης για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική. Στην πράξη, μάλιστα, πολλοί μελετητές οδηγούνται στην υπερδιαστασιολόγηση ανεμογεννητριών και σε αντιοικονομικούς σχεδιασμούς, λόγω της αβεβαιότητας που επικρατεί ως προς την επιρροή των συνθηκών έδρασης.

Ως άμεση απόρροια των παραπάνω, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετάται η επιρροή της αλληλεπίδρασης ανωδομής - θεμελίωσης, τόσο στα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στους πυλώνες ανεμογεννητριών, όσο και στις προκαλούμενες μετατοπίσεις της κεφαλής τους. Η εκτίμηση της εν λόγω επιρροής πραγματοποιείται με ευριστικές μεθόδους που βασίζονται σε κανόνες της στατικής των κατασκευών και πραγματοποιούνται εκτός του αλγοριθμικού περιβάλλοντος του ειδικού προγράμματος ανάλυσης ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκε. Το πρόγραμμα αυτό αποτελεί το

λογισμικό FAST του εργαστηρίου National Renewable Energy Laboratory (NREL), το οποίο χρηματοδοτείται από το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η επιρροή της παραπάνω παραμέτρου στους λόγους εκμετάλλευσης και στους ελέγχους αστοχίας ανεμογεννητριών τύπου NREL 5 MW, ώστε να καταστεί αντιληπτό αν τίθεται ζήτημα ασφαλείας στην μέχρι στιγμής αποδεκτή προσομοίωση τους. Πέραν των ελέγχων αντοχής, ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο έλεγχος της επιρροής της αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης και στους ελέγχους κόπωσης της κατασκευής μέσα στο φάσμα ταχυτήτων ανέμου που μελετήθηκαν. Σημειώνεται ότι ο τύπος ανεμογεννητριών που επιλέχθηκε να μελετηθεί αποτελεί τον πλέον διαδεδομένο σε διεθνές επίπεδο τύπο ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα και συναντάται στις περισσότερες συναφείς μελέτες φέροντας τον τίτλο του «τύπου αναφοράς».

Επιπλέον, επειδή η ρεαλιστικότητα του τρόπου προσομοίωσης των συνθηκών στήριξης μίας ανεμογεννήτριας αποτελεί συνάρτηση πολλών μεταβλητών, πραγματοποιούνται παραμετρικές επιλύσεις ως προς τις σημαντικότερες εξ αυτών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην κατεύθυνση της γενίκευσης των συμπερασμάτων του πονήματος, κρίθηκε σκόπιμη η μεγαλύτερη δυνατή διεύρυνση του εύρους των τιμών των παραμέτρων της μελέτης, ώστε να ανεξαρτητοποιηθεί το αποτέλεσμα από τα εκάστοτε δεδομένα και συνθήκες. Οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι οι ακόλουθοι:

- **Είδος** ανεμογεννήτριας: χερσαία / θαλάσσια σταθερής βάσης πυθμένα
- **Θεμελίωση** ανεμογεννήτριας: ρηχή θεμελίωση (βαρύτητας με σύστημα anchor cage), βαθιά θεμελίωση (μονοπάσσαλη), χωροδικτύωμα (τρίποδας)

Ειδικότερα, η εργασία αποτελείται από **τρία μέρη**. Στο **πρώτο μέρος** γίνεται μία σύντομη **θεωρητική αναφορά** στον τομέα της **αιολικής ενέργειας**, καθώς και στα **είδη των ανεμογεννητριών** της μελέτης, αλλά και των **φορτίσεων** που αυτές δέχονται βάσει των ευρέως αποδεκτών **κανονιστικών πλαισίων** (Κεφ. 1-3). Στο **δεύτερο μέρος** πραγματοποιούνται οι **αναλύσεις**, ο **σχεδιασμός** και η παράθεση των **παραμετρικών επιλύσεων** της μελέτης (Κεφ. 4 – 10). Τέλος, στο **τρίτο μέρος** συγκρίνονται και αξιολογούνται τα **αποτελέσματα** του δεύτερου μέρους, ενώ εξάγονται και τα **συμπεράσματα** της μεταπτυχιακής εργασίας.

Αναλυτικότερα, στα έντεκα επιμέρους κεφάλαια περιλαμβάνονται τα εξής:

Κεφάλαιο 1^ο: Σύντομη αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με έμφαση στην παραγωγή αιολικής ενέργειας, στην εξέλιξη και την κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών και της θεμελίωσής τους.

Κεφάλαιο 2^ο: Περιγραφή του είδους και των χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών μελέτης.

