



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΥΡΓΟΥ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ : ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Σοφοκλή Σουλουτζηδάκη

Υπεύθυνος Καθηγητής : Σοφιανόπουλος Δημήτριος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Μ
Βόλος, Οκτώβριος 2014



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 13291/1
Ημερ. Εισ.: 26-03-2015
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ
2014
ΣΟΥ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα και υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Σοφιανόπουλο Δημήτριο για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της ήταν για μένα ιδιαίτερα σημαντική και συνεχής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον στενό μου φίλο Αλκιβιάδη Παζάρογλου, του οποίου η συμβολή υπήρξε καθοριστική όσον αφορά την κατανόηση και έμπρακτη εφαρμογή του λογισμικού Microsoft Excel Solver.

Περίληψη

Η επιθυμία και αυξανόμενη τάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές παγκοσμίως, όπως μέσω εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την πρόσφατη κατασκευή πολύ μεγάλων τουρμπινών εγκαθιστούμενων σε μεγαλύτερα συνεχή ύψη, καθιστά ολοένα και πιο σημαντικό το βέλτιστο σχεδιασμό (από πλευράς αντοχής και ασφαλείας) των κατασκευών που τις στηρίζουν.

Προς τούτο, η παρούσα Διπλωματική Εργασία σκοπεύει στην κατανόηση του πως διαδικασίες βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις σχετικές δυνατότητες λογισμικού Microsoft Excel μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχεδιασμό ιστών ανεμογεννητριών και των θεμελίων αυτών. Επιπρόσθετα, η Εργασία αναπτύσσει περαιτέρω προηγούμενες έρευνες με σκοπό να μελετηθεί πως επηρεάζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός από τη θεώρηση ιστού θεμελίωσης ως ενός ολοκληρωμένου συστήματος.

Ειδικότερα, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μορφώνονται και επιλύονται λαμβάνοντας υπ' όψη ή μη την επιρροή των μετατοπίσεων οι οποίες οφείλονται στην περιστροφική και οριζόντια δυσκαμψία των θεμελίων, στον υπολογισμό των φυσικών (ιδιο)συχνοτήτων.

Η γενική μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή του προβλήματος σχεδιασμού ιστού – θεμελίωσης σε προβλήματα βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τα ακόλουθα :

1. συλλογή πληροφοριών για τις απαιτήσεις σχεδιασμού και τις τιμές των παραμέτρων.
2. απόφαση επί της επιλογής μεθόδου σχεδιασμού
3. εφαρμογή – εκτέλεση μέσω του Microsoft Excel

Οι βασικές παραδοχές της όλης Εργασίας περιλαμβάνουν:

1. χρήση της μεθόδου ισοδύναμων συγκεντρωμένων μαζών για τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων,
2. Σχεδιασμό με βάση τον έλεγχο ακραίων συνθηκών φόρτισης σύμφωνα με τον IEC 61400-1 (International Electrotechnical Commission) – δηλαδή χωρίς να ληφθεί υπ' όψη η κόπωση,
3. χρήση των ακραίων συνθηκών φόρτισης από έγγραφο του κατασκευαστή, που ικανοποιούν τις περιπτώσεις φόρτισης του IEC 61400-1,
4. υπολογισμός των δυνάμεων λόγω του ανέμου σύμφωνα με το προαναφερθέν πρότυπο,
5. οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι συνεχείς.

Το άθροισμα του κόστους υλικού και κατασκευής του ιστού με το συνολικό κόστος της θεμελίωσης αποτελούν την αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Τέλος, μερικά από τα σπουδαιότερα συμπεράσματα της εργασίας είναι :

1. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε (με βάση τις δυνατότητες του Excel για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης) μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί για να αποκτηθούν λογικά αποδεκτές λύσεις σχεδιασμού και εκτίμηση κόστους.
2. Ακριβέστερος οικονομο-τεχνικός σχεδιασμός θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση επιλυτή ικανού να διαχειριστεί προβλήματα διακριτής βελτιστοποίησης.
3. Η θεώρηση του ιστού και της θεμελίωσης ως ολοκληρωμένου συστήματος οδηγεί σε δαπανηρότερο αλλά ασφαλέστερο σχεδιασμό.
4. Για τις τιμές των παραμέτρων που θεωρήθηκαν, ο περιορισμός (constraint) που αφορούσε την ιδιοσυχνότητα του πύργου βρέθηκε να ελέγχει το σχεδιασμό του, ενώ ο περιορισμός σε σχέση με τη φέρουσα ικανότητα ελέγχει τον σχεδιασμό της θεμελίωσης.
5. Η χαλάρωση ή η περαιτέρω δέσμευση στα όρια των ιδιοσυχνοτήτων έχει οδηγήσει σε περισσότερο ή λιγότερο βέλτιστες λύσεις αντίστοιχα.

Abstract

A renewed commitment to electricity from renewable resources, such as wind, along with the recent deployment of very large turbines that rise to new heights, makes obtaining the most efficient and safe designs of the structures that support them ever more important.

Towards this goal, the present research seeks to understand how optimization concepts and Microsoft Excel's optimization capabilities can be used in the design of wind turbine towers and foundations. Additionally, this research expands on the work of previous researchers to study how considering the tower and foundation as an integral system, affects the optimal design.

Specifically, optimization problems are formulated and solved with and without taking into account the effect of deflections, resulting from the foundation's rotational and horizontal stiffness, on natural frequency calculations.

The general methodology used to transcribe the design of wind turbine towers and foundations into an optimization problem includes:

- 1) collecting information on design requirements and parameter values
- 2) deciding how to analyze the structure
- 3) formulating the optimization problem
- 4) implementation using Microsoft Excel.

Key assumptions include:

- 1) use of an equivalent lumped mass method for estimating natural frequency
- 2) International Electrotechnical Commission (IEC) 61400-1 extreme loading condition controls design (i.e. fatigue loading condition is not considered)
- 3) extreme loads are obtained from manufacturer provided structural load document that satisfies loading cases outlined in IEC 61400-1
- 4) wind forces on the tower are calculated in accordance with IEC 61400-1
- 5) optimization variables are continuous.

The sum of the tower material and fabrication cost and the total foundation cost is taken as the objective function. Important conclusions from this work include:

- 1) optimization concepts and Microsoft Excel's optimization capabilities can be used to obtain reasonable conceptual level designs and cost estimates
- 2) detailed designs and cost estimates could be achieved using a solver capable of handling discrete optimization problems
- 3) considering the tower and foundation as an integral system results in a more expensive, but safer, design
- 4) for the assumed parameter values, the constraint on the tower's natural frequency was found to control the tower design and the bearing capacity constraint was found to control the foundation design
- 5) relaxing or tightening the limit on the natural frequency will result in the greatest benefit or penalty, respectively, on the optimum solution.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση | 2 |
| 1.3 Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας | 6 |
| 1.4 Συνοπτική περιγραφή περιεχομένου | 7 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ | 9 |
| 2.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού πύργου | 9 |
| 2.1.1 Διαστάσεις διατομής | 9 |
| 2.1.2 Τοπικός λυγισμός | 9 |
| 2.1.2.1 Μέθοδος επιτρεπόμενων τάσεων τοπικού λυγισμού | 9 |
| 2.1.2.2 Θεωρία μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης | 10 |
| 2.1.3 Μετατόπιση και στροφή της κορυφής του πύργου | 10 |
| 2.2 Απαιτήσεις σχεδιασμού θεμελίωσης | 11 |
| 2.2.1 Φέρουσα ικανότητα | 11 |
| 2.2.2 Δυσκαμψία | 13 |
| 2.2.3 Ροπή ανατροπής | 13 |
| 2.3 Όριο ιδιοσυχνότητας | 14 |

| | | |
|------------|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 | ΑΝΑΛΥΣΗ | 15 |
| 3.1 | Φορτία του πύργου και της θεμελίωσης | 15 |
| 3.1.1 | Φορτία ανωδομής | 15 |
| 3.1.2 | Άνεμος, ίδιο βάρος και δυνάμεις λόγω εσωτερικών εξαρτημάτων | 16 |
| 3.2 | Ανάλυση του πύργου | 18 |
| 3.2.1. | Εσωτερικές δυνάμεις | 18 |
| 3.2.2. | Μετατοπίσεις | 19 |
| 3.2.3 | Τάσεις στη διατομή | 20 |
| 3.2.3.1 | Συνιστώσες των τάσεων | 20 |
| 3.2.3.2 | Κύριες τάσεις | 21 |
| 3.3. | Ανάλυση θεμελίων | 21 |
| 3.3.1. | Συνολικό κατακόρυφο φορτίο | 22 |
| 3.3.2. | Συνολική πίεση επί του εδάφους | 22 |
| 3.3.3 | Δυσκαμψία θεμελίωσης | 22 |
| 3.3.4. | Ανατροπή θεμελίωσης | 23 |
| 3.4. | Ανάλυση συχνότητας | 23 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ / ΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ | 25 |
| 4.1. | Μεταβλητές βελτιστοποίησης | 25 |
| 4.1.1. | Σχεδιαστικές μεταβλητές | 25 |
| 4.1.2. | Ανεξάρτητες παράμετροι | 25 |
| 4.1.3 | Εξαρτημένες μεταβλητές | 28 |
| 4.1.4. | Μεταβλητές εξαρτώμενες από το ύψος | 30 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Αντικειμενική συνάρτηση | 31 |
| 4.3. Περιορισμοί | 32 |
| 4.3.1. Περιορισμοί μεταβλητών σχεδιασμού | 32 |
| 4.3.1.1. Όρια στην εξωτερική διάμετρο της βάσης του πύργου | 32 |
| 4.3.1.2 Όρια στην εξωτερική διάμετρο της κορυφής του πύργου | 32 |
| 4.3.1.3 Όρια στο πάχος του τοιχώματος του πύργου | 33 |
| 4.3.1.4. Όρια στη διάμετρο του θεμελίου | 33 |
| 4.3.1.5. Όρια στο πάχος θεμελίωσης στο εξωτερικό όριο (άκρο) | 33 |
| 4.3.2 Περιορισμός ιδιοσυχνότητας | 33 |
| 4.3.3 Περιορισμοί τοπικού λυγισμού | 34 |
| 4.3.3.1 Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού | 34 |
| 4.3.3.2 Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης | 34 |
| 4.3.4. Περιορισμός μετατόπισης κορυφής | 35 |
| 4.3.5. Περιορισμός στροφής κορυφής | 35 |
| 4.3.6 Περιορισμοί φέρουσας ικανότητας | 36 |
| 4.3.7 Περιορισμοί δυσκαμψίας | 36 |
| 4.3.8 Περιορισμοί ανατροπής | 36 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 38 |
| | |
| 5.1 Υλοποίηση χρησιμοποιώντας το Excel Solver | 38 |
| 5.2 Η μέθοδος GRG (μειωμένη γενικευμένη κλίση) | 40 |
| 5.3 Αποτελέσματα | 40 |
| 5.3.1 Βέλτιστη λύση | 40 |
| 5.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την διαδικασία επίλυσης | 56 |

| | |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 63 |
|--|----|

| | |
|----------------|----|
| 6.1 Σχολιασμός | 63 |
|----------------|----|

| | |
|------------------|----|
| 6.2 Συμπεράσματα | 65 |
|------------------|----|

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Βέλτιστος σχεδιασμός πύργου και θεμελίων ανεμογεννήτριας | 40 |
| 5.2 | Ανεξάρτητοι παράμετροι | 41 |
| 5.3 | Τιμές εξαρτημένων μεταβλητών της βέλτιστης λύσης | 47 |
| 5.4 | Τελικές τιμές των μεταβλητών που σχετίζονται με το ύψος του πύργου στην κορυφή αλλά και τη βάση αυτού | 53 |
| 5.5 | Τιμές περιορισμών στο τελικό σχεδιασμό | 56 |
| 5.6 | Απόκλιση των τιμών των περιορισμών | 57 |
| 5.7 | Χαρακτηρισμός των περιορισμών στο βέλτιστο σχεδιασμό | 59 |
| 5.8 | Τιμές του πολλαπλασιαστή Lagrange | 60 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Τρισδιάστατες συνιστώσες των δυνάμεων στην κορυφή του πύργου και στα θεμέλια | 15 |
| 3.2 | Δισδιάστατες συνιστώσες των δυνάμεων στην κορυφή του πύργου και στα θεμέλια | 16 |
| 3.3 | Φόρτιση του πύργου | 17 |
| 3.4 | Διάγραμμα ελευθέρου σώματος τμήματος του πύργου | 18 |
| 3.5 | Θέση των κρίσιμων σημείων A και B | 20 |

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγικές Παρατηρήσεις

1.1. Εισαγωγή

Η δημιουργία ενός μέλλοντος «καθαής ενέργειας» αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της εποχής μας. Προκειμένου λοιπόν να μπορέσουμε να ανταποκριθούμε σε αυτή τη πρόκληση, αναπτύχθηκε το 2009, ένα νέο ολοκληρωμένο ενεργειακό σχέδιο. Μέρος του σχεδίου αυτού προϋποθέτει ότι μέχρι το 2012, το 10% του ηλεκτρικού ρεύματος, θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η γεωθερμική και η αιολική, και το 25% μέχρι το 2025. Επιπρόσθετα από αυτή τη δέσμευση για ηλεκτρισμό μέσω των εναλλακτικών πηγών ενέργειας, μια πρόσφατη έρευνα που διεξήγαγε το Πανεπιστήμιο του Harvard και η οποία εκδόθηκε στα πρακτικά της Εθνικής Ακαδημίας Επιστημών των Η.Π.Α. το 2009, κατέδειξε ότι η προοπτική παγκόσμιας αιολικής ενέργειας αντιστοιχεί 40 φορές μεγαλύτερη από την ήδη υπάρχουσα συνολική κατανάλωση ρεύματος (Lu 2009). Τα μεγάλα αυτά ποσοστά που προκύπτουν από αυτή την έρευνα, σε σχέση με προηγούμενες έρευνες (σχεδόν 7 φορές πάνω) οφείλεται στην εγκατάσταση πολύ μεγάλων ανεμογεννητριών που φτάνουν σε μεγάλα ύψη, γεγονός που δεν είχε εκτιμηθεί σε προηγούμενες.

Καθώς λοιπόν οι ανεμογεννήτριες αναπτύσσονται σε τέτοια ύψη, προκειμένου να αξιοποιηθούν οι μεγάλες ταχύτητες ανέμου στα ύψη αυτά, το να εξασφαλιστεί ένας πιο αποτελεσματικός και ασφαλής σχεδιασμός των φερόντων οργανισμών των δομικών στοιχείων που τα υποστηρίζουν, θα καταστεί ολοένα και μεγαλύτερης σημασίας για την επιτυχή διάδοση της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, ένα σημαντικό ποσοστό έρευνας έχει διεξαχθεί για τη μόρφωση του σχεδιασμού πύργων και ιστών ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτές οι έρευνες μας παρείχαν τόσο πολύτιμες προσεγγίσεις στο βέλτιστο σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών, όσο και στην αποτελεσματικότητα των διαφόρων μεγεθών βελτιστοποίησης. Ωστόσο, ενώ οι πρόσφατη έρευνα είναι όντως αξιόπαινη, συνεχίζει να υφίσταται ένα κενό στη βιβλιογραφία γύρω από το βέλτιστο σχεδιασμό ενός συνδυασμένου συστήματος πύργου – ιστού και θεμελίωσης.

Θεωρώντας τον ιστό και τη θεμελίωση ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, στο οποίο οι συνθήκες στήριξης του πύργου δεν θεωρούνται ως απολύτως άκαμπτες, θα επιτρέψει στην καλλίτερη κατανόηση της εγκυρότητας των τρεχουσών υποθέσεων σχετικά με τις συνθήκες στήριξης του ιστού και στην απόκτηση τελικά ενός πλέον ακριβούς σχεδιασμού της όλης κατασκευής της ανεμογεννήτριας.

Επιπρόσθετα, λόγω της έλλειψης ενός επίσημου προτύπου σχεδιασμού των ανεμογεννητριών, οι προηγούμενες προσπάθειες έπρεπε να βασιστούν σε ένα συνδυασμό κωδίκων, προτύπων και κρίσης Μηχανικών προκειμένου να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού. Έτσι λοιπόν, η έρευνα της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, σκοπεύει να «γεμίζει αυτά τα κενά» με το να ενσωματώσει τα θεμέλια (ή τη θεμελίωση) στην βέλτιστη διαμόρφωση του σχεδιαστικού προβλήματος με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμού, που περιγράφονται στο πρόσφατα ανεπτυγμένο Πρότυπο Σχεδιασμού Ανεμογεννητριών (IEC 61400 -1) της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής.

Σε ότι ακολουθεί, παρουσιάζεται μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας γύρω από το βέλτιστο σχεδιασμό των διαφόρων κατασκευών σχήματος πύργου ή ιστού, προκειμένου να επανεξεταστούν οι διάφορες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης και να εξακριβωθούν σημαντικές παραδοχές σχετικές με το περιεχόμενο της παρούσας Εργασίας.

1.2. Σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Negm και Maalawl το 1999, ανέπτυξαν και δοκίμασαν έξι (6) στρατηγικές βελτιστοποίησης, στην προσπάθεια τους να εξασφαλίσουν το βέλτιστο σχεδιασμό ανεμογεννήτριας, αποτελούμενη από πολλαπλά ομοιόμορφα τμήματα.

Στην καθεμία από τις έξι (6) αυτές στρατηγικές, η μέση διάμετρος, το ύψος και το πάχος τοιχώματος κάθε τμήματος της, επελέγησαν ως μεταβλητές σχεδιασμού. Παρ' όλα ταύτα, κάθε στρατηγική διέφερε στην επιλογή του προς βελτίωση κριτηρίου:

- 1) ελαχιστοποίηση της μάζας του πύργου.
- 2) μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας του πύργου.
- 3) μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας προς μάζα του πύργου.
- 4) ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων.
- 5) ελαχιστοποίηση ενός δείκτη απόδοσης που μετράει τη διαφορά μεταξύ της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής και της συχνότητας διέγερσης της γεννήτριας.
- 6) μεγιστοποίηση της ιδιοσυχνότητας του συστήματος.

