



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
**Παναγιωτάκης Ευάγγελος**

EMK ME 2022 17

Επιβλέπων: Δρ. Γαντές Χαράλαμπος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
**Ευάγγελος Παναγιωτάκης**

EMK ME 2022 17

Επιβλέπων: Δρ. Γαντές Χαράλαμπος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2022



Copyright © Παναγιωτάκης Ευάγγελος, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Panagiotakis Evangelos, 2022

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ευάγγελος Παναγιωτάκης (2022)  
Διερεύνηση συμπεριφοράς καλωδιωτών πυλώνων ανεμογεννητριών  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2022 17  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Panagiotakis Evangelos (2022)  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2022 17  
Behavior Investigation of guyed masts for wind turbines  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την οικογένειά και τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την υποστήριξη καθ' όλη την πορεία της εργασίας.







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΜΕ 2022 17

**Διερεύνηση συμπεριφοράς καλωδιωτών πυλώνων ανεμογεννητριών  
Παναγιωτάκης Ευάγγελος**

Επιβλέπων: Δρ. Γαντές Χαράλαμπος, Καθηγητής ΕΜΠ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε ένα κόσμο συνεχώς αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων η ανάγκη να καλυφθούν με το μικρότερο δυνατό αποτύπωμα γίνεται όλο και επιτακτικότερη. Στο πλαίσιο αυτό, η επιστημονική κοινότητα και δη η επιστήμη του Μηχανικού καλείται να επιλύσει τα υπάρχοντα αλλά και τα εκκολαπτόμενα προβλήματα. Η ανάπτυξη της πράσινης ενέργειας αποτελεί καταλυτή αυτής της προσπάθειας με την αιολική να αποκτά περισσότερο πρωταγωνιστικό ρόλο με την πάροδο του χρόνου.

Στην πλειάδα των ενεργειακών δομών που κατασκευάζονται ώστε να εξυπηρετήσουν τις σύγχρονες κοινωνίες εμφανίζονται εδώ και αρκετές δεκαετίες οι ανεμογεννήτριες, εκμεταλλευόμενες τον άνεμο προκειμένου να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια, με την σύγχρονη μορφή της να βρίσκεται στο ιστορικό φάσμα τα τελευταία 70 χρόνια. Η συνεχής απαίτηση ενέργειας φέρει και ανάγκη βελτίωσης και διόγκωσης των ανεμογεννητριών. Μια εκ των λύσεων που προτείνει ο Πολιτικός Μηχανικός είναι και ο καλωδιωτός φορέας ως ενδεχομένη στατική λύση για την ανύψωση του, η οποία προϋποθέτει την πλήρη κατανόηση της συμπεριφοράς του δομικού συνόλου μέσω παραμετρικών λύσεων.

Με τη χρήση των απαραίτητων FEM προγραμμάτων ανάλυσης, δημιουργείται το υπόβαθρο για τις παραμετρικές λύσεις και την ανύψωση, που είναι αρχικός πυλώνας, χάλυβα S355 και διατομών CHS. Εκμεταλλευόμενοι την εξίσωση του Dischinger μεταβαίνουμε ομαλά στο σχεδιασμό του καλωδιωτού φορέα, αντιμετωπίζοντας την έμφυτη γεωμετρική μη γραμμικότητα, με τα διατιθέμενα εργαλεία του προγράμματος να αντιμετωπίζουν επιτυχώς το θέμα. Η διαμόρφωση του καλωδιωτού φορέα δημιουργεί σημείο αναφοράς για την απόκριση του δομικού συνόλου με έμφαση στις ιδιομορφικές αναλύσεις, τις μετακινήσεις κορυφής και το design. Οι παραμετρικές αναλύσεις αποκαλύπτουν λεπτομερώς τη συμπεριφορά του μοντέλου στις αλλαγές, με τη μεταβολή της γωνίας πρόσδεσης, της θέσης πρόσδεσης, της διατομής καλωδίου, της προέντασης καλωδίου και του συνδυασμού των τελευταίων δύο ώστε να διατηρηθεί σταθερό το ποσοστό προέντασης στο μέγεθος του ορίου διαρροής. Με εποπτική εικόνα της απόκρισης του καλωδιωτού πυλώνα, γίνεται η ανύψωση αυτού μέχρι και την στάθμη των 180m υψομέτρου, όπου διενεργείται ο σχεδιασμός στα πλαίσια της λειτουργικότητας των μηχανισμών της.

Το πεδίο των καλωδιωτών πυλώνων είναι ακόμα πρώιμο στο χώρο των ανεμογεννητριών. Η ευελιξία στο σχεδιασμό, η προσαρμοστικότητα λόγω ποικίλων γεωμετριών καθώς και η ευκολία κατασκευής καθιστούν τους καλωδιωτούς φορείς ως ένα ενδιαφέρον πεδίο μελέτης για τη θωράκιση ενός πράσινου ενεργειακά μέλλοντος.





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



DIPLOMA THESIS  
EMK ME 2022 17

## **Behavior Investigation of guyed masts for wind turbines**

**Panagiotakis Evangelos**

Supervisor: Dr. Gantes Charalampos, Professor NTUA

### **ABSTRACT**

In a world of ever-increasing energy demands, the need to meet them with the smallest possible footprint is becoming more and more imperative. In this context, the scientific community especially the science of Engineering, is called upon to resolve the existing as well as the emerging problems. The development of green energy is a catalyst for this effort, with wind energy gaining a more prominent role over time.

Among the multitude of energy structures built to serve modern societies, wind turbines have been appearing for several decades, harnessing the wind to generate electricity, with their modern form being on the historical spectrum for the last 70 years. The constant demand for energy brings the need to improve and enlarge wind turbines. One of the solutions proposed by the Civil Engineer is the cable structures as a possible static solution for its elevation which requires a full understanding of the behavior of the structural assembly through parametric solutions.

By using the necessary FEM analysis programs, the background for the parametric solutions and the elevation, which is the initial pillar, S355 steel and CHS cross-section is created. Taking advantage of Dischinger's equation, we smoothly transition to the design of the guyed mast, addressing the inherent geometric nonlinearity of cables, with the provided program tools successfully addressing the issue. The configuration of the cabled vector creates a benchmark for the response of the structural ensemble with emphasis on eigenmodal analyses, peak displacements and design. The parametric analyses reveal in detail the model's behavior to changes by varying the tethering angle, the tether location, cable cross-section, cable prestressing and the combination of the last two to maintain a constant prestressing rate at the magnitude of the yield strength. With a supervisory view of the response of the cable pylon, it is raised up to the 180m altitude level, where the design is carried out within the functionality of its mechanisms.

The field of guyed masts is still early in the wind turbine field. Flexibility in design, adaptability due to varied geometries as well as ease of construction make cabled carriers as an interesting field of study for shielding a green energy future.





# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ .....</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ανεμογεννήτριες .....	2
<b>2</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....</b>	<b>9</b>
2.1	Μοντελοποίηση .....	9
2.1.1	Αρχική Φάση Σχεδιασμού .....	9
2.1.1.1	Προσομοίωση με Ελατήριο – Dischinger Formula .....	11
2.1.2	Τελική Φάση σχεδιασμού, Καλωδιωτό Μοντέλο.....	15
2.1.2.1	Εντατικά Μεγέθη (Αξονικές και Καμπτικές Δυνάμεις) .....	18
2.1.2.2	Design και Βελτιστοποίηση πυλώνα.....	21
<b>3</b>	<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ .....</b>	<b>26</b>
3.1	Γωνία πρόσδεσης καλωδίων στον πυλώνα.....	26
3.1.1	Βαθμοί Αξιοποίησης.....	26
3.1.1.1	Παραμετρικά Μοντέλα έως 45° .....	28
3.1.1.2	Παραμετρικά Μοντέλα 45° έως 60° .....	29
3.1.1.3	Παραμετρικά άκρα .....	29
3.1.2	Μετακινήσεις .....	31
3.1.3	Ιδιομορφές - Ιδιοσυχνότητες .....	34
3.1.4	Βελτιστοποίηση Παραμετρικών Μοντέλων .....	36
3.1.4.1	Παραμετρικά Διαγράμματα .....	37
3.2	Ύψος Πρόσδεσης .....	40
3.2.1	Βαθμοί Αξιοποίησης.....	40
3.2.1.1	Παραμετρικά μοντέλα των τριών πρώτων θέσεων.....	41
3.2.1.2	Παραμετρικά μοντέλα των τελευταίων θέσεων .....	42
3.2.1.3	Παραμετρικά άκρα .....	43
3.2.2	Μετακινήσεις .....	45
3.2.3	Ιδιοσυχνότητες-Ιδιομορφές .....	47
3.2.4	Βελτιστοποίηση Παραμετρικών μοντέλων .....	49
3.2.4.1	Παραμετρικά Διαγράμματα .....	50
3.3	Διατομή Καλωδίων .....	54
3.3.1	Βαθμοί Αξιοποίησης.....	54
3.3.1.1	Παραμετρικά μοντέλα των μικρότερων διατομών.....	55
3.3.1.2	Παραμετρικά μοντέλα διατομών μεγαλύτερων του βασικού μοντέλου .....	56
3.3.1.3	Σύγκριση παραμετρικών άκρων .....	57
3.3.2	Μετακινήσεις .....	58
3.3.3	Ιδιοσυχνότητες – Ιδιομορφές .....	60

3.3.4	Βελτιστοποίηση παραμετρικών μοντέλων .....	61
3.3.4.1	Παραμετρικά Διαγράμματα .....	63
3.4	Προένταση καλωδίων .....	66
3.4.1	Βαθμός Αξιοποίησης.....	66
3.4.1.1	Παραμετρικά μοντέλα προέντασης μικρότερης της αρχικής.....	68
3.4.1.2	Παραμετρικά μοντέλα μεγαλύτερης προέντασης της αρχικής .....	69
3.4.1.3	Παραμετρικά άκρα .....	70
3.4.2	Μετακινήσεις .....	71
3.4.3	Ιδιοσυχνότητες – Ιδιομορφές .....	73
3.4.4	Βελτιστοποίηση παραμετρικών μοντέλων .....	75
3.4.4.1	Παραμετρικά Διαγράμματα .....	76
3.5	Προένταση ως ποσοστό ορίου αστοχίας.....	79
3.5.1	Βαθμός Αξιοποίησης.....	79
3.5.1.1	Σύγκριση βασικού μοντέλου με τα παραμετρικά.....	81
3.5.2	Μετακινήσεις .....	83
3.5.3	Ιδιοσυχνότητες – Ιδιομορφές .....	84
3.5.4	Βελτιστοποίηση Παραμετρικών Μοντέλων .....	86
3.5.4.1	Παραμετρικά διαγράμματα .....	87
<b>4</b>	<b>ΑΝΥΨΩΜΈΝΟΣ ΠΥΛΩΝΑΣ.....</b>	<b>91</b>
4.1	Εισαγωγή.....	91
4.2	Εξέλιξη πυλώνων ανεμογεννητριών .....	92
4.2.1	Καλωδιωτός Φορέας προς Ανύψωση Πυλώνα.....	93
4.3	Μοντελοποίηση ανυψωμένου καλωδιωτού πυλώνα .....	94
4.3.1	Πρώτη φάση σχεδιασμού .....	95
4.3.1.1	Προένταση.....	95
4.3.1.2	Γωνία Πρόσδεσης .....	98
4.3.2	Τελική φάση σχεδιασμού.....	100
4.3.2.1	Σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις .....	102
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>109</b>





# 1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Βασική και συνεχιζόμενη απαίτηση των ανθρώπων, από τη στιγμή που άρχισαν να δομούν τις πρώτες κοινότητες, που πρόκειται για αρχέτυπα οργάνωσης των μετέπειτα σύγχρονων κοινωνιών, είναι η κατανάλωση ενέργειας. Πέραν της ενεργειακής πυραμίδας που επιβάλλει η οικονομία της φύσης για τη συντήρηση της βιολογικής υπόστασης του είδους, η ανθρώπινη φύση μέσα από την εξερεύνηση και τη συνεχή ροπή πνευματικής εξέλιξης, διευκόλυνση του καθημερινού βίου αλλά και την ανάπτυξη των μέσων παραγωγής για σταθερή και αξιόπιστη βιωσιμότητα, επέφεραν την ανάγκη ενεργειακών απαιτήσεων.

Στα πλαίσια της διεύρυνσης αυτών των απαιτήσεων, η εξέλιξη της Μηχανικής ως επιστήμη ήταν και θα συνεχίζει μέχρι σήμερα να είναι αναπόδραστο και αναπόφευκτο κομμάτι του συγχρόνου ανθρώπου. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου όπου διαρκώς εξυπηρετείται από ολοένα και περισσότερους, ολοένα και αποτελεσματικότερους αυτοματισμούς, αποτελεί το εχέγγυο που χρειάζεται ο σύγχρονος μηχανικός προκειμένου να φέρει εις πέρας την εξέχουσα σημασία αποστολή.

Σε ένα πλανήτη με πεπερασμένο αριθμό καταναλώσιμων πόρων, με την ταυτόχρονη έκρηξη της ανάγκης για ενέργεια στην οποιαδήποτε μορφή της για την εξυπηρέτηση πολλαπλών αναγκών, από τις συνεχείς και καθημερινές αερομεταφορές και τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, μέχρι και την πλήρη εξάρτηση από τον υπολογιστή στην ακμάζουσα ψηφιακή εποχή, τα ερωτήματα που γεννούνται είναι πολλά. Το βασικότερο όλων είναι η χρονική διάρκεια, έως πότε δηλαδή θα έχουμε διαθέσιμες πηγές προς κατανάλωση, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, μεταλλεύματα κ.α. και ποιο είναι το αντίτιμο στο περιβάλλον, με την κλιματική αλλαγή να βρίσκεται πλέον στην καθημερινότητα. Το δεύτερο και πιο επιδραστικό ερώτημα είναι αυτό που γεννά την ελπίδα. Η επιστράτευση της επιστήμης με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος (ενεργειακό, οικονομικό) αλλά και την συνεχή εξέλιξη του κλάδου της πράσινης ενέργειας, τουτέστιν τις ανακυκλώσιμες πηγές ενέργειας.

## 1.2 Ανεμογεννήτριες

Η αιολική ενέργεια δεν αποτελεί εξαίρεση στην προσπάθεια ανεύρεσης του μελλοντικού τρόπου ενεργειακής εξισορρόπησης του πλανήτη. Τα αιολικά πάρκα ολοένα και αυξάνονται, η τεχνολογία των ανεμογεννητριών βρίσκεται σε περίοπτη θέση των project από τις μεγαλύτερες οικονομίες του κόσμου και στα πλαίσια αυτά ο Μηχανικός καλείται να δώσει απαντήσεις που βελτιώνουν, βελτιστοποιούν και ανακαλύπτουν τους μηχανισμούς εκμετάλλευσης του ανέμου, ενός αγαθού που διανέμεται δωρεάν σε όλα τα πλάτη και μήκη της γης.

Οι ανεμογεννήτριες, όπως και κάθε δομή παραγωγής πράσινης ενέργειας, είναι κλάδος που απασχολεί την επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού με ποικίλους τρόπους. Ένας εξ αυτών είναι και η μεγέθυνση της, η διόγκωση δηλαδή του δομικού συνόλου με σκοπό να είναι αποδοτικότερη, να παράγει περισσότερο και να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην οργανική συνάφεια της φύσης, σαν αποδεκτό τεχνητό μέλος της.

Στα πλαίσια της ανάπτυξης του μεγέθους τους, φυσικά στα πλαίσια των πρωτοκόλλων ασφαλείας και βέλτιστης λειτουργίας, υπάρχουν ενδεχόμενες στατικές λύσεις που έχουν δοθεί ανά καιρούς. Μία από αυτές αποτελεί και ο καλωδιωτός φορέας, όπου θα αναλυθεί και θα διερευνηθεί η λειτουργία του σε συνεργασία με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, η ευελιξία του σαν λύση, οι σχεδιαστικές απαιτήσεις που παράγονται καθώς και η συμπεριφορά που διαμορφώνει στο γενικότερο δομικό σύνολο.

Παράδειγμα της συνεχούς ανάπτυξης αλλά και επένδυσης στο μέλλον είναι το αιολικό πάρκο San Gorgonio στη Νότια Καλιφόρνια, με συνολική χωρητικότητα 652MW, Εικ. 1-1



*Εικόνα 1-1: Αιολική φάρμα San Gorgonio Pass, Νότια Καλιφόρνια*

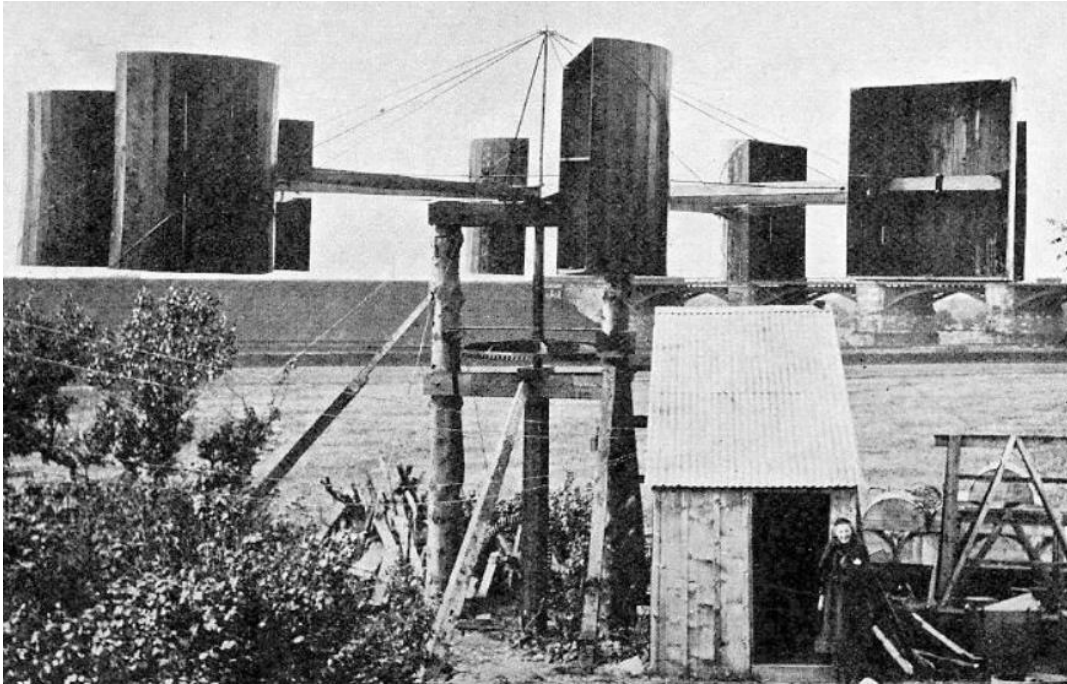
Το ανθρώπινο είδος έδειξε από αρκετά νωρίς στο φάσμα της ιστορικής του εξέλιξης ενδιαφέρον προκειμένου να εκμεταλλευτεί στον άνεμο. Πρότυπες μορφές και μηχανισμοί που κινούνταν με τον άνεμο προκείμενοι να παράξουν έργο, κάνουν την εμφάνισή τους από την Περσία του 5ου αιώνα μ.Χ.

Η εκμετάλλευση του ανέμου γίνεται πρακτικά, χωρίς τη χρήση κάποιας μηχανής από τη στιγμή που σχεδιάστηκαν τα πρώτα ιστιοφόρα, όπου τα πανιά των πλοίων χρησιμοποιούσαν τον άνεμο ως κινητήριο δύναμη για τα ταξίδια. Παρόλα αυτά, η πρώτη μηχανή που παραπέμπει σε μηχανή παραγωγής ενέργειας με σκοπό την παραγωγή έργου προς αξιοποίηση, αποτελούν τα πανεμόνια. Στο ανατολικό Ιράν, πρότυπες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα με σκοπό της άλεσης σιταριού, της άντλησης νερού ή και παραγωγή ζαχαροκάλαμου, ουσιαστικά εξυπηρετούν τις τοπικές κοινότητες χωρίς κανένα ενεργειακό αντίτιμο, Εικ. 1-2



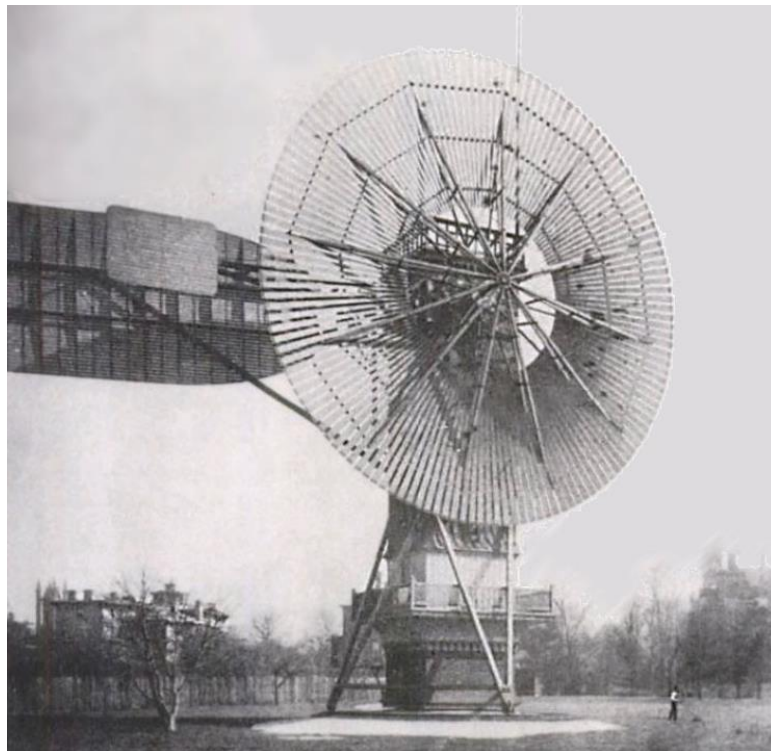
*Εικόνα 1-2: Μακέτα παρουσίασης πανεμόνιου*

Με την εξέλιξη των σχεδίων, τη ανεύρεση της μέγιστης αποδοτικότητας και την ανακάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας, που η εμφάνισή της σηματοδοτεί αξιοσημείωτη αλλαγή ρότας της ανθρώπινης ιστορίας, καταφτάνει το 1887 η πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Σκωτία από τον καθηγητή Prof. James Blyth, όπου δημιούργησε μια ανεμογεννήτρια με σκοπό τη ρευματοδότηση της αγροικίας του στη Σκωτία, στέλνοντας ρεύμα σε ενεργειακούς θύλακες που ήταν εγκατεστημένοι στο χώρο, Εικ. 1-3,



*Εικόνα 1-3: Πρώτη ανεμογεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Wikipedia, 2022)*

Την ίδια χρονιά δημιουργείται στην πόλη του Κλίβελαντ των Ηνωμένων Πολιτειών η πρώτη ανεμογεννήτρια μεγάλης κλίμακας, 18m ύψους, από τον Charles Brush και τροφοδοτεί μια γεννήτρια 12kW, Εικ. 1-4



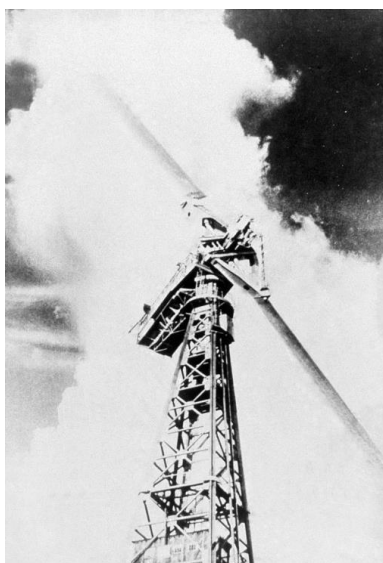
*Εικόνα 1-4: Πρώτη ανεμογεννήτρια μεγάλης κλίμακας, Cleveland*

Από τις αρχές του 20ου αιώνα, η χρήση των ανεμογεννητριών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αρχίζει να γίνεται σύνηθες φαινόμενο. Ήδη από το 1900 στη Δανία, δημιουργείται αιολικό πάρκο με συνολική ισχύ 30MW, ενώ ο προπομπός της σύγχρονης μορφής μια ανεμογεννήτριας, δομής δηλαδή που συνδέεται σε τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού απαντάται στη Γιάλτα της Σοβιετικής Ένωσης το 1931, ύψους 30m και παραγωγής 100kW. Σε επίπεδο εθνικού δικτύου, δηλαδή για προσφορά γενικής κοινωνικής υπόστασης και όχι για εξυπηρέτηση ατομικών ή τοπικών συμφερόντων, εγκαθίσταται στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1951, Εικ. 1-5