Κεφάλαιο 3^ο: Περιγραφή των φορτίσεων ανεμογεννητριών βάσει των ισχυόντων κανονιστικών πλαισίων.

Κεφάλαιο 4^ο: Ανάλυση της ανωδομής ανεμογεννητριών με το πρόγραμμα αριθμητικής αεροελαστικής μοντελοποίησης FAST. Πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών, των παραμέτρων και του τρόπου μοντελοποίησης εντός του προγράμματος.

Κεφάλαιο 5^ο: Περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού της ανωδομής των ανεμογεννητριών και των ελέγχων έναντι λυγισμού και κοπώσεως.

Κεφάλαιο 6^ο: Περιγραφή της ευριστικής μεθόδου εισαγωγής της αλληλεπίδρασης ανωδομής-θεμελίωσης στην ανάλυση των ανεμογεννητριών. Αναλύεται η πορεία συλλογισμού της μεθόδου, καθώς και τα επιμέρους εργαλεία που χρησιμοποιεί, όπως η αρχή των δυνατών έργων και απλοποιημένα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα SAP2000.

Κεφάλαιο 7^ο: Παρουσίαση της εφαρμογής όλων των παραπάνω σε μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων ως προς το είδος της ανεμογεννήτριας μελέτης. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ασχολείται με χερσαίες και θαλάσσιες ανεμογεννήτριες σταθερής βάσης πυθμένα.

Κεφάλαιο 8^ο: Παρουσίαση της εφαρμογής όλων των παραπάνω σε μία σειρά παραμετρικών αναλύσεων ως προς τον τρόπο θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας μελέτης. Η παρούσα εργασία ασχολείται με ανεμογεννήτριες ρηχής θεμελίωσης (βαρύτητας με σύστημα anchor cage), βαθιάς θεμελίωσης (μονοπάσσαλης) και θεμελίωσης τύπου πυραμοειδούς χωροδικτύωματος (τρίποδας).

Κεφάλαιο 9^ο: Έπεται ξεχωριστό κεφάλαιο που περιλαμβάνει την σύγκριση των επιμέρους αναλύσεων, καθώς και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους και συγκεντρώνει τα συμπεράσματα της μελέτης.

Με τον τρόπο αυτόν, η παρούσα μελέτη φιλοδοξεί να αποτελέσει γνώμονα της αλλοιωμένης συμπεριφοράς που επιφέρει η ελλιπής προσομοίωση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κατασκευής στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, αλλά και σημείο αφετηρίας για τους μηχανικούς εκείνους που θα ασχοληθούν με τον σχεδιασμό τους μέχρις, όπου πιο ολοκληρωμένα λογισμικά και εργαλεία ανάλυσης καταστούν προσιτά.

Ο υπογράφων



Αθήνα, Οκτώβριος 2017

Τσικουράκης Γεώργιος

Λέξεις κλειδιά:

Ανεμογεννήτριες, Αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής, Βαθιάς θεμελίωσης, Ρηχές θεμελίωσης, Θεμελίωση βαρύτητας, Πέδιλα, Σύστημα anchor cage, Μονοπάσσαλη θεμελίωση, Θεμελίωση τρίποδα, Περιβαλλοντικά φορτία, Φορτία ανέμου, Φορτία κύματος, Μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας, Δυναμική ανάλυση, Λυγισμός, Λεπτότοιχες διατομές, Κόπωση

ABSTRACT

The present postgraduate thesis deals with the improvement of the numerical simulations concerning the structure – foundation interaction of wind turbines.

The design of wind turbines constitutes a sine qua non multifarious civil engineering venture, mainly due to the dynamic nature of the loads regarding their kind, value and application point, but also due to high quality demands of the structure in terms of efficiency, economy and durability.

Therefore, the simulation and the structural analysis of wind turbines using conventional methods and software is considered inadequate. On the contrary, new specialized computing tools have been developed over the last few years and are still evolving to simulate the coupled dynamic wind turbine response. Most commonly, these tools consist of individual aerodynamics and hydrodynamics models, as well as structural (elastic) dynamics and control and electrical system (servo) dynamics models. In order for a coupled, non-linear analysis to become feasible, there is usually a single code that calls and combines individual subroutines in the time domain.

A critical point in the effort for an ever more detailed and realistic simulation of the towers of wind turbines is the interaction of their superstructure with the foundation and underlying ground. The importance of this factor is known and recognized in most civil engineers projects, however it is particularly noticeable in the case of wind turbines, due to their statically determinate (or with a low degree of indetermination) bodies.

In spite of the importance of the soil-structure interaction factor though, most state of the art numerical simulation tools nowadays fail to sufficiently incorporate it in their analysis. The usual practice is to consider the tower of the wind turbine fixed at its base, a condition that may be far from the reality.