Σε όλες τις στρατηγικές επιβλήθηκαν περιορισμοί σε ό,τι αφορά επιτρεπόμενη τάση, τις μέγιστες αποδεκτές μετατοπίσεις, στον συντονισμό, στα όρια στη μάζα του πύργου, στα όρια στη μέση διάμετρο και τέλος στα όρια του πάχους τοιχώματος.

Το πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού που δημιουργούνταν σε κάθε περίπτωση λύθηκε χρησιμοποιώντας μια μέθοδο βελτιστοποίησης με εσωτερική συνάρτηση ποιής.

Οι πιο σημαντικές παραδοχές της εργασίας αυτής ήταν :

- α) ο πύργος είναι πακτωμένος στο έδαφος (ως πρόβολος).
- β) ο πύργος αποτελείται από τμήματα, τα οποία έχουν διαφορετικές αλλά ομοιόμορφες ιδιότητες διατομής.
- γ) η άτρακτος / ρότορας θεωρείται ως μια συγκεντρωμένη μάζα άκαμπτα συνδεδεμένη με τη κορυφή του πύργου.
- δ) το υλικό του πύργου είναι γραμμικά ελαστικό, ισότροπο και ομογενές.
- ε) η διατομή του πύργου είναι λεπτότοιχη και κυκλική.
- στ) Οι μετατοπίσεις υπολογίζονται με βάση τη θεωρία δοκού Euler - Bernoulli, δηλαδή αμελούνται δευτερεύουσες επιδράσεις λόγω αξονικών και διατμητικών παραμορφώσεων αλλά και περιστροφικής αδράνειας.
- ζ) Κατανεμημένα αεροδυναμικά φορτία που οφείλονται στις οπισθέλκουσες δυνάμεις και δρουν στον πύργο, υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ένα δυσδιάστατο μοντέλο σταθερής ροής.
- η) Μη δομικές μάζες, που κατανέμονται κατά μήκος του ύψους του πύργου, υπολογίζονται ως κλάσμα της συνολικής μάζας της κατασκευής.
- θ) Η ανάλυση της κατασκευής ανάγεται σε ένα δυσδιάστατο πρόβλημα, τέτοιο ώστε να λαμβάνεται υπ' όψη μόνο κάμψη κάθετα στο επίπεδο του ρότορα.

Από τους βέλτιστους σχεδιασμούς, που προέκυψαν ως άνω, ο πλέον κατάλληλος και ισορροπημένος σε ροή βελτίωσης μάζας και δυσκαμψίας ήταν αυτό, που σχετιζόταν με την μεγιστοποίηση της φυσικής συχνότητας του συστήματος.

Οι Kocer και Aroga το 1996 διατύπωσαν το σχεδιασμό δωδεκάγωνων χαλύβδινων ιστών μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα, χρησιμοποίησαν τη διατύπωση τους αυτή, για να επιλύσουν, ένα πρόβλημα / παράδειγμα σχεδιασμού που είχε ήδη πραγματοποιηθεί και αναφερθεί στην βιβλιογραφία, αλλά με χρήση συμβατικών μεθόδων. Η εξωτερική διάμετρος του ιστού στην κορυφή του και η κωνικότητα, ελήφθησαν ως συνεχείς μεταβλητές σχεδίασης. Η δυσκαμψία του πρώτου τμήματος του στύλου και το πάχος σχεδιασμού του δεύτερου τμήματος του, ελήφθησαν ως δύο διακεκριμένες μεταβλητές σχεδιασμού.

Σαν κριτήριο βελτιστοποίησης επιλέχθηκε το κόστος του υλικού του στύλου. Επιβλήθηκαν περιορισμοί στη θλιπτική τάση, τη διατμητική τάση, την καμπτική τάση καθώς στη συνισταμένη των τάσεων αλλά και στις μετατοπίσεις.

Το εν λόγω πρόβλημα διακριτής βελτιστοποίησης επιλύθηκε χρησιμοποιώντας πολλαπλές μεθόδους βελτιστοποίησης στο λογισμικό IDESIGN 4.2. Οι δύο μέθοδοι που απέδωσαν τα λιγότερο δαπανηρά (από πλευράς κόστους) αποτελέσματα περιλάμβαναν:

- 1) Μία συνεχής διαδοχική τετραγωνική μέθοδος προγραμματισμού συνδυασμένη με μια διακριτή μέθοδο κλάδου – ορίου.
- 2) Ένα γενετικό αλγόριθμο που μεταχειρίζεται όλες τις σχεδιαστικές μεταβλητές ως διακριτές μεταβλητές με τις ακόλουθες σπουδαιότερες παραδοχές :
 - α) ως τελική σχεδίαση λαμβάνεται η πιο συντηρητική από την εξέταση τριών ξεχωριστών περιπτώσεων φορτίσεων.
 - β) λαμβάνονται υπ' όψη τα φορτία από τους αγωγούς, το ίδιο βάρος του πύργου καθώς και η επίδραση του αέρα επάνω του.
 - γ) ο ιστός είναι πακτωμένος στη βάση του (πρόβολος).
 - δ) μια επαναληπτική μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογιστούν ροπές δευτέρας τάξης που προκύπτουν καθώς το κέντρο βάρους του ιστού μετατοπίζεται λόγω μετατοπίσεων.
 - ε) ένας συνδυαστικός τύπος καμπτικής τάσης, ο οποίος συνδυάζει τις τάσεις λόγω των ροπών κατά τον y και z άξονα χρησιμοποιείται στο να εκτιμηθεί μία μοναδική ενιαία τιμή καμπτικής έντασης σχεδιασμού.
 - στ) η διατμητική τάση σχεδιασμού υπολογίζεται από το άθροισμα των τάσεων που οφείλονται στις δυνάμεις διάτμησης και στρέψης.
 - ζ) η θλιπτική τάση σχεδιασμού υπολογίζεται ως η πρόσθεση των αξονικών και καμπτικών τάσεων.
 - η) παραμορφώσεις στους y και z άξονες υπολογίζονται με το να ολοκληρώσουμε αριθμητικά την εξίσωση της ελαστικής γραμμής.
 - θ) η απόκλιση του σχεδιασμού προκύπτει από τη τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων του y και z άξονα.
 - ι) ο περιορισμός του συνδυασμού των τάσεων μορφώνεται χρησιμοποιώντας το κριτήριο διαρροής της ενέργειας παραμορφώσεως.

Σε γενικές γραμμές αυτή η εργασία έδειξε ότι η διαδικασία βέλτιστου σχεδιασμού, μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικά και ασφαλή σχέδια, εν συγκρίσει με τη μέχρι τώρα συμβατική διαδικασία σχεδιασμού.

Επίσης περιγράφηκε το πώς ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί από τη στιγμή που θα διαμορφωθεί, να τροποποιηθεί σχετικά γρήγορα και να δοκιμαστούν νέοι τρόποι σχεδιασμού προκειμένου να προσδιοριστεί ο καλύτερος (αποδείχθηκε ότι η χρήση κυκλικής διατομής, απέφερε 2,4% μείωση των εξόδων σε υλικά).

Οι ίδιοι συγγραφείς το 1997 επέκτειναν τη δουλειά που είχαν κάνει τον προηγούμενο χρόνο στην προσπάθεια τους να τυποποιήσουν τον ιστό από χάλυβα χρησιμοποιώντας διακεκριμένη βελτιστοποίηση. Στη νέα δουλειά αυτή το βέλτιστο σχέδιο επιλέγεται μέσα από ένα σύνολο προκατασκευασμένων τμημάτων του ιστού, τα οποία υπάρχουν σε καταλόγους.

Επίσης το σχήμα της διατομής και η ποιότητα του χάλυβα προστίθεται στις σχεδιαστικές μεταβλητές, ενώ τα κόστη συγκόλλησης ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση. Επιβάλλονται παρόμοιοι περιορισμοί με αυτούς της προηγούμενης εργασίας ενώ χρησιμοποιούνται ένας γενετικός αλγόριθμος, μία μέθοδος καταμέτρησης και μια μέθοδος ανόπτησης για να λύθει το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Αποτελέσματα αυτής της εργασίας, έδειξαν ότι η καταμέτρηση και η προσομοίωση ανόπτησης, είναι σημαντικά πιο δαπανηρές υπολογιστικά από τον γενετικό αλγόριθμο. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του σχεδιασμού του χαλύβδινου ιστού, δέχτηκε ότι τα βέλτιστα σχέδια που προκύπτουν διέφεραν πολύ λίγο μεταξύ τους. Γενικά, η αύξηση των μεταβλητών σχεδίασης, διεύρυνε την περιοχή αναζήτησης γεγονός που οδήγησε στην βελτίωση της τελικής τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Σε άλλη σχετική εργασία τους (το 1996), οι ίδιοι συγγραφείς, μελετώντας τον βέλτιστο σχεδιασμό ιστών μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας από προεντεταμένο σκυρόδεμα κατέδειξαν ότι οι επιρροές δευτερευουσών ροπών, οι οποίοι οφείλονται σε οριζόντιες παραμορφώσεις, είναι σημαντικά και πρέπει να συμπεριλαμβάνονται οπωσδήποτε στην όλη ανάλυση.

Η ίδια ερευνητική ομάδα (Kocer και Aroga 1999) διαπίστωσε ότι οι διαφορές των αποτελεσμάτων, που είχαν προκύψει μέσω γεωμετρικά μη γραμμικής και γραμμικής ανάλυσης στο βέλτιστο σχεδιασμό ήταν πολύ μικρές. Τούτο οφειλόταν στο γεγονός ότι κάποιοι περιορισμοί οδηγούσαν την κατασκευή να βρίσκεται

συνεχώς στην ελαστική περιοχή κατά την απόκριση της. Παρόμοια συμπεράσματα εξήγαγαν οι Kocer και Arora (2002) στη διάρκεια μελέτης του βέλτιστου σχεδιασμού δικτυωτών χαλύβδινων ιστών – πύργων υπό σεισμική φόρτιση.

Οι Martagh , Basu και Broderick, το 2005, μελέτησαν την απόκριση ταλαντώσεων όταν η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους – κατασκευής συμπεριλαμβάνονταν μέσα στο κατασκευαστικό μοντέλο. Βρέθηκε ότι εντάσσοντας την ευκαμψία του εδάφους το μοντέλο, οδηγεί σε μεγάλο ποσοστό απόσβεσης στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι από τους υπολογισμούς της ιδιοσυχνότητας, που δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η απόσβεση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής, θα προκύπτουν αποτελέσματα αναληθή που μπορεί κιάλας να οδηγήσουν σε μη συμφέρουσες – και μη οικονομικές λύσεις.

Οι Silva, Arora και Brasil 2008, παρουσίασαν ένα μη γραμμικό μοντέλο, το οποίο βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα, για τη δυναμική ανάλυση των λεπτότοιχων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επίσης υπέβαλαν το μοντέλο αυτό σε περιορισμούς βελτιστοποίησης και το εφάρμοσαν στο βέλτιστο σχεδιασμό των ανεμογεννητριών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

1.3. Στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Οι κύριοι στόχοι της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι οι ακόλουθοι δύο:

1) Η κατανόηση του τρόπου μέσω του οποίου οι τεχνικές βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις δυνατότητες του Excel μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό ιστού και θεμελίωσης ανεμογεννητριών. Μέσω αυτής πιστεύεται ότι θα δοθεί η δυνατότητα αντίληψης ότι η προτεινόμενη διαδικασία οδηγεί σε ασφαλέστερες και αποτελεσματικότερες σχετικές κατασκευές.

2) Η μελέτη του βαθμού επιρροής στο βέλτιστο σχεδιασμό της θεώρησης ιστού - θεμελίου ως ολοκληρωμένου συστήματος, όπου οι συνθήκες στήριξης στη βάση της κατασκευής δεν είναι πλήρως (ιδεατά) δύσκαμπτη.

Με το να κατανοήσουμε το πώς η θεμελίωση επηρεάζει το σχεδιασμό, θα βοηθήσουμε άλλους να κάνουν βελτιωμένες και πιο εξελιγμένες υποθέσεις για τις συνθήκες στήριξης του πύργου. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει σε περισσότερο αποτελεσματικά, ασφαλή και εξειδικευμένα σχέδια.

1.4. Συνοπτική περιγραφή περιεχομένου

Πέραν το τρέχοντος 1^{ου} Κεφαλαίου, η παρούσα Εργασία απαρτίζεται από πέντε ακόμα Κεφάλαια και Βιβλιογραφία. Τα υπόλοιπα Κεφάλαια πραγματεύονται συνοπτικά τα εξής :

Το 2^ο Κεφάλαιο περιέχει τις απαιτήσεις σχεδιασμού και συνοψίζει τα διάφορα κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στο σχεδιασμό ιστών ανεμογεννητριών και θεμελίωσης, όπως :

- όρια στις διαστάσεις της διατομής του ιστού
- τοπικός λυγισμός των τοιχωμάτων του ιστού
- μετατόπιση και στροφές στην κορυφή του ιστού
- όρια στις διαστάσεις της διατομής της θεμελίωσης
- φέρουσα ικανότητα του εδάφους θεμελίωσης
- οριζόντια και περιστροφική δυσκαμψία της θεμελίωσης
- ανατροπή του θεμελίου
- ιδιοσυχνότητες του ιστού

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιέχεται η ανάλυση. Εκεί συνοψίζονται οι ακόλουθες διαδικασίες:

- Υπολογισμός των φορτίων επί της κατασκευής.
- Υπολογισμός εσωτερικών δυνάμεων, παραμορφώσεων και τάσεων που αναπτύσσονται στον ιστό.
- Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας του εδάφους, των δυσκαμψιών, της θεμελίωσης και της ροπής ανατροπής αυτής.
- Υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας του ιστού λαμβάνοντας υπ' όψη ή μη την επίδραση της δυσκαμψίας της θεμελίωσης.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η διατύπωση και η μόνρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αναγνωρίζεται η προς ελαχιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση και μετατρέπονται τα αποτελέσματα από τις απαιτήσεις σχεδιασμού και την ανάλυση (των δύο προηγούμενων Κεφαλαίων) σε περιορισμούς βελτιστοποίησης. Μεταξύ των οριζόμενων μεταβλητών βελτιστοποίησης περιλαμβάνονται και οι κάτωθι:

- Παράμετροι σχεδιασμού
- Ανεξάρτητες παράμετροι
- Εξαρτημένες μεταβλητές
- Μεταβλητές εξαρτώμενες από το ύψος

Πέραν τούτων, στους τύπους των μεταβλητών περιορισμών περιλαμβάνονται : αυτοί των παραμέτρων σχεδιασμού, ιδιοσυχνότητας, τοπικού λυγισμού, μετατοπίσεων κορυφής, στροφή κορυφής, φέρουσας ικανότητας, δυσκαμψίας και ανατροπής.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρατίθενται οι εφαρμογές μέσω του Excel Solver add –in και τα σχετικά αποτελέσματα, ενώ δίδεται και μια συνοπτική περιγραφή της γενικευμένης θεωρίας βελτιστοποίησης περιορισμένης κλίσης που είναι ενσωματωμένη στο εν λόγω λογισμικό.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο σχολιάζονται οι βέλτιστες λύσεις και τα ληφθέντα αριθμητικά αποτελέσματα, συμπεράσματα και προτάσεις – περιοχές μελλοντικής έρευνας.

Κεφάλαιο 2 : Απαιτήσεις Σχεδιασμού

2.1. Απαιτήσεις σχεδιασμού πύργου

Σε αυτή την παράγραφο σχολιάζονται οι διαστάσεις της διατομής, ο τοπικός λυγισμός, η παραμόρφωση της κορυφής του πύργου και τα όρια μετατόπισης και στροφής της κορυφής του. Τα όρια της ιδιοσυχνότητας του πύργου και του συνδυασμού πύργου – θεμελίων συζητούνται στην παράγραφο 2.3 . Όλες αυτές οι απαιτήσεις σχεδιασμού πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να εξασφαλιστεί ένας ικανοποιητικός σχεδιασμός του πύργου.

2.1.1. Διαστάσεις διατομής

Λόγω περιορισμών στην μεταφορά, η εξωτερική διάμετρος του πύργου δεν μπορεί να ξεπερνάει τα 4.5m. Επίσης, λόγω περιορισμών στο πάχος του χάλυβα, που μπορεί να ελασθεί (παραχθεί) μέσω συμβατικής βιομηχανικής κατεργασίας, το μέγιστο πάχος του τοιχώματος του πύργου δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 40mm.

2.1.2. Τοπικός λυγισμός

Για την αποφυγή του φαινομένου του τοπικού λυγισμού των τοιχωμάτων του πύργου χρησιμοποιείται η μέθοδος επιτρεπόμενων τάσεων τοπικού λυγισμού και η θεωρία της μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης (κριτήριο von Mises).

2.1.2.1. Μέθοδος επιτρεπόμενων τάσεων τοπικού λυγισμού

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει (Burton et al 2001) :

- 1) τον υπολογισμό της ελαστικής κρίσιμης τάσης λυγισμού, ενός κυλινδρικού χαλύβδινου σωλήνα, ο οποίος έχει μέτρο ελαστικότητας E_s , πάχος τοιχώματος t_w και μέση ακτίνα r_m , λόγω αξονικής (εξίσωση 2.2).
- 2) τον υπολογισμό συντελεστών μείωσης της κρίσιμης τάσης για κάμψη (εξίσωση 2.3) με αξονική φόρτιση (εξίσωση 2.4).
- 3) την αντικατάσταση των τιμών αυτών στην εξίσωση 2.1 μαζί με την τάση διαρροής του υλικού f_y , ώστε να ληφθεί η επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού. Η μέγιστη κύρια τάση στην κατασκευή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τιμή της επιτρεπόμενης τάσης τοπικού λυγισμού, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης του εν λόγω φαινομένου.

$$\sigma_{\lambdaογησμου} = \begin{cases} f_y \left[1 - 0.4123 \left(\frac{f_y}{\alpha_B \sigma_{cr}} \right)^{0.6} \right] & , \alpha_B \sigma_{cr} > f_y/2 \\ 0.75 \alpha_B \sigma_{cr} & , \alpha_B \sigma_{cr} > f_y/2 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\kappa\rho\iota\sigma\iota\mu\eta \ \epsilon\lambda\alpha\sigma\tau\iota\kappa\eta} = 0.605 E_S \frac{t_m}{r_m} \quad (2.2)$$

$$\alpha_B = 0.1887 + 0.8113 \alpha_0 \quad (2.3)$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \frac{0.83}{\sqrt{1 + 0.01 r_m/t_w}} & , \frac{r_m}{t_w} < 212 \\ \frac{0.70}{\sqrt{0.1 + 0.01 r_m/t_w}} & , \frac{r_m}{t_w} \geq 212 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.1.2.2. Θεωρία μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή ότι η διαρροή θα επέλθει όταν η ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου εξισωθεί με την ενέργεια που σχετίζεται με την αστοχία σε ένα απλό τεστ εφελκυσμού (εξίσωση 2.5). Αυτή η θεωρία χρησιμοποιείται κυρίως στο Δομοστατικό Σχεδιασμό, λόγω του αποδεδειγμένου αποτελεσματικού 'ιστορικού' της, όσον αφορά την πρόβλεψη της αστοχίας στα όλκιμα υλικά (Ugural και Fenster 2003). Οι κύριες τάσεις σ_1 , σ_2 και σ_3 λαμβάνονται στα κρίσιμα σημεία του πύργου. Στην ουσία, εφαρμόζεται ένας προσεγγιστικός συντελεστής ασφαλείας, FS, ώστε να μειώσει την τάση διαρροής σ_{yp} του υλικού.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \left(\frac{\sigma_{yp}}{FS} \right)^2 \quad (2.5)$$

2.1.3. Μετατόπιση και στροφή της κορυφής του πύργου

Προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες δυναμικές παραμορφώσεις στην κορυφή του πύργου η μέγιστη μετατόπιση εκεί, περιορίζεται στο 1,25 τοις εκατό (1,25 %) του ύψους του πύργου. Επίσης για να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των ελίκων της τουρμπίνας και του πύργου, η μέγιστη περιστροφή στη κορυφή του πύργου περιορίζεται στις 5°.