*Εικόνα 1-5: Πρώτη ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη σε εθνικό δίκτυο 1951, UK*

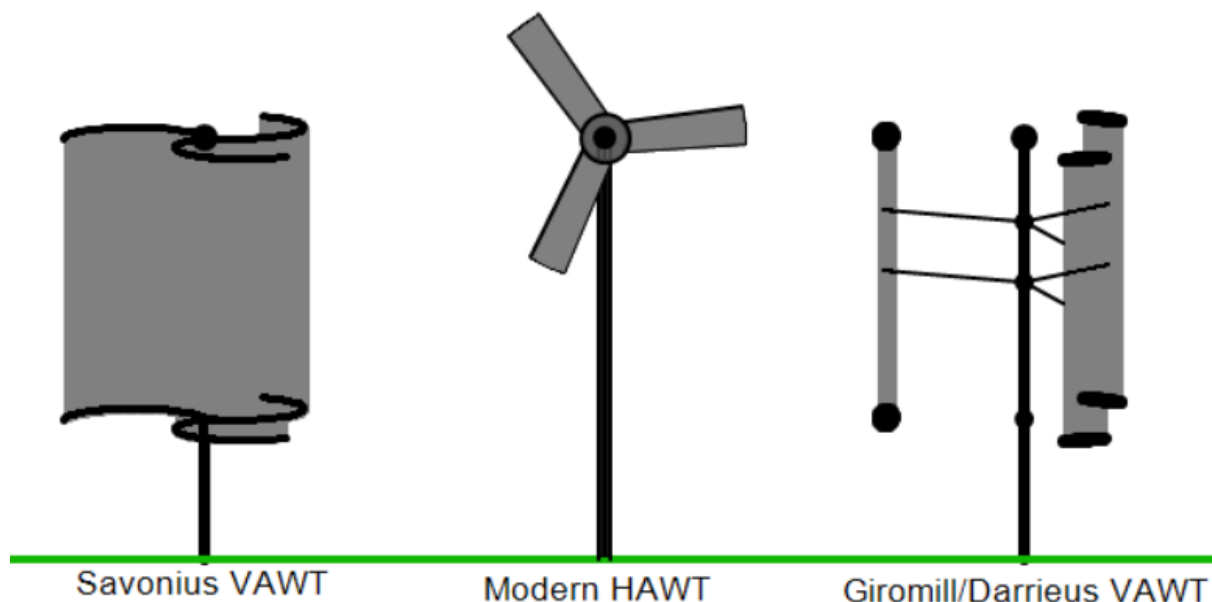
Ήδη από το 1941, στο Βερμόντ των Ηνωμένων Πολιτειών δημιουργήθηκε η πρώτη ανεμογεννήτρια με παραγόμενη ισχύ που ξεπερνάει το 1MW, παρόλο που μετά από 1100 ώρες χρήσης υπέστη αστοχία στη δομική του επάρκεια και καταστράφηκε, Εικ. 1-6



*Εικόνα 1-6: Πρώτη ανεμογεννήτρια 1MW, Vermont USA*

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των αυτοματισμών βρίσκει τους ρότορες, τους πυλώνες, τα υλικά και τα πτερύγια των ανεμογεννητριών να αναπτύσσονται ραγδαία με σκοπό τη βελτιστοποίηση. Κατά τη δεκαετία του 1970 οι συσσωρευμένες φωνές κατά της πυρηνικής ενέργειας σε συνδυασμό με την πετρελαϊκή κρίση αποτέλεσαν καταλύτη στην ανάπτυξη του κλάδου, με την Ιαπωνία και την Κίνα να ξεκινούν διαμόρφωση γραμμή μαζικής παραγωγής, με τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη να ακολουθούν τη δεδομένη ρότα, φτάνοντας στο σήμερα και την Vestas να αποτελεί την ηγέτιδα δύναμη στον σχεδιασμό και την παραγωγή ανεμογεννητριών.

Στο ιστορικό φάσμα της εξέλιξής τους, οι ανεμογεννήτριες απαντώνται σε τρεις βασικές μορφές, που διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αυτές του οριζόντιου και αυτές του κατακόρυφου άξονα, ή αλλιώς horizontal-axis wind turbines (HAWTs) και vertical-axis wind turbines (VAWTs) με τους βασικούς τύπους να διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα Εικ. 1-7,



*Εικόνα 1-7: Οι 3 κυρίαρχοι τύποι ανεμογεννητριών*

Οι σχηματισμοί οριζόντιου άξονα είναι αυτές που έχουν επικρατήσει στη σημερινή εποχή, κυρίως λόγω αρκετά μεγαλύτερης αποδοτικότητας συμβαδίζοντας με τις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις.

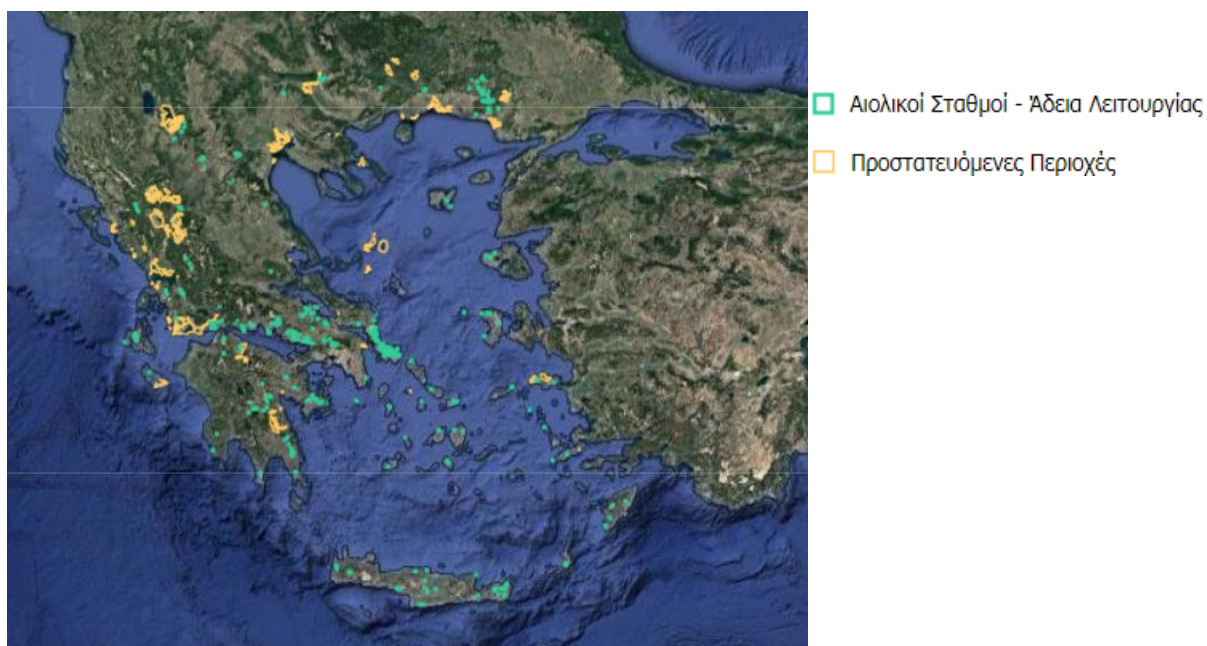
Με δεδομένη και κραταία μορφή, η διαμόρφωση των αιολικών πάρκων που απαρτίζονται από εκατοντάδες έως και χιλιάδες μονάδες έχει ως κρίσιμο στοιχείο την επιλογή θέσης που θα αποτελέσει και το χώρο επένδυσης. Η επιλογή της γεωγραφικής τοποθεσίας είναι ένα πολυπαραγοντικό ζήτημα με αξιοσημείωτα στοιχεία τα κόστη μεταφοράς υλικών, την ευκολία κατασκευής, τις δυνατότητες σχεδιασμού από ευμενή ή δυσμενή στοιχεία της φύσης κ.α. Οι ανεμογεννήτριες συναρτήσεως της γεωγραφικής τους θέσης χωρίζονται σε χερσαίες, παράκτιες (onshore) και υπεράκτιες (offshore) Εικ. 1-8,



Εικόνα 1-8: Υπεράκτιο πάρκο ανεμογεννητριών

Ειδική μνεία γίνεται και για την Ελλάδα, όπου η γεωγραφική της θέση στον Ευρωπαϊκό Νότο με το αμιγώς μεσογειακό κλίμα και την ένταση του ανέμου, αποτελεί σημαντικό κόμβο για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, όπως και άλλων ΑΠΕ. Μέχρι και τις καταγραφές του 2021, στην Ελλάδα βρίσκονται 2.270 ανεμογεννήτριες, εκ των οποίων οι περισσότερες λειτουργούν στην Στερεά Ελλάδα παράγοντας 1.837 MW, το 41% της συνολικής ενέργειας της χώρας. Η συνολική ενέργεια που υπάρχει στη χώρα βρίσκεται στα επίπεδα των 4.451 MW, με το 2020 να αποτελεί χρονιά ορόσημο με 200 νέες εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες.

Οι περισσότερες εξ αυτών κατασκευάζονται με άδεια παραγωγής από το κράτος αποφεύγοντας τις προστατευόμενες περιοχές, Εικ. 1-9,



Εικόνα 1-9: Γεωπληροφοριακός Χάρτης, ΡΑΕ (ΡΑΕ, 2022)

Προσβλέποντας σε ένα ευεργετικό για το ανθρώπινο είδος μέλλον, με την πράσινη ενέργεια να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην καθημερινότητα αλλά και τις συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις να καλύπτονται επιτυχώς, ο ρόλος του Μηχανικού είναι πιο επίκαιρος από ποτέ. Η βιωσιμότητα του πλανήτη με στόχο τις μηδενικές εκπομπές άνθρακα είναι ο μεγάλος στόχος έως και το 2030, με χώρες όπως οι Σκανδιναβικές και η Μεγάλη Βρετανία να οδεύουν προς τα εκεί με βήμα σταθερό και σθεναρό.

Η αναζήτηση τρόπων να μεγαλύτερη παραγωγή φέρνει στο προσκήνιο και την επικρατούσα τάση όχι μόνο να βελτιστοποιούνται οι μηχανισμοί και τα πτερύγια, αλλά να αυξάνονται και σε μέγεθος. Η αύξηση του ύψους των πυλώνων των ανεμογεννητριών, σε περιπτώσεις χερσαίας υποδομής, είναι πεδίο προς άπλετη διερεύνηση. Το μέγεθος φαντάζει ως το προφανές στοιχείο στην προσπάθεια αύξησης παραγωγής, με την γνησίως αύξουσα τάση να έχει εξελίξει στο φάσμα των ετών τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες από τα 58-60m, κοντά στα 120m ως τετριμμένο πλέον υψόμετρο.

Οι δρόμοι επίτευξης του στόχου ποικίλουν με τις λύσεις στα project που παρουσιάζονται να είναι αξιοθαύμαστες, με μια σημαντική εξ αυτών όπως θα δούμε να αποτελεί η λύση του καλωδιωτού φορέα.

Εταιρείες διεθνούς κύρους όπως η Vestas και η Ramboll, ήδη εκπονούν project με στατικές λύσεις που επιτυγχάνονται με καλωδιωτούς φορείς, λόγω μιας σειράς πλεονεκτημάτων που προσφέρουν.

Είτε στην Φινλανδία με το Viinamäki project από τη Vestas, είτε με τα σχέδια της Ramboll όπου σχεδιάζει να υλοποιήσει πάρκο με ανεμογεννήτριες καλωδιωτών πυλώνων, τα δείγματα για το μέλλον είναι ενθαρρυντικά. Άλλωστε, σύμφωνα με τον τεχνικό διευθυντή της τελευταίας Ulrik Støttrup Andersen, υπολογισμένα σενάρια υποδεικνύουν μείωση εξόδων έως και 30% για την υλοποίηση τέτοιων κατασκευών σε σχέση με οποιαδήποτε εναλλακτική. Παρακάτω διακρίνεται το πόνημα της Ramboll Εικ. 1-10, (Ramboll, 2019)



*Εικόνα 1-10: Αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών με καλωδιωτούς πυλώνες (onshore windfarm), Ramboll*



## 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 2.1 Μοντελοποίηση

Για την διαμόρφωση της καλωδιωτής κατασκευής και τη μορφοποίηση του συνολικού φορέα επιβαλλόταν η χρήση κάποιου FEM (CSI, n.d.) προγράμματος ως βοήθημα για τη δημιουργία της διερεύνησης. Σκοπός άλλωστε για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς και την ευκρίνεια των συμπερασμάτων αποτελεί η δόμηση μιας ισχυρής βάσης δεδομένων ως σημείο αναφοράς της ανάλυσης, όπου θα πραγματοποιηθεί με το πρόγραμμα SAP2000. Τόσο η διαμόρφωση του πυλώνα όσο και η επιλογή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των καλωδίων και των υλικών επιλέγεται βάσει διαθέσιμων στην αγορά προϊόντων αλλά και υλικών που ανά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλα project. Στα πλαίσια της διερεύνησης της συμπεριφοράς του δομικού συνόλου, πρώτα διαμορφώνεται η βάση με πυλώνα υψομέτρου 120m, ενός γνώριμου μεγέθους όπου προσδένονται καλώδια. Με αυτό τον τρόπο έχουμε ευκρινή και ακριβή αποτέλεσμα λόγω γνώριμων κατασκευαστικά μεγεθών, ενώ ταυτόχρονα διενεργείται και η μεγάλης κλίμακας παραμετρική ανάλυση. Έπειτα, επιχειρείται η ανύψωση του πυλώνα, όπου πλέον υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία και η ανάλογη εποπτεία ώστε να εκφράζονται ασφαλή συμπεράσματα.

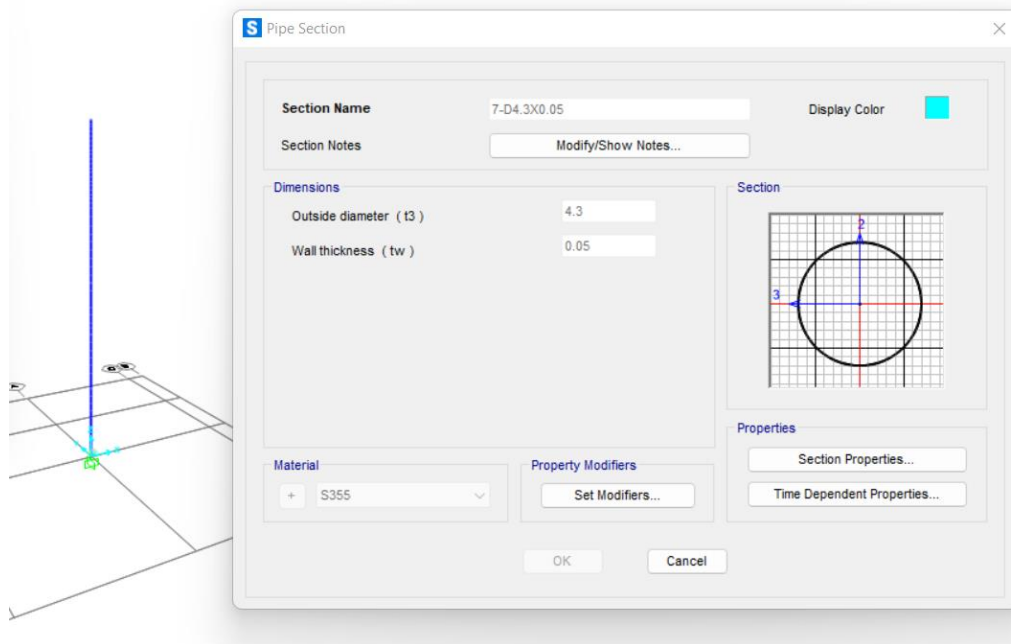
#### 2.1.1 Αρχική Φάση Σχεδιασμού

Κατά την πρώτη φάση προσέγγισης του προβλήματος, σχεδιάζεται ο πυλώνας που αποτελεί και τη βάση της ανεμογεννήτριας. Ο πυλώνας αποτελείται αποκλειστικά από κοίλες διατομές χάλυβα, κλάσης S355. Βάσει της βηματικής λογικής που ακολουθείται για μεγαλύτερη εποπτεία, το υψόμετρο του πυλώνα τοποθετείται στα 117.5m, όπου αθροίζοντας το ύψος του ρότορα φτάνει τα 120m.

Η επιλογή των διατομών αλλά και των μηκών τους διενεργείται βάσει βιβλιογραφίας, όπου τα μήκη των CHS μελών του πυλώνα έχουν μήκους που κυμαίνεται από 1.2m έως και 2m, με την εμφάνιση δαχτυλιδιών (φλάντζες) να γίνεται ανά 20-25m.

Η βάση του πυλώνα είναι πακτωμένη και έχει ως σημείο εκκίνησης διατομή διαμέτρου  $D=4.8m$ , και πάχους διατομής 0.56m, η οποία όπως και κάθε άλλη εφεξής θα αναφέρεται με το συμβολισμό  $D4.8 \times 0.56$ , τμήμα που αποτελεί και τη μέγιστη διάμετρο που δύναται να υποστηρίξει ευρωπαϊκό οδικό δίκτυο μεταφοράς. Οι πλείστες των διατομών κυμαίνονται σε διαμέτρους από τα 4.3m έως και 3.6m, εξαιρουμένης της βάσης και της κορυφής που στηρίζει το μηχανισμό του ρότορα. Επιπροσθέτως τα πάχη των διατομών κυμαίνονται μεταξύ των 0.015m και των 0.06m, με τις πλείστες εξ αυτών να κυμαίνονται στο στενότερο φάσμα των 0.015m-0.025m.

Δειγματικά, οι πρώτες διαμορφώσεις και ο σχεδιασμός του πυλώνα, Εικ.2-1,



Εικόνα 2-1 : Απεικόνιση πυλώνα και τυχαίας διατομής μέσω του SAP2000

Στα πλαίσια δόμηση πυλώνων ανεμογεννητριών ο τρόπος που εξετάζεται η επάρκειά του είναι η εφαρμογή φορτίων στην κορυφή του πυλώνα όπου κατά τη βιβλιογραφία είναι ένας συνδυασμός εφαρμογής σημειακής τέμνουσας, στροφικής κατά τον κατακόρυφο άξονα ροπής καθώς και καμπτικής ροπής, ενώ σε αντίθεση με την πλειάδα των κατασκευών, ο πυλώνας δεν αστοχεί από σεισμική διέγερση, αλλά από το συνδυασμό των παραπάνω δυνάμεων, όπου αντικατοπτρίζουν τις συνδυαστικές φορτίσεις των ανεμοπιέσεων.

Επιπλέον, ο ρότορας μαζί με το βάρος των πτερυγίων προσομοιάζεται ως σημειακή μάζα με βάρος 4000kN

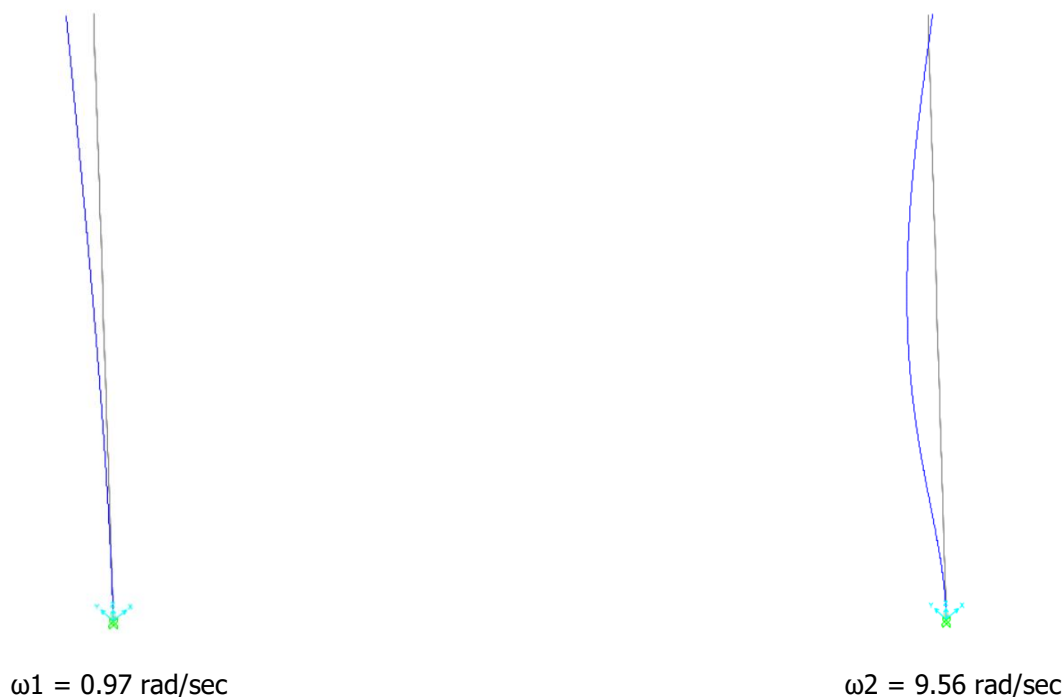
Τα φορτία κορυφής που εφαρμόζονται στον πυλώνα είναι,

- i) Οριζόντια δύναμη 1200kN
- ii) Στρεπτικό φορτίο 12000 kNm
- iii) Δρώσα σημειακή ροπή, τέτοια ώστε να συμφωνεί με την οριζόντια δύναμη, 15000 kNm
- iv) Βάρος ρότορα και πτερυγίων 4000 kN



Εικόνα 2-2: Σημειακή εφαρμογή φορτίων, κορυφή πυλώνα

Ένας τέτοιος πυλώνας, σχεδιασμένος με προδιαγραφές να μπορεί να υλοποιηθεί σε μελέτη εφαρμογής, είναι συνολικού βάρους 390.55 tons με τις ιδιομορφές του πυλώνα να διαμορφώνονται ως εξής, Εικ.2-3, (Koulatsou, Kazakis, Gantes, & Lagaros, 2020)



Εικόνα 2-3: Ιδιομορφές και Ιδιοσυχνότητες ελεύθερου πυλώνα

#### 2.1.1.1 Προσομοίωση με Ελατήριο – Dischinger Formula

Στις καλωδιωτές κατασκευές υπάρχει η γενική παραδοχή της αξιωματικής γεωμετρικής μη γραμμικότητας που παρουσιάζει η συμπεριφορά των καλωδίων. Κατά γενική ομολογία, οι σύγχρονες τεχνολογικές υποδομές με τα απαραίτητα προγράμματα έχουν επιλύει το πρόβλημα συνδυασμού στοιχείων γραμμικής συμπεριφοράς (χαλύβδινος πυλώνας) προσδεμένα με στοιχεία μη γραμμικής συμπεριφοράς (καλώδια).

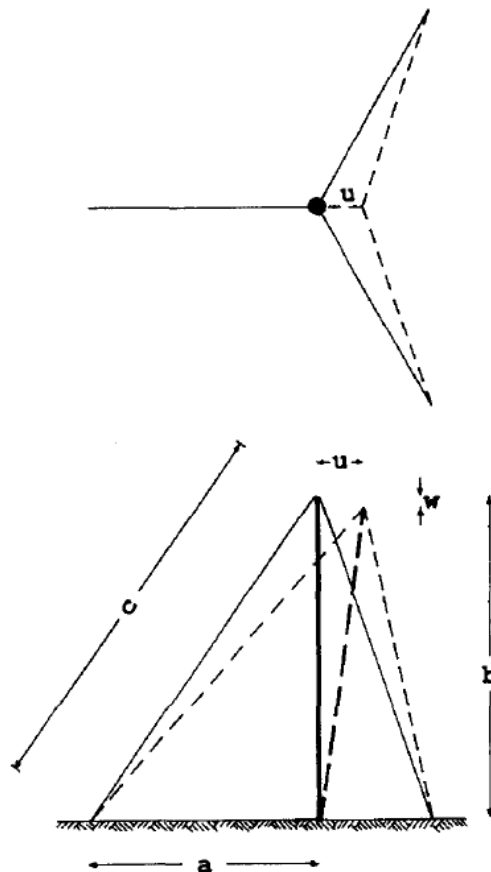
Στα ερευνητικά πλαίσια της εργασίας, σε συνδυασμό με την επιβεβαίωση της ομαλής λειτουργίας του υπολογιστικού υποβάθρου που παράγει ακριβή αποτελέσματα, διαμορφώνεται ένα υβριδικό στάδιο πριν γίνει ο σχεδιασμός και η πρόσδεση των καλωδίων στον πυλώνα. Το ενδιάμεσο στάδιο ουσιαστικά αποτελείται από την προσομοίωση ομάδας καλωδίων από το συνδυασμό ενός ελατηρίου με ένα κατακόρυφο φορτίο στο σημείο πρόσδεσης. Το κλειδί της μεταγωγής από τη μια φόρμα στην άλλη

καθίσταται εφικτό με την εξίσωση του Dischinger<sup>1</sup> όπου αποτελεί και το προγεφύρωμα μεταξύ των μοντέλων.