The cause of the above mentioned weakness of the simulation process is the computational effort required in case that the user of the program is able to choose the degrees of freedom of the base support of a wind turbine. The appropriate modification of the subroutine matrixes, as well as the proper coupling between them, is a feasible goal, but rather a demanding one, when constructing the algorithm of the code. Consequently, this development is expected to be included over time in the capabilities of available computing tools, but not in the nearest future.

As expected, the current inadequate tools cause uncertainty about the accuracy and safety of wind turbine design at a time of intense construction activity in the sector, but also at a time of pressing social need for a shift to renewable energy sources, such as wind power. In fact, many engineers are being lead to over-dimensioning of wind turbines and uneconomic design, due to the uncertainty surrounding the influence of ground conditions.

As an aftermath, in the present study, the influence of the superstructure - foundation interaction is studied, both regarding the internal forces developed on wind turbine towers and the resulted displacements of their top. The estimation of this influence is done by heuristic methods based on structural static fundamental concepts and carried out outside the algorithmic environment of the special wind turbine analysis program being used. Wind turbine analyzes were conducted in the FAST software environment produced and distributed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), which is funded by the United States Department of Energy.

More specifically, the influence of the above parameter on the exploitation ratios and failure checks of the NREL 5 MW wind turbine type is estimated, in order to be perceived whether there is a safety issue in their so far acceptable simulation. Apart from the strength checks, another interesting feature that is being evaluated, is the influence of soil-foundation interaction on the fatigue checks of the tower within the wind speed spectrum. It is noted that type NREL 5MW is one of the most widely used types of horizontal wind turbines worldwide and can be found in almost all relative papers under the characterization of "reference type".

Moreover, because the accuracy of the simulation of the support conditions depends on many variables, parametric analysis are conducted considering the alteration of the most important of them. It is worth noting that, in the direction of generalizing the conclusions of the thesis, the greatest possible extension of the range of values of the parameters was considered in order to disengage the results from the given data and conditions.

More specifically, this thesis consists of three parts. In the **first part**, a brief **theoretical reference** is made to the **wind energy** sector, as well as to the **types of wind turbines** used in the study and the **loads** they are exposed to, according to the widely accepted regulatory framework (Chapters 1 - 3). In the **second part**, the **analyzes, design** and presentation of the **parametric investigations** of the study are carried out (Chapters 4 - 10). Finally, the **third part** compares and evaluates the **results** of the second part, whereas the **conclusions** of the postgraduate thesis are summarized.

The contents of the eleven chapters is presented in detail below:

Chapter 1: Brief reference to renewable energy with emphasis on wind power generation and wind turbine development through the years. The classification of wind turbines as well as their foundation types are also presented.

Chapter 2: Description of the type and characteristics of the wind turbine used in the study.

Chapter 3: Description of wind turbine loads based on current regulatory framework.

Chapter 4: Analysis of the superstructure of wind turbines using FAST aeroelastic numerical modeling program and detailed description of the capabilities, parameters and concept of the modeling.

Chapter 5: Description of the superstructure design, buckling and fatigue checks.

Chapter 6: Description of the heuristic method used to introduce the superstructure-foundation interaction within the analysis of wind turbines. Presentation of the procedure sequence, as well as the individual tools involved, such as the principle of virtual work and simplified finite element simulations in SAP2000 software.

Chapter 7: Presentation of the implementation of all the above in a series of parametric analyzes regarding the type of wind turbine. This postgraduate thesis deals with land and sea, steady-based wind turbines.

Chapter 8: Presentation of the implementation of all the above in a series of parametric analyzes regarding the foundation of the wind turbine. The present study deals with shallow (pedestals), deep (single pile) and pyramidal (tripod) type foundations.

Chapter 9: A separate chapter follows, in which the evaluation of the results and the findings of the study is conducted through the comparison of the individual analyzes.

Eventually, by conducting all the above calculations, this post-graduate thesis aims to indicate and also quantify the influence of the structure-foundation interaction and its currently insufficient modeling in the cases of land-based and offshore wind turbines. The results of this paper aspire to constitute a

representative indication for those engineers that will face the design of wind turbines before updated and more complete analysis software tools become available.

The author



Athens, October 2017

Tsikourakis Georgios

Key words:

Wind Turbines, Soil-structure interaction, Deep foundations, Shallow foundations, Gravity foundations, Footings, Anchor cage system, Monopile foundations, Tripod foundations, Environmental loading, Wind loading, Wave loading, Time-history non-linear analysis, Dynamic modal analysis, Buckling design, Thin sections, Fatigue.