2.2. Απαιτήσεις σχεδιασμού θεμελίωσης

Τα όρια στην φέρουσα ικανότητα, την δυσκαμψία και την ροπή ανατροπής αναφέρονται σε αυτό το Κεφάλαιο. Δεν λαμβάνονται υπ' όψη καθιζήσεις καθόσον οι πιέσεις επαφής επί του εδάφους λόγω κατακόρυφων φορτίων είναι τυπικά χαμηλές (50 – 75 kPa) σε θεμέλια πύργου ανεμογεννητριών, και επίσης επειδή οι μέγιστες αναμενόμενες καθιζήσεις σε έδαφος με κατάλληλη φέρουσα ικανότητα και δυσκαμψία είναι συνήθως μικρότερες των 2.5cm (Tinjum και Christensen 2010). Επιπρόσθετα, λεπτομερής σχεδιασμός, ολίσθηση και ρευστοποίηση εδάφους εκφεύγουν των σκοπών της παρούσας Εργασίας.

2.2.1. Φέρουσα ικανότητα

Για προστασία από την διατμητική αστοχία του εδάφους που στηρίζεται η θεμελίωση, το οριακό φορτίο που μπορεί να φέρει αυτή Q_{ult} πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το συνολικό κάθετο κατακόρυφο φορτίο, Q , λαμβάνοντας υπ' όψιν πάντα ένα συντελεστή ασφαλείας FS (εξίσωση 2.6) (Don 2007). Η διαδικασία εύρεσης αυτού του συντελεστή ασφαλείας για έκκεντρα φορτισμένες θεμελιώσεις, όπως αυτές των ανεμογεννητριών, είναι γνωστή ως μέθοδος του Meyerhof ή αλλιώς «ενεργού εμβαδού» και περιλαμβάνει τα ακόλουθα γενικά βήματα :

- Προσδιορισμός της εκκεντρότητας της φόρτισης της θεμελίωσης (εξίσωση 2.7) και χρήση της για τον υπολογισμό του ενεργού πλάτους (εξίσωση 2.8), μήκους (εξίσωση 2.9) και εμβαδού (εξίσωση 2.10) αυτής.
- Υπολογισμός της αντίστοιχης γενικής οριακής φέρουσας ικανότητας του Meyerhof (εξίσωση 2.11).
- Υπολογισμός του συνολικού οριακού φορτίου (εξίσωση 2.23) και εξασφάλιση ότι ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας φέρουσας ικανότητας (εξίσωση 2.6) είναι επαρκής.
- Έλεγχος του συντελεστή ασφαλείας έναντι της μέγιστης πίεσης στο έδαφος q_{max} (εξίσωση 2.24). Οι συντελεστές ασφαλείας έναντι αστοχίας της φέρουσας ικανότητας και μέγιστης πίεσης στο έδαφος, συνήθως κυμαίνονται από 2 – 3 (Brown 2001).

Στις παρακάτω εξισώσεις τα $c', q, \gamma, \phi', D_f$ και β αντιπροσωπεύουν τη συνοχή του εδάφους, την ενεργή τάση στον πυθμένα της θεμελίωσης, το ειδικό βάρος

του εδάφους, τη γωνία τριβής του εδάφους, το βάθος των θεμελίων και την κλίση της φόρτισης στη θεμελίωση αντίστοιχα. Επίσης για κυκλικές θεμελιώσεις, τα B και L λαμβάνονται ως η διάμετρος του θεμελίου.

$$FS = \frac{Q_{ult}}{Q} \quad (2.6)$$

$$e = \frac{M}{Q} \quad (2.7)$$

$$B' = B - 2e \quad (2.8)$$

$$L' = L \quad (2.9)$$

$$A' = (B')(L') \quad (2.10)$$

$$q'_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (2.11)$$

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right) e^{\pi \tan \phi'} \quad (2.12)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi' \quad (2.13)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi' \quad (2.14)$$

$$F_{cs} = 1 + \left(\frac{B'}{L} \right) \left(\frac{N_q}{N_c} \right) \quad (2.15)$$

$$F_{qs} = 1 + \left(\frac{B'}{L'} \right) \tan \phi' \quad (2.16)$$

$$F_{\gamma s} = 1 - 0.4 \left(\frac{B'}{L'} \right) \quad (2.17)$$

$$F_{cd} = \begin{cases} 1 + 0.4 \left(\frac{D_f}{B} \right) & , \frac{D_f}{B} \leq 1 \\ 1 + (0.4) \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right) & , \frac{D_f}{B} > 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$F_{qd} = \begin{cases} 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \frac{D_f}{B}, & \frac{D_f}{B} \leq 1 \\ 1 + 2 \tan \phi' (1 - \sin \phi')^2 \tan^{-1} \left(\frac{D_f}{B} \right), & \frac{D_f}{B} > 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$F_{yd} = 1 \quad (2.20)$$

$$F_{ci} = F_{qi} = \left(1 - \frac{\beta^\circ}{90^\circ} \right)^2 \quad (2.21)$$

$$F_{yi} = \left(1 - \frac{\beta}{\phi'} \right)^2 \quad (2.22)$$

$$Q_{ult} = q'_u A' \quad (2.23)$$

$$FS = \frac{q'_u}{q_{max}} \quad (2.24)$$

2.2.2. Δυσκαμψία

Όπως προαναφέρθηκε, προς αποφυγή μεγάλων δυναμικών παραμορφώσεων στην κορυφή του πύργου και για να υφίσταται και η απαιτούμενη απόσβεση, ο τελικός σχεδιασμός του θεμελίου θα πρέπει να ικανοποιεί τις ελάχιστες τιμές περιστροφικής και οριζόντιας δυσκαμψίας, που παρέχεται από τον κατασκευαστή της τουρμπίνας. Τυπικές τιμές αυτών είναι 50 GNm / rad και 1000 MN/m αντίστοιχα.

2.2.3. Ροπή ανατροπής

Καθόσον που τα θεμέλια υπόκεινται σε πολύ μεγάλες ροπές, ο συντελεστής ασφαλείας ενάντια ανατροπής (εξίσωση 2.25) πρέπει να ελέγχεται (Das 2000). Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από το πηλίκο του αθροίσματος των ροπών που ανθίστανται της ανατροπής ΣM_R και του αθροίσματος των ροπών που τείνουν να οδηγήσουν σε ανατροπή, ΣM_O των θεμελίων. Ως σημείο αναφοράς και υπολογισμού των ροπών, λαμβάνεται το σημείο περί του οποίου θα συμβεί η ανατροπή και το οποίο είναι συνήθως στην άκρη της θεμελίωσης.

Οι συντελεστές ασφαλείας έναντι ανατροπής συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 2 – 3 (Das 2000).

$$FS = \frac{\sum M_R}{\sum M_0} \quad (2.25)$$

2.3. Όριο ιδιοσυχνότητας

Προκειμένου να αποφύγουμε το συντονισμό, πρέπει η τιμή της ιδιοσυχνότητας του φέροντα οργανισμού της ανεμογεννήτριας, να είναι αρκετά μακριά από την συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας (διεγείρουσα). Η συχνότητα σε Hertz (Hz) υπολογίζεται από το πηλίκο της γωνιακής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας (σε στροφές ανά λεπτό (rpm) διά 60). Για ανεμογεννήτριες μεγέθους κοινής ωφέλειας, τα διαστήματα λειτουργίας κυμαίνονται κανονικά από 14 έως 31,4 rpm για τις μικρότερες γεννήτριες και για τις μεγαλύτερες από 6,2 έως 17,7 rpm. Αυτές ισοδυναμούν με συχνότητες λειτουργίας μεταξύ 0,23 και 0,52 Hz για μικρότερες γεννήτριες και μεταξύ 0,10 και 0,30 Hz για μεγαλύτερες. Η ιδιοσυχνότητα του φέροντα οργανισμού της ανεμογεννήτριας, πρέπει να διατηρείται πάνω από την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας της συγκεκριμένης γεννήτριας πολλαπλασιασμένη επί ενός συντελεστή, συνήθως μεταξύ 1.1 και 2, ούτως ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός σε οποιοδήποτε σημείο κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γεννήτριας.

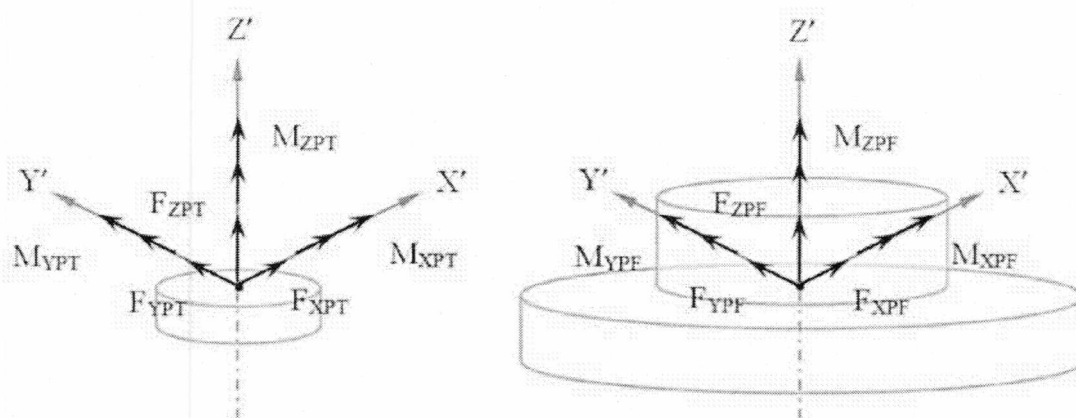
Κεφάλαιο 3 : Ανάλυση

3.1. Φορτία του πύργου και της θεμελίωσης

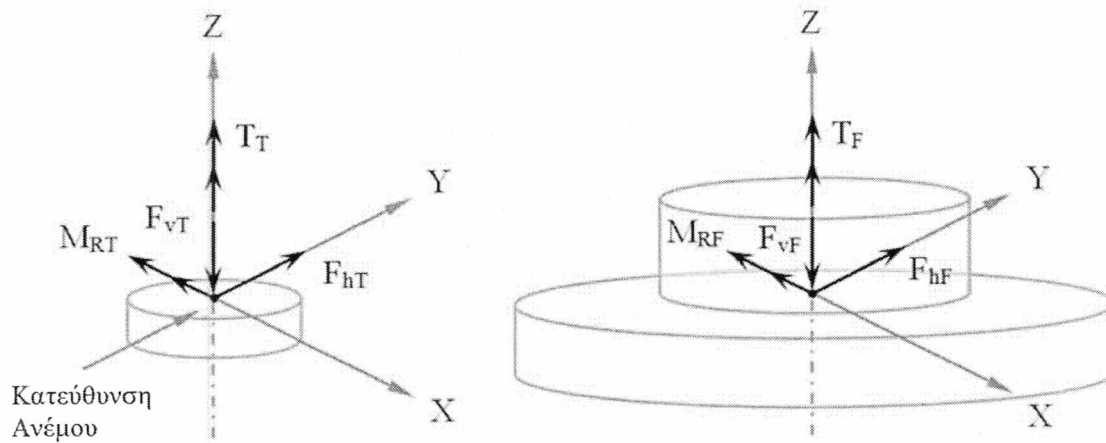
Η παράγραφος αυτή αναφέρεται στα φορτία που θεωρούνται δρώντα επί του πύργου και στη θεμελίωση. Η συνολική φόρτιση του πύργου, αποτελείται από φορτία της γεννήτριας, αέρα, ιδιοβάρος και εσωτερικά μηχανήματα. Φορτία της γεννήτριας, που δρουν στην κορυφή του πύργου λαμβάνονται από ένα έγγραφο περί φορτίσεως της κατασκευής, που δίνεται από τον κατασκευαστή. Τα υπόλοιπα φορτία όπως λόγω αέρα, ίδιο βάρος και από τα εσωτερικά μηχανήματα, προκύπτουν μέσω κατάλληλων (μαθηματικών) τύπων. Η φόρτιση των θεμελίων, είναι αποτέλεσμα των διαφόρων φορτίων του πύργου. Στην φόρτιση των θεμελίων, προστίθεται επίσης και το ίδιο βάρος αυτών.

3.1.1. Φορτία ανωδομής

Προκειμένου να εφαρμοστεί δισδιάστατη ανάλυση, το τρισδιάστατο σύνολο των εντατικών μεγεθών στην κορυφή του πύργου και στη βάση του (θεμελίωση), σύμφωνα με το Σχήμα 3.1. μετασχηματίζεται σε ένα δισδιάστατο σύνολο συνιστάμενων δυνάμεων, που δρουν σε ένα ορισμένο δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1 Τρισδιάστατες συνιστώσες των δυνάμεων στην κορυφή του πύργου και στα θεμέλια.



Σχήμα 3.2 Δισδιάστατες συνιστώσες των δυνάμεων στην κορυφή του πύργου και στα θεμέλια.

Συνιστάμενες δυνάμεις που δρουν στην κορυφή του πύργου :

$$F_{hT} = \sqrt{F_{XPT}^2 + F_{YPT}^2} \quad (3.1)$$

$$F_{vT} = -F_{ZPT} \quad (3.2)$$

$$M_{RT} = \sqrt{M_{XPT}^2 + M_{YPT}^2} \quad (3.3)$$

$$T_T = M_{ZPT} \quad (3.4)$$

$$F_{hF} = \sqrt{F_{XPF}^2 + F_{YPF}^2} \quad (3.5)$$

$$F_{vF} = -F_{ZPF} \quad (3.6)$$

$$M_{RF} = \sqrt{M_{XPF}^2 + M_{YPF}^2} \quad (3.7)$$

$$T_F = M_{ZPF} \quad (3.8)$$

3.1.2. Άνεμος, ίδιο βάρος και δυνάμεις λόγω εσωτερικών εξαρτημάτων.

Στην ανάλυση του πύργου πρέπει να συμπεριληφθούν δυνάμεις που ασκούνται λόγω του ανέμου, του ίδιου βάρους και των εσωτερικών εξαρτημάτων, πέρα από τα φορτία της κορυφής του πύργου.

Οριζόντια καταναμημένο φορτίο ανέμου :

$$W_h = c_f q_i D A F d_e(z) \quad (3.9)$$

όπου

c_f είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης (αντίσταση αέρα)

q_i είναι η πίεση που ασκεί ο άνεμος σε ύψος z

DAF είναι ο δυναμικός συντελεστής ενίσχυσης

$d_e(z)$ είναι η εξωτερική διάμετρος σε ύψος z

Κάθετο κατανεμημένο φορτίο λόγω ιδιουβαρους του πύργου και εσωτερικών εξαρτημάτων:

$$W_v = W_{IF} + A(z)\gamma \quad (3.10)$$

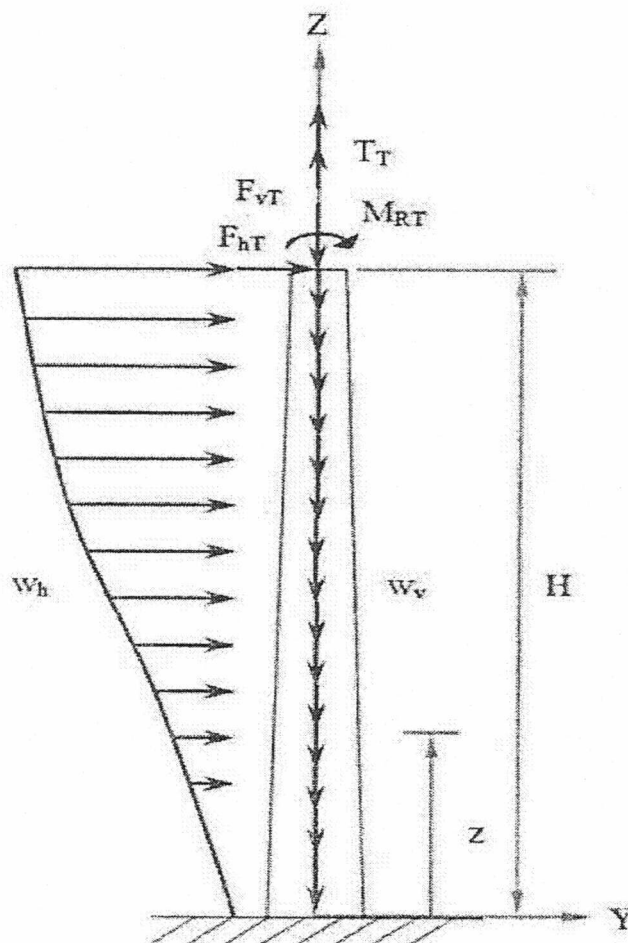
όπου

W_{IF} : το κατανεμημένο φορτίο λόγω εσωτερικών εξαρτημάτων,

$A(z)$: το εμβαδόν της διατομής σε ύψος z και

γ : το ίδιο βάρος του υλικού του πύργου.