Η ισοδύναμη σταθερά του ελατηρίου, εκπεφρασμένη ως  $k_{\text{equivalent}} = k_{\text{eq}}$  έχει την εξής μορφή,

$$K_{\text{eq}} = N * \left\{ T_p + \frac{\frac{1}{2} E A g \left(\frac{a}{c}\right)^2}{1 + \frac{\left(\frac{m g a}{T_p}\right)^2 E A g}{12 T_p}} \right\} * \left(\frac{1}{c}\right), \text{ ενώ ταυτόχρονα το κατακόρυφο φορτίο } F_w \text{ δίνεται από τη}$$

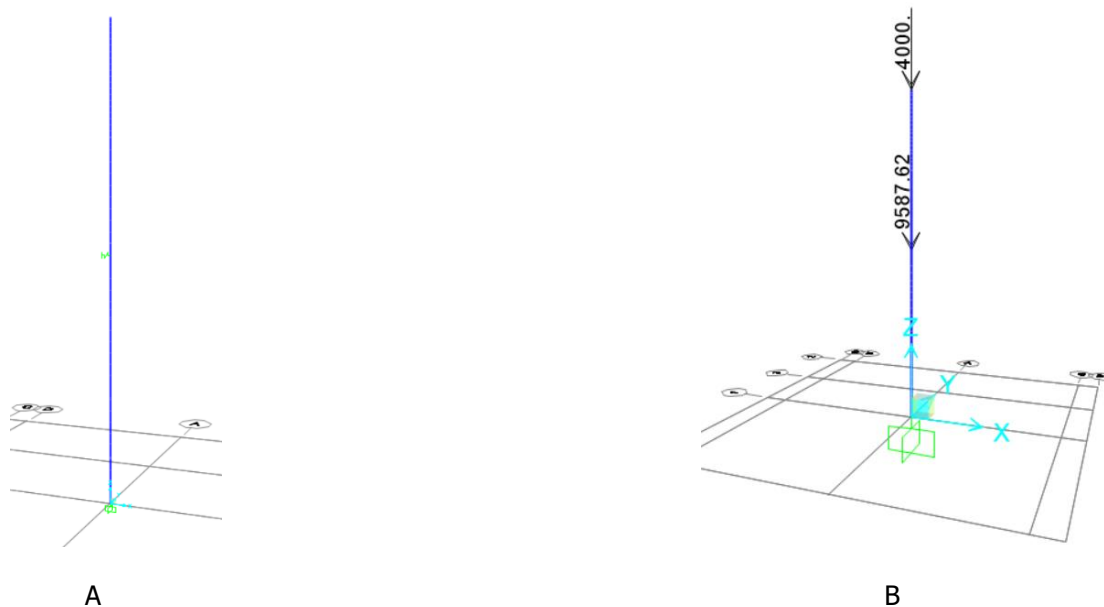
σχέση  $F_w = N * T_p * \left(\frac{1}{c}\right)$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των καλωδίων,  $T_p$  η προένταση των καλωδίων,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  $m g$  το κατανεμημένο βάρος του καλωδίου,  $A_g$  η κυλινδρική διατομή του καλωδίου, ενώ τα  $a$ ,  $b$ ,  $c$  τα γεωμετρικά στοιχεία σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα Εικ. 2-4



Εικόνα 2-4: Γεωμετρικά στοιχεία της εξίσωσης, Dischinger

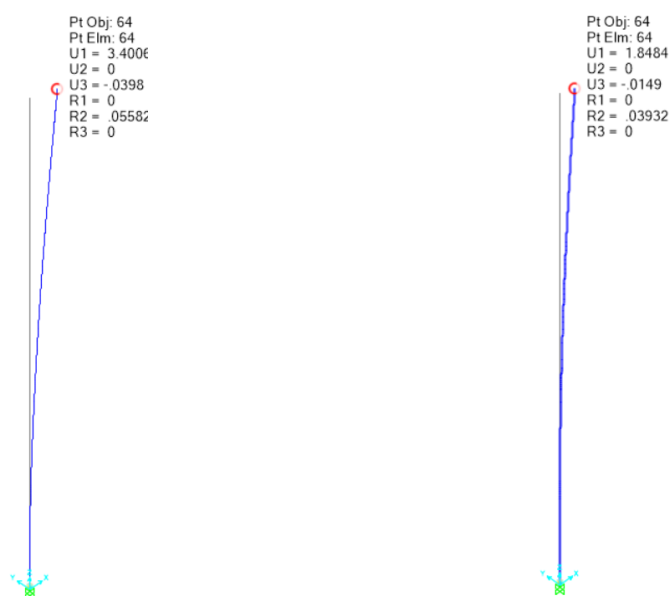
<sup>1</sup> (Gantes C. , 1993)

Οι παραπάνω υπολογισμοί, για μια τριάδα καλωδίων, με προένταση στα 4500 kN (αναλύεται αργότερα η επιλογή του συγκεκριμένου αριθμού) δίνουν το ζευγάρι τιμών  $k_{eq} = 8490.04$  kN/m και κατακόρυφο φορτίο  $F_w = 9587.6$  kN. Τα συγκεκριμένα μεγέθη εφαρμόζονται στον 30<sup>ο</sup> κόμβο του πυλώνα, όπου και αποτελεί το σημείο πρόσδεσης, στα 61.5m Εικ. 2-5 και Εικ. 2-6,



Εικόνα 2-5: Ελατήριο στο σημείο πρόσδεσης (A), Εφαρμοζόμενο φορτίο στην πρόσδεση και βάρος κορυφής (B)

Οι μετακινήσεις που παρήχθησαν τόσο από τον ελεύθερο πυλώνα, όσο και από το ελατήριο, Εικ. 2-6,



Εικόνα 2-6: Μετακίνηση κορυφής πριν και μετά την εφαρμογή ελατηρίου

Η μετακίνηση λοιπόν του πυλώνα στην κορυφή, μειώθηκε από τα 3.4m που βρίσκονταν με την άσκηση των φορτίων κορυφής, στα 1.84m μετά την εφαρμογή του ζεύγους ελατηρίου και κατακόρυφου φορτίου.

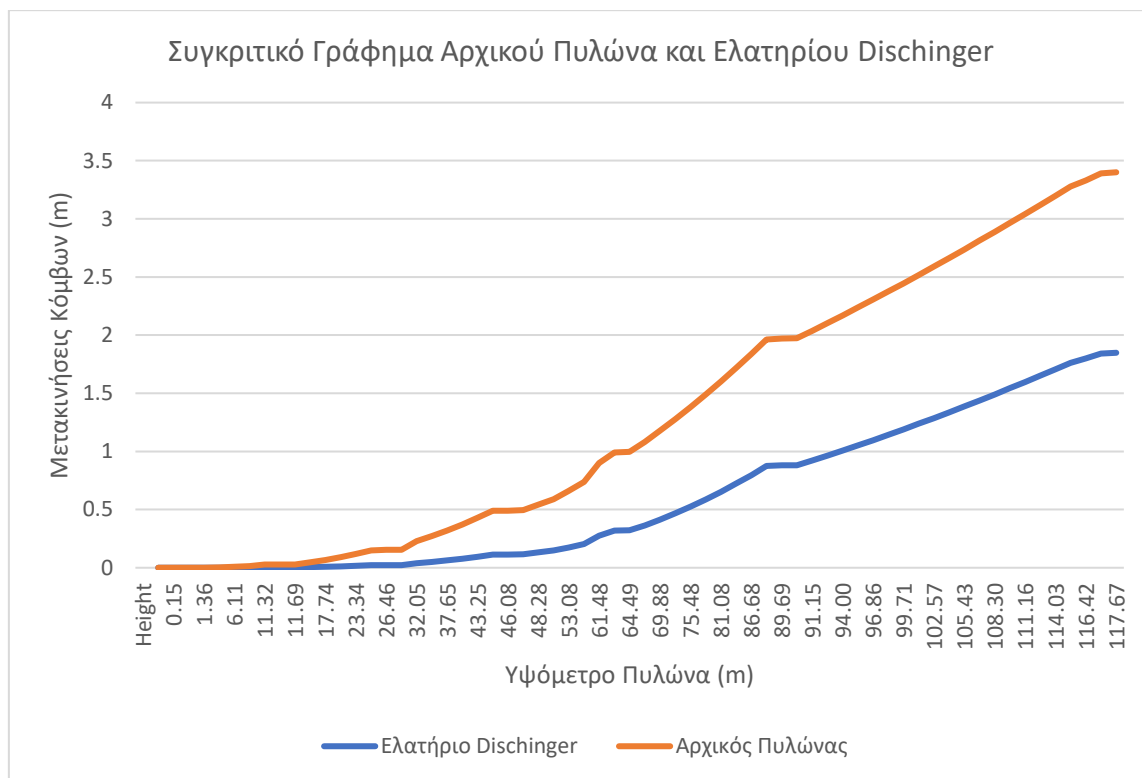
Επιπλέον, οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες των παραπάνω, μεταλλάχθηκαν ως εξής, Πίν. 2-1,

*Πίνακας 2-1 : Μεταβολή Ιδιοσυχνοτήτων και Ιδιοπεριόδων μετά την εφαρμογή του ελατηρίου*

Ιδιομορφες	Αρχικός πυλώνας		Ελατήριο Dischinger	
	Ιδιοπερίοδοι	Ιδιοσυχνότητες	Ιδιοπερίοδοι	Ιδιοσυχνότητες
	Sec	rad/sec	Sec	rad/sec
1	2.104626	2.985416	4.808316	1.306733
2	0.469275	13.38914	1.399626	4.489189
3	0.188742	33.28987	0.232149	27.0653
4	0.102201	61.47897	0.215837	29.11082
5	0.070716	88.85123	0.152632	41.16557
6	0.064724	97.076	0.10768	58.35041
7	0.044167	142.2591	0.070308	89.36608
8	0.033918	185.2439	0.058182	107.9914
9	0.030437	206.4341	0.035642	176.2873
10	0.026365	238.3136	0.031939	196.7223
11	0.021762	288.7279	0.023975	262.068
12	0.01893	331.9165	0.02276	276.0628

Το υβριδικό στάδιο με το ζεύγος ελατηρίου – κατακόρυφου φορτίου όπως θα φανεί και παρακάτω παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση σε σχέση με το καλωδιωτό μοντέλο.

Αναφορικά με τις μετακινήσεις των κόμβων καθ' ύψος του πυλώνα, τόσο για τον αρχικό πυλώνα όσο και για το ενδιάμεσο μοντέλο, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα, Εικ. 2-7



Εικόνα 2-7 : Γράφημα μετακινήσεων πριν και μετά την εφαρμογή ελατηρίου

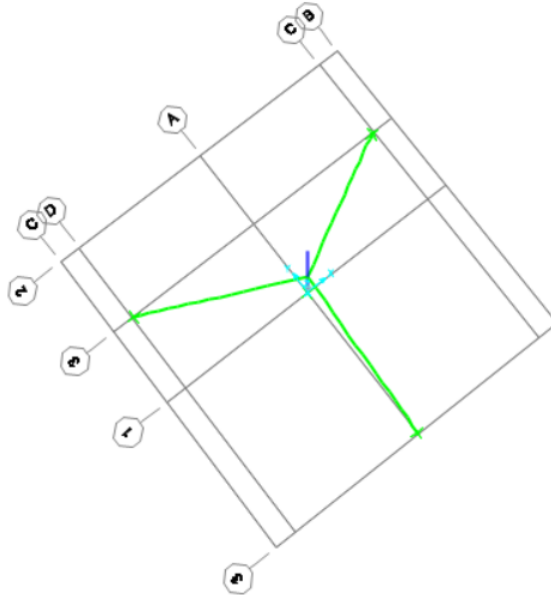
### 2.1.2 Τελική Φάση σχεδιασμού, Καλωδιωτό Μοντέλο

Η τελική φάση του σχεδιασμού, που θα αποτελέσει και το σημείο αναφοράς για τις παραμετρικές διερευνήσεις και την ανύψωση, γίνεται στην τελική διαμόρφωση του μοντέλου με την πρόσδεση του καλωδιωτού φορέα, όπου παρατίθενται η γεωμετρία, η επιλογή υλικών, η κατηγορία 4 των CHS διατομών τα εντατικά μεγέθη και οι βαθμοί αξιοποίησης.

Τα καλώδια έχουν διάμετρο 0.12m , επιλεγμένο από τον κατάλογο της Pfeifer, με ανάλογο υλικό του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι προσδιορισμένα μέσα από τη μπροσούρα Anpex H1, με την εμπορική ονομασία PV1450.

Το όριο διαρροής των καλωδίων φτάνει στα 14500 kN αξονικής δύναμης , ενώ η προένταση που έχει εφαρμοσθεί είναι 4500 kN (το 31% της αντοχής).

Η τοποθέτηση των καλωδίων, έγινε με βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τη γωνία «πυλώνα-καλωδίου» να είναι στις 45° και η γωνία μεταξύ τους στις 120°. Η γεωμετρία, όπως διακρίνεται στο σχήμα Εικ. 2-8,



Εικόνα 2-8: Πρόσδεση καλωδίων με 120ο γωνία μεταξύ τους

Το υλικό των καλωδίων καταχωρήθηκε ως Steel Wire Rope, όπου έχει προδιαγραφές σύμφωνα με τα βιομηχανικά πρότυπα της Sudwestfalen, προτύπου EN 10088-3 : 1.4436 X3CrNiMo 17-13-3 το οποίο συνοδεύει το σχεδιασμό του PV1450 (Pfeifer, 2022).

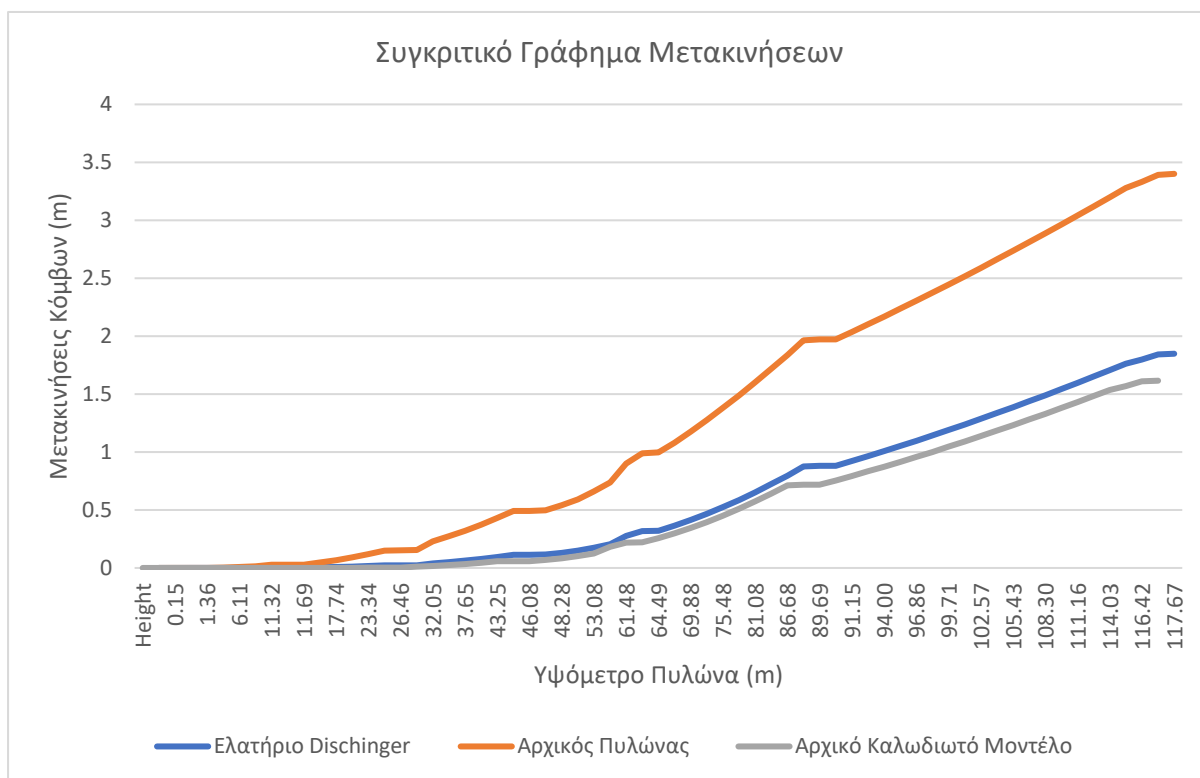
Οι μετακινήσεις κορυφής μειώνονται δραστικά και όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα Εικ. 2-9, οι αποκλίσεις με το ελατήριο και την Dischinger formula είναι στα προβλεπόμενα επίπεδα, επαληθεύοντας τη μη γραμμική ανάλυση του SAP2000. Στο πρόγραμμα του SAP2000, έκδοση 23.1.1, στα load cases επιλέγεται να τρέξουν όλα τα patterns με την επιλογή non-linear με τις απαραίτητες ρυθμίσεις.

Η διαδικασία διενεργείται με συγκεκριμένο τρόπο, κατά τα πρότυπα ρυθμίσεων του προγράμματος, όπου δομούνται 3 βασικά load cases :

- i) Load case: Tip loads ( Φορτία Κορυφής) όπου εισάγονται τα φορτία που ασκούνται στον πυλώνα
- ii) Load case: DEAD , όπου με βάση το Material Source στην ανάλυση εισάγονται τα βάρη του πυλώνα, των καλωδίων και το βάρος ρότορα – πτερυγίων
- iii) Load case: Target , όπου είναι η εισαγωγή της προέντασης των καλωδίων ώστε να τρέξουν ομαλά στα πλαίσια της μη γραμμικής ανάλυσης

Το load case Tip Loads εισάγεται με zero initial conditions και ακολουθούν τα DEAD και Target μετά από αυτό.

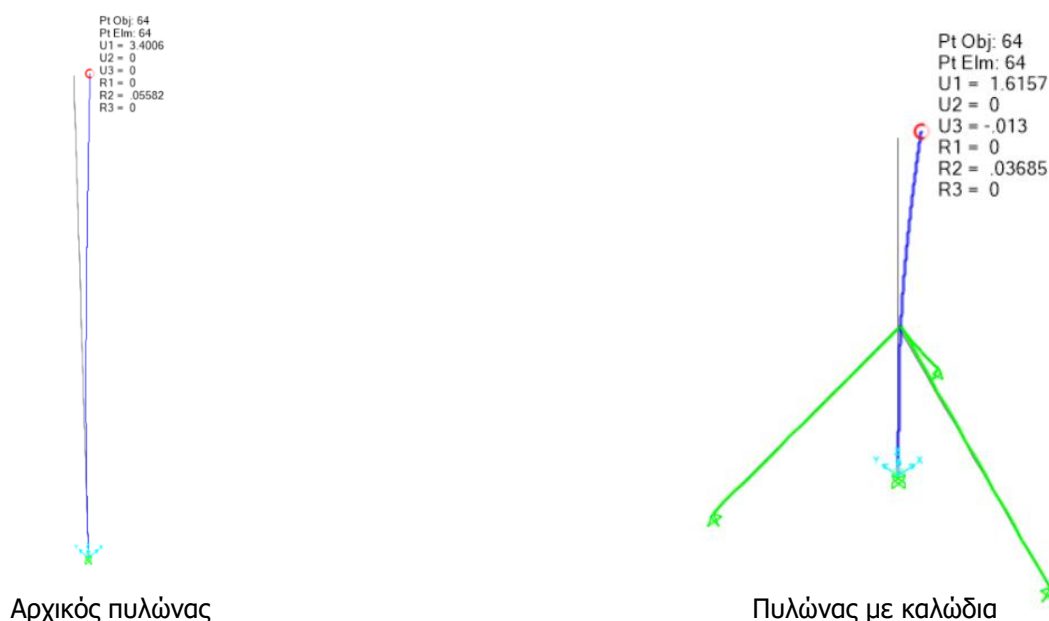




Εικόνα 2-9 : Σύγκριση μετακίνησης των τριών μοντέλων

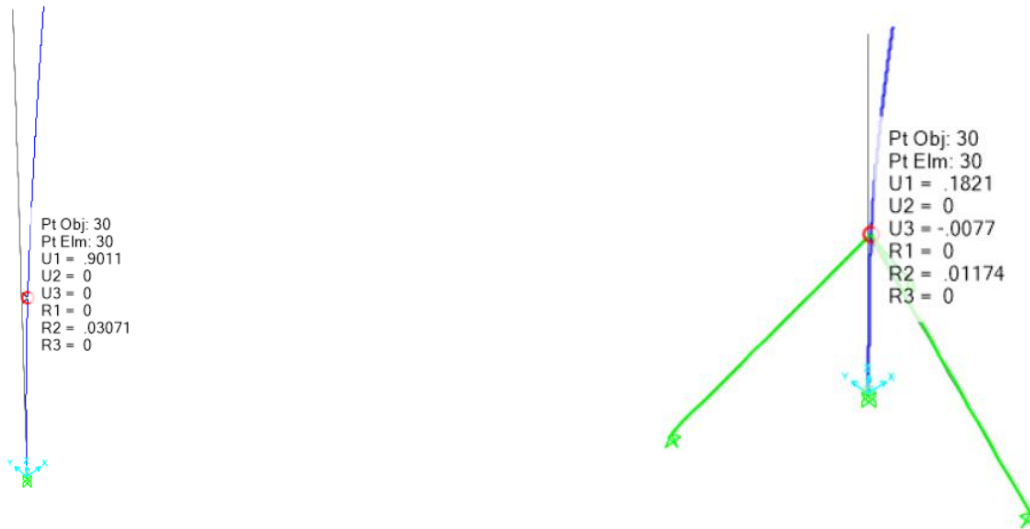
Η μετακίνηση κορυφής του πυλώνα με τον καλωδιωτό πλέον φορέα παρουσιάζει μετακίνηση κορυφής 1.74m, και πορεία μεταβολής που επιβεβαιώνει τόσο την υπόθεση του ζεύγους «ελατήριο-κατακόρυφο φορτίο», όσο και την ορθότητα της μη γραμμικής ανάλυσης όπως διενεργήθηκε από το πρόγραμμα καθώς και τη σωστή γεωμετρία του φορέα.

Για εποπτική παρατήρηση παρατίθενται συγκριτικά τα εξής, Εικ. 2-10 και Εικ. 2-11,



Εικόνα 2-10: Σύγκριση μετακίνησης κορυφής αρχικού και καλωδιωτού φορέα

Επιπλέον οι μετακίνηση του κόμβου πρόσδεσης (Label 30) μειώνεται από τα 0.9m στα 0.18m,



Αρχικός πυλώνας ,σημείο πρόσδεσης

Πυλώνας με καλώδια, σημείο πρόσδεσης

Εικόνα 2-11: Σύγκριση μετακίνησης κόμβου πρόσδεσης αρχικού και καλωδιωτού φορέα

#### 2.1.2.1 Εντατικά Μεγέθη (Αξονικές και Καμπτικές Δυνάμεις)

Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στον πυλώνα και τα καλώδια προέρχονται από τα φορτία κορυφής, την προένταση στα καλώδια και το εφαρμοσμένο βάρος ρότορα-πτερυγίων στην κορυφή του πυλώνα.

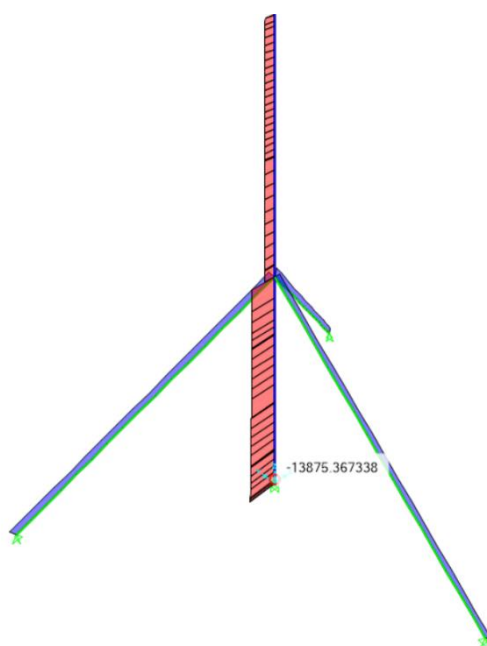
Το διάγραμμα των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται έχει τραπεζοειδή μορφή, καθώς ξεκινάει με τα 4000 kN, λόγω των 400 tons εφαρμογής συγκεντρωμένης μάζας στην κορυφή και καταλήγει στα 7905.55 kN στη βάση καθώς προστίθεται διαρκώς ως και τη βάση το βάρος του πυλώνα, Εικ. 2-12.