Η φόρτιση που έχει θεωρηθεί για τον πύργο φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Φόρτιση του πύργου.

Πέραν των ανωτέρω πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη οι δυνάμεις που οφείλονται στο ίδιο βάρος των θεμελίων στην ανάλυση αυτών. Το ίδιο βάρος αυτών ασκείται στο κέντρο βάρους τους με φορά προς τα αρνητικά z. Το κατακόρυφο φορτίο λόγω ίδιου βάρους της θεμελίωσης ισούται με :

$$W_f = m_f g \quad (3.11)$$

όπου

m_f : η μάζα των θεμελίων και

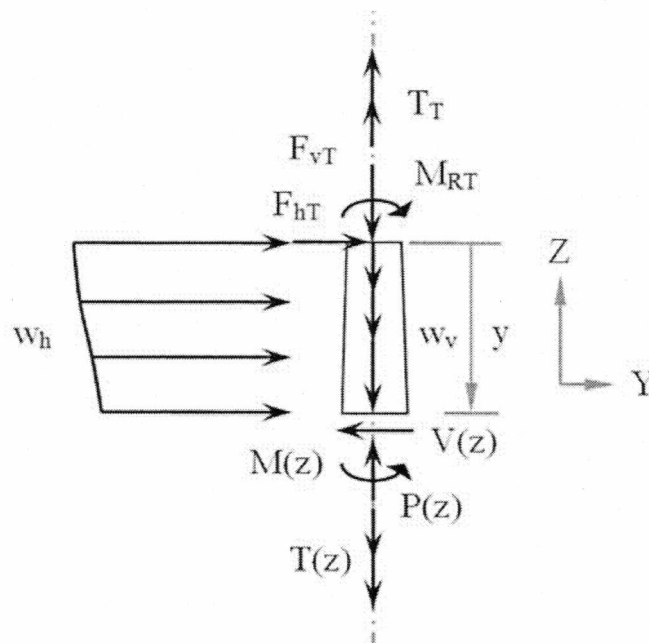
g : η επιτάχυνση βαρύτητας

3.2. Ανάλυση του πύργου

Η ανάλυση του πύργου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των εσωτερικών δυνάμεων, παραμορφώσεων / μετατοπίσεων, δευτερευουσών ροπών λόγω μετατοπίσεων, συνιστωσών τάσεων και κυρίων τάσεων. Οι τάσεις αυτές ευρίσκονται σε κρίσιμα σημεία και η μέγιστη τιμή της κύριας τάσης λαμβάνεται ως τάση σχεδιασμού.

3.2.1. Εσωτερικές δυνάμεις

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον πύργο, θεωρούμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος ενός τμήματος του πύργου μέχρι ύψος y από τη θεμελίωση σύμφωνα με το Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος τμήματος του πύργου.

Οι εσωτερικές δυνάμεις ως συναρτήσεις του ύψους z , έχουν ως εξής :

$$P_{(z)} = F_{vT} + \int_0^{H-z} w_v dy \quad (3.12)$$

$$V_{(z)} = F_{hT} + \int_0^{H-z} w_h dy \quad (3.13)$$

$$T_{(z)} = T_T \quad (3.14)$$

$$M_{(z)} = M_{RT} + F_{hT}(H-z) + \int_0^{H-z} w_h (H-z-y) dy + M_{(z) 2nd order} \quad (3.15)$$

Ροπές δευτέρας τάξης, που οφείλονται σε μετατοπίσεις, υπολογίζονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας και της εξίσωσης 3.16.

$$M_{(z) 2nd order} = P(z) \times 0.75 \times (v_{top} - v_i) \quad (3.16)$$

όπου v_i είναι η μετατόπιση του τμήματος i και v_{top} είναι η μετατόπιση στην κορυφή του πύργου.

3.2.2. Μετατοπίσεις

Αυτές υπολογίζονται με την εφαρμογή μιας διαδικασίας αριθμητικής ολοκλήρωσης, η οποία χρησιμοποιεί τον κανόνα του τραπεζιού, στη διαφορική εξίσωση ελαστικής γραμμής δύο φορές. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αυτή η εξίσωση προϋποθέτει γραμμικά ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής. Κατά συνέπεια, μπορούμε να γράψουμε πως :

$$EI(z)v''(z) = -M(z) \quad (3.17)$$

$$v''_i = -\frac{M(z_i)}{EI(z_i)} \quad (3.18)$$

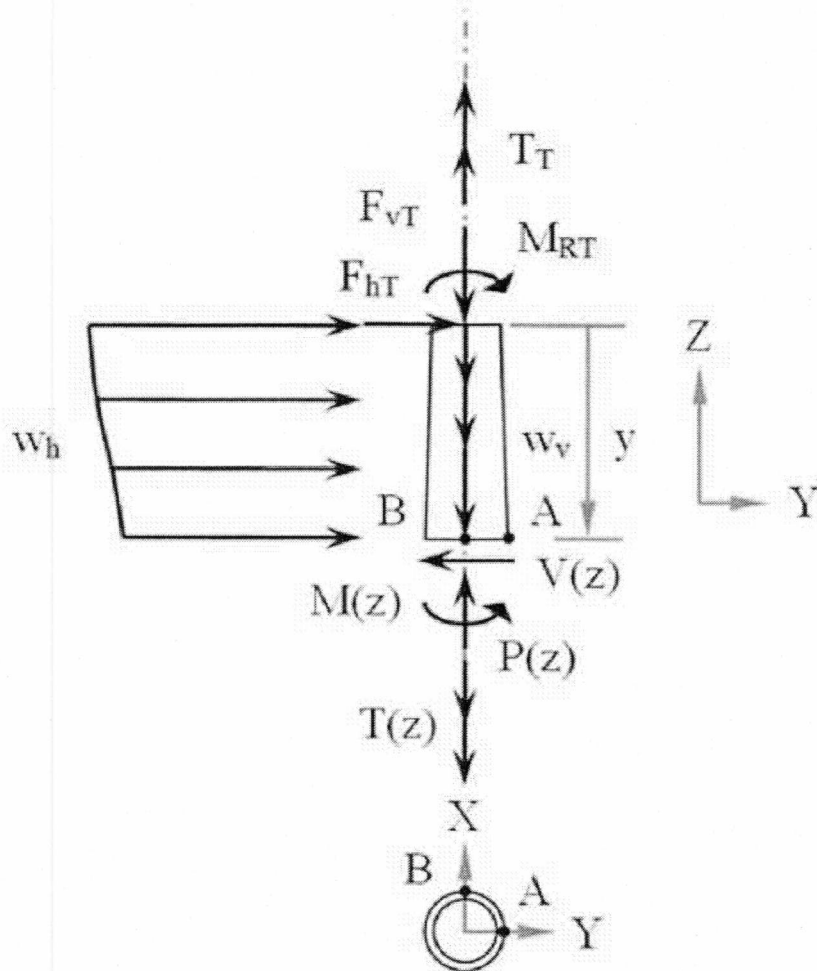
$$v'_i = v'_{i-1} + \frac{v''_i + v''_{i-1}}{2} h \quad (3.19)$$

$$v_i = v_{i-1} + \frac{v'_i + v'_{i-1}}{2} h \quad (3.20)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του Young, $I(z)$ είναι η ροπή αδράνειας της διατομής σε ύψος z και $h = z_i - z_{i-1}$.

3.2.3. Τάσεις στη διατομή

Από τη στιγμή που προσδιοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις που δρουν στον πύργο, υπολογίζονται οι συνιστώσες των εσωτερικών τάσεων και οι κύριες τάσεις στα δύο κρίσιμα σημεία, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.5. Η μέγιστη κύρια τάση λαμβάνεται ως τάση σχεδιασμού.



Σχήμα 3.5 Θέση των κρίσιμων σημείων A και B.

3.2.3.1. Συνιστώσες των τάσεων

Οι συνιστώσες εσωτερικών τάσεων στο κρίσιμο σημείο (A) έχουν ως εξής :

$$\sigma_z = \frac{P(z)}{A(z)} + \frac{M(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{I(z)} \quad (3.21)$$

$$\tau_{zx} = \frac{T(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{J(z)} \quad (3.22)$$

και με την ίδια λογική, οι εν λόγω συνιστώσες στο κρίσιμο σημείο (B) είναι ίσες με :

$$\sigma_z = \frac{P(z)}{A(z)} \quad (3.23)$$

$$\tau_{zy} = \frac{T(z) \left(\frac{d_e(z)}{2} \right)}{J(z)} + \frac{V(z) Q(z)}{I(z) b(z)} \quad (3.24)$$

Στις παραπάνω σχέσεις $A(z)$ είναι το εμβαδόν της διατομής σε ύψος z , $d_e(z)$ είναι η εξωτερική διάμετρος του πύργου σε ύψος z , $J(z)$ είναι η πολική ροπή αδρανείας σε ύψος z , $Q(z)$ είναι η πρώτη ροπή σε ύψος z και $b(z)$ είναι το πλάτος του υλικού της διατομής σε ύψος z .

3.2.3.2. Κύριες τάσεις

Οι κύριες τάσεις ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) στα κρίσιμα σημεία A και B είναι οι ιδιοτιμές (σ_p) του τανυστή των τάσεων και μπορούν να βρεθούν λύνοντας την χαρακτηριστική εξίσωση (3.25) σε κάθε κρίσιμο σημείο (Ugural και Fenster 2003).

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_p & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_p \end{vmatrix} = 0 \quad (3.25)$$

όπου

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

3.3. Ανάλυση θεμελίων

Η ανάλυση της θεμελίωσης συνίσταται στον υπολογισμό της συνολικής κατακόρυφης δύναμης, του συνολικού φορτίου του εδάφους, των τιμών δυσκαμψίας των θεμελίων και των ροπών ανατροπής και αντίστασης. Οι τιμές που προκύπτουν από τα προαναφερθέντα είναι οι απαιτούμενες προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού της θεμελίωσης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.

3.3.1. Συνολικό κατακόρυφο φορτίο

Το συνολικό κατακόρυφο φορτίο είναι το άθροισμα της κατακόρυφης δύναμης που δέχονται τα θεμέλια από την ανωδομή και του ιδιουβάρους των θεμελίων (εξίσωση 3.26).

$$Q = F_{vF} + W_f \quad (3.26)$$

3.3.2. Συνολική πίεση επί του εδάφους

Η μέγιστη πίεση επί του εδάφους, για έκκεντρα φορτιζόμενες θεμελιώσεις, δίνονται από την εξίσωση 3.27. Στη δεύτερη περίπτωση, $e \geq B/6$ υπολογίζει τη μέγιστη πίεση στο έδαφος όταν υπάρχει αποκόλληση μεταξύ θεμελίωσης και εδάφους. Η εκκεντρότητα της φόρτισης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.28. (Das 2007).

$$q_{max} = \begin{cases} \frac{Q}{BL} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) & , e < \frac{B}{6} \\ \frac{4Q}{3L(B-2e)} & , e \geq \frac{B}{6} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$e = \frac{M_{RF}}{Q} \quad (3.28)$$

όπου B και L είναι ουσιαστικά η διάμετρος για κυκλικό θεμέλιο.

3.3.3. Δυσκαμψία θεμελίωσης

Οι τιμές της δυσκαμψίας του εδάφους εξαρτώνται από : τις ιδιότητες του εδάφους, τις διαστάσεις της θεμελίωσης και το βάθος του βραχώδους υποστρώματος. Η περιστροφική δυσκαμψία ισούται με το λόγο μεταξύ της ροπής ανατροπής προς τη γωνία στροφής.

Η οριζόντια δυσκαμψία είναι ο λόγος των οριζόντιων δυνάμεων προς τις οριζόντιες μετατοπίσεις. Οι τιμές οριζόντιας και στροφικής ακαμψίας για μια κυκλική βάση, ενσωματωμένη σε ένα εδαφικό στρώμα πάνω από βραχώδες υπόστρωμα, υπολογίζονται από τις εξισώσεις 3.29, 3.30 αντίστοιχα.

$$K_R = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H_b}\right) \left(1 + 2\frac{D_f}{R}\right) \left(1 + 0.7\frac{D_f}{H_b}\right) \quad (3.29)$$

$$K_H = \frac{8GR}{1-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H_b}\right) \left(1 + \frac{2D_f}{3R}\right) \left(1 + \frac{5}{4} \frac{D_f}{H_b}\right) \quad (3.30)$$

όπου G , R , ν , D_f , και H_b είναι το μέτρο διάτμησης του εδάφους, η ακτίνα του θεμελίου, η σταθερά του Poisson για το έδαφος, το βάθος θεμελίωσης και το βάθος του βραχώδους υποστρώματος αντίστοιχα.

3.3.4. Ανατροπή θεμελίωσης

Οι ροπές αντίστασης (εξίσωση 3.31) και ανατροπής (εξίσωση 3.32) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφαλείας, έναντι ανατροπής και υπολογίζονται στον πόδα των θεμελίων, από τη στιγμή που εκεί πρόκειται να συμβεί το φαινόμενο (Das 2007). Η συνολική ροπή αντίστασης είναι η ολική κατακόρυφη δύναμη πολλαπλασιασμένη επί τη μισή διάμετρο των θεμελίων. Η συνολική ροπή ανατροπής είναι το άθροισμα της συνισταμένης ροπής και της συνισταμένης οριζόντιας δύναμης πολλαπλασιασμένη με το ύψος των θεμελίων, σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$\sum M_R = Q \times \frac{B}{2} \quad (3.31)$$

$$\sum M_O = F_{hF} \times (D_f + h_p) + M_{RF} \quad (3.32)$$

όπου D_f και h_p είναι το βάθος της θεμελίωσης και το ύψος του βάθρου εκτός εδάφους (πάνω στο έδαφος) αντίστοιχα.

3.4. Ανάλυση συχνότητας

Η ιδιοσυχνότητα f_n του πύργου και του συστήματος πύργου και θεμελίωσης, αποκτάται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ισοδύναμων συγκεντρωμένων μαζών, η οποία απορρέει από τη μέθοδο του Rayleigh. Αυτή η μέθοδος θεωρεί ότι η μάζα του πύργου είναι συγκεντρωμένη σε μια σειρά σημείων και η παραμόρφωση υπό στατική φόρτιση πλησιάζει την θεμελιώδη (1η) κανονική μορφή ταλάντωσης. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται με τον υπολογισμό των τιμών της ενεργής δυσκαμψίας (εξίσωση 3.27) και της ενεργής μάζας (εξίσωση 3.28) και αντικαθιστώνται αυτές στην εξίσωση 3.26.

Συνεπώς, βρίσκεται ότι:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.33)$$

$$\bar{k} = g \sum_{i=1}^n m_i v_i \quad (3.34)$$

$$\bar{m} = g \sum_{i=1}^n m_i v_i^2 \quad (3.35)$$

όπου m_i είναι η μάζα του i τμήματος του πύργου και όπου v_i είναι η παραμόρφωση του i τμήματος του πύργου υπό στατική φόρτιση.

Κεφάλαιο 4 : Διατύπωση / Μόρφωση του Προβλήματος Βελτιστοποίησης

4.1. Μεταβλητές βελτιστοποίησης

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν μεταβλητές σχεδιασμού, ανεξάρτητες παραμέτρους, εξαρτημένες μεταβλητές και μεταβλητές εξαρτημένες από το ύψος.

4.1.1. Σχεδιαστικές μεταβλητές

Οι διαστάσεις της διατομής του πύργου και της θεμελίωσης μεταχειρίζονται ως μεταβλητές σχεδιασμού για τη μόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης :

| | | |
|----------|---|---|
| d_{bo} | = | εξωτερική διάμετρο της βάσης του πύργου |
| d_{to} | = | εξωτερική διάμετρο της κορυφής του πύργου |
| t | = | πάχος του τοιχώματος του πύργου |
| B | = | διάμετρος της βάσης των θεμελίων |
| t_{fo} | = | πάχος της θεμελίωσης στο εξωτερικό ίχνος/στρώμα |