Τα υποφαινόμενα σημεία που διακρίνονται είναι δειγματικά προκειμένου να καταδείξουν τα μεγέθη και την εξέλιξή τους, μιας και η μεγάλη πληθώρα των joints δεν επιτρέπει ακριβή εικονική παράθεση, όπως συμβαίνει με ένα πίνακα.



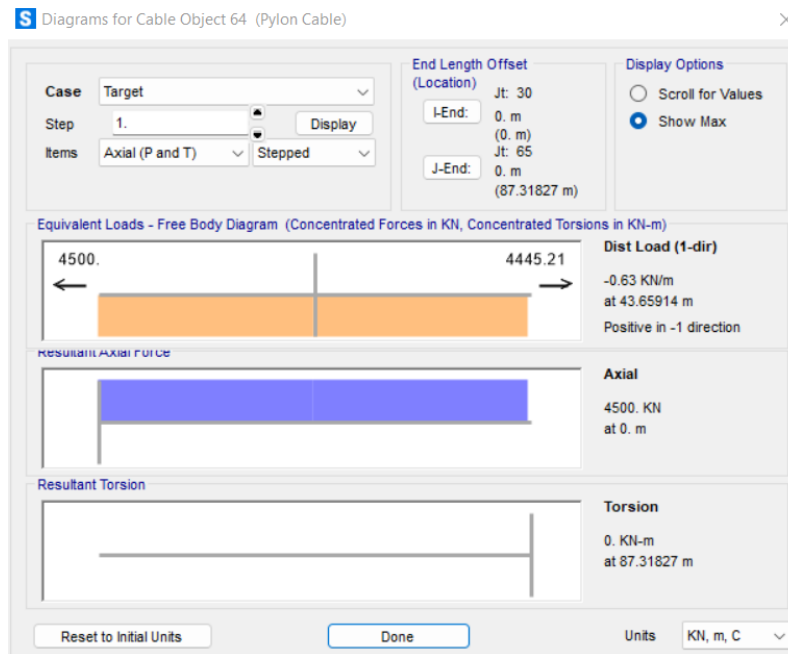
Εικόνα 2-12: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων, Ελεύθερος Πυλώνας

Στον αντίποδα, όταν εφαρμοστούν τα καλωδιωτά μέλη έχουμε αλλαγή της μορφής των διαγραμμάτων. Η προένταση στα καλώδια αναπτύσσει αξονικές που παρουσιάζονται και στο σημείο πρόσδεσης, όπου υπό γωνία  $45^\circ$ , αναλύονται σε κατακόρυφη και οριζόντια συνιστώσα. Η οριζόντια συνιστώσα αποτελεί τον περιορισμό των πλευρικών μετακινήσεων του κόμβου πρόσδεσης, ο οποίος λειτουργεί σαν μια μορφή πάκτωσης για το σύστημα όπως θα φανεί και στις παραμετρικές αναλύσεις, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα αυξάνει τις αξονικές εντάσεις στο σύστημα, δημιουργώντας ένα «άλμα» με διαχωριστικό σύνορο το σημείο πρόσδεσης, Εικ. 2-13,



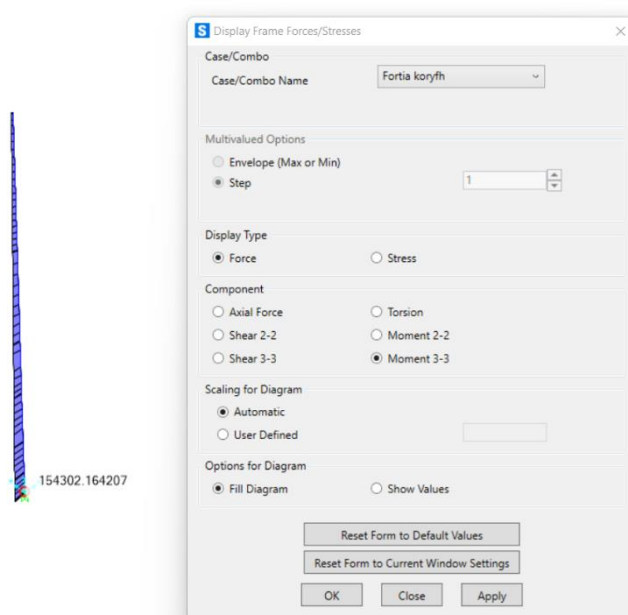
Εικόνα 2-13: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων, Καλωδιωτός Πυλώνας

Πέραν του άλματος των αξονικών δυνάμεων, διακρίνεται το σταθερό αξονικό φορτίο στα καλώδια, όπου στην άκρη του σημείου πρόσδεσης έχει ελαφρώς ελαττωμένη προένταση λόγω του ίδιου βάρους που λειτουργεί ευνοϊκά Εικ. 2-14,



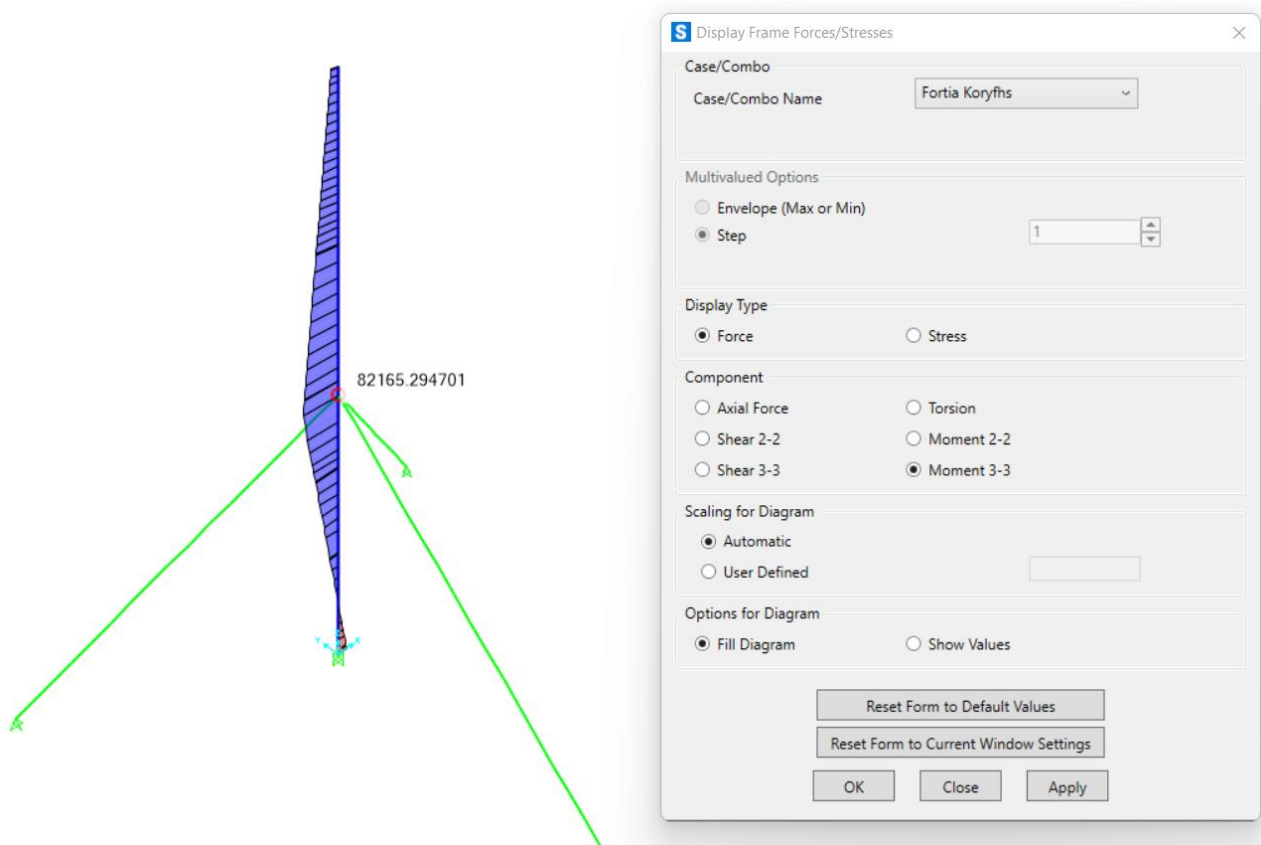
Εικόνα 2-14: Προένταση στα καλώδια

Αναφορικά με τις καμπτικές δυνάμεις, αυτές δημιουργούνται από την εφαρμογή της τέμνουσας δύναμης και της σημειακής ροπής που εφαρμόζονται στην κορυφή του πυλώνα. Όπως είναι αναμενόμενο, στην κορυφή του ελεύθερου πυλώνα οι καμπτικές εντάσεις που αναπτύσσονται είναι μηδανικές λόγω ελεύθερου άκρου ενώ μεγιστοποιούνται στην βάση του πυλώνα, Εικ. 2-15



Εικόνα 2-15: Διάγραμμα ροπών, Ελεύθερος Πυλώνας

Η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται στη βάση κυμαίνεται στα 155000kNm, από το Load Case «Φορτία Κορυφής» ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα ροπών του καλωδιωτού μοντέλου, όπου οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στην περιοχή εκατέρωθεν της πρόσδεσης στον 30ο κόμβο εφόσον αποτελεί σημείο πλευρικής αντίστασης στην κίνηση Εικ. 2-16,



Εικόνα 2-16: Διάγραμμα ροπών, Καλωδιωτός Πυλώνας

Στη βάση του πυλώνα όντας πάκτωση διακρίνονται και αρνητικές τιμές ροπών, ενώ η μέγιστη τιμή της έντασης κυμαίνεται στα 82000kNm.

#### 2.1.2.2 Design και Βελτιστοποίηση πυλώνα

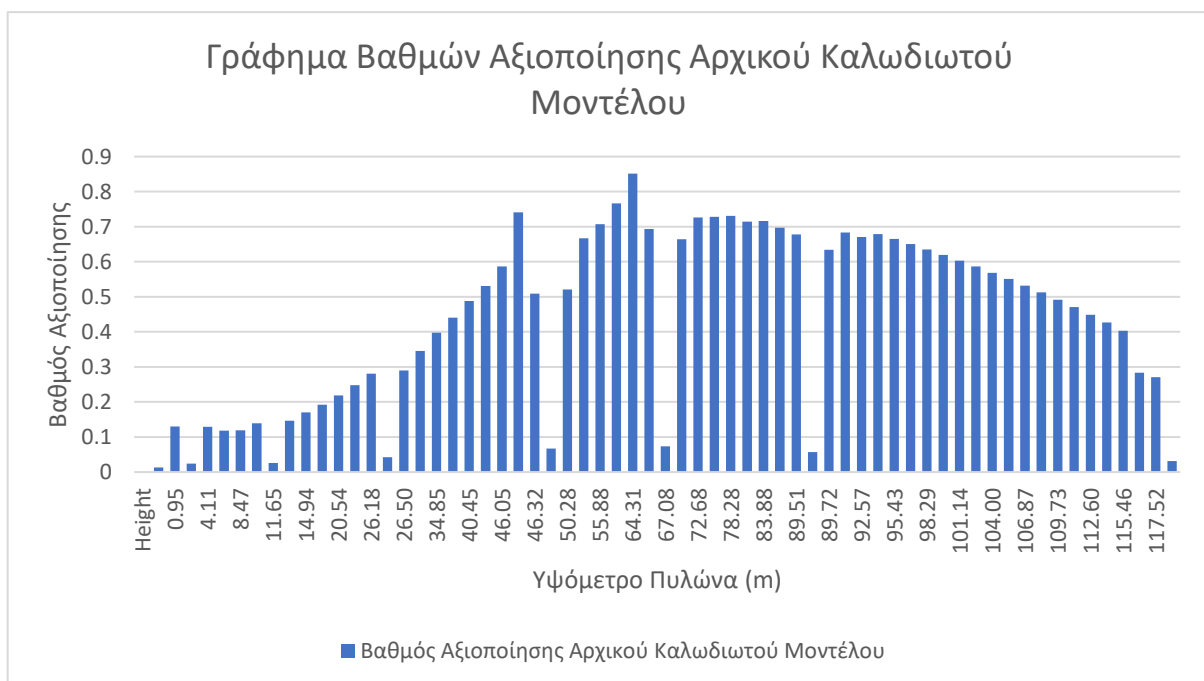
Οι διατομές που επελέγησαν είναι κοίλες κυλινδρικές και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους τις κατατάσσουν στην Κατηγορία 4. Το πρόγραμμα SAP2000, όπως και τα περισσότερα FEM εργαλεία που χρησιμοποιούνται για design έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν διατομές τέτοιας κατηγορίας, όπου μας ενδιαφέρει για τους βαθμούς αξιοποίησης που παράγονται ώστε να διακρίνουμε ποιες εξ αυτών είναι σε θέση να ανταποκρίνονται στους ελέγχους του EC3.

Η διαδικασία του Design αναδεικνύει έντονα την ανάγκη επανασχεδιασμού του πυλώνα μετά την εφαρμογή των καλωδίων, μιας και περιορίζει αισθητά την παραμόρφωση του. Απώτερος σκοπός είναι η

βελτιστοποίηση του πυλώνα προκειμένου να λειτουργεί εγγύτερα του ορίου διαρροής, εξοικονομώντας δομικό υλικό.

Βάσει του EC3 EN1993 1-6 Annex D, EN1993 Part 3.1 όπου διενεργούνται οι έλεγχοι μέσω του SAP2000, οι βαθμοί αξιοποίησης προκύπτουν από τον δυσμενέστερο συνδυασμό, που στην πλειάδα των μελών πρόκειται για την εξίσωση 6.44 του υπομνήματος 6.2.9.3 (2) για το συνδυαστικό έλεγχο κάμψης – θλίψης διαμορφώνεται το τοπίο για την βελτιστοποίηση. Οι αναλυτικές λύσεις ακολουθώντας την υπολογιστική μέθοδο του EC3 συμφωνεί με τη διαδικασία του SAP2000, με το πρόγραμμα να είναι ελαφρώς συντηρητικότερο, προς την ασφαλή πλευρά.

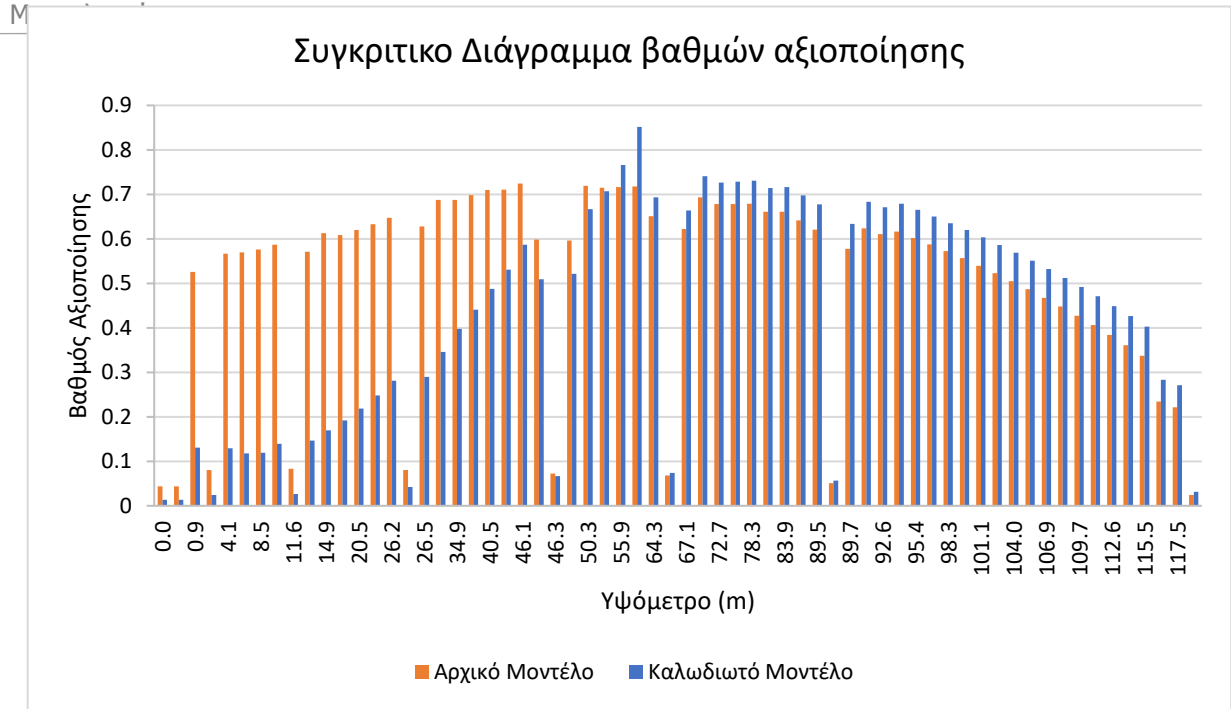
Οι βαθμοί αξιοποίησης που διαμορφώνονται για τον καλωδιωτό πυλώνα παρατίθενται στην Εικ. 2-17,



Εικόνα 2-17: Διάγραμμα βαθμών αξιοποίησης, Αρχικός Καλωδιωτός Πυλώνας

Διακεκριμένα σημεία αναφοράς αποτελούν ο κόμβος πρόσδεσης με βαθμό αξιοποίησης  $0.852 < 1$ , όπως και η κορυφή με το αναμενόμενο αποτέλεσμα  $0.03 < 1$ . Τα χαρακτηριστικά διαχωριστικά σημεία, οι πολύ μικροί βαθμοί αξιοποίησης είναι τα δαχτυλιδία (φλάντζες) όπου η καταπόνηση δεν αναπτύσσει αντίστοιχα μεγάλες τιμές λόγω πολύ μικρού μήκους.

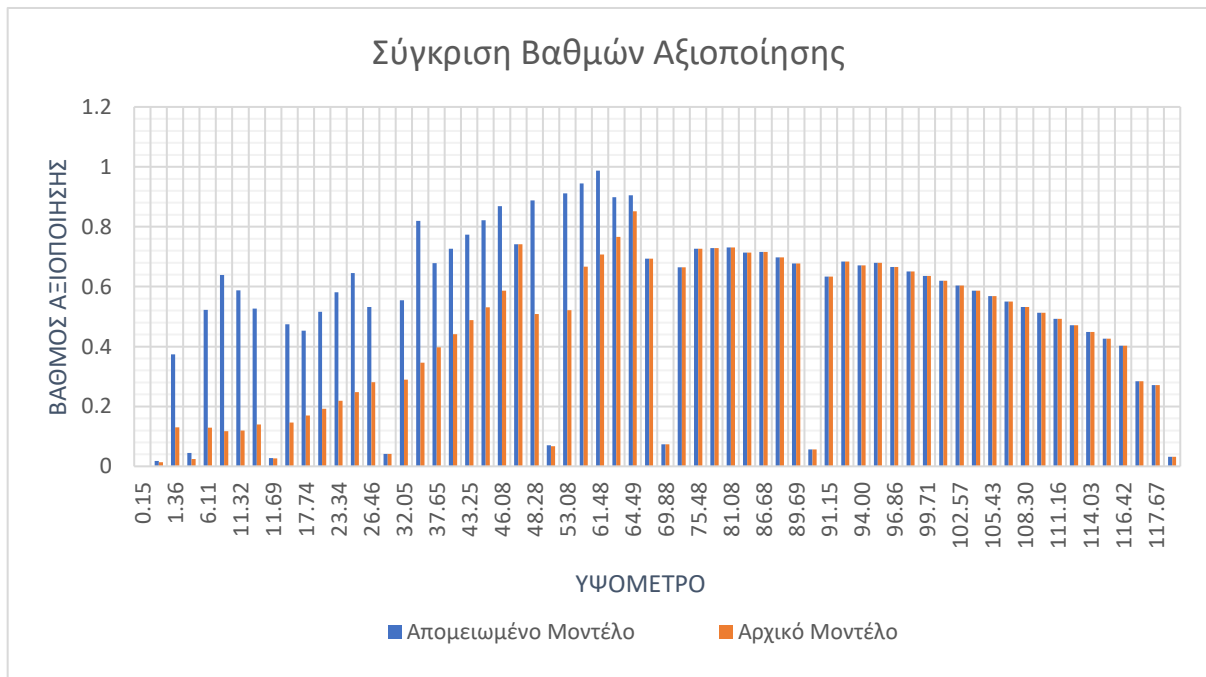
Σκοπός του πυλώνα είναι η βέλτιστη λειτουργία του, η οποία στα πλαίσια της ασφάλειας προκύπτει ο επανασχεδιασμός του κάτωθεν της πρόσδεσης μέρος του πυλώνα ώστε να λειτουργεί εγγύτερα του ορίου. Ταυτόχρονα όπως φαίνεται παρακάτω, ο καλωδιωτός φορέας «ανακουφίζει» αρκετά τον πυλώνα σε σχέση με την αρχική ελεύθερη μορφή του Εικ.2-18 ,



Εικόνα 2-18 : Διάγραμμα βαθμών αξιοποίησης, Αρχικός και Καλωδιωτός Πυλώνας

Οι μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται είναι στο κάτω της πρόσδεσης μέρος του πυλώνα κατά τα 62m ως και την πρόσδεση. Το άνωθεν τμήμα έχει αρκετά παρεμφερή αποτελέσματα όπου και διατηρούνται ως έχουν.

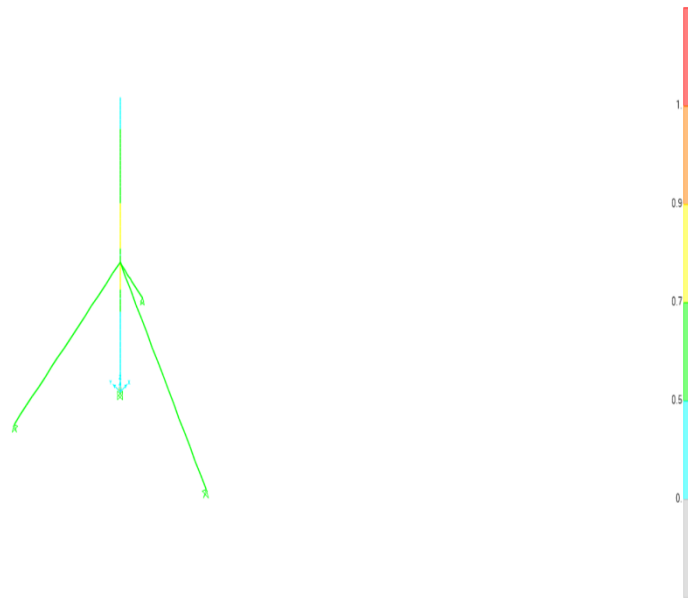
Η έμφαση δίνεται στον επανασχεδιασμό με απώτερο σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία, όπου το βάρος του πυλώνα μειώνεται δραστικά με τους βαθμούς αξιοποίησης να αυξάνονται, Εικ. 2-19



Εικόνα 2-19 : Διάγραμμα βαθμών αξιοποίησης, Αρχικού και Απομειωμένου Πυλώνα

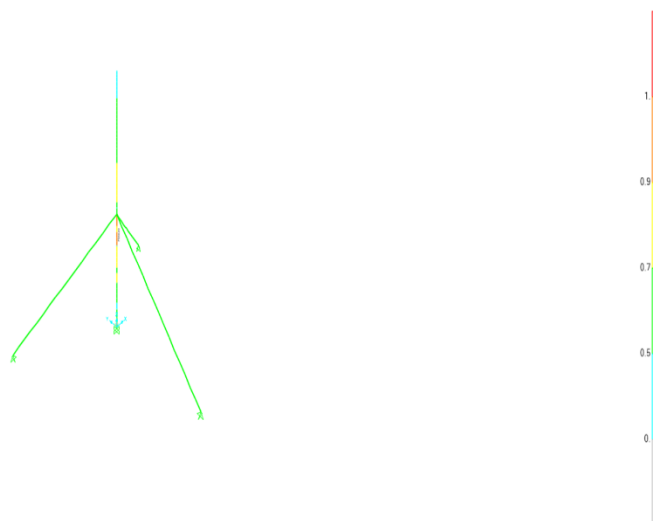
Ενώ η χρωματική αναπαράσταση των βαθμών αξιοποίησης εποπτικά φαίνεται παρακάτω, Εικ. 2-20

Αρχικό Μοντέλο, τέσσερα μέλη με βαθμούς αξιοποίησης κοντά στο  $0.65 < 1$ , δηλαδή στο φάσμα του κίτρινου χρώματος.