4.1.2. Ανεξάρτητες παράμετροι

Οι παρακάτω παράμετροι είναι ανεξάρτητες από τις σχεδιαστικές μεταβλητές και απαιτούν προσδιορισμό προτού αρχίσει η διαδικασία της βελτιστοποίησης :

| | | |
|-----------|---|--|
| F_{XPT} | = | οριζόντια δύναμη στην κορυφή του πύργου συνευθειακή με τον άξονα του ρότορα. |
| F_{YPT} | = | οριζόντια πλάγια δύναμη στην κορυφή του πύργου. |
| F_{ZPT} | = | κατακόρυφη δύναμη προς τα πάνω στην κορυφή του πύργου. |
| M_{XPT} | = | ροπή ως προς τον x' άξονα στην κορυφή του πύργου |
| M_{YPT} | = | ροπή ως προς τον y' άξονα στην κορυφή του πύργου |
| M_{ZPT} | = | ροπή ως προς τον z' άξονα στην κορυφή του πύργου |
| F_{XPF} | = | οριζόντια δύναμη στα θεμέλια συνευθειακή με τον άξονα του ρότορα |
| F_{YPF} | = | οριζόντια πλάγια δύναμη στα θεμέλια |

| | | |
|------------------|---|---|
| F_{ZPF} | = | κατακόρυφη προς τα πάνω δύναμη στα θεμέλια |
| M_{XPF} | = | ροπή ως προς x' άξονα στη θεμελίωση |
| M_{YPF} | = | ροπή ως προς y' άξονα στη θεμελίωση |
| M_{ZPF} | = | ροπή ως προς z' άξονα στη θεμελίωση |
| F_{hT} | = | οριζόντια δύναμη στην κορυφή του πύργου |
| F_{vT} | = | κατακόρυφη δύναμη στην κορυφή του πύργου με φορά προς τα κάτω |
| M_{RT} | = | συνισταμένη ροπή στην κορυφή του πύργου |
| T_T | = | στρεπτική ροπή στην κορυφή του πύργου |
| F_{hF} | = | οριζόντια συνισταμένη δύναμη στο θεμέλιο |
| F_{vF} | = | κατακόρυφη δύναμη στο θεμέλιο με φορά προς τα κάτω |
| M_{RF} | = | συνισταμένη ροπή στην θεμελίωση |
| T_F | = | στρεπτική ροπή στη θεμελίωση |
| ρ_s | = | πυκνότητα μάζας του χάλυβα |
| μ_t | = | κόστος του πύργου |
| μ_f | = | κόστος της θεμελίωσης |
| $FS_{frequency}$ | = | συντελεστής ασφαλείας για ιδιοσυχνότητα |
| f_{req} | = | συχνότητα γεννήτριας |
| f_y | = | τάση διαρροής του χάλυβα |
| FS_{MDE} | = | συντελεστής ασφαλείας μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης |
| v_a | = | επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής |
| v'_a | = | επιτρεπόμενη στροφή της κορυφής |
| K_{ReqRot} | = | ελάχιστη απαιτούμενη περιστροφική δυσκαμψία |
| $K_{ReqHoriz}$ | = | ελάχιστη απαιτούμενη οριζόντια δυσκαμψία |
| V_{ref} | = | ταχύτητα ανέμου αναφοράς |
| H_n | = | ύψος θαλάμου |

| | | |
|------------------|---|--|
| W_n | = | πλάτος θαλάμου |
| H | = | ύψος πύργου |
| ρ_a | = | πυκνότητα του αέρα |
| γ_s | = | ειδικό βάρος του χάλυβα |
| ρ_c | = | πυκνότητα του σκυροδέματος |
| E_s | = | μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. |
| c_f | = | συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης (αντίστασης αέρα) στον πύργο |
| DAF | = | συντελεστής δυναμικής ενίσχυσης |
| w_{IF} | = | κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο λόγω εσωτερικών εξαρτημάτων |
| g | = | επιτάχυνση βαρύτητας |
| ϕ' | = | γωνία τριβής του εδάφους |
| c' | = | συνοχή εδάφους |
| γ | = | ίδιο βάρος του εδάφους |
| t_p | = | πάχος του βάθρου |
| d_p | = | διάμετρος του βάθρου |
| a_f | = | διάσταση των θεμελίων a |
| h_p | = | ύψος του βάθρου πάνω από το έδαφος |
| G_0 | = | αρχικό μέτρο διατμήσεως |
| γ_{shear} | = | ποσοστού μείωσης μέτρου διατμήσεως |
| G | = | μέτρο διατμήσεως |
| ν | = | συντελεστής Poisson |
| H_{hub} | = | ύψος κέντρο τροχού |
| τ_{yield} | = | αντοχή σε διατμητική διαρροή |
| N_q | = | συντελεστής φέρουσας ικανότητας |
| N_γ | = | συντελεστής φέρουσας ικανότητας |
| β | = | κλίση του φορτίου στη θεμελίωση σε σχέση με την κατακόρυφο |

| | | |
|----------|---|---|
| F_{ci} | = | συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{qi} | = | συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{ri} | = | συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό οριακής φέρουσας ικανότητας |

4.1.3. Εξαρτημένες μεταβλητές

Οι παρακάτω μεταβλητές εξαρτώνται από τις μεταβλητές σχεδίασης – μελέτης και θα αλλάξουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης :

| | | |
|---------------------|---|--|
| τ | = | κωνικότητα του πύργου |
| V_t | = | όγκος του πύργου |
| m_t | = | μάζα του πύργου |
| V_f | = | όγκος των θεμελίων |
| m_f | = | μάζα των θεμελίων |
| f_n | = | ιδιοσυχνότητα |
| $\sigma_1^{cpA_t}$ | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_2^{cpA_t}$ | = | ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_3^{cpA_t}$ | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_1^{cpB_t}$ | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_2^{cpB_t}$ | = | ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_3^{cpB_t}$ | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου |
| $\sigma_1^{cpA_b}$ | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου |
| $\sigma_2^{cpA_b}$ | = | μέση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου |
| $\sigma_3^{cpA_b}$ | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου |
| $\sigma_1^{cpB_b}$ | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου |
| $\sigma_2^{cpB_b}$ | = | μέση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου |
| $\sigma_3^{cpB_b}$ | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου |
| r_m | = | μέση ακτίνα διατομής |

| | | |
|----------------------------|---|---|
| $\sigma_{CriticalElastic}$ | = | κρίσιμη ελαστική τάση λυγισμού |
| α_0 | = | συντελεστής μείωσης αξονικής κρίσιμης τάσης |
| α_B | = | συντελεστής μείωσης καμπτικής κρίσιμης τάσης |
| $\sigma_{buckling}$ | = | επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού |
| v_{top} | = | μετατόπιση της κορυφής του πύργου |
| v'_{top} | = | στροφή του άκρου στην κορυφή του πύργου |
| D_f | = | βάθος θεμελίωσης |
| q | = | ισοδύναμη επιφόρτιση για το έδαφος πάνω από τη θεμελίωση |
| b_f | = | δεύτερη διάσταση της θεμελίωσης b |
| e | = | εκκεντρότητα της φόρτισης στα θεμέλια |
| b_e | = | ενεργός / επιφάνεια θεμελίωσης / ασθενής άξονας |
| I_e | = | ενεργός / επιφάνεια θεμελίωσης μεγάλος άξονας |
| A_{eff} | = | ενεργός επιφάνεια θεμελίωσης |
| L' | = | ενεργό μήκος της θεμελίωσης |
| B' | = | ενεργό πλάτος της θεμελίωσης |
| A' | = | ενεργό εμβαδό ισοδύναμου ορθογωνίου |
| F_{cs} | = | συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{qs} | = | συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{rs} | = | συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{cd} | = | συντελεστής βάθους για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{qd} | = | συντελεστής βάθους για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας |
| F_{rd} | = | συντελεστής βάθους για τον υπολογισμό της οριακής |

| | |
|----------------------|---|
| | φέρουσας ικανότητας |
| q'_u | = οριακή φέρουσα ικανότητα του Meyerhof |
| Q_{ult} | = ολικό οριακό φορτίο που αντέχει η θεμελίωση |
| Q_{total} | = ολικό κατακόρυφο φορτίο που αντέχει η θεμελίωση |
| $FS_{bearing}$ | = συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας φέρουσας ικανότητας |
| q_{max} | = μέγιστη πίεση στο έδαφος |
| $FS_{Soil Pressure}$ | = συντελεστής ασφαλείας μέγιστης πίεσης στο έδαφος |
| K_R | = στρωφική δυσκαμψία των θεμελίων |
| K_H | = οριζόντια δυσκαμψία των θεμελίων |
| $\sum M_R$ | = άθροισμα ροπών αντίστασης |
| $\sum M_O$ | = άθροισμα ροπών ανατροπής |

4.1.4. Μεταβλητές εξαρτημένες από ύψος

Οι παρακάτω μεταβλητές εξαρτώνται από το ύψος του πύργου.

| | |
|-----------|--|
| z | = ύψος πάνω από το έδαφος |
| V_{e50} | = αναμενόμενη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου με διάστημα επαναφοράς 50 χρόνια |
| q_i | = πίεση του ανέμου |
| d_0 | = εξωτερική διάμετρος του πύργου |
| w_h | = οριζόντιο κατανεμημένο φορτίο ανέμου |
| d_i | = εσωτερική διάμετρος του πύργου |
| A | = εμβαδό διατομής του πύργου |
| w_v | = κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο |
| y | = απόσταση από την κορυφή του πύργου |
| P | = αξονική δύναμη διατομής |
| V | = τέμνουσα δύναμη διατομής |
| T | = στρεπτική ροπή |
| M | = καμπτική ροπή διατομής |

| | | |
|------------------|---|---|
| I | = | ροπή αδράνειας διατομής |
| v'' | = | καμπυλότητα στο κατακόρυφο επίπεδο |
| v' | = | στροφή στο κατακόρυφο επίπεδο |
| v | = | οριζόντια μετατόπιση |
| M_{2nd} | = | καμπτική ροπή 2ας τάξης |
| σ_{ZcpA} | = | θλιπτική τάση κατά μήκος του άξονα z στο κρίσιμο σημείο A |
| σ_{ZcpB} | = | θλιπτική τάση κατά μήκος του άξονα z στο κρίσιμο σημείο B |
| J | = | πολική ροπή αδρανείας της διατομής |
| τ_{ZXcpA} | = | διατμητική τάση λόγω στρέψης στο κρίσιμο σημείο A |
| Q | = | ροπή αδράνειας 1ης τάξης στη διατομή |
| b | = | το πλάτος εκεί που υπολογίζεται η διατμητική τάση |
| τ_{ZYcpB} | = | διατμητική τάση λόγω στρέψης και διάτμησης στο κρίσιμο σημείο B |
| σ_1^{cpA} | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A |
| σ_2^{cpA} | = | ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A |
| σ_3^{cpA} | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A |
| σ_1^{cpB} | = | μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B |
| σ_2^{cpB} | = | ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B |
| σ_3^{cpB} | = | ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B |
| \bar{k} | = | ενεργός – ωφέλιμη δυσκαμψία για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας |
| \bar{m} | = | ενεργή μάζα για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας |

4.2. Αντικειμενική συνάρτηση

Ο σκοπός μας είναι να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος του πύργου και της θεμελίωσης (εξίσωση 4.1). Για να υπολογίσουμε την αντικειμενική συνάρτηση, ουσιαστικά πολλαπλασιάζουμε τις μάζες του πύργου και της θεμελίωσης, με τις αντίστοιχες τους τιμές κόστους και αθροίζουμε τα γινόμενα δηλαδή :

$$f = m_t \times \mu_t + m_f \times \mu_f \quad (4.1)$$

4.3. Περιορισμοί

Στο εδάφιο αυτό, οι απαιτήσεις σχεδιασμού που περιγράφηκαν στο 2ο Κεφάλαιο, μετατρέπονται σε περιορισμούς βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, οι απαιτήσεις που σχετίζονται με όρια των μεταβλητών σχεδιασμού, όρια ιδιοσυχνοτήτων, όρια τοπικού λυγισμού, όρια μετατοπίσεων και στροφών της κορυφής, επιτρεπόμενη φέρουσα ικανότητα, δυσκαμψία θεμελίωσης και ανατροπή θεμελίωσης μετατρέπονται σε ανισοτικούς περιορισμούς. Αυτοί αναπαρίσταται με το γράμμα g και γράφονται με κλασσική μορφή. Επίσης, οι περιορισμοί, έχουν κανονικοποιηθεί, όπου είναι δυνατόν, με σκοπό την καλυτέρευση της διαδικασίας βελτιστοποίησης (Aroga 2004).

4.3.1. Περιορισμοί μεταβλητών σχεδιασμού

Οι περιορισμοί στις μεταβλητές σχεδιασμού του πύργου, οι οποίοι καθορίζουν το τελικό σχεδιασμό του, προέρχονται από περιορισμούς μεταφοράς και κατασκευαστικούς. Οι περιορισμοί στις σχεδιαστικές μεταβλητές της θεμελίωσης, που καθορίζουν τον τελικό σχεδιασμό της, τυπικά προέρχονται από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που προκύπτουν όταν σχεδιάζουμε ρηχά θεμέλια ανεμογεννήτριας.

4.3.1.1. Όρια στην εξωτερική διάμετρο της βάσης του πύργου

Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2, η εξωτερική διάμετρος της βάσης του πύργου δεν μπορεί να ξεπερνά τα 4,5m λόγω των περιορισμών μεταφοράς. Επιπρόσθετα, πρέπει να ορίσουμε , για άλλη μια φορά, ένα κατώτερο όριο στην εξωτερική διάμετρο ώστε να εξασφαλίσουμε ότι αυτό το όριο παραμένει πάνω από το μηδέν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οπότε :

$$g_1 = 0.1 - d_{bo} \leq 0 \quad (4.2)$$

$$g_2 = d_{bo} - 4.5 \leq 0 \quad (4.3)$$

4.3.1.2. Όρια στην εξωτερική διάμετρο της κορυφής του πύργου

Η εξωτερική διάμετρος της κορυφής του πύργου δεν μπορεί να ξεπερνάει το πλάτος της ατράκτου. Εδώ αυτή θεωρείται ίση με 3.4m (έχοντας συμπεριλάβει και τη τουρμπίνα). Για άλλη μια φορά πρέπει να ορίσουμε ένα κατώτατο όριο στην εξωτερική διάμετρο για να διασφαλίσουμε ότι αυτή η τιμή

παραμένει πάνω από το μηδέν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης και συνεπώς :

$$g_3 = 0.1 - d_{to} \leq 0 \quad (4.4)$$

$$g_4 = d_{to} - 3.4 \leq 0 \quad (4.5)$$

4.3.1.3. Όρια στο πάχος του τοιχώματος του πύργου

Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2, το μέγιστο πάχος του τοιχώματος του πύργου είναι 40mm, λόγω των περιορισμών στο πάχος του χάλυβα που μπορεί να παραχθεί βιομηχανικά, χρησιμοποιώντας τον κλασσικό εξοπλισμό. Όπως και παραπάνω :

$$g_5 = 0.001 - t \leq 0 \quad (4.6)$$

$$g_6 = t - 0.04 \leq 0 \quad (4.7)$$

4.3.1.4. Όρια στη διάμετρο του θεμελίου

Ο σχεδιασμός των τυπικών «ρηχών» θεμελιώσεων ανεμογεννήτριας, προβλέπει διάμετρο βάσης από 10 – 30m. Για αυτό το λόγο, δεχόμαστε ως κατώτατο και ανώτατο όριο, τα 10 και 30m αντίστοιχα για τη διάμετρο βάσης της θεμελίωσης, ήτοι:

$$g_7 = 10 - B \leq 0 \quad (4.8)$$

$$g_8 = B - 30 \leq 0 \quad (4.9)$$

4.3.1.5. Όρια στο πάχος θεμελίωσης στο εξωτερικό όριο (άκρο)

Ο σχεδιασμός των κλασσικών «ρηχών» θεμελιώσεων ανεμογεννήτριας, προβλέπουν πάχος του εξωτερικού άκρου – ορίου (πλευρικού ορίου) από 0,50 – 1,5m. Για αυτό το λόγο δεχόμαστε τα 0.50 – 1.50 m ως κατώτατο και ανώτατο όριο αντίστοιχα.

$$g_9 = 0.50 - t_{fo} \leq 0 \quad (4.10)$$

$$g_{10} = t_{fo} - 1.5 \leq 0 \quad (4.11)$$

4.3.2. Περιορισμός ιδιοσυχνότητας

Η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής που στηρίζει την ανεμογεννήτρια πρέπει να παραμένει πάνω από τη μέγιστη συχνότητα λειτουργίας μίας συνήθους

γεννήτριας. Αυτό γίνεται με έναν κατάλληλο συντελεστή, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 1,1 – 2 , προκειμένου να αποφευχθεί ο συντονισμός σε οποιοδήποτε σημείο, κατά την περίοδο λειτουργίας της γεννήτριας. Αυτός ο περιορισμός απλοποιήθηκε διαιρώντας και τα δύο άκρα της ανισότητας με την ιδιοσυχνότητα του πύργου ως εξής :

$$g_{11} = \frac{FS_{frequency} \times f_{req}}{f_n} \leq 1 \quad (4.12)$$

4.3.3. Περιορισμοί Τοπικού Λυγισμού

Μια τασική μέθοδος επιτρεπόμενου τοπικού λυγισμού και η θεωρία της μέγιστης παραμόρφωσης, χρησιμοποιούνται ώστε να «προστατεύσουν» το τοίχωμα του πύργου έναντι τοπικού λυγισμού. Το εδάφιο αυτό περιγράφει τη μετατροπή των μεθόδων αυτών σε περιορισμούς βελτιστοποίησης.

4.3.3.1. Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού

Η μέθοδος επιτρεπόμενης τάσης τοπικού λυγισμού προϋποθέτει ότι η μέγιστη κύρια τάση στην κατασκευή δεν ξεπερνάει την επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού. Ο περιορισμός αυτός εφαρμόζεται στην κορυφή και στη βάση του πύργου, προκειμένου να ισχύει για όλο το ύψος της κατασκευής. Επίσης, υπολογίζονται οι τιμές της μέγιστης κύριας τάσης και στα δύο κρίσιμα σημεία Α και Β ώστε να καλύψουν τη διακύμανση των τάσεων στη διατομή. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, οι σχετικοί περιορισμοί έχουν ως ακολούθως :

$$g_{12} = \frac{\sigma_1^{cpA_t}}{\sigma_{buckling}} \leq 1 \quad (4.13)$$

$$g_{13} = \frac{\sigma_1^{cpA_b}}{\sigma_{buckling}} \leq 1 \quad (4.14)$$

$$g_{14} = \frac{\sigma_1^{cpB_t}}{\sigma_{buckling}} \leq 1 \quad (4.15)$$

$$g_{15} = \frac{\sigma_1^{cpB_b}}{\sigma_{buckling}} \leq 1 \quad (4.16)$$

4.3.3.2. Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης

Η θεωρία αυτή (κριτήριο von Mises) προϋποθέτει ότι η ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου της κατασκευής δεν ξεπερνάει την

ενέργεια που σχετίζεται με τη διαρροή σε δοκιμή απλού εφελκυσμού. Ένας αντίστοιχος συντελεστής ασφαλείας, FSMDE, εφαρμόζεται συνήθως για να μειώσει την τάση διαρροής του υλικού f_y . Αυτό εφαρμόζεται στο ανώτατο σημείο του πύργου αλλά και στη βάση προκειμένου να ικανοποιείται η συνθήκη για όλο το ύψος της κατασκευής. Τέλος υπολογίζονται οι τιμές μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης και στα κρίσιμα σημεία A και B ώστε να αντιπροσωπεύσουν τη διακύμανση της τάσης στην κατασκευή.

$$g_{16} = \frac{(\sigma_1^{cpA_t} - \sigma_2^{cpA_t})^2 + (\sigma_2^{cpA_t} - \sigma_3^{cpA_t})^2 + (\sigma_3^{cpA_t} - \sigma_1^{cpA_t})^2}{2 \left(\frac{f_y}{FS_{MDE}} \right)^2} \leq 1 \quad (4.17)$$

$$g_{17} = \frac{(\sigma_1^{cpA_b} - \sigma_2^{cpA_b})^2 + (\sigma_2^{cpA_b} - \sigma_3^{cpA_b})^2 + (\sigma_3^{cpA_b} - \sigma_1^{cpA_b})^2}{2 \left(\frac{f_y}{FS_{MDE}} \right)^2} \leq 1 \quad (4.18)$$

$$g_{18} = \frac{(\sigma_1^{cpB_t} - \sigma_2^{cpB_t})^2 + (\sigma_2^{cpB_t} - \sigma_3^{cpB_t})^2 + (\sigma_3^{cpB_t} - \sigma_1^{cpB_t})^2}{2 \left(\frac{f_y}{FS_{MDE}} \right)^2} \leq 1 \quad (4.19)$$

$$g_{19} = \frac{(\sigma_1^{cpB_b} - \sigma_2^{cpB_b})^2 + (\sigma_2^{cpB_b} - \sigma_3^{cpB_b})^2 + (\sigma_3^{cpB_b} - \sigma_1^{cpB_b})^2}{2 \left(\frac{f_y}{FS_{MDE}} \right)^2} \leq 1 \quad (4.20)$$