*Εικόνα 2-20: Χρωματική διαβάθμιση βαθμών αξιοποίησης, Αρχικός Πυλώνας*

Ενώ στο τελικό μοντέλο παρατηρούνται κάτωθεν της πρόσδεσης μέλη με βαθμούς αξιοποίησης κοντά στο  $0.95 < 1$ , Εικ. 2-21



*Εικόνα 2-21: Χρωματική διαβάθμιση βαθμών αξιοποίησης, Απομειωμένος Πυλώνας*



Μετά τη βελτιστοποίηση προκύπτει και η διαφορά βάρους του πυλώνα, με σταθερή την διατομή του καλωδίου στα 0.14m και σταθερή προένταση στα 4500kN, όπως φαίνεται στον πίνακα Πίν. 2-2 και Πίν. 2-3, η διαφορά του βάρους από τους 390.55 tons στους 261.18 tons διαφορά της τάξης των 129.37 tons, διαφορά της του 49.5% όπου αποτελεί αξιοσημείωτο αριθμό ισοδυναμώντας σχεδόν με το μισό του βάρους του προϋπάρχοντος πυλώνα.

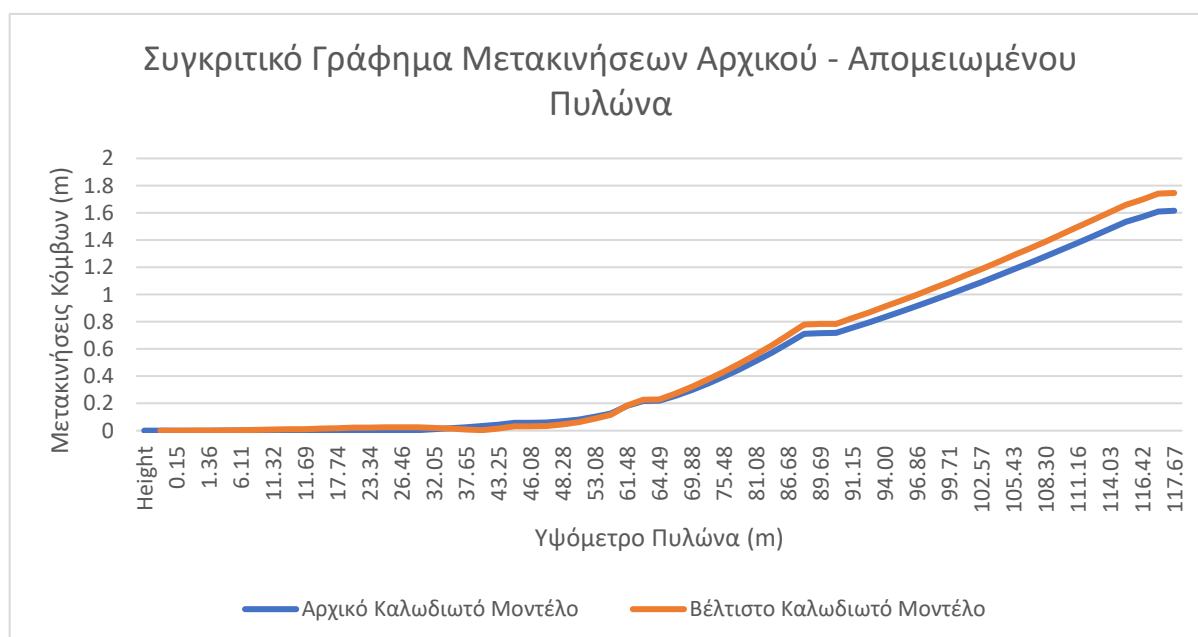
Πίνακας 2-1: Βάρος και υλικό των δομικών μελών, Αρχικός Πυλώνας

Δομικό Μέλος	Υλικό	Συνολικό Βάρος (tons)
Frame	S355	390.55
Cable	Steel Wire Rope	23.4

Πίνακας 2-2: Βάρος και υλικό των δομικών μελών, Απομειωμένος Πυλώνας

Δομικό Μέλος	Υλικό	Συνολικό Βάρος (tons)
Frame	S355	261.18
Cable	Steel Wire Rope	23.4

Επιπροσθέτως οι μετακινήσεις κορυφής και κόμβων μετά την απομείωση παρουσιάζουν διαφορές, τέτοιες ώστε να δικαιολογούν την λογική αφαίρεσης υλικού. Η βελτιστοποίηση του πυλώνα άλλωστε έγινε με βασικό γνώμονα τη λειτουργικότητα του μηχανισμού «ρότορα – πτερυγίων» που βρίσκεται στην κορυφή, με τις απομειώσεις να γίνονται μέχρι τα όρια των αποδεκτών τιμών, Εικ. 2-22



Εικόνα 2-22 : Σύγκριση μετακίνησης των Αρχικού και Απομειωμένου Πυλώνα

## 3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ

Η διερεύνηση των παραμετρικών λύσεων αποτελεί καταλυτικό κομμάτι στην αναζήτηση του βέλτιστου σχεδιασμού και της γεωμετρίας της κατασκευής καθώς και στην ανάπτυξη μια σκωπτικής ματιάς επι της συμπεριφοράς του δομικού συνόλου.

Οι παραμετρικές λύσεις χωρίστηκαν σε 4 βασικές κατηγορίες, με τον μεταβαλλόμενο όρο να είναι η γωνία πρόσδεσης, το ύψος πρόσδεσης, η διατομή των καλωδίων και η δύναμη προέντασης. Το φάσμα μεταβολής σε κάθε περίπτωση προσδιορίζεται βάσει των αισθητών αλλαγών που αποσκοπείται να παρατηρηθούν για ευρύτερο ορίζοντα αποτελεσμάτων, ώστε να έχουμε ουσιαστικές αλλαγές στις διατομές προς βελτιστοποίηση αλλά και τον εντοπισμό των ορίων της παρόμοιας συμπεριφοράς των μοντέλων.

### 3.1 Γωνία πρόσδεσης καλωδίων στον πυλώνα

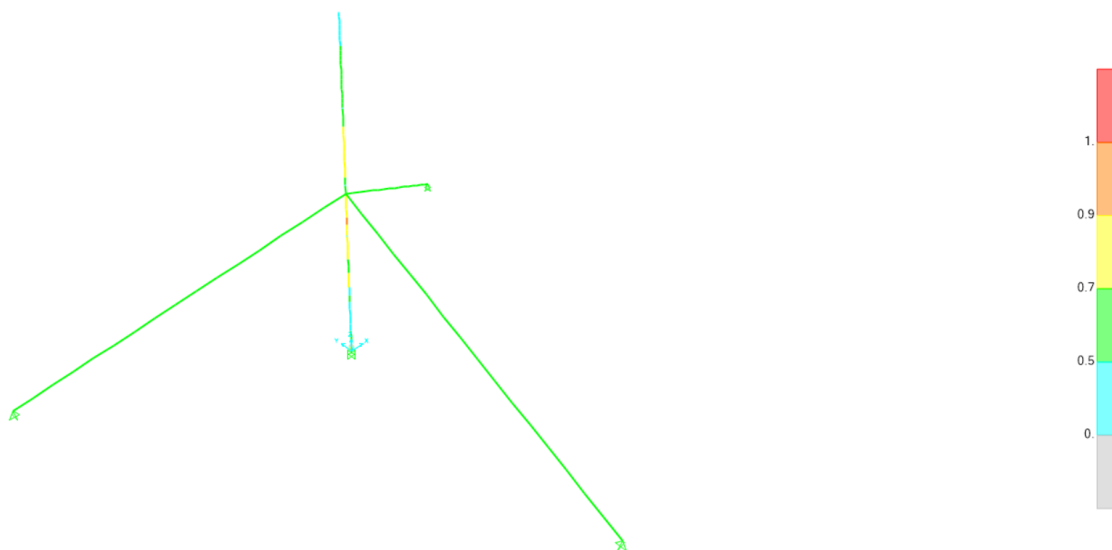
Πρόκειται για την πρώτη προς διερεύνηση παραμετρική λύση. Το βασικό μοντέλο σχεδιασμού του καλωδιωτού πυλώνα έχει ως γωνία πρόσδεσης τις 45°. Με βάση αυτό κινούμαστε προς τις δυο κατευθύνσεις ορίζοντας ένα εύρος από τις 20° έως τις 50° με σταθερό βηματισμό ανά δέκα μοίρες.

#### 3.1.1 Βαθμοί Αξιοποίησης

Το μοντέλο των 20° συνοδεύει το κατώτερο σημείο του μεταβαλλόμενου μεγέθους με τη χρωματική απεικόνιση των βαθμών αξιοποίησης να υποδηλώνουν αστοχία σε πολλαπλά μέλη (κόκκινο χρώμα). Αντίστοιχα, το ευμενέστερο στάδιο των παραμετρικών, δηλαδή το μοντέλο με γωνία πρόσδεσης τις 60 μοίρες φαίνεται αισθητά διαφορετικό, ακόμα και από την πρώτη επαφή που είναι η χρωματική διάκλαση όπως φαίνονται στα Εικ. 3-1 και Εικ. 3-2.



Εικόνα 3-1: Καλωδιωτός Πυλώνας Ανεμογεννήτριας με γωνία πρόσδεσης 20ο



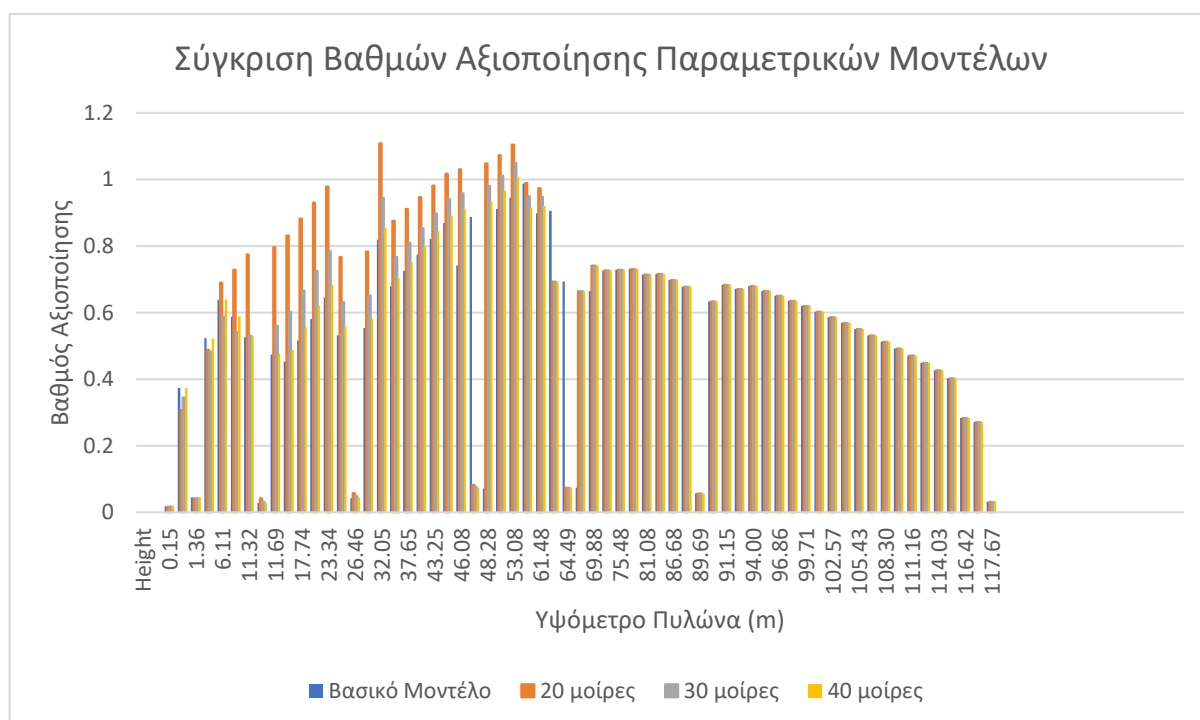
Εικόνα 3-2 : Καλωδιωτός Πυλώνας Ανεμογεννήτριας με γωνία πρόσδεσης 60ο

Όπως και στις υπόλοιπες παραμετρικές λύσεις, η αστοχία μελών συναντάται πάντα στην περιοχή κάτωθεν της πρόσδεσης, με τα μέλη να αστοχούν στο συνδυαστικό έλεγχο θλίψης-κάμψης. Με την αλλαγή της γεωμετρίας οι βαθμοί αξιοποίησης αλλάζουν δραστικά σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο σχεδιασμού.

### 3.1.1.1 Παραμετρικά Μοντέλα έως 45°

Η μεταβολή των βαθμών αξιοποίησης αναμένεται να είναι αυξητική καθώς με την πορεία από το κατώτερο παραμετρικό άκρο των 20° έως και το ανώτερο των 60°. Για λόγους ευανάγνωστων διαγραμμάτων αλλά και ταυτόχρονα για να δοθεί έμφαση στην βέλτιστη γωνία πρόσδεσης, χρησιμοποιείται το βασικό μοντέλο των 45° ως η διαχωριστική γραμμή στα συγκρίσιμα δεδομένα.

Οι βαθμοί αξιοποίησης κυμαίνονται όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα Εικ. 3-3,



Εικόνα 3-3 : Βαθμοί αξιοποίησης για μοντέλα έως 45ο

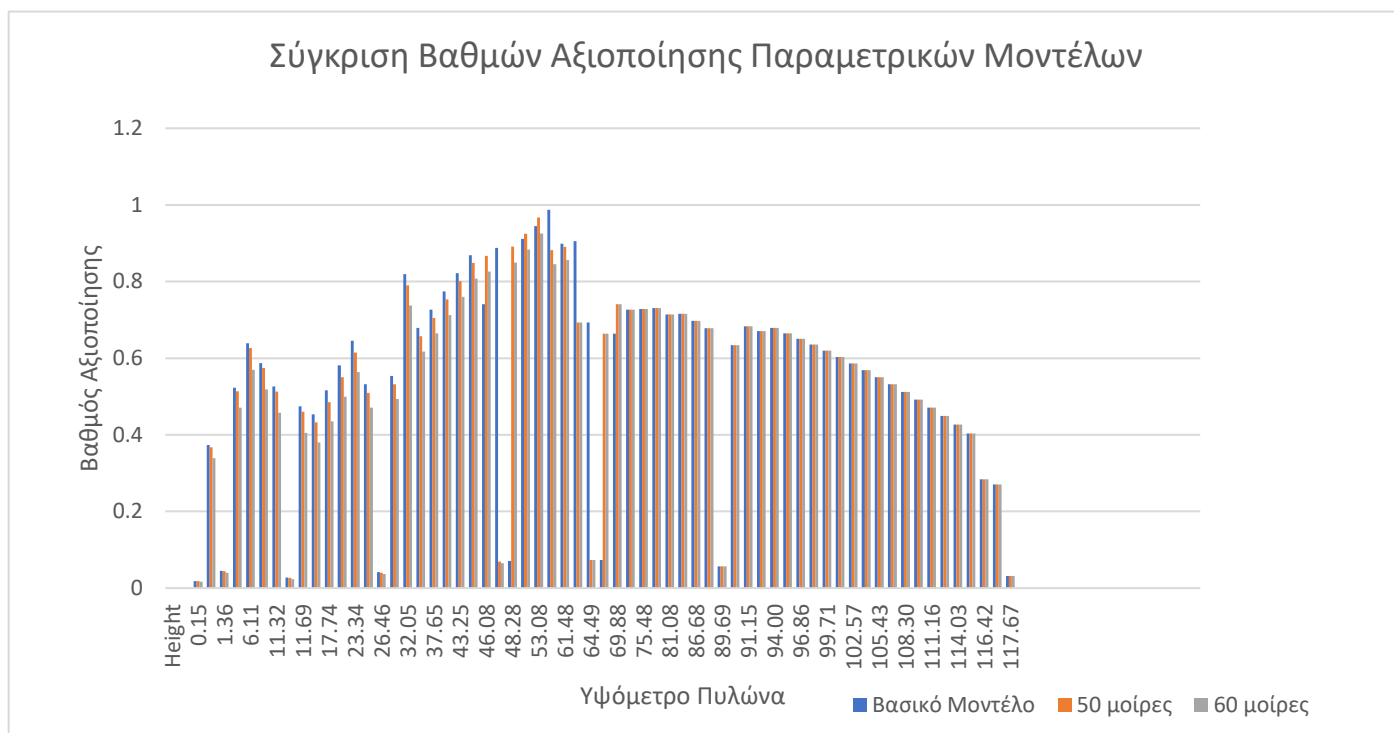
Διακρίνεται εμφανώς η καθοδική τάση των βαθμών αξιοποίησης καθώς αυξάνουμε τη γωνία πρόσδεσης. Η μεταβολή της γωνίας πρόσδεσης μεταβάλλει κατά προέκταση και το ημίτονο της συνιστώσας με αποτέλεσμα να μειώνεται δραστικά και η μεταφορική αντίσταση που υπάρχει από την πρόσδεση.

Αναμένεται λοιπόν ότι οι μετατοπίσεις του μοντέλου από τις ασκούμενες στην κορυφή δυνάμεις θα είναι και μεγαλύτερες. Το μοντέλο των 40° δίνει εξαιρετικά όμοια αποτελέσματα σε σχέση με το βασικό.

Επιπλέον, γίνεται αντιληπτή η ταύτιση των αποτελεσμάτων από το σημείο πρόσδεσης και μετά, στο ύψος των 61.48m από όπου είναι σαν να μετακινείται ανεξάρτητος φορέας καθότι δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της γωνίας. Πρόκειται για επιβεβαίωση της λειτουργία του καλωδιωτού φορέα με το σημείο πρόσδεσης των καλωδίων να λειτουργεί σαν πάκτωση.

### 3.1.1.2 Παραμετρικά Μοντέλα 45° έως 60°

Οι μεταβολές σε περιοχές άνω των 45° λειτουργούν ευεργετικά μέχρι και την περιοχή των 60°. Όπως δείχνουν οι βαθμοί αξιοποίησης που πέφτουν σημαντικά, Εικ. 3-4.



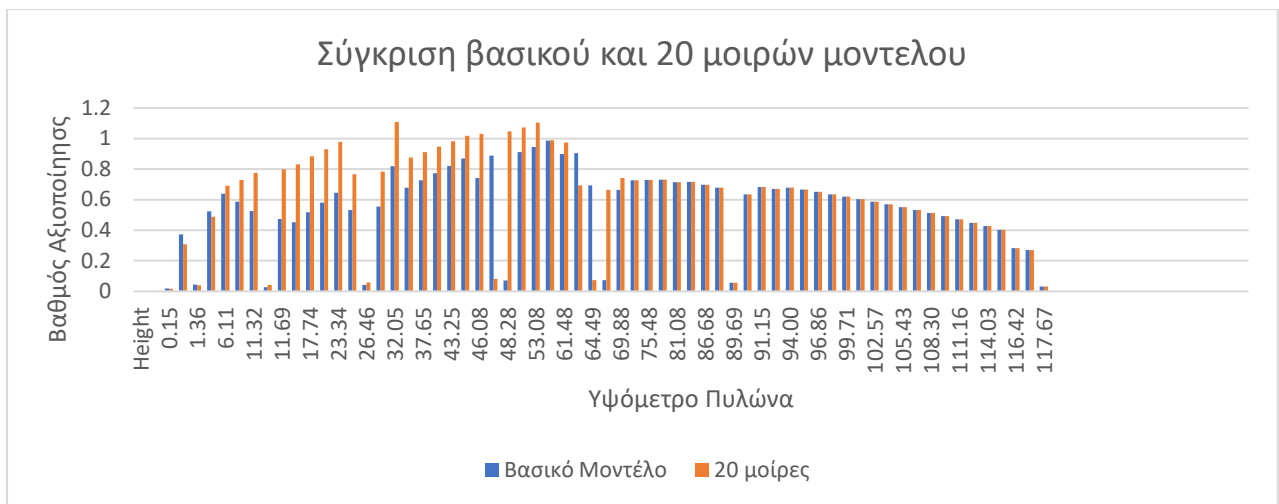
Εικόνα 3-4 : Βαθμοί αξιοποίησης για μοντέλα από 45ο έως 60ο

Κατά το αναμενόμενο, σε οποιοδήποτε σημείο κάτωθεν του σημείου πρόσδεσης, όταν η γωνία βρίσκεται στις 60° έχουμε τους μικρότερους βαθμούς αξιοποίησης.

### 3.1.1.3 Παραμετρικά άκρα

Για μεγαλύτερη εποπτεία, λόγω της πληθώρας των μοντέλων, γίνεται μια αναφορά στα δύο ακραία παραμετρικά εν συγκρίσει με το βασικό, παρατηρώντας έτσι τις μεγάλες διαφορές που προκύπτουν.

Παρακάτω φαίνεται η διαρροή 5 μελών του πυλώνα με 20° γωνία πρόσδεσης με τις μεγάλες διαφορές να φαίνονται στο μέσο ου κάτω τμήματος, Εικ. 3-5.



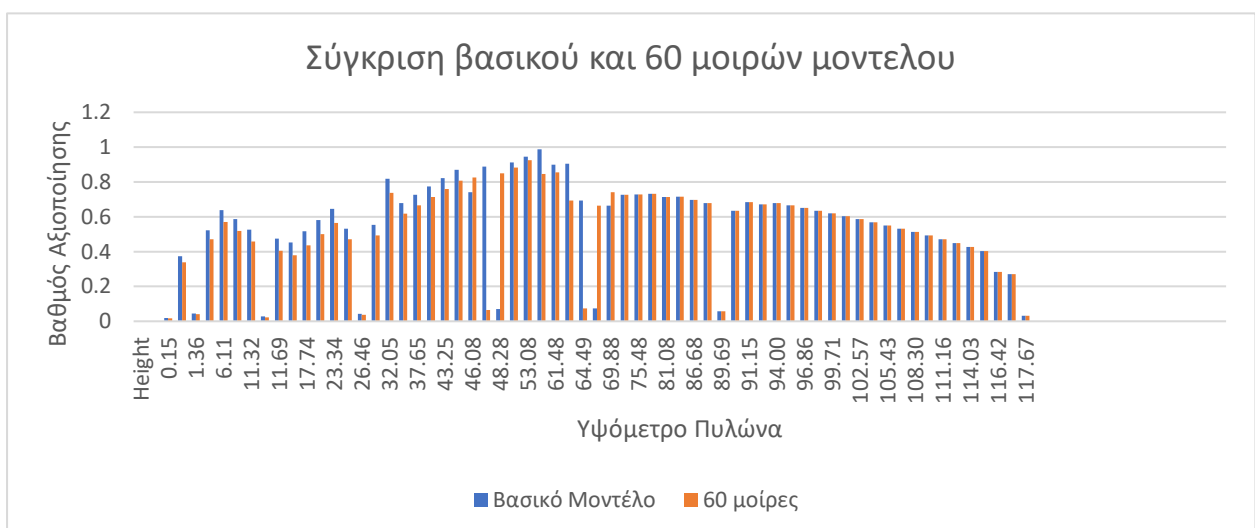
*Εικόνα 3-5: Βαθμοί αξιοποίησης για μοντέλα 20ο και 45ο*

Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, οι διαφορές του βασικού μοντέλου με αυτού της γωνίας πρόσδεσης των 60° Εικ. 3-6 είναι αρκετά μικρότερες δίνοντας ισχυρή ένδειξη πως οι συγκεκριμένες περιοχές μεταβολής παρά τις αλλαγές της τάξης του 30% δεν έχουν τον ίδιο αντίκτυπο.

Ενδεικτικά παρατίθενται οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης για τα προαναφερθέντα μοντέλα

*Πίνακας 3-1 : Βαθμοί αξιοποίησης ανά γωνία πρόσδεσης*

Υψόμετρο	45°	20°	60°
32.05 m	0.819143	<b>1.108104</b>	0.737118
53.08 m	0.944872	1.104509	<b>0.925675</b>
55.88 m	<b>0.987177</b>	0.98914	0.84537

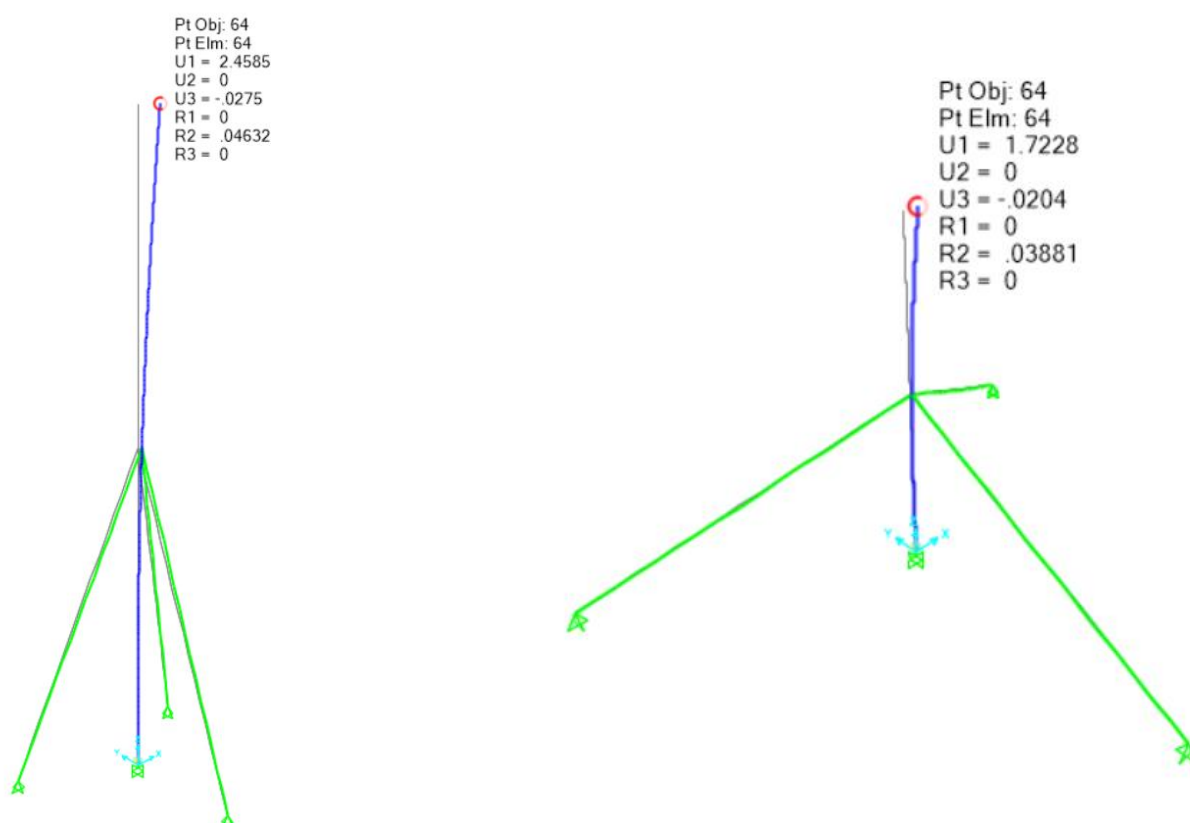


*Εικόνα 3-6 : Βαθμοί αξιοποίησης για μοντέλα 60ο και 45ο*

### 3.1.2 Μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις των κόμβων, όπως αυτοί προσδιορίστηκαν και σχεδιάστηκαν από το πρόγραμμα, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της διερεύνησης της δοθείσας υπόθεσης. Ειδικά οι μετακινήσεις κορυφής ελέγχονται ενδελεχώς, κυρίως γιατί αποτελεί το σημείο που φέρει τον μηχανισμό της ανεμογεννήτριας.

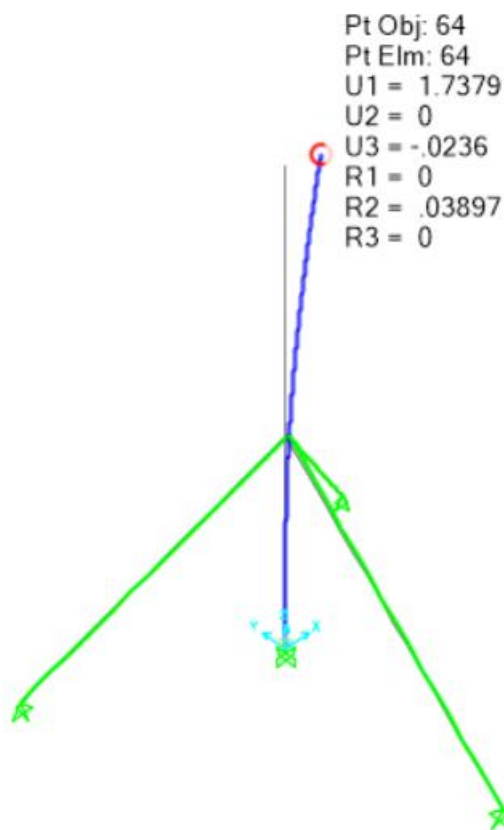
Στα δύο άκρα του παραμετρικού φάσματος παρατηρούνται οι μετακινήσεις όπως διακρίνονται ως ποσότητα U1, σε μέτρα, Εικ. 3-7,



Εικόνα 3-7: Μετακίνηση κορυφής για τις περιπτώσεις των 20ο και 60ο αντίστοιχα.

Πέραν των ασήμαντων στροφικών και κατακόρυφων μετακινήσεων, στην κορυφή του πυλώνα, ανάλογα με την εκάστοτε γωνία βλέπουμε και διαφορετικές μετατοπίσεις. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει, όπως ακριβώς και στους βαθμούς αξιοποίησης το γεγονός πως οι διαφορές είναι πολύ μικρότερες στις περιοχές άνωθεν των 45° με το βασικό μοντέλο, σε σύγκριση με την αντίθετη διαδρομή.

Η μετακίνηση των 2.459m της κορυφής του πυλώνα με τη μικρότερη γωνία είναι μεγαλύτερη κατά 0.72 m, ενώ η μεγαλύτερη γωνία δίνει μετακίνηση 1.723 m που είναι μικρότερη μόλις κατά 0.014 m. Πρακτικά για το μέγεθος του πυλώνα και μεγέθη που πραγματευόμαστε, η διαφορά αυτή είναι πρακτικά μηδενική.



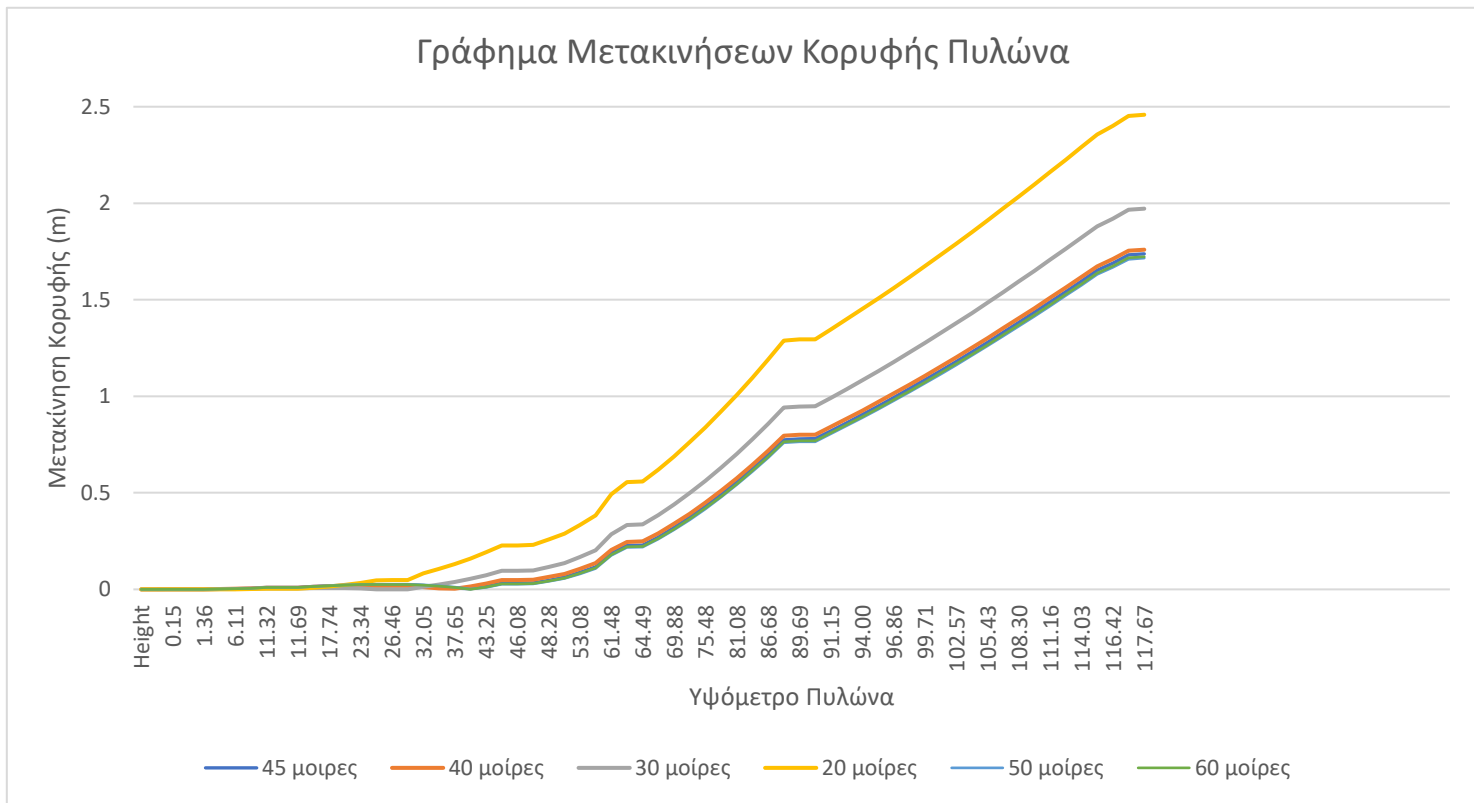
Εικόνα 3-8: Μετακίνηση κορυφής για 45ο

Συγκρίνοντας όλες τις περιπτώσεις των παραμετρικών μοντέλων, πέραν της μετακίνησης κορυφής διαφαίνεται και μια ομοιογένεια αναφορικά με την αλληλουχία των μετατοπίσεων ανά κόμβο. Παρόλο που η αλλαγή μιας παραμέτρου δύναται να προκαλέσει αστάθεια, στην παρούσα προσομοίωση επετεύχθη μια ατύπως γραμμική συμπεριφορά, όπως φαίνεται στο Εικ. 3-9.

Πίνακας 3-2 : Μετακίνηση κορυφής συναρτήσει των παραμετρικών

Γωνία πρόσδεσης	20°	30°	40°	45°	50°	60°
Μετακίνηση κορυφής	2.458 m	1.972 m	1.76 m	1.738 m	1.715 m	1.722 m



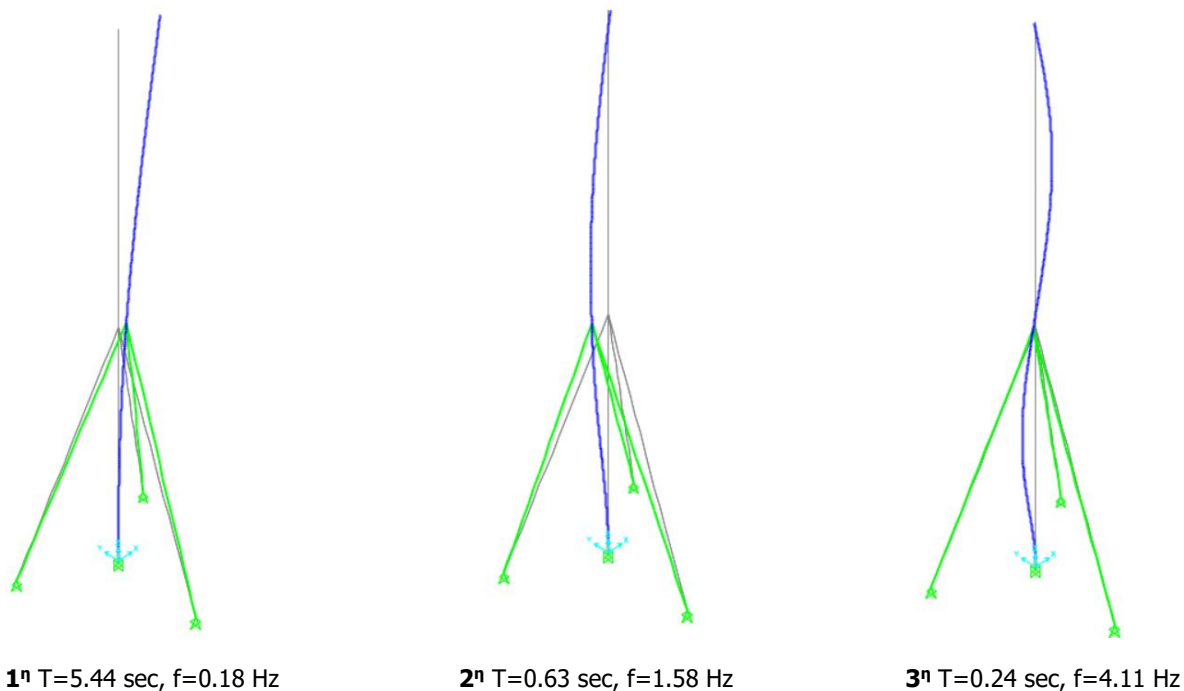


Εικόνα 3-9 : Μετακινήσεις Κορυφής Πυλώνων

Η μετατόπιση κορυφής έχει αισθητά μεγαλύτερη διαφορά στις μικρές γωνίες των 20° και 30° ενώ είναι πρακτικά ίδιες στις περιοχές 45°-60°. Μετά το πέρας των 62 μέτρων ύψους, σημείο πρόσδεσης του πυλώνα, φαίνεται μια συγγενής συμπεριφορά μεταβολής των πυλώνων.

### 3.1.3 Ιδιομορφές - Ιδιοσυχνότητες

Με την ιδιομορφική ανάλυση, μέσω του load case MODAL, μας έδωσε τις εξής 3 πρώτες ιδιομορφές, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



Εικόνα 3-10: Οι πρώτες 3 ιδιομορφές του μοντέλου των 20σ

Οι ιδιοσυχνότητες για τις 12 πρώτες ιδιομορφές όπως φαίνονται στον πίνακα :

Πίνακας 3-3 : Ιδιοσυχνότητες συναρτήσει των παραμετρικών

Ιδιομορφές	Ιδιοσυχνότητες rad/sec				
	20°	30°	40°	50°	60°
1	1.154	1.306	1.384	1.416	1.415
2	9.935	11.419	12.592	13.175	12.989
3	25.858	25.875	25.890	25.895	25.884
4	30.185	30.033	29.856	29.681	29.527
5	51.672	51.799	51.846	51.706	51.250
6	86.847	86.847	86.846	86.846	86.844
7	121.825	121.144	120.236	119.067	117.444
8	125.964	125.830	125.552	125.025	124.075

9	169.739	169.729	169.710	169.677	169.621
10	213.957	213.701	213.258	212.521	211.284
11	269.702	269.611	269.421	269.113	268.606
12	269.724	269.637	269.537	269.384	269.129

Αντίστοιχα οι ιδιοπερίοδοι,

Πίνακας 3-4 : Ιδιοπερίοδοι συναρτήσει των παραμετρικών

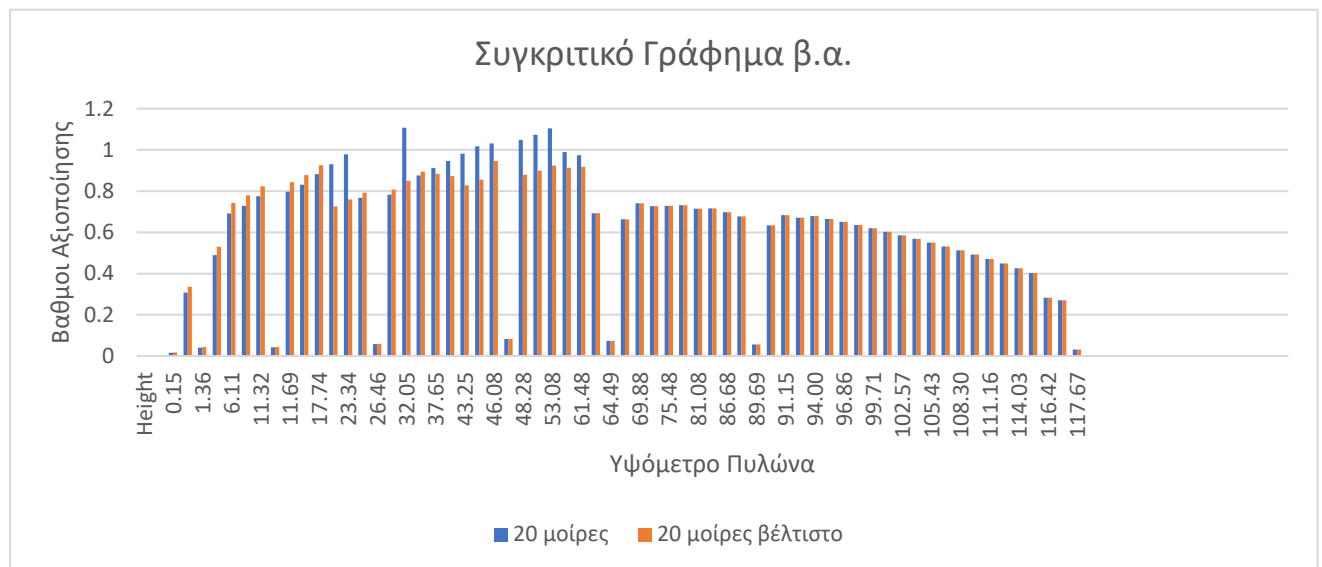
Ιδιομορφές	Ιδιοπερίοδοι (sec)					
	45°	20°	30°	40°	50°	60°
1	4.470	5.444	4.809	4.540	4.436	4.441
2	0.484	0.632	0.550	0.499	0.477	0.484
3	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243	0.243
4	0.211	0.208	0.209	0.210	0.212	0.213
5	0.121	0.122	0.121	0.121	0.122	0.123
6	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072
7	0.053	0.052	0.052	0.052	0.053	0.053
8	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.051
9	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037	0.037
10	0.030	0.029	0.029	0.029	0.030	0.030
11	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
12	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023

### 3.1.4 Βελτιστοποίηση Παραμετρικών Μοντέλων

Εν συνεχεία της δημιουργίας των παραμετρικών μοντέλων, βελτιστοποιούμε για την εκάστοτε περίπτωση, έτσι ώστε πέραν της στατικής επάρκειας να διερευνηθεί και η διαφοροποίηση της δομικής ύλης στα πλαίσια οικονομικότερου σχεδιασμού.

Το σημείο πρόσδεσης, ως προσομοίωμα πάκτωσης, απομονώνει άτυπα το άνω μέλος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, με αποτέλεσμα να οδηγεί τον επανασχεδιασμό να γίνεται με ιδιαίτερη έμφαση στο κάτω της πρόσδεσης μέρος του πυλώνα.

Η περίπτωση της γωνίας πρόσδεσης των 20° κάτωθεν του σημείου πρόσδεσης, όπου διαφαίνονται αστοχίες και μέλη σε μη αποδεκτούς βαθμούς αξιοποίησης, επανασχεδιάζεται με τους βαθμούς αξιοποίησης να κινούνται σε πεδία συγγενή με αυτούς του βασικού, Εικ. 3-11.



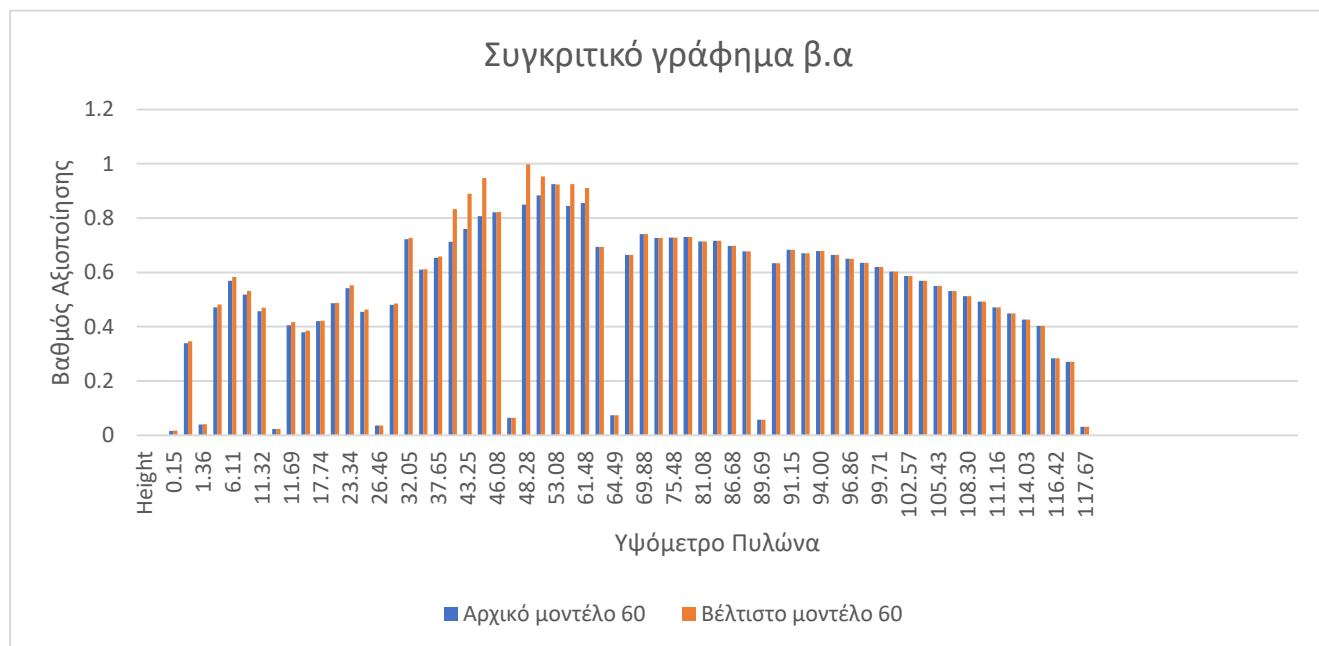
Εικόνα 3-11 : Βαθμοί Αξιοποίησης Αρχικού-Βέλτιστου Μοντέλου

Η διαφορά που διακρίνεται στους βαθμούς αξιοποίησης για τα μέλη ως και τα 26 πρώτα μετρά του πυλώνα, δείχνει υψηλότερους βαθμούς αξιοποίησης στο βέλτιστο μοντέλο σε αντιπαραβολή με αυτό που φέρει τον αρχικό πυλώνα. Ο λόγος που δεν μειώθηκαν οι συγκεκριμένες διατομές, έστω και ελαφρά λόγω της μικρής διαφοράς στους βαθμούς αξιοποίησής, είναι ο περιορισμός της μεταβολής του πάχους των μελών καθ' ύψος του πυλώνα. Στην περίπτωση μεταβολής τους, αναιρείται το δομικό αξίωμα των συνεχώς μειούμενων διατομών από τη βάση έως και την κορυφή του πυλώνα.

Από την άλλη, ο λόγος αύξησης των β.α. τους, είναι ουσιαστικά το άνοιγμα της ψαλίδας μεταξύ των μελών στις περιοχές 0-26 μέτρα και 26-62 μέτρα. Η πρώτη περιοχή πλέον λειτουργεί εγγύτερα του ορίου, αναλαμβάνοντας τα ανώτερα μέλη που είναι πλέον ασθενέστερα.

Ο βέλτιστος βασικός πυλώνας, χρειάζεται 269.5 τόνους χάλυβα για τη δημιουργία του , ενώ αυτός των 20°, χρειάζεται 282.9 τόνους. Πρόκειται για αύξηση της τάξης των 13.4 τόνων χάλυβα, ήτοι 4.97% .

Αντίστοιχα, η βελτιστοποίηση στις 60° δίνει τους παρακάτω β.α. Εικ. 3-12 :



Εικόνα 3-12 : Βαθμοί Αξιοποίησης Αρχικού-Βέλτιστου Μοντέλου

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον οι μεγαλύτερες γωνίες λειτουργούν ευμενώς, είχαμε βελτιστοποίηση της κατασκευής με μείωση των διατομών.