4.3.4. Περιορισμός μετατόπιση κορυφής

Όπως προαναφέρθηκε (Κεφάλαιο 2), η μέγιστη μετατόπιση στην κορυφή του πύργου περιορίζεται σε μια επιτρεπόμενη παραμόρφωση της τάξης του 1,25 % του ύψους του πύργου, ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική κίνηση του στροβίλου, οπότε:

$$g_{20} = \frac{v_{top}}{v_a} \leq 1 \quad (4.21)$$

4.3.5. Περιορισμός στροφή κορυφής

Παρόμοια, η μέγιστη περιστροφή στην κορυφή του πύργου περιορίζεται σε μια επιτρεπτή στροφή των 5° προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ των πτερυγίων και του πύργου, άρα :

$$g_{21} = \frac{v'_{top}}{v'_\alpha} \leq 1 \quad (4.22)$$

4.3.6. Περιορισμοί φέρουσας ικανότητας

Προκειμένου να προστατευθούμε από αστοχία λόγω διάτμησης στο έδαφος που στηρίζει τη θεμελίωση, πρέπει το μέγιστο φορτίο που δύναται αυτή να φέρει, να είναι μεγαλύτερο από το συνολικό κατακόρυφο φορτίο που ασκείται σε αυτή. Για αυτό χρησιμοποιούμε έναν αντίστοιχα συντελεστή ασφαλείας $FS_{bearing}$. Επιπρόσθετα, η μέγιστη φέρουσα ικανότητα της θεμελίωσης, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη πίεση στο έδαφος, με τη βοήθεια ενός συντελεστή ασφαλείας $FS_{SoilPressure}$. Οι συντελεστές ασφαλείας έναντι αστοχίας φέρουσας ικανότητας και μέγιστης πίεσης στο έδαφος συνήθως κυμαίνονται από 2 – 3. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε την τιμή 3 ώστε να εξασφαλίσουμε έναν συντηρητικό σχεδιασμό :

$$g_{22} = \frac{3}{FS_{bearing}} \leq 1 \quad (4.23)$$

$$g_{23} = \frac{3}{FS_{Soil Pressure}} \leq 1 \quad (4.24)$$

4.3.7. Περιορισμοί δυσκαμψίας

Ο τελικός σχεδιασμός των θεμελίων πρέπει να ικανοποιεί τις ελάχιστες στρεπτικές και αξονικές τιμές δυσκαμψίας, οι οποίες παρέχονται από τον κατασκευαστή προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική κίνηση στην κορυφή του πύργου και να προσφερθεί η απαιτούμενη απόσβεση. Για την στροφική και αξονική – οριζόντια δυσκαμψία λαμβάνεται αντίστοιχα 50 GN-m/rad και 1.000 MN/m, οπότε :

$$g_{24} = \frac{K_{ReqRot}}{K_R} \leq 1 \quad (4.25)$$

$$g_{25} = \frac{K_{ReqHoriz}}{K_H} \leq 1 \quad (4.26)$$

4.3.8. Περιορισμός ανατροπής

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ανατροπής, ο οποίος προκύπτει από τη διαίρεση του αθροίσματος των ροπών που τείνουν να αντισταθούν στην ανατροπή

(ΣMR) , με το άθροισμα των ροπών που τείνουν να ανατρέψουν την θεμελίωση (ΣMO), συνήθως κυμαίνεται από 2 – 3. Από τη στιγμή που τα φορτία που προκαλούν τις ροπές αντίστασης και ανατροπής είναι καλά καθορισμένες, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής ασφαλείας με την κατώτατη τιμή των ορίων.

$$g_{26} = \frac{2 \times \sum M_O}{\sum M_R} \leq 1 \quad (4.27)$$

Κεφάλαιο 5 : Υλοποίηση και Αποτελέσματα

5.1. Υλοποίηση χρησιμοποιώντας το Excel Solver

Ο Solver του Microsoft Excel (Microsoft Excel's Solver add-in), χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να πραγματοποιηθεί και να γίνει πράξη το ζήτημα της βελτιστοποίησης, όπως αυτό διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 4. Προκειμένου βέβαια να γίνει κάτι τέτοιο, ήταν απαραίτητο να προσαρμόσουμε όλες τις μεταβλητές σχεδιασμού, τις ανεξάρτητες παραμέτρους, τις εξαρτημένες μεταβλητές, τις μεταβλητές που εξαρτώνται από το ύψος, τους περιορισμούς, καθώς και πληροφορίες για την αντικειμενική συνάρτηση, σε ένα φύλλο εργασίας του Excel.

Οι αρχικές τιμές των σχεδιαστικών μεταβλητών που φαίνονται στον Πίνακα 5.1, προέκυψαν ως μέσος όρος της ανώτερης και της κατώτατης τιμής κάθε μεταβλητής. Οι τιμές των ανεξάρτητων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση, αναφέρονται σε προηγούμενα Κεφάλαια και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2. Οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών που υπολογίστηκαν με τις εξισώσεις των κεφαλαίων 2 και 3, καθώς και οι τιμές τους που χρησιμοποιήθηκαν στη τελική λύση, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3. Αντίστοιχα, οι μεταβλητές οι εξαρτώμενες από το ύψος, υπολογίστηκαν και αυτές από τις εξισώσεις των Κεφαλαίων 2 και 3 και οι τελικές τιμές τους (που αντιστοιχούν στην κορυφή και τη βάση της κατασκευής), φαίνονται στο Πίνακα 5.4.

Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, οι περιορισμοί στις σχεδιαστικές μεταβλητές, δεν έχουν κανονικοποιηθεί. Η τακτική αυτή εφαρμόστηκε κατά τον καθορισμό των περιορισμών στις μεταβλητές σχεδιασμού στο Excel. Όλοι οι άλλοι περιορισμοί κανονικοποιήθηκαν τόσο στο Κεφάλαιο 4 όσο και στο Excel. Επίσης, όλοι οι περιορισμοί διατυπώθηκαν με την κλασσική μορφή, δηλαδή του τύπου μικρότερο από ($<$) και ίσο με ($=$). Αυτό διευκολύνει την αποτελεσματικότερη εισαγωγή στον Excel Solver. Τέλος, διαμορφώνεται η συνάρτηση που επιδιώκαμε και εισάγεται στον Excel Solver.

Το πρόβλημά της βελτιστοποίησης που ασχολούμαστε, ορίζεται στο κουτί διαλόγου παραμέτρων του Solver (Solver Parameters dialog box). Ως 'Target Cell' ορίζεται το κελί που περιλαμβάνει την εξίσωση της συνάρτησής μας και η επιλογή 'Min' επιλέγεται προκειμένου ο Solver να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική μας συνάρτηση. Τα κελιά που περιλαμβάνουν τις τιμές των σχεδιαστικών μεταβλητών εισάγονται στο κουτί 'By Changing Cells'. Αντίστοιχα, οι περιορισμοί ορίζονται στο

κουτί 'Subject to the Constraints'. Αφού οριστεί το πρόβλημα με τον τρόπο που αναφέραμε προηγουμένως (στο Solver Parameters dialog box), μπορούμε να ορίσουμε και τις αριθμητικές παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της εύρεσης βέλτιστης λύσης βελτιστοποίησης, με το να πατήσουμε την επιλογή "Options".

Το προκύπτον κουτί διαλόγου Solver Options επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει τα εξής :

- Το μέγιστο χρόνο που μπορεί να διαρκέσει η διαδικασία της επίλυσης
- Το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που χρειάζεται η διαδικασία μέχρι να ολοκληρωθεί
- Την ακρίβεια της λύσης
- Την ανοχή στους περιορισμούς και τελικά
- Την αποδεκτή σύγκλιση του αλγορίθμου.

Ο χρήστης μπορεί επίσης να καθορίσει και άλλες παραμέτρους, όπως τη χρήση π.χ της μεθόδου των κεντρικών διαφορών για τον υπολογισμό παραγώγων ή μεθόδων όπως του Newton για τον υπολογισμό των διευθύνσεων της αναζήτησης.

Πιο συγκεκριμένα οι τιμές και οι παραδοχές που έγιναν σε αυτή την Εργασία είναι οι εξής :

- ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να διαρκέσει η διαδικασία επίλυσης, έχει οριστεί στα 100 δευτερόλεπτα.
- ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων φτάνει μέχρι τις 10.000
- η ακρίβεια ορίστηκε στο 0.000001
- η ανοχή στους περιορισμούς περιορίζεται στο 1 %.
- η σύγκλιση έχει οριστεί στο 0.00001
- η μέθοδος του Newton έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των κατευθύνσεων αναζήτησης.

Από τη στιγμή λοιπόν που το πρόβλημα έχει μορφωθεί και καθοριστεί, μπορεί ο Solver να πραγματοποιήσει τη διαδικασία και μας δώσει τη λύση. Απαντήσεις και αναφορές ευαισθησίας και ορίων μπορούν να δημιουργηθούν και εκείνη τη στιγμή. Τα περιεχόμενα αυτών των αναφορών, συνοψίζονται στους Πίνακες 5.5 - 5.8. Η σπουδαιότητα των τιμών αυτών σχολιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

5.2. Η μέθοδος GRG (Γενικευμένη Μειωμένης Κλίσης)

Ο Excel Solver χρησιμοποιεί μια έκδοση της μεθόδου αυτής βελτιστοποίησης για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, και πιο συγκεκριμένα τον κώδικα GRG2, ο οποίος δημιουργήθηκε από τους Lasdon και Waren. Η μέθοδος αυτή είναι μια επέκταση της μεθόδου μειωμένης κλίσης, που είναι ουσιαστικά ένας αλγόριθμος για τετραγωνικό προγραμματισμό, προκειμένου να διαχειριστεί μη γραμμικούς ανισοτικούς περιορισμούς (Aroga 2004). Η γενική ιδέα της μεθόδου που αναφερόμαστε, είναι να βρει μια κατεύθυνση αναζήτησης τέτοια ώστε οι περιορισμοί που εφαρμόζονται ήδη να παραμένουν ακριβώς ενεργοί για την παραμικρή κίνηση και να χρησιμοποιήσει την μέθοδο Newton Raphson προκειμένου να επανερχόμαστε εντός των ορίων των περιορισμών, όταν αυτοί δεν τηρούνται. Η εφαρμογή της GRG μεθόδου, του Excel Solver, δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής τόσο της μεθόδου του Newton, όσο και αυτής της συζευγμένης κλίσης (Conjugate Gradient method), ούτως ώστε να αποφασιστεί μια κατεύθυνση αναζήτησης. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η πρώτη μέθοδος.

5.3. Αποτελέσματα

5.3.1. Βέλτιστη λύση

Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τους βέλτιστους σχεδιασμούς που προκύπτουν, όταν δεχόμαστε τον πύργο και τη θεμελίωση ως ξεχωριστά τμήματα αλλά και ως ένα ενιαίο ολοκληρωμένο σύστημα. Προκειμένου να αναλύσουμε τον πύργο και τα θεμέλια ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η δυσκαμψία της θεμελίωσης κατά τον υπολογισμό τις ιδιοσυχνότητας του πύργου.

Πίνακας 5.1. Βέλτιστος σχεδιασμός πύργου και θεμελίων ανεμογεννήτριας

| Μεταβλητές | Πύργος και θεμέλια | | Πύργος και θεμέλια ως σύστημα | |
|--------------|--------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | Αρχική Υπόθεση | Βέλτιστη Τιμή | Αρχική Υπόθεση | Βέλτιστη Τιμή |
| d_{bo} [m] | 2.3 | 4.5 | 2.3 | 4.5 |
| d_{t0} [m] | 1.75 | 3.4 | 1.75 | 3.4 |
| t [mm] | 20.5 | 35.3 | 20.5 | 35.4 |
| B [m] | 20 | 11.84 | 20 | 11.84 |
| t_{fo} [m] | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |
| f [\$] | 473,155 | 523,772 | 473,155 | 524,918 |

Ο Πίνακας 5.2 δείχνει τις τιμές των ανεξάρτητων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για να περιγράψουν το πρόβλημα.

Πίνακας 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|---|---------------|-----------|--------|
| Οριζόντια δύναμη στην κορυφή του πύργου, στη διεύθυνση του άξονα του ρότορα | (F_{XPT}) | [kN] | 809 |
| Οριζόντια πλευρική δύναμη στην κορυφή του πύργου | (F_{YPT}) | [kN] | 47.3 |
| Κατακόρυφη προς τα πάνω δύναμη στην κορυφή του πύργου | (F_{ZPT}) | [kN] | -1,342 |
| Ροπή κατά τον άξονα X' στην κορυφή του πύργου | (M_{XPT}) | [kNm] | 1,639 |
| Ροπή κατά τον άξονα Y' στην κορυφή του πύργου | (M_{YPT}) | [kNm] | 2,179 |
| Ροπή κατά τον άξονα Z' στην κορυφή του πύργου | (M_{ZPT}) | [kNm] | 2,499 |
| Οριζόντια δύναμη στα θεμέλια, στη διεύθυνση του άξονα του ρότορα | (F_{XPF}) | [kN] | 1,245 |
| Οριζόντια πλευρική δύναμη στα θεμέλια | (F_{YPF}) | [kN] | 389 |
| Κατακόρυφη προς τα πάνω δύναμη στα θεμέλια | (F_{ZPF}) | [kN] | -5,420 |
| Ροπή κατά τον άξονα X' στα θεμέλια | (M_{XPF}) | [kNm] | 11,542 |
| Ροπή κατά τον άξονα Y' στα θεμέλια | (M_{YPF}) | [kNm] | 16,303 |

Συνέχεια Πίνακα 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|---|---------------|----------------------|--------|
| Ροπή κατά τον άξονα Z' στα θεμέλια | (M_{zPF}) | [kNm] | 2,499 |
| Οριζόντια συνισταμένη δύναμη στην κορυφή του πύργου | (F_{hT}) | [kN] | 810.4 |
| Κατακόρυφη δύναμη προς τα κάτω στην κορυφή του πύργου | (F_{vT}) | [kN] | 1,342 |
| Συνισταμένη ροπή στην κορυφή του πύργου | (M_{RT}) | [kNm] | 2,727 |
| Ροπή στρέψης στην κορυφή του πύργου | (T_T) | [kNm] | 2,499 |
| Οριζόντια συνισταμένη δύναμη στα θεμέλια | (F_{hF}) | [kN] | 1,304 |
| Κατακόρυφη δύναμη προς τα κάτω στα θεμέλια | (F_{vT}) | [kN] | 5,420 |
| Συνισταμένη ροπή στα θεμέλια | (M_{RF}) | [kNm] | 19,975 |
| Ροπή στρέψης στα θεμέλια | (T_F) | [kNm] | 2,499 |
| Πυκνότητα (μάζας) του χάλυβα | (ρ_s) | [kg/m ³] | 7850 |
| Ειδικό κόστος του πύργου | (μ_t) | [\$/kg] | 1.5 |
| Ειδικό κόστος της θεμελίωσης | (μ_f) | [\$/kg] | 0.256 |

Συνέχεια Πίνακα 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|---|--------------------|-----------|-------|
| Συντελεστής ασφαλείας για ιδιοσυχνότητα | $(FS_{frequency})$ | - | 2 |
| Συχνότητα της τουρμπίνας | (f_{req}) | [Hz] | 0.33 |
| Αντοχή του χάλυβα | (f_y) | [MPa] | 345 |
| Συντελεστής ασφαλείας μέγιστης ενέργειας παραμόρφωσης | (FS_{MDE}) | - | 1.2 |
| Επιτρεπόμενη μετατόπιση κορυφής | (v_a) | [m] | 1 |
| Επιτρεπόμενη περιστροφή κορυφής | (v'_a) | [deg] | 5 |
| Ελάχιστη απαιτούμενη στρεπτική δυσκαμψία | (K_{ReqRot}) | [GNm/rad] | 50 |
| Ελάχιστη απαιτούμενη αξονική δυσκαμψία | $(K_{ReqHoriz})$ | [MN/m] | 1,000 |
| Χαρακτηριστική ταχύτητα ανέμου | (V_{ref}) | [m/s] | 50 |
| Ύψος γεννήτριας | (H_n) | [m] | 4 |
| Πλάτος γεννήτριας | (W_n) | [m] | 3.4 |
| Ύψος του πύργου | (H) | [m] | 80 |

Συνέχεια Πίνακα 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|--|---------------|----------------------|---------|
| Πυκνότητα του αέρα | (ρ_a) | [kg/m ³] | 1.225 |
| Ειδικό βάρος χάλυβα | (γ_s) | [N/m ³] | 77,000 |
| Πυκνότητα μάζας σκυροδέματος | (ρ_c) | [kg/m ³] | 2,400 |
| Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα | (E_s) | [GPa] | 210 |
| Συντελεστής αντίστασης αέρα | (c_f) | - | 0.6 |
| Συντελεστής Δυναμικής Ενίσχυσης | (DAF) | - | 1.11451 |
| Κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο λόγω εσωτερικών εξαρτημάτων | (w_{IF}) | [kN/m] | 0.8 |
| Επιτάχυνση της βαρύτητας | (g) | [m/s ²] | 9.81 |
| Γωνία τριβής εδάφους | (φ') | [deg] | 10 |
| Συνοχή του εδάφους | (c') | [kN/m ²] | 15.2 |
| Ειδικό βάρος εδάφους | (γ) | [kN/m ³] | 17.8 |
| Πάχος του βάθρου | (t_p) | [m] | 1.5 |

Συνέχεια Πίνακα 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|---|--------------------|----------------------|--------|
| Διάμετρος του βάρθρου | (d_p) | [m] | 5.6 |
| α διάσταση του θεμελίου | (a_f) | [m] | 2.8 |
| Ύψος βάρθρου πάνω από το έδαφος | (h_p) | [m] | 0.1524 |
| Αρχικό μέτρο διάτμησης | (G_o) | [MN/m ²] | 44.65 |
| Ποσοστό μείωσης μέτρου διάτμησης | (γ_{shear}) | - | 0.6 |
| Ύψος υποβάρθρου | (H_b) | [m] | 10 |
| Μέτρο διάτμησης | (G) | [MN/m ²] | 180 |
| Λόγος του Poisson | (ν) | - | 0.5 |
| Ύψος διανομέα | (H_{hub}) | [m] | 82 |
| Διαθέσιμη διατμητική αντοχή στη διαρροή | (τ_{yield}) | [MPa] | 207 |
| Συντελεστής φέρουσας ικανότητας | (N_q) | - | 2.47 |
| Συντελεστής φέρουσας ικανότητας | (N_c) | - | 8.35 |

Συνέχεια Πίνακα 5.2

| Παράμετρος | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Τιμές |
|--|---------------|-----------|-------|
| Συντελεστής φέρουσας ικανότητας | (N_γ) | - | 1.22 |
| Κλίση του φορτίου στα θεμέλια σε σχέση με την κατακόρυφο | (β) | [deg] | 0 |
| Συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό της μέγιστης φέρουσας ικανότητας (F_{ci}) | (F_{ci}) | - | 1 |
| Συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό της μέγιστης φέρουσας ικανότητας (F_{qi}) | (F_{qi}) | - | 1 |
| Συντελεστής κλίσης για τον υπολογισμό της μέγιστης φέρουσας ικανότητας (F_{μ}) | (F_{μ}) | - | 1 |

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών, οι οποίες υπολογίζονται με τις εξισώσεις από τα Κεφάλαια 2 και 3 και τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 5.2. Αυτές αναφέρονται, όπως προηγουμένως, στο βέλτιστο σχεδιασμό του πύργου και των θεμελίων ξεχωριστά, αλλά και στο συνδυασμό των δύο ως σύστημα.