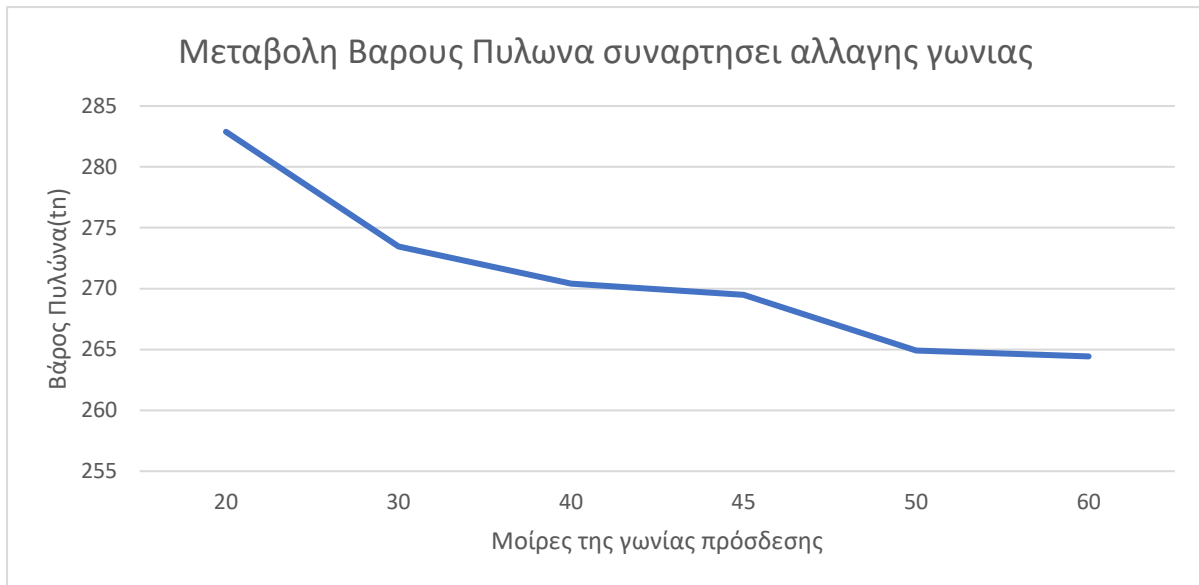
Ο αρχικός πυλώνας βάρους 269.5 τόνων, επανασχεδιάστηκε καταλήγοντας σε συνολικό βάρος 264.4 τόνων. Πρόκειται για μεταβολή της τάξης των 5.1 τόνων υλικού, δηλαδή 1.89% μείωση.

Σαφώς η διαφορά είναι μικρότερη σε σχέση με το συγκριτικό που εμπεριέχει τη μικρότερη γωνία, ένδειξη πως η αύξηση της γωνίας πρόσδεσης μετά τις 45° γωνία έχει μικρό αντίκτυπο.

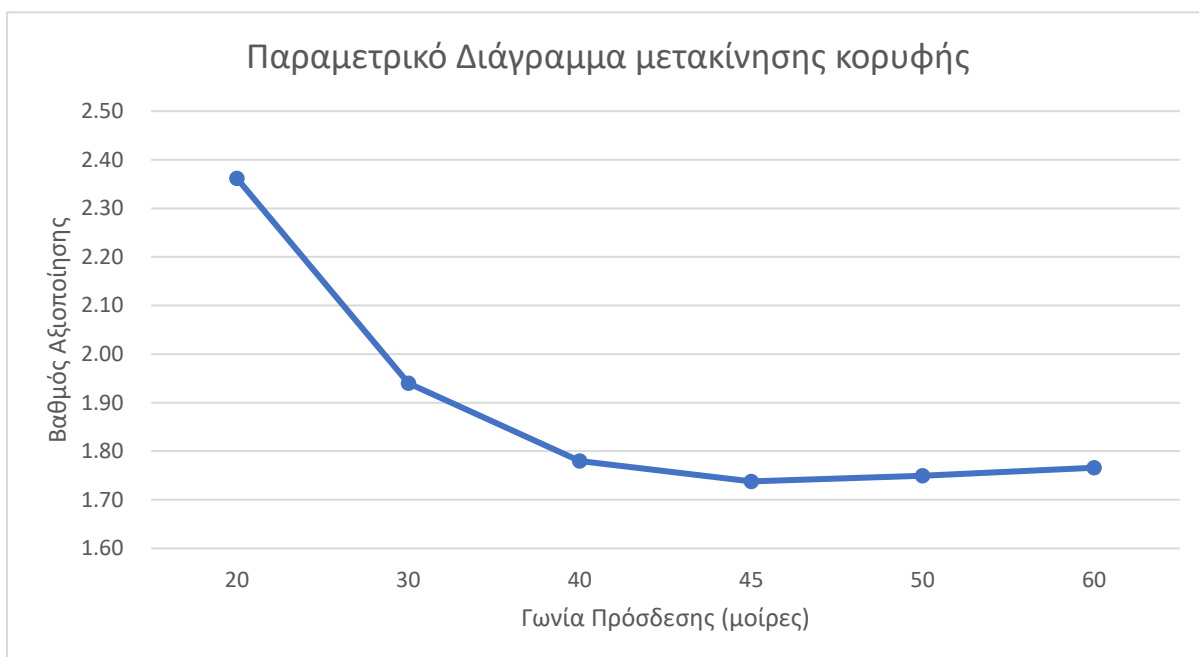
### 3.1.4.1 Παραμετρικά Διαγράμματα

Από τις βελτιστοποιήσεις όλων των μοντέλων, προέκυψαν συγκριτικά γραφήματα που δείχνουν την γενική τάση της κατασκευής να δέχεται είτε αυξήσεις είτε μειώσεις βάρους ανάλογα με τη γωνία.

Η μεταβολή του βάρους, όπως και της μετακίνησης της κορυφής παρουσιάζεται στα παρακάτω παραμετρικά διαγράμματα, Εικ. 3-13 και Εικ. 3-14 και τους αντίστοιχους πίνακες Πίν. 3-5 και Πίν. 3-6.



*Εικόνα 3-13 : Μεταβολή Βάρους πυλώνα συναρτήσεως γωνίας πρόσδεσης*



*Εικόνα 3-14 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφή*

Πίνακας 3-5 : Μεταβολή βάρους πυλώνα

Γωνία Πρόσδεσης	Βάρος πυλώνα (tons)
20°	282.8825
30°	273.4549
40°	271.412
45°	269.4798
50°	264.9047
60°	263.4283

Η μετακίνηση κορυφής, όπως διακρίνεται και στα δεδομένα του παρακάτω πίνακα 3-6, αποκαλύπτουν την τάση της μετακίνησης κορυφής να αυξάνει και πάλι στα μοντέλα των 50° και 60°.

Πίνακας 3-6 : Μεταβολή μετακίνησης κορυφής

Γωνία πρόσδεσης	Μετακίνηση κορυφής
20°	2.362 m
30°	1.94 m
40°	1.760 m
45°	1.74 m
50°	1.749 m
60°	1.766 m

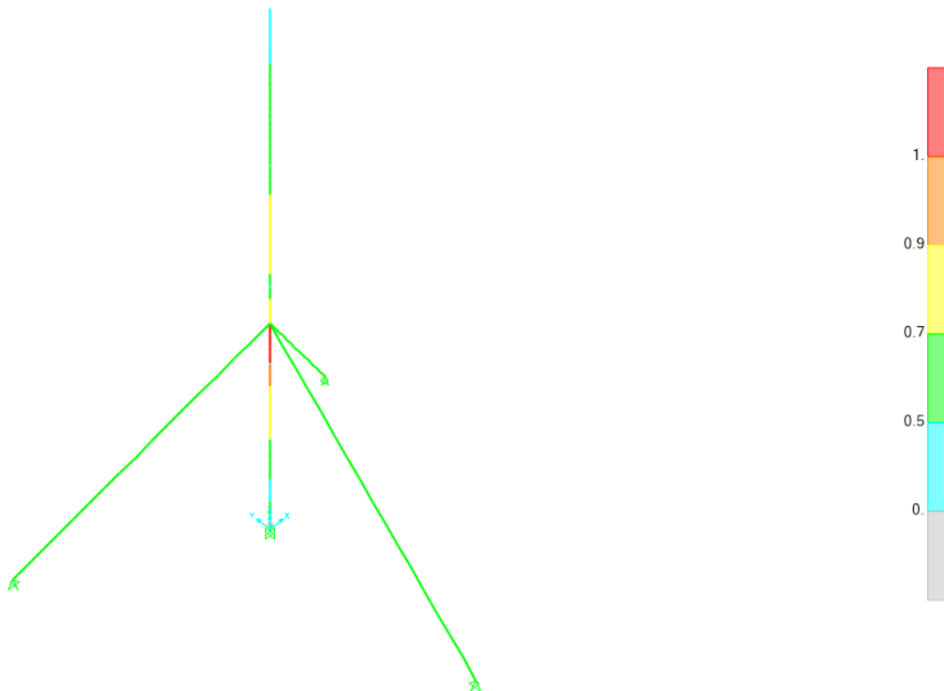
## 3.2 Ύψος Πρόσδεσης

Η δεύτερη προς ανάλυση παράμετρος είναι το ύψος του σημείου πρόσδεσης των καλωδίων στον φορέα. Διακρίνουμε και πάλι ένας εύρος μεταβολών με αξία παρατήρησης και ουσιαστών διαφορών στα παραμετρικά, αλλά και βελτιστοποιημένα μοντέλα που παράγονται.

Το αρχικό μοντέλο έχει θέση πρόσδεσης τα 61.48 m και αποτελεί ουσιαστικά το ανώτερο σημείο που δύναται να βρίσκεται, λόγω του μήκους των πτερυγίων που θα πρέπει να λειτουργούν ανεμπόδιστα. Σαν άνω όριο λοιπόν, επιλέχθηκαν τα 61.48 m, ο βηματισμός πτώσης της τιμής αυτής είναι τα 5 μέτρα τη φορά, οπότε σε ένα πλήθος 5 παραμετρικών μοντέλων, διαμορφώνεται ένα εύρος από 35 έως και 62 μέτρα.

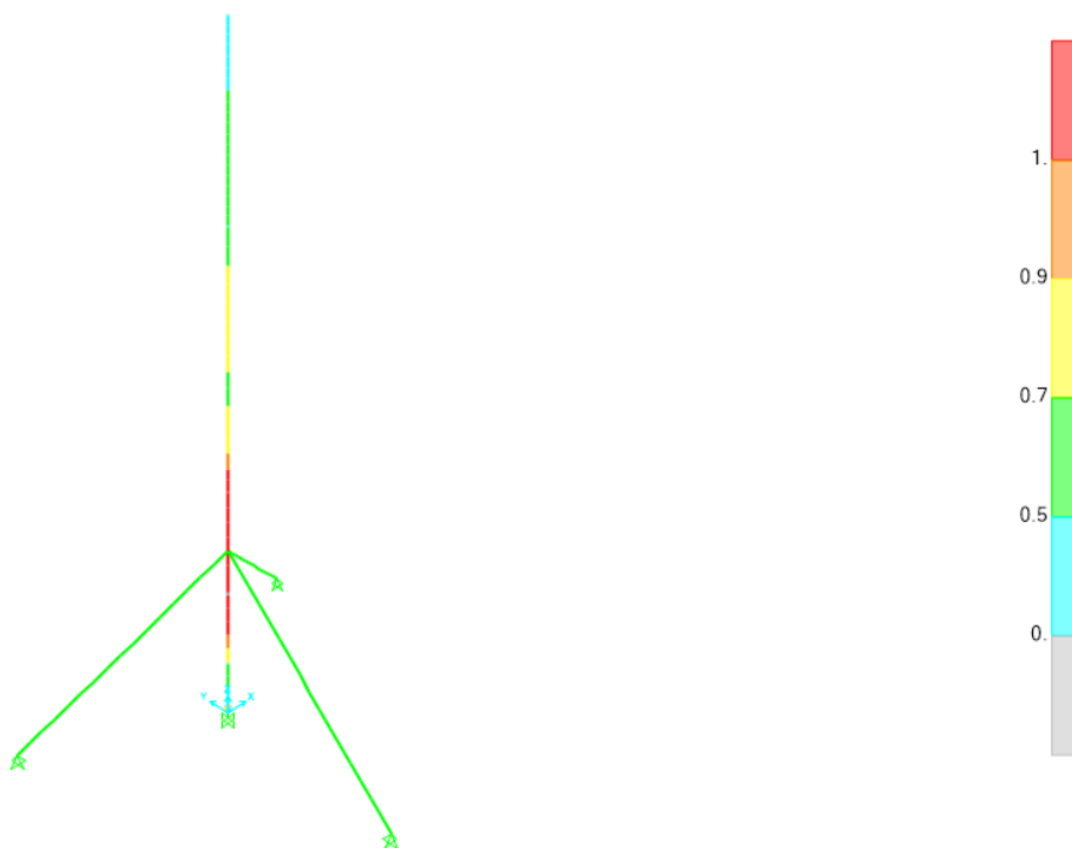
### 3.2.1 Βαθμοί Αξιοποίησης

Τα δύο άκρα όπως προαναφέρθηκε είναι η αρχική θέση στα 61.5 m , ενώ το έτερο άκρο ορίσθηκε στη θέση των 35.5 m. Λόγω της σταθερά πτωτικής πορείας της θέσης πρόσδεσης, αναμένεται να βλέπουμε συμπεριφορές είτε γνησίως αύξουσες, είτε γνησίως φθίνουσες. Σε κάθε περίπτωση, η κάθοδος της θέσης πρόσδεσης των καλωδίων, φέρει ένα όλο και μεγαλύτερο τμήμα να αστοχεί άνωθεν αυτής, όπως φαίνεται στα Εικ. 3-15 και Εικ. 3-16.



Εικόνα 3-15: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Θέση Πρόσδεσης 55.88 m





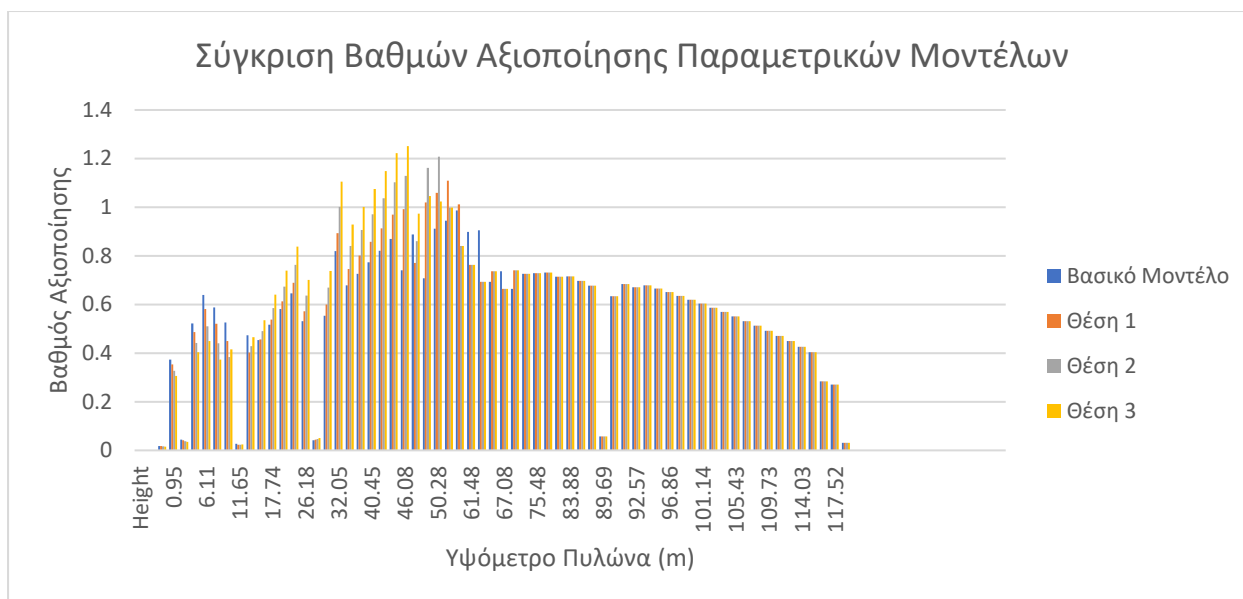
Εικόνα 3-16: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Θέση Πρόσδεσης 34.85 m

Όπως διαφαίνεται από την χρωματική αναπαράσταση των βαθμών αξιοποίησης, στις δύο ακραίες παραμετρικές λύσεις, οι αστοχίες μελών ξεκινάνε με την κατακόρυφη μετάθεση της πρόσδεσης κατά 5 m, ενώ προσεγγίζοντας το κατώτερο σημείο, αναπτύσσονται αστοχίες σε όλο και περισσότερα μέλη, φτάνοντας στην τελική κατάσταση της εικόνας 3-16.

### 3.2.1.1 Παραμετρικά μοντέλα των τριών πρώτων θέσεων

Για λόγους ευανάγνωστων διαγραμμάτων, αλλά ταυτόχρονα για περισσότερο εποπτική μάτια γίνεται ένας πρότυπος διαχωρισμός των μοντέλων βάσει της θέσης πρόσδεσης. Οι πρώτες αναφορές και συγκρίσεις γίνονται μεταξύ των τριών πρώτων θέσεων, δηλαδή της αρχικής, της Θέσης 1 και της Θέσης 2. Ως Θέση 1 ορίζεται η πρόσδεση σε υψόμετρο 55.88 m ενώ ως Θέση 2, σε υψόμετρο 50.28 m και η Θέση 3 στα 46.32m.

Οι βαθμοί αξιοποίησης των προαναφερθέντων, όπως φαίνονται στο Εικ. 3-17,



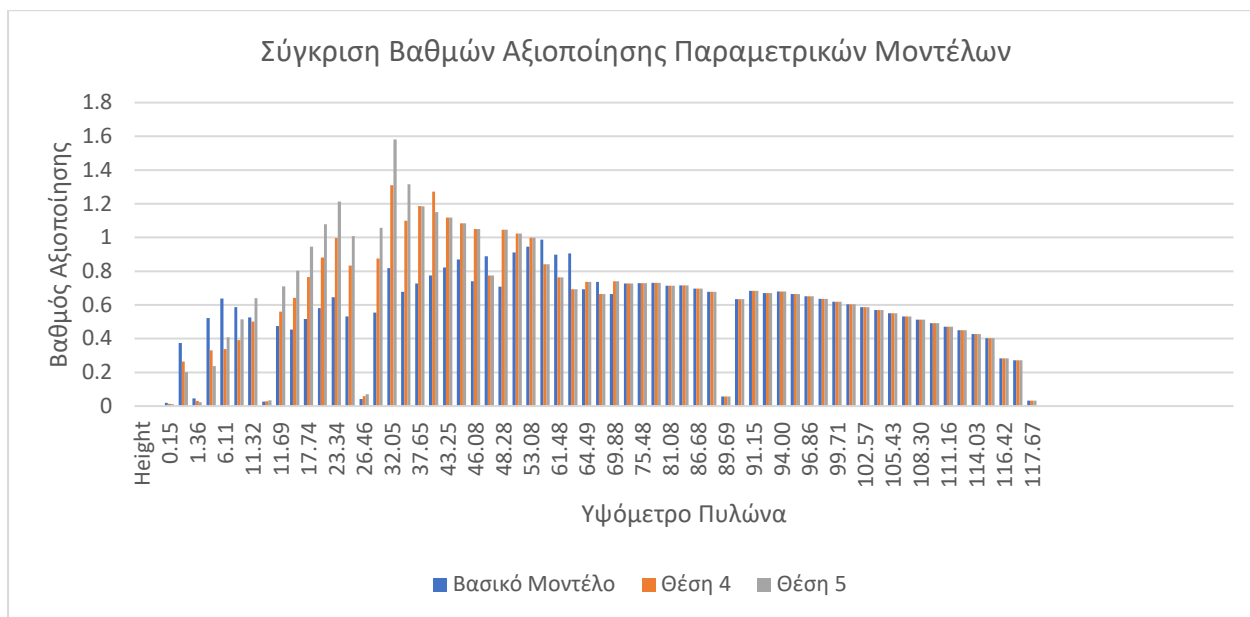
Εικόνα 3-17 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης

Οι έντονες διαφορές μεταξύ των μοντέλων καθιστούν σαφές πως η αλλαγή θέσης πρόσδεσης επιφέρει αξιοσημείωτες αλλαγές. Η θέση πρόσδεσης, λόγω των περιορισμών κίνησης που επιφέρει, αποτελεί μια υβριδική μορφή μεταξύ πάκτωσης και άρθρωσης που χωρίζει επί της ουσίας τον πυλώνα σε δύο μέρη. Άλλωστε, η ταύτιση των βαθμών αξιοποίησης από κάποιο υψόμετρο και έπειτα επιβεβαιώνει πως σε περιοχές μακριά από τις μεταβολές ο πυλώνας παραμένει ανεπηρέαστος.

### 3.2.1.2 Παραμετρικά μοντέλα των τελευταίων θέσεων

Για τα τελευταία δυο υψόμετρα της τοποθέτησης του σημείου πρόσδεσης, αυτά των Θέσεων 4 και 5, με υψόμετρα 40.45m και 34.85 m οι βαθμοί αξιοποίησης εντείνουν τη διαφορά τους σε σχέση με το αρχικό μοντέλο, με τον παραμετρικό φορέα της Θέσης 5 να αποτελεί και το μεγαλύτερο, δυσανάλογο σε σχέση με το προηγούμενο παραμετρικό μοντέλο άλμα.

Στην Εικ. 3-18, διακρίνονται το άλμα των βαθμών αξιοποίησης, καθώς και η αστοχία όλο και περισσότερων μελών εκατέρωθεν της πρόσδεσης.

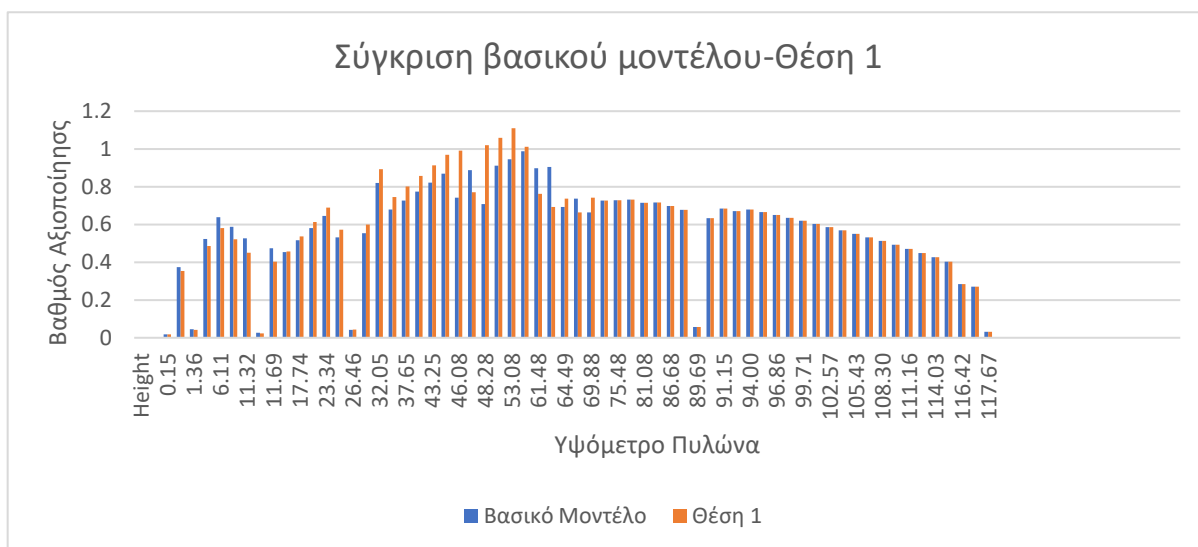


Εικόνα 3-18 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης

Οι διαφορές απαντώνται σε μια αξιοπρόσεχτη περιοχή γύρω από το σημείο πρόσδεσης, όπως και οι μεγαλύτερες τιμές των βαθμών αξιοποίησης. Όπως και με την αλλαγή γωνίας, η μεταβολή του υψόμετρου της σύνδεσης των καλωδίων στο πυλώνα επιφέρει αστοχία με τις μεγαλύτερες τιμές β.α. ακριβώς κάτω από την πρόσδεση, αδυνατώντας να περάσουν το συνδυαστικό έλεγχο θλίψης κάμψης.

### 3.2.1.3 Παραμετρικά άκρα

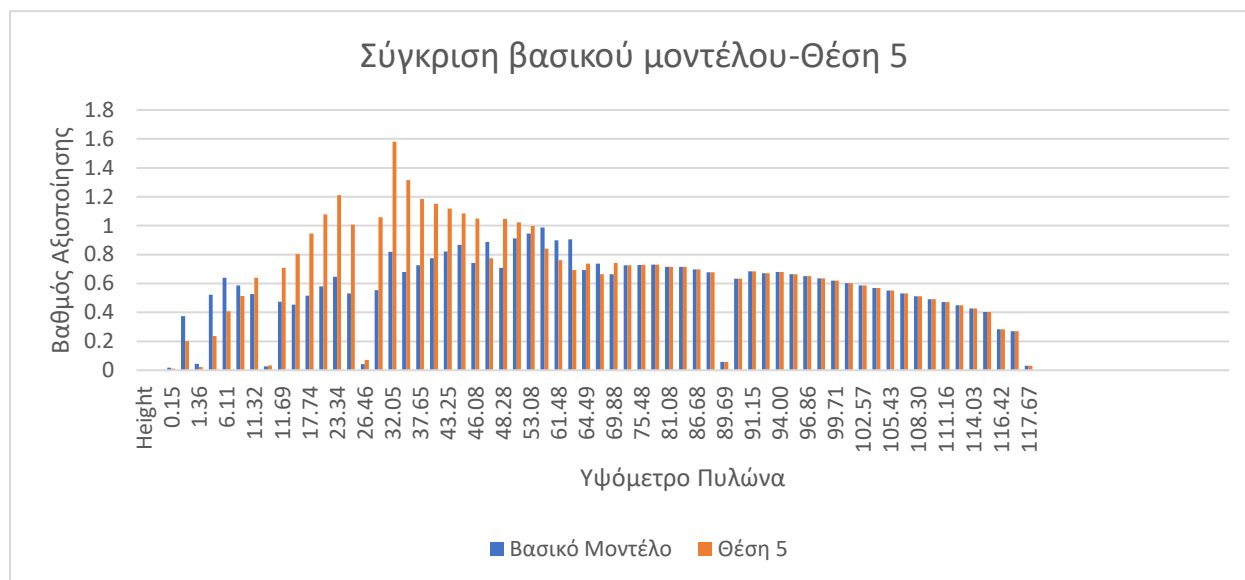
Προκειμένου να γίνουν ευκρινείς οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων, ειδικά σε μια παραμετρική ανάλυση με γνησίως μεταβαλλόμενες συμπεριφορές, παρατίθενται τα δύο ακραία μοντέλα, σε σύγκριση με το αρχικό, που αποτελεί και το σενάριο με το μεγαλύτερο υψόμετρο.