Πίνακας 5.3 Τιμές εξαρτημένων μεταβλητών της βέλτιστης λύσης

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|--|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------------|
| Κωνικότητα του πύργου | (τ) | [m/m] | Τιμές | Τιμές |
| Όγκος του πύργου | (V_t) | [m ³] | 34.7 | 34.8 |
| Μάζα του πύργου | (m_t) | [kg] | 272,340 | 273,104 |
| Όγκος των θεμελίων | (V_f) | [m ³] | 187.6 | 187.6 |
| Μάζα των θεμελίων | (m_f) | [kg] | 450,156 | 450,156 |
| Ιδιοσυχνότητα | (f_n) | [Hz] | 0.66666421 | 0.6664655 |
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο Α στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_1^{cpA,t})$ | [MPa] | 13.6 | 13.54 |

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|--|----------------------|-----------|----------------------|---------------------------------|
| Ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_2^{cpA_t})$ | [MPa] | 0 | 0 |
| Ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_3^{cpA_t})$ | [MPa] | -1.194 | -1.191 |
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_1^{cpB_t})$ | [MPa] | 10.4 | 10.3 |
| Ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_2^{cpB_t})$ | [MPa] | 0 | 0 |
| Ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στην κορυφή του πύργου | $(\sigma_3^{cpB_t})$ | [MPa] | -6.77 | -6.75 |
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου | $(\sigma_1^{cpA_b})$ | [MPa] | 185.8 | 185.3 |
| Μέση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου | $(\sigma_2^{cpA_b})$ | [MPa] | 0 | 0 |
| Ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A στη βάση του πύργου | $(\sigma_3^{cpA_b})$ | [MPa] | -0.028 | -0.028 |

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|--|------------------------------|-----------|-------------------------|---------------------------------------|
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου | $(\sigma_1^{cpB_b})$ | [MPa] | 12.79 | 12.76 |
| Μέση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου | $(\sigma_2^{cpB_b})$ | [MPa] | 0 | 0 |
| Ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B στη βάση του πύργου | $(\sigma_3^{cpB_b})$ | [MPa] | -4.54 | -4.52 |
| Μέση ακτίνα διατομής | (r_m) | [m] | 1.957 | 1.957 |
| Κρίσιμη ελαστική τάση λυγισμού | $(\sigma_{CriticalElastic})$ | [MPa] | 2,289 | 2,295 |
| Συντελεστής μείωσης αξονικής κρίσιμης τάσης | (α_0) | - | 0.666 | 0.666 |
| Συντελεστής μείωσης καμπτικής κρίσιμης τάσης | (α_B) | - | 0.729 | 0.729 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού | $(\sigma_{buckling})$ | [MPa] | 290 | 290 |
| Μετατόπιση του άκρου της κορυφής του πύργου | (v_{top}) | [m] | 0.913 | 0.913 |
| Στροπή του άκρου στην κορυφή του πύργου | (v'_{top}) | [deg] | 1.053 | 1.052 |
| Βάθος θεμελίωσης | (D_f) | [m] | 4.65 | 4.65 |

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|---|---------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|
| Ισοδύναμη επιφόρτιση για το έδαφος πάνω από τη θεμελίωση | (q) | [kN/m ²] | 82.7 | 82.7 |
| Δεύτερη διάσταση της θεμελίωσης b | (b_f) | [m] | 3.07 | 3.07 |
| Εκκεντρότητα της φόρτισης στα θεμέλια | (e) | [m] | 2.03 | 2.03 |
| Ενεργής / ωφέλιμης περιοχής θεμελίωσης μικρός άξονας | (b_e) | [m] | 7.67 | 7.67 |
| Ενεργής / ωφέλιμης περιοχής θεμελίωσης μεγάλος άξονας | (I_e) | [m] | 11.00 | 11.00 |
| Ενεργό εμβαδό / περιοχή θεμελίωσης | (A_{eff}) | [m ²] | 61.5 | 61.5 |
| Ενεργό μήκος της θεμελίωσης | (L') | [m] | 9.39 | 9.39 |
| Ενεργό πλάτος της θεμελίωσης | (B') | [m] | 6.54 | 6.54 |
| Ωφέλιμο εμβαδό ισοδύναμου ορθογωνίου | (A') | [m ²] | 61.5 | 61.5 |
| Συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | (F_{cs}) | - | 1.206 | 1.206 |
| Συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | (F_{qs}) | - | 1.123 | 1.123 |
| Συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | (F_{fs}) | - | 0.721 | 0.721 |

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|---|------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|
| Συντελεστής βάθους για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | (F_{cd}) | - | 1.158 | 1.158 |
| Συντελεστής βάθους για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | (F_{qd}) | - | 1.095 | 1.095 |
| Συντελεστής σχήματος για τον υπολογισμό της οριακής φέρουσας ικανότητας | $(F_{\gamma d})$ | - | 1 | 1 |
| Οριακή φέρουσα ικανότητα του Meyerhof | (q'_u) | [kN/m ²] | 480 | 480 |
| Ολικό οριακό φορτίο που αντέχει η θεμελίωση | (Q_{ult}) | [MN] | 29.5 | 29.5 |
| Ολικό κατακόρυφο φορτίο που αντέχει η θεμελίωση | (Q_{total}) | [MN] | 9.84 | 9.84 |
| Συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας φέρουσας ικανότητας | $(FS_{bearing})$ | - | 3 | 3 |
| Μέγιστη πίεση στο έδαφος | (q_{max}) | [kN/m ²] | 145.7 | 145.7 |
| Συντελεστής ασφαλείας μέγιστης πίεσης στο έδαφος | $(FS_{Soil Pressure})$ | - | 3.30 | 3.30 |

| Μεταβλητή | (Συμβολισμός) | [Μονάδες] | Πύργος και Θεμελίωση | Πύργος και Θεμελίωση ως σύστημα |
|----------------------------------|---------------|-----------|----------------------|---------------------------------|
| Στροφική δυσκαμψία των θεμελίων | (K_R) | [GNm/rad] | 729 | 729 |
| Οριζόντια δυσκαμψία των θεμελίων | (K_H) | [MN/m] | 52,797 | 52,797 |
| Άθροισμα ροπών αντίστασης | $(\sum M_R)$ | [MNm] | 57.7 | 57.7 |
| Άθροισμα ροπών ανατροπής | $(\sum M_O)$ | [MNm] | 26.2 | 26.2 |

Ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει τις τιμές των μεταβλητών που εξαρτώνται από το ύψος και οι οποίες υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις των Κεφαλαίων 2 και 3 καθώς και από τις τιμές των παραμέτρων του Πίνακα 5.2. Αυτές αναφέρονται, όπως προηγουμένως, στο βέλτιστο σχεδιασμό του πύργου και των θεμελίων ξεχωριστά, αλλά και στο συνδυασμό των δύο ως σύστημα.

Πίνακας 5.4 Τελικές τιμές των μεταβλητών που σχετίζονται με το ύψος του πύργου στην κορυφή αλλά και τη βάση αυτού.

| Μεταβλητή | Πύργος και θεμελίωση | | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα | |
|---|----------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| | Τιμή στην κορυφή | Τιμή στη βάση | Τιμή στην κορυφή | Τιμή στη βάση |
| Ύψος πάνω από το έδαφος (z) [m] | 80 | 0 | 80 | 0 |
| Αναμενόμενη μέγιστη ταχύτητα του ανέμου με διάστημα επανεμφάνισης 50 χρόνια (V_{e50}) [m/s] | 69.8 | 0 | 69.8 | 0 |
| Πίεση του ανέμου (q_i) [kg/(m·s ²)] | 2,985 | 0 | 2,985 | 0 |
| Εξωτερική διάμετρος του πύργου (d_o) [m] | 3.4 | 4.5 | 3.4 | 4.5 |
| Οριζόντια κατανεμημένη φόρτιση λόγω αέρα (w_h) [kN/m] | 6.79 | 0 | 6.79 | 0 |
| Εσωτερική διάμετρος του πύργου (d_i) [m] | 3.33 | 4.43 | 3.33 | 4.43 |
| Εμβαδό διατομής του πύργου (A) [m ²] | 0.373 | 0.495 | 0.374 | 0.496 |
| Κάθετο κατανεμημένο φορτίο (w_v) [kN/m] | 29.5 | 38.9 | 29.6 | 39.0 |
| Απόσταση από την κορυφή του πύργου (y) [m] | 0 | 80 | 0 | 80 |

| | | | | | |
|--|-------|--------|-------|-------|---------|
| Αξονική δύναμη στη διατομή (P) [MN] | 1.342 | 4.08 | 1.342 | 1.342 | 4.09 |
| Διατμητική δύναμη στη διατομή (V) [MN] | 0.810 | 1.320 | 0.810 | 0.810 | 1.320 |
| Ροπή (στρεπτική) στη διατομή (T) [MNm] | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 |
| Καμπτική ροπή στη διατομή (M) [MNm] | 2.73 | 97.2 | 2.73 | 2.73 | 89.1 |
| Ροπή αδράνειας στη διατομή (I) [m ⁴] | 0.528 | 1.233 | 0.528 | 0.529 | 1.236 |
| Καμπυλότητα στο κατακόρυφο επίπεδο (ν'') [m ⁻¹] | 3E-05 | 0.0004 | 3E-05 | 3E-05 | 0.0004 |
| Περιστροφή στο κατακόρυφο επίπεδο (ν') [m ⁻¹] | 0.018 | 0 | 0.018 | 0.018 | 0.00003 |
| Οριζόντια μετατόπιση (ν) [m] | 0.913 | 0 | 0.913 | 0.913 | 0.00003 |
| Καμπτική ροπή 2 ^{ης} τάξης (M_{2nd}) [MNm] | 0 | 2.79 | 0 | 0 | 2.80 |
| Τάση κατά τον z άξονα στο κρίσιμο σημείο A (σ_{zcpA}) [MPa] | 12.39 | 185.7 | 12.35 | 12.35 | 185.3 |
| Τάση κατά τον z άξονα στο κρίσιμο σημείο B (σ_{zcpB}) [MPa] | 3.60 | 8.24 | 3.59 | 3.59 | 8.24 |
| Πολική ροπή αδρανείας της διατομής (J) [m ⁴] | 1.055 | 2.47 | 1.058 | 1.058 | 2.47 |
| Διατμητική τάση λόγω στρέψης στο κρίσιμο σημείο A ($\tau_{z\chi cpA}$) [MPa] | 4.03 | 2.28 | 4.02 | 4.02 | 2.27 |
| Ροπή αδράνειας 1 ^{ης} τάξης στη διατομή (Q) [m ³] | 0.20 | 0.35 | 0.20 | 0.20 | 0.35 |
| Το πλάτος εκεί που υπολογίζεται η διατμητική τάση (b) [m] | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 |
| Διατμητική τάση λόγω στρέψης και διάτμησης στο κρίσιμο σημείο B ($\tau_{z\chi cpB}$) [MPa] | 8.37 | 7.62 | 8.35 | 8.35 | 7.60 |

| | | | | |
|--|---------|-------|---------|---------|
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A (σ_1^{cpA}) [MPa] | 13.58 | 185.8 | 13.54 | 185.3 |
| Μέση - ενδιάμεση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A (σ_2^{cpA}) [MPa] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ελάχιστη - μικρότερη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο A (σ_3^{cpA}) [MPa] | -1.194 | -0.03 | -1.191 | -0.03 |
| Μέγιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B (σ_1^{cpB}) [MPa] | 10.37 | 12.79 | 10.34 | 12.76 |
| Μέση κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B (σ_2^{cpB}) [MPa] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ελάχιστη κύρια τάση στο κρίσιμο σημείο B (σ_3^{cpB}) [MPa] | -6.77 | -4.54 | -6.75 | -4.52 |
| Ενεργή δυσκαμψία για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας (\bar{k}) [N-m] | 836.543 | 0 | 840.170 | 109.1 |
| Ενεργή μάζα για τον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας (\bar{m}) [kg-m ²] | 47.677 | 0 | 47.884 | 0.00028 |

5.3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την επίλυση

Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τις τιμές των περιορισμών για τη βέλτιστη λύση, τόσο για το πύργο και τη θεμελίωση ως ξεχωριστές μονάδες, όσο και το συνδυασμό τους ως σύστημα.

Πίνακας 5.5 Τιμές περιορισμών στο τελικό σχεδιασμό

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμός | Τιμές | Τιμές |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_1) [m] | 0.1 | 0.1 |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_2) [m] | 4.5 | 4.5 |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_3) [m] | 0.1 | 0.1 |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_4) [m] | 3.4 | 3.4 |
| Κατώτατο όριο στο πάχος του πύργου (g_5) [m] | 0.001 | 0.001 |
| Ανώτατο όριο στο πάχος του πύργου (g_6) [m] | 0.035261397 | 0.035361231 |
| Κατώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_7) [m] | 10 | 10 |
| Ανώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_8) [m] | 11.73425921 | 11.73425921 |
| Κατώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_9) [m] | 0.5 | 0.5 |
| Ανώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_{10}) [m] | 0.5 | 0.5 |
| Όριο ιδιοσυχνότητας (g_{11}) | 1.000003684 | 1.000003018 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{12}) | 0.046872199 | 0.046726075 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{13}) | 0.641158428 | 0.639310365 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{14}) | 0.035777188 | 0.035664858 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{15}) | 0.044128285 | 0.044027228 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{16}) | 0.002444699 | 0.002431282 |

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|--|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμός | Τιμές | Τιμές |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{17}) | 0.417567177 | 0.415470104 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{18}) | 0.002702237 | 0.002687301 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{19}) | 0.002929623 | 0.002916299 |
| Μετακίνηση κορυφής (g_{20}) | 0.913146973 | 0.913317194 |
| Στροφή κορυφής (g_{21}) | 0.210539591 | 0.210344101 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας φέρουσας ικανότητας (g_{22}) | 1 | 1 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας πίεσης επί του εδάφους (g_{23}) | 0.910085954 | 0.910085954 |
| Όριο ελάχιστης περιστροφικής δυσκαμψίας (g_{24}) | 0.068586604 | 0.068586604 |
| Όριο ελάχιστης οριζόντιας δυσκαμψίας (g_{25}) | 0.018940663 | 0.018940663 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας έναντι ανατροπής (g_{26}) | 0.909249029 | 0.909249029 |

Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει την απόκλιση των περιορισμών της λύσης μας για το πύργο και τη θεμελίωση ξεχωριστά αλλά και για το σύστημα των δύο.

Πίνακας 5.6 Απόκλιση των τιμών των περιορισμών

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμοί - Όρια | Απόκλιση | Απόκλιση |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_1) [m] | 4.4 | 4.4 |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_2) [m] | 0 | 0 |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_3) [m] | 3.3 | 3.3 |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_4) [m] | 0 | 0 |
| Κατώτατο όριο στο πάχος των τοιχωμάτων του πύργου (g_5) [m] | 0.034261397 | 0.034361231 |

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμοί - Όρια | Απόκλιση | Απόκλιση |
| Ανώτατο όριο στο πάχος των τοιχωμάτων του πύργου (g_6) [m] | 0.004738603 | 0.004638769 |
| Κατώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_7) [m] | 1.734259214 | 1.734259214 |
| Ανώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_8) [m] | 18.26574079 | 18.26574079 |
| Κατώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_9) [m] | 0 | 0 |
| Ανώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_{10}) [m] | 1 | 1 |
| Όριο ιδιοσυχνότητας (g_{11}) | 3.68437E-06 | 3.01811E-06 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{12}) | 0.953127801 | 0.953273925 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{13}) | 0.358841572 | 0.360689635 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{14}) | 0.964222812 | 0.964335142 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{15}) | 0.955871715 | 0.955972772 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{16}) | 0.997555301 | 0.997568718 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{17}) | 0.582432823 | 0.584529896 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{18}) | 0.997297763 | 0.997312699 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{19}) | 0.997070377 | 0.997083701 |
| Μετακίνηση κορυφής (g_{20}) | 0.086853027 | 0.086682806 |
| Στροφή κορυφής (g_{21}) | 0.789460409 | 0.789655899 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας φέρουσας ικανότητας (g_{22}) | 0 | 0 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας πίεσης επί του εδάφους (g_{23}) | 0.089914046 | 0.089914046 |
| Όριο ελάχιστης περιστροφικής δυσκαμψίας (g_{24}) | 0.931413396 | 0.931413396 |
| Όριο ελάχιστης οριζόντιας δυσκαμψίας (g_{25}) | 0.981059337 | 0.981059337 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας έναντι ανατροπής (g_{26}) | 0.090750971 | 0.090750971 |

Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει την κατάσταση των περιορισμών στη βέλτιστο σχεδιασμό μας για το πύργο και τη θεμελίωση ξεχωριστά αλλά και για το σύστημα των δύο. Οι περιορισμοί που χαρακτηρίζονται ως «δεσμευτικοί», είναι αυτοί που ήταν ενεργητικοί στην βέλτιστη λύση.

Πίνακας 5.7 Χαρακτηρισμός των περιορισμών στο βέλτιστο σχεδιασμό

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμοί - Όρια | Χαρακτηρισμός | Χαρακτηρισμός |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_1) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_2) [m] | δεσμευτικός | δεσμευτικός |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_3) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_4) [m] | δεσμευτικός | δεσμευτικός |
| Κατώτατο όριο στο πάχος του τοιχώματος του πύργου (g_5) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Ανώτατο όριο στο πάχος του τοιχώματος του πύργου (g_6) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Κατώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_7) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Ανώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_8) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Κατώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_9) [m] | δεσμευτικός | δεσμευτικός |
| Ανώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_{10}) [m] | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Όριο ιδιοσυχνότητας (g_{11}) | δεσμευτικός | δεσμευτικός |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{12}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{13}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{14}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{15}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|--|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμοί - Όρια | Χαρακτηρισμός | Χαρακτηρισμός |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της κορυφής του πύργου (g_{16}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο A της βάσης του πύργου (g_{17}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της κορυφής του πύργου (g_{18}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο B της βάσης του πύργου (g_{19}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Μετακίνηση κορυφής (g_{20}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Περιστροφή κορυφής (g_{21}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας φέρουσας ικανότητας (g_{22}) | δεσμευτικός | δεσμευτικός |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας πίεσης επί του εδάφους (g_{23}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Όριο ελάχιστης περιστροφικής δυσκαμψίας (g_{24}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Όριο ελάχιστης οριζόντιας δυσκαμψίας (g_{25}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας έναντι ανατροπής (g_{26}) | Μη δεσμευτικός | Μη δεσμευτικός |

Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει τις τιμές του πολλαπλασιαστή Lagrange (LM) στο τελικό μας σχέδιο για το πύργο και τη θεμελίωση ξεχωριστά αλλά και για το σύστημα των δύο. Στο Excel Solver, οι τιμές του πολλαπλασιαστή Lagrange για ελαχιστοποίηση προβλημάτων είναι αρνητικές.

Πίνακας 5.8 Τιμές του πολλαπλασιαστή Lagrange

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|---|----------------------|---------------------------------|
| Περιορισμοί - Όρια | LM | LM |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_1) [m] | 0 | 0 |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου (g_2) [m] | - | - |
| Κατώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_3) [m] | 0 | 0 |

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|--|-------------------------|---------------------------------------|
| <i>Περιορισμοί - Όρια</i> | <i>LM</i> | <i>LM</i> |
| Ανώτατο όριο της εξωτερικής διαμέτρου στην κορυφή του πύργου (g_4) [m] | - | - |
| Κατώτατο όριο στο πάχος του τοιχώματος του πύργου (g_5) [m] | 0 | 0 |
| Ανώτατο όριο στο πάχος του τοιχώματος του πύργου (g_6) [m] | - | - |
| Κατώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_7) [m] | 0 | 0 |
| Ανώτατο όριο στη διάμετρο των θεμελίων (g_8) [m] | - | - |
| Κατώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_9) [m] | -62309.3 | -62198.7 |
| Ανώτατο όριο στο πάχος των θεμελίων στο εξωτερικό άκρο (g_{10}) [m] | - | - |
| Όριο ιδιοσυχνότητας (g_{11}) | -405223 | -407585 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο <i>A</i> της κορυφής του πύργου (g_{12}) | 0 | 0 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο <i>A</i> της βάσης του πύργου (g_{13}) | 0 | 0 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο <i>B</i> της κορυφής του πύργου (g_{14}) | 0 | 0 |
| Επιτρεπόμενη τάση τοπικού λυγισμού στο κρίσιμο σημείο <i>B</i> της βάσης του πύργου (g_{15}) | 0 | 0 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο <i>A</i> της κορυφής του πύργου (g_{16}) | 0 | 0 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο <i>A</i> της βάσης του πύργου (g_{17}) | 0 | 0 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο <i>B</i> της κορυφής του πύργου (g_{18}) | 0 | 0 |
| Μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης στο κρίσιμο σημείο <i>B</i> της βάσης του πύργου (g_{19}) | 0 | 0 |
| Μετατόπιση κορυφής (g_{20}) | 0 | 0 |
| Στροφή κορυφής (g_{21}) | 0 | 0 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας φέρουσας ικανότητας (g_{22}) | -15991.3 | -15632.0 |

| | Πύργος και θεμελίωση | Πύργος και θεμελίωση ως σύστημα |
|--|----------------------|---------------------------------|
| <i>Περιορισμοί - Όρια</i> | <i>LM</i> | <i>LM</i> |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας πιέσεων επί του εδάφους (g_{23}) | 0 | 0 |
| Όριο ελάχιστης περιστροφικής δυσκαμψίας (g_{24}) | 0 | 0 |
| Όριο ελάχιστης οριζόντιας δυσκαμψίας (g_{25}) | 0 | 0 |
| Όριο συντελεστή ασφαλείας έναντι ανατροπής (g_{26}) | 0 | 0 |

Κεφάλαιο 6 : Σχολιασμός και Συμπεράσματα

6.1. Σχολιασμός

Οι στόχοι της εργασίας αυτής χωρίζονται σε δυο σκέλη :

1) Στο να καταλάβουμε το πώς έννοιες βελτιστοποίησης, αλλά και οι δυνατότητες βελτιστοποίησης που προσφέρει το Microsoft Excel, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό των πύργων και των θεμελίων ανεμογεννητριών,

2) στο να μελετήσουμε το πώς επηρεάζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός, άμα θεωρήσουμε τον πύργο και τη θεμελίωση ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που όμως οι συνθήκες στήριξης του πύργου δεν είναι απόλυτα σταθερές.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή την εργασία, δείχνουν ότι έννοιες βελτιστοποίησης και το Excel μπορούν να δώσουν τελικά απολύτως λογικά και αποδεκτά σχέδια και κοστολογικές εκτιμήσεις για τον πύργο αλλά και τη θεμελίωση ανεμογεννητριών. Επιπρόσθετα, με το να διαμορφώνει κανείς τον σχεδιασμό, ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, του δίνεται η δυνατότητα να αφομοιώσει καλύτερα το πώς οι διάφορες σχεδιαστικές μεταβλητές μπορούν να επηρεάσουν το τελικό σχέδιο και κατ' επέκταση να αναπτύξει πιο εξειδικευμένα και ολοκληρωμένα σχέδια. Με το θεωρήσουμε τον πύργο και τη θεμελίωση ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα, μειώθηκε η ιδιοσυχνότητα του πύργου. Αυτό συνέβαλε στο να μην ικανοποιείται το ίδιο εύκολα το όριο της ιδιοσυχνότητας του πύργου και οδήγησε στον επανασχεδιασμό του με πιο ογκώδης διαστάσεις.

Η έρευνα αυτή επεκτείνει την δουλειά προηγούμενων μελετών όσον αφορά την προσπάθεια βελτίωσης της κατασκευής στήριξης των ανεμογεννητριών, με δυο βασικούς τρόπους. Πρώτον, ο κατασκευαστής παρείχε τα φορτία της κορυφής του πύργου και των θεμελιώσεων, κάτι που ενσωματώνει τις ισχύουσες διεθνώς αποδεκτές σχεδιαστικές απαιτήσεις για ανεμογεννήτριες, ούτως ώστε να έχουμε πιο αντικειμενικές και ρεαλιστικές τιμές στα δεδομένα που εισάγουμε στη στατική ανάλυση. Κατά δεύτερο, τα θεμέλια ενσωματώθηκαν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και η δυσκαμψία αυτών συμπεριελήφθη στον υπολογισμό της ιδιοσυχνότητας του πύργου.

Λόγω των περιορισμών στις δυνατότητες του Excel Solver, περιορίστηκε και η εργασία αυτή και έφτασε ως αυτό το σημείο, κάτι βέβαια που μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση ενός διαφορετικού αντίστοιχου προγράμματος. Η GRG μέθοδος του Excel Solver μπορεί να διαχειρίζεται μόνο συνεχή προβλήματα. Ωστόσο

το να σχεδιάσεις λεπτομερώς τον πύργο και τη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας, είναι ένα διακριτό πρόβλημα (δηλαδή υπάρχουν μόνο συγκεκριμένα πάχη διαθέσιμα για το τοίχωμα του πύργου καθώς επίσης οι πύργοι αποτελούνται από ξεχωριστά κομμάτια τα οποία έχουν διαφορετικό πάχος το ένα με το άλλο αντί να είναι ομοιόμορφα). Για αυτό λοιπόν το λόγο έπρεπε να γίνουν συγκεκριμένες τροποποιήσεις και προσαρμογές προκειμένου να ληφθούν υπ' όψη οι περιορισμοί του προγράμματος επίλυσης. Αυτές οι απλοποιήσεις περιόρισαν τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής σε ένα περισσότερο εννοιολογικό – θεωρητικό σχεδιαστικό επίπεδο παρά σε κάτι εκτενέστερο και πιο λεπτομερές. Ωστόσο πρέπει να αναφέρουμε ότι για έναν πιο λεπτομερή σχεδιασμό, θα ήταν απαραίτητο ένα πρόγραμμα επίλυσης για θέματα βελτιστοποίησης, ικανό να αντιμετωπίζει τέτοια διακριτά προβλήματα.

Ένα μη αναμενόμενο αποτέλεσμα της έρευνας αυτής ήταν το μεγάλο κόστος κατά το σχεδιασμό του πύργου και της θεμελίωσης, ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Το αποτέλεσμα αυτό χαρακτηρίζεται ως απρόσμενο γιατί οι προηγούμενες έρευνες υποδείκνυαν ότι θα συνέβαινε ακριβώς το αντίθετο. Βέβαια ύστερα απο μια προσεκτικότερη διερεύνηση, είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι έγκυρα και ότι λαμβάνοντας υπόψη την δυσκαμψία της θεμελίωσης, στους υπολογισμούς της ιδιοσυχνότητας, θα καταλήξουμε σε ένα πιο δαπανηρό τελικό σχεδιασμό. Κατ' επέκταση και με βάση τα συμπεράσματα μας, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι μελέτες που δεν έχουν συμπεριλάβει στους υπολογισμούς τους την δυσκαμψία της θεμελίωσης, μπορεί να καταλήξουν σε ελλειπή και ανεπαρκή αποτελέσματα. Η συνθήκη πλήρους πάκτωσης του πύργου στη βάση του υποδηλώνει άπειρη δυσκαμψία στη θεμελίωση. Όταν ληφθεί υπ' όψη πεπερασμένη δυσκαμψία θεμελίωσης, φυσικό επακόλουθο είναι η αύξηση των μετατοπίσεων και ως εκ τούτου σε μείωση της φυσικής συχνότητας. Κατά συνέπεια απαιτείται στην περίπτωση αυτή ογκωδέστερος σχεδιασμός για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός στην ελάχιστη ιδιοσυχνότητα του πύργου. Η παραδοχή άπειρης δυσκαμψίας θεμελίωσης μπορεί να ευσταθεί για δύσκαμπτα εδάφη (π.χ. αργιλικά) όχι όμως και για πιο μαλακά.

Δεδομένα ευαισθησίας, (δηλαδή Πίνακες 5.5 – 5.8) που προέκυψαν κατά την επίλυση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ούτως ώστε να αναλύουμε εις βάθος το πρόβλημα. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 15.7 φαίνονται ότι οι περιορισμοί στα άνω όρια της εξωτερικής διαμέτρου στη βάση του πύργου και στην κορυφή του πύργου, το κατώτατο όριο στο πάχος της θεμελίωσης στο εξωτερικό σύνορο, το όριο της ιδιοσυχνότητας και τέλος το όριο του συντελεστή ασφαλείας φέρουσας ικανότητας,

είναι ενεργητικοί στο μέγιστο. Αυτοί οι ενεργητικοί περιορισμοί έχουν μηδενική χαλαρότητα (πιν.5.6). Στο Excel, οι τιμές του Πολλαπλασιαστή Lagrange είναι αρνητικές για προβλήματα ελαχιστοποίησης. Παρόλα αυτά, αυτό είναι κάτι που δεν μας ενδιαφέρει απο τη στιγμή που εμείς ασχολούμαστε μόνο με τις σχετικές τιμές των αποτελεσμάτων του Πολλαπλασιαστή Lagrange. Πρέπει να τονίσουμε ότι το Excel δεν υπολογίζει αποτελέσματα του Π. Lagrange για τα ενεργά άνω όρια των μεταβλητών σχεδιασμού, επειδή αυτά αντιμετωπίζονται ξεχωριστά κατά την επίλυση, για λόγους αποδοτικότητας. Οι τιμές του Π. Lagrange που προκύπτουν για τους υπόλοιπους ενεργητικούς περιορισμούς, δείχνουν το πλεονέκτημα του να αντιμετωπίσεις έναν περιορισμό πιο ελαστικά, σε αντίθεση με το να το δέσμευες περισσότερο. Ωστόσο, πριν προχωρήσει κανείς σε σύγκριση πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τα αποτελέσματα του Π. Lagrange για τους κανονικοποιημένους περιορισμούς με ένα συντελεστή που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό, προκειμένου να πάρουμε αληθή αποτελέσματα. Οι τελικές αυτές τιμές που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 5.8, από τον οποίο παρατηρούμε κιόλας ότι το να δεσμεύεις ή να ‘χαλαρώνεις’ το όριο της ιδιοσυχνότητας, θα οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη ζημία ή κέρδος αντίστοιχα στην τελική μας λύση.

Συνοπτικά, η Εργασία αυτή περιγράφει λεπτομερώς τη διαδικασία μετατροπής ενός μέχρι τώρα θεωρητικού σχεδιασμού θεμελίωσης και πύργου ανεμογεννήτριας, σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και προσφέρει μια γενική μεθοδολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάπτυξη ακόμα πιο σύγχρονων και εξελιγμένων μοντέλων και συστημάτων. Επιπρόσθετα, τονίζει τη σημασία του να λαμβάνει κανείς τον πύργο και τη θεμελίωση ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα και δίνει παραδείγματα για το πώς μια τέτοια παραδοχή θα μπορούσε να λειτουργήσει σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης.

6.2. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα από αυτήν την εργασία είναι τα ακόλουθα :

- Οι θεωρητικές μέθοδοι και οι ιδέες βελτιστοποίησης, καθώς και οι αντίστοιχες δυνατότητες του Microsoft Excel, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λάβουμε λογικά συμπεράσματα σε θεωρητικό επίπεδο όσον αφορά το σχεδιασμό αλλά και τα κόστη των πύργων αλλά και των θεμελιώσεων ανεμογεννητριών.

- Λεπτομερή σχέδια αλλά και κοστολογικές εκτιμήσεις των κατασκευών που αναφερόμαστε, μπορούν να προκύψουν από ένα κατάλληλο πρόγραμμα επίλυσης (θεμάτων βελτιστοποίησης), ικανό να διαχειριστεί διακριτά προβλήματα βελτίωσης.
- Η παραδοχή του πύργου και της θεμελίωσης ως ενός ολοκληρωμένου συστήματος, οδηγεί σε πιο δαπανηρό σχεδιασμό. Ωστόσο, με το να τα θεωρήσει κανείς ως δύο διακριτά και ανεξάρτητα μέλη, μπορεί να οδηγηθεί σε αβέβαια και μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.
- Όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων που έχουμε θεωρήσει στο Κεφάλαιο 5, το όριο της ιδιοσυχνότητας του πύργου αποδείχθηκε ότι ουσιαστικά ήταν το κριτήριο για το σχεδιασμό του πύργου και αντίστοιχα το όριο της φέρουσας ικανότητας σχετιζόταν με το σχεδιασμό των θεμελίων.
- Η «χαλάρωση» ή η περαιτέρω δέσμευση στο όριο της ιδιοσυχνότητας θα οδηγήσει σε μεγαλύτερο κέρδος ή ζημία αντίστοιχα στην τελική μας λύση.

BIBΛIOΓPAΦIA

- Arora, Jasbir S. 2004. *Introduction to Optimum Design*. 2nd ed. Boston: Elsevier.
- Brown, Robert Wade. 2001. *Practical Foundation Engineering Handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. 2001. *Wind Energy Handbook*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Das, Braja M. 2007. *Principles of Foundation Engineering*. 6th ed. New Delhi: Cengage Learning.
- International Electrotechnical Commission (IEC). 2005. *Wind Turbines – Part 1: Design Requirements* (61400-1). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission (IEC).
- Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 1996. Design of Prestressed Concrete Transmission Poles: Optimization Approach. *Journal of Structural Engineering* 122, no. 7 (July): 804-814.
- Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 1996. Optimal Design of Steel Transmission Poles. *Journal of Structural Engineering* 122, no. 11 (November): 1347-1356.
- Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 1997. Standardization of Steel Pole Design Using Discrete Optimization. *Journal of Structural Engineering* 123, no. 3 (March): 345-349.
- Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 1999. Optimal Design of H-Frame Transmission Poles For Earthquake Loading. *Journal of Structural Engineering* 125, no. 11 (February): 1299-1308.

Kocer, Fatma Y. and Arora, Jasbir S. 2002. Optimal Design of Latticed Towers Subjected to Earthquake Loading. *Journal of Structural Engineering* 128, no. 2 (February): 197-204.

Lu, X., McElroy and M. B., Kiviluoma, J. 2009. Global potential for wind-generated electricity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States* 106, no. 27: 10933-10938.

Murtagh, P.J., Basu B., and Broderick, B.M. 2005. Response of Wind Turbines Including Soil-Structure Interaction. *Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, paper 270: 1-17.

Negm, Hani M. and Maalawi, Karam Y. 1999. Structural Design Optimization of Wind Turbine Towers. *Computers and Structures* 74 (2000): 649-666.

Obama for America. Barack Obama and Joe Biden: New Energy for America. Organizing for America. http://www.barackobama.com/pdf/factsheet_energy_speech_080308.pdf (acc. October. 31, 2010)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000124460