Εικόνα 3-19 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης βασικού-Θέση 1

Στο Εικ. 3-19 φαίνεται η αστοχία 4 μελών, αλλά και η ταύτιση των βαθμών αξιοποίησης από τα 75.48 μέτρα και μετά, κόμβος 19.6 m ψηλότερα από το σημείο πρόσδεσης.

Κατά τον ίδιο τρόπο, συνεχίζει το άνοιγμα της ψαλίδας καταφτάνοντας στο χαμηλότερο σημείο της Θέσης 5 όπου, Εικ. 3-20,



Εικόνα 3-20 : Συγκριτικό γράφημα βαθών αξιοποίησης βασικού-Θέση 5

Τα μέλη που αστοχούν αυξάνονται σε 13 ξεπερνώντας κατά πολύ τη μονάδα, ενώ η ταύτιση των βαθμών αξιοποίησης σε σχέση με το βασικό μοντέλο ξεκινά στα 72.68 m, κόμβος 38.1 μέτρα ψηλότερα από το σημείο πρόσδεσης.

Οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης βρίσκονται σε 3 διαφορετικά υψόμετρα για τα τρία προαναφερθέντα διαφορετικά μοντέλα, όπως φαίνεται στον πίνακα Πίν. 3-7 .

Πίνακας 3-7 : Μέγιστοι β.α. ανά θέση πρόσδεσης

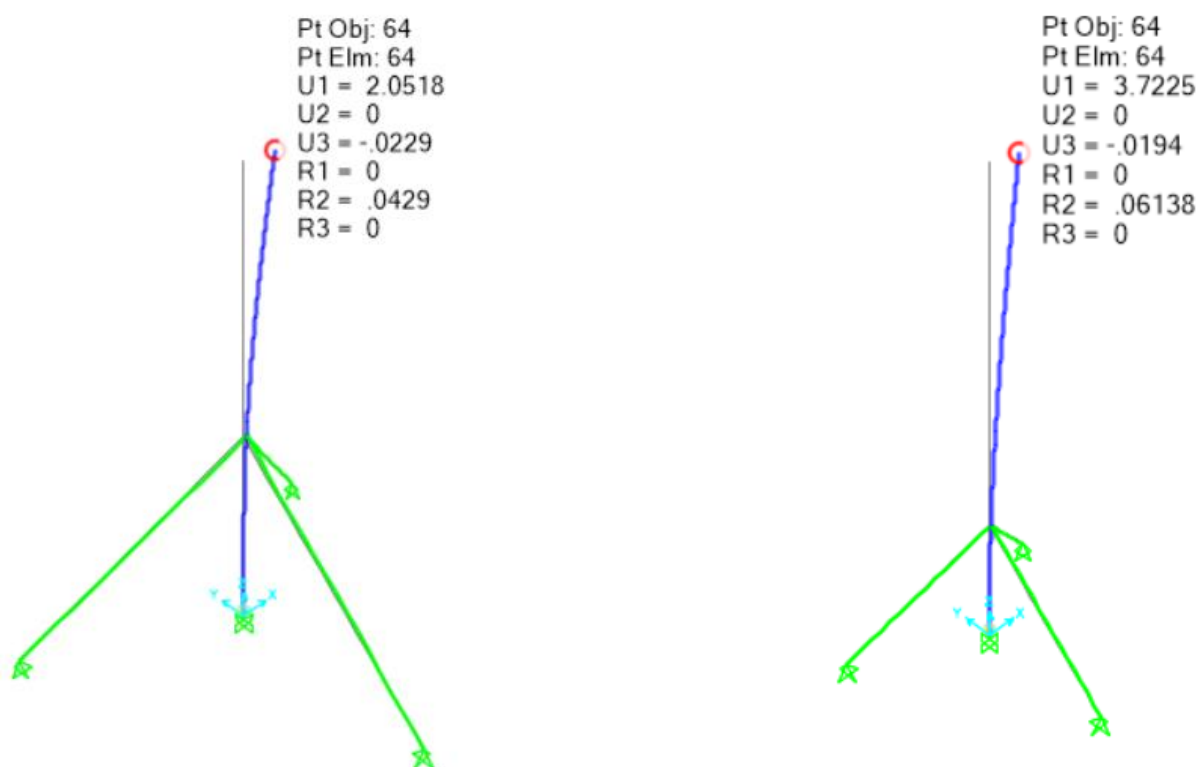
Υψόμετρο (m)	Αρχική θέση	Θέση 1	Θέση 5
32.05 m	0.819143	0.893166	<b>1.580597</b>
53.08 m	0.944872	<b>1.108928</b>	0.998992
55.88 m	<b>0.987177</b>	1.011566	0.841109

### 3.2.2 Μετακινήσεις

Βασική αρχή για την πλήρη εποπτεία της συμπεριφοράς των μοντέλων κατά τη διάρκεια των παραμετρικών λύσεων αποτελεί η κατανόηση της συμπεριφοράς του σημείου πρόσδεσης ως ένα σημείο δέσμευσης της ελευθερίας των κινήσεων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας.

Το εύρος τιμών που πάρθηκε από την αρχική θέση πρόσδεσης, ακριβώς κάτω από τον κύκλο που περιγράφουν τα πτερύγια, μέχρι και το κατώτερο σημείο που βρίσκεται εγγύτερα της βάσης του πυλώνα, βαθμηδόν αυξάνουν το μήκος του άνω της πρόσδεσης μέρους του πυλώνα, ενώ μειώνουν το κάτω.

Στα δύο άκρα του παραμετρικού φάσματος παρατηρούνται οι μετακινήσεις όπως διακρίνονται ως ποσότητα U1, σε μέτρα, Εικ. 3-21,



Εικόνα 3-21: Μετακίνηση κορυφής για τις περιπτώσεις των θέση 1 και θέση 5 αντίστοιχα.

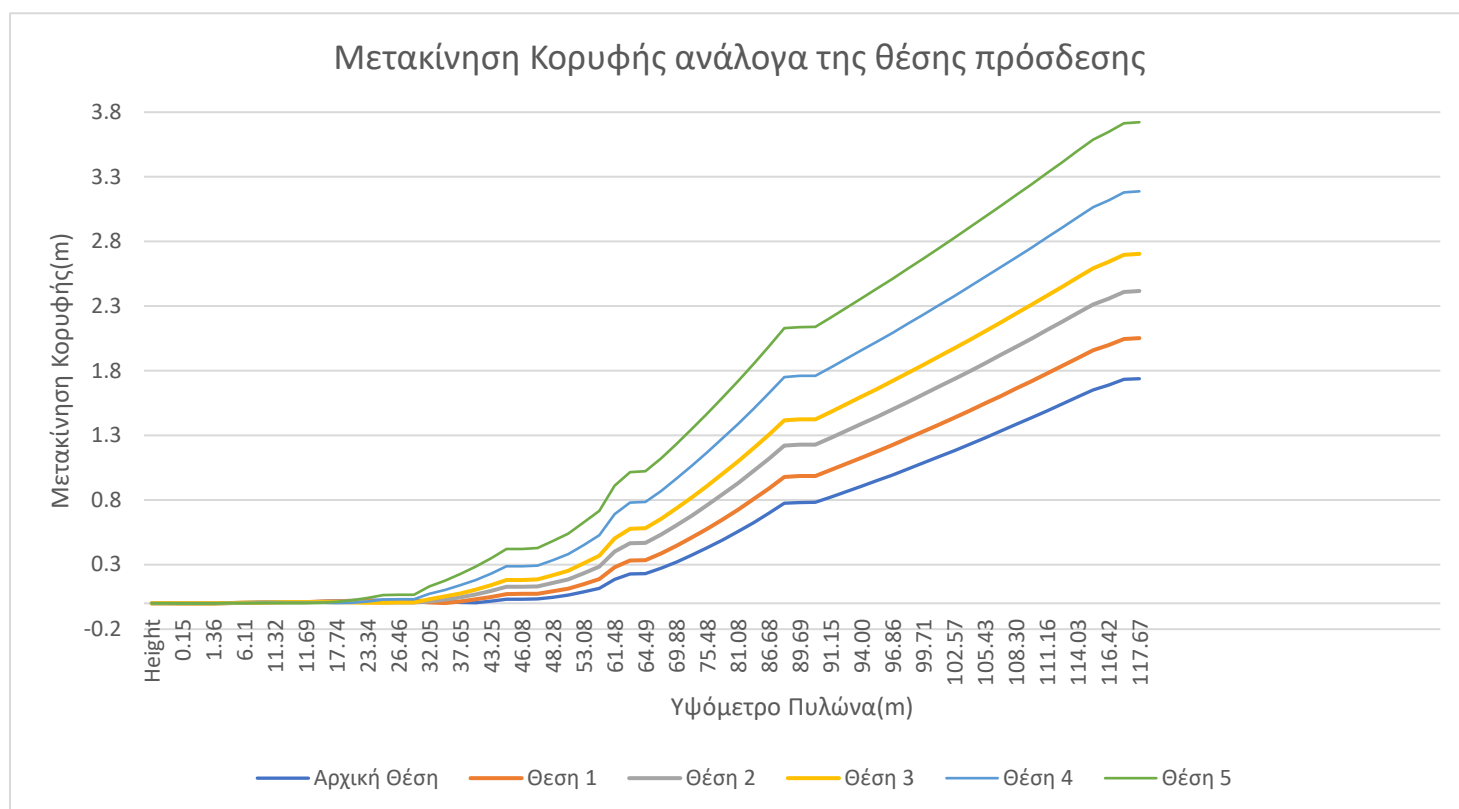
Αναλογιζόμενοι πως η αρχική μετατόπιση κυμαίνεται στα 1.74 m (Εικ. 3-8), η θέση πρόσδεσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στο σχεδιασμό της λειτουργικότητας μιας ανεμογεννήτριας. Μετατόπιση της πρόσδεσης κατά 20 μέτρα, σε ένα πυλώνα ύψους 120 μέτρων, μπορεί να επιφέρει αλλαγή έως και 2 μέτρα όπως φαίνεται από τη μετακίνηση κορυφής για τη θέση 5, μεταβολή της τάξης του 113%.

Τα ενδιάμεσα στάδια υποδεικνύουν μια σταθερά αυξητική πορεία της μετακίνησης κορυφής, όπως φαίνεται στον πίνακα Πίν. 3-8,

Πίνακας 3-8 : Μέγιστες μετατοπίσεις ανά θέση πρόσδεσης

Θέση πρόσδεσης	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5
Μετακίνηση κορυφής (m)	2.05177 m	2.416442 m	2.703825 m	3.187762 m	3.722512 m

Μολονότι οι μεταβολές είναι μεγάλες, η πορεία αλλαγής αυτών των τιμών φαίνεται να ακολουθεί μια συσχετισμένη συμπεριφορά για κάθε μοντέλο, συναρτήσει των υπολοίπων. Στον κάτωθεν πίνακα, με εισαχθέντα δεδομένα την μετακίνηση των κόμβων σε συνάρτηση με την αύξηση του υψομέτρου, δίνει το εξής γραφικό αποτέλεσμα, Εικ. 3-22,

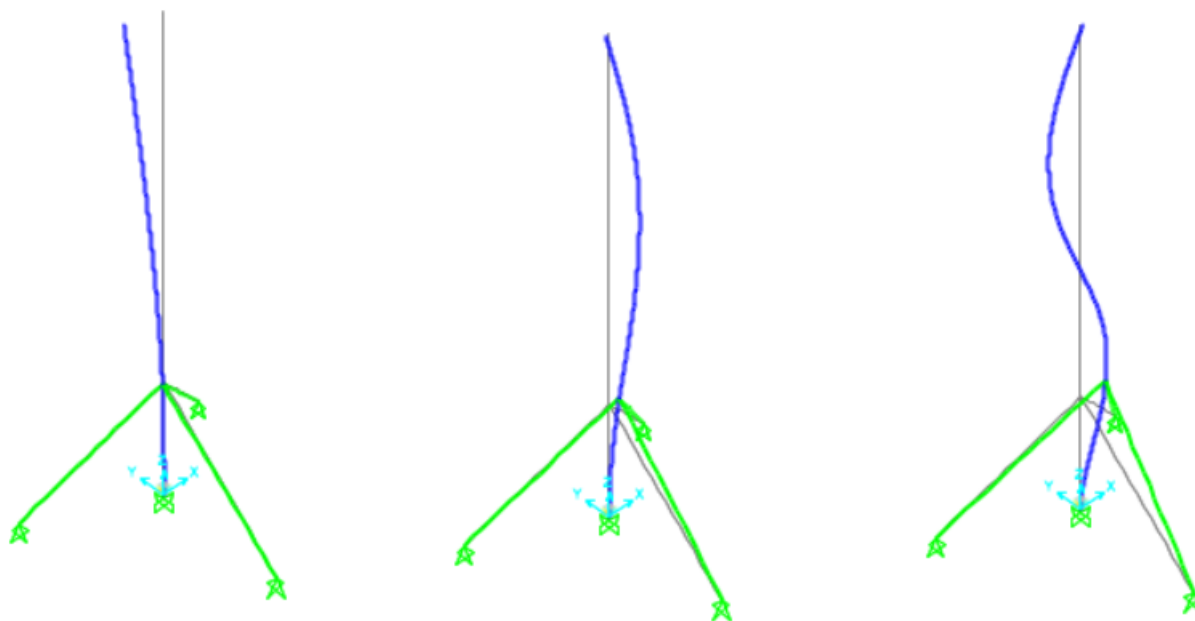


Εικόνα 3-22 : Μετακίνηση κορυφής για τις όλες τις περιπτώσεις

Η αλλαγή της γεωμετρίας του δομικού συνόλου, επιφέρει αλλαγές στην μετακίνηση των κόμβων, που μεταφράζεται στην παραμόρφωση του ίδιου του πυλώνα, με την αλληλουχία των μεταβολών να είναι ατύπως συνεπής μεταξύ των μοντέλων. Η διαφορά μετατόπισης της κορυφής δεν έχει σταθερή διαφορά παρά το σταθερό βήμα μεταβολής, ενώ διακρίνεται πως η μεγαλύτερη διαμορφώνεται εν μέσω της μετάβασης από τη θέση 4 στη θέση 5.

### 3.2.3 Ιδιοσυχνότητες-Ιδιομορφές

Με την ιδιομορφική ανάλυση, μέσω του load case MODAL, μας έδωσε τις εξής 3 πρώτες ιδιομορφές, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



**1<sup>η</sup>** T=6.79 sec, f=0.15 Hz

**2<sup>η</sup>** T=0.58 sec, f=1.71 Hz

**3<sup>η</sup>** T=0.21 sec, f=4.62 Hz

Εικόνα 3-23: Οι πρώτες 3 ιδιομορφές του μοντέλου της θέσης 5

Οι ιδιοπερίοδοι για τις 12 πρώτες ιδιομορφές όπως φαίνονται στον πίνακα :

Πίνακας 3-9 : Ιδιοπερίοδοι ανα θέση πρόσδεσης

Ιδιομορφες	Ιδιοπερίοδοι sec					
	Αρχικό	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5
1	4.470	4.900633	5.363328	5.705178	6.24336	6.792879
2	0.484	0.486901	0.500844	0.51685	0.548128	0.58435
3	0.243	0.239641	0.233371	0.227885	0.220373	0.216166
4	0.211	0.211018	0.211011	0.211036	0.211085	0.211168

5	0.121	0.120341	0.119545	0.119366	0.119301	0.118413
6	0.072	0.072917	0.073756	0.073716	0.072855	0.072352
7	0.053	0.052305	0.05206	0.051866	0.05156	0.051284
8	0.050	0.04952	0.048804	0.049011	0.04961	0.049409
9	0.037	0.037354	0.037839	0.037462	0.036991	0.037513
10	0.030	0.029497	0.028832	0.02912	0.029376	0.028867
11	0.023	0.023449	0.023802	0.023454	0.023617	0.023759
12	0.023	0.023251	0.02333	0.023268	0.023532	0.023709

Αντίστοιχα οι ιδιοσυχνότητες,

Πίνακας 3-10 : Ιδιοσυχνότητες ανά θέση πρόσδεσης

Ιδιομορφές	Αρχικό	Ιδιοσυχνότητες rad/sec				
		Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5
1	1.4055815	1.282117	1.171509	1.101313	1.006379	0.924966
2	12.984753	12.90444	12.54519	12.1567	11.463	10.75243
3	25.894192	26.21916	26.92358	27.57169	28.51157	29.06642
4	29.762509	29.77556	29.77654	29.77309	29.76613	29.75449
5	51.803672	52.21163	52.55929	52.63794	52.66648	53.06146
6	86.845935	86.16892	85.18837	85.23472	86.24231	86.84227
7	119.66148	120.126	120.6914	121.1431	121.8621	122.5168
8	125.31471	126.8814	128.7423	128.2005	126.6527	127.1665
9	169.69501	168.2046	166.0514	167.7232	169.8566	167.4954
10	212.91791	213.0092	217.9211	215.7702	213.8861	217.6566
11	269.27822	267.9565	263.9805	267.896	266.0452	264.4567
12	269.46552	270.2325	269.3137	270.0377	267.0047	265.0104



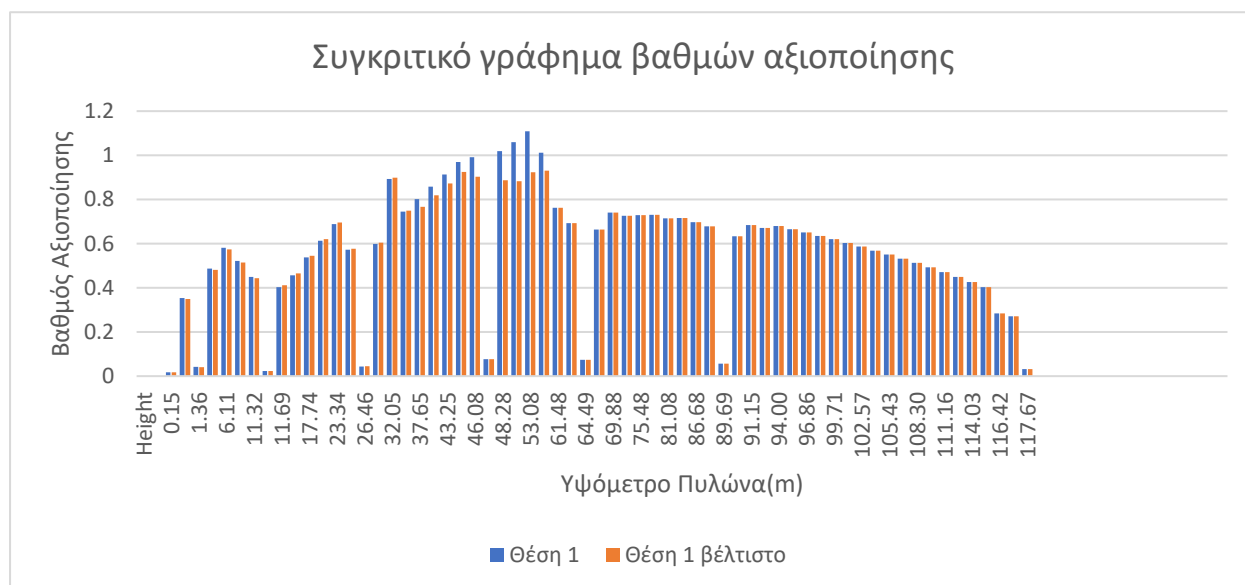
### 3.2.4 Βελτιστοποίηση Παραμετρικών μοντέλων

Ακολουθώντας σταθερά τη λογική βελτιστοποίησης των παραμετρικών μοντέλων, με απώτερο σκοπό τη διερεύνηση της βιωσιμότητας και λειτουργικότητας τους, επανασχεδιάστηκαν και τα 5 μοντέλα με παράμετρο τη γωνία πρόσδεσης. Η μετάβαση από την Θέση 1 έως και τη Θέση 5, είναι σταθερά η μετάβαση από ένα ψηλότερο σε ένα χαμηλότερο σημείο. Η πορεία αυτή συνεχώς αυξάνει τον αριθμό των μελών που αστοχούν.

Επιπροσθέτως, όπως διακρίνεται και από τους βαθμούς αξιοποίησης, η αύξηση των μελών που διαρρέουν εμφανίζεται γύρω από την περιοχή πρόσδεσης, τόσο πάνω όσο και κάτω από αυτή.

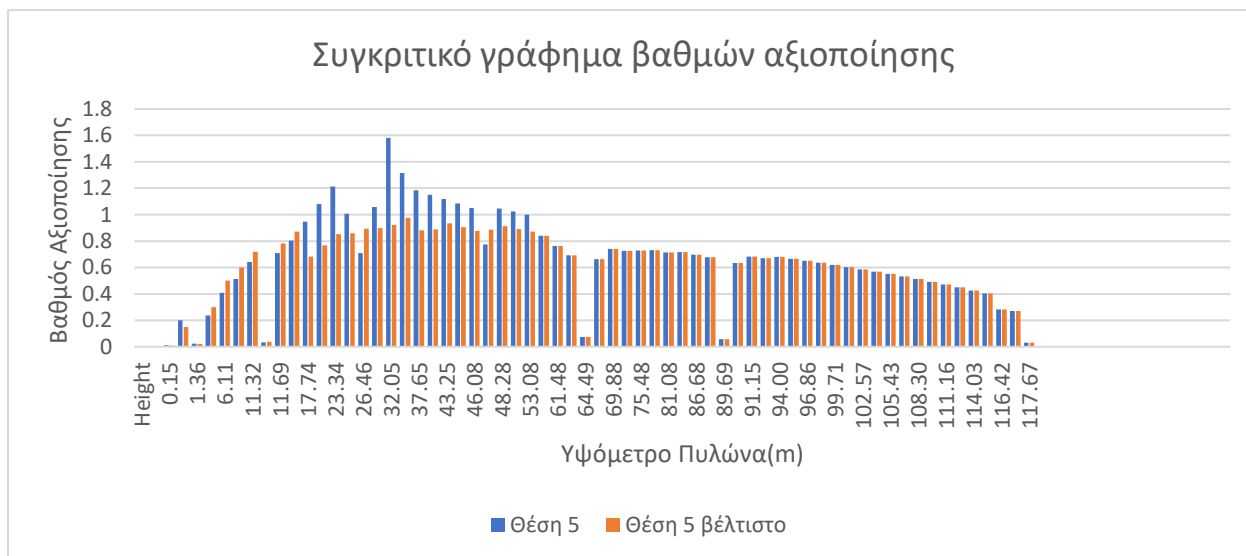
Ο κόμβος που αποτελεί την πρόσδεση, με τους όποιους περιορισμούς κίνησης από τα καλώδια, καθώς κατεβαίνει προς τη βάση της ανεμογεννήτριας, αυξάνει το μήκος του άνω άκρου με ελεύθερο τμήμα αυτό του μηχανισμού λειτουργίας στην κορυφή, η μετακίνηση του οποίου αυξάνει τις παραμορφώσεις άρα και τα αστοχούντα μέλη.

Η εικόνα των βαθμών αξιοποίησης, πριν και μετά τον επανασχεδιασμό, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα για την περίπτωση της πρώτης παραμέτρου, όπου επανασχεδιάζεται ο αρχικός ουσιαστικά πυλώνας, Εικ. 3-24,



Εικόνα 3-24 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης Θέσης 1 Αρχικού – Βέλτιστου

Επιπλέον, για την περίπτωση της Θέσης 5, στο χαμηλότερο υψόμετρο πρόσδεσης των 34.85m, έχουμε, Εικ. 3-25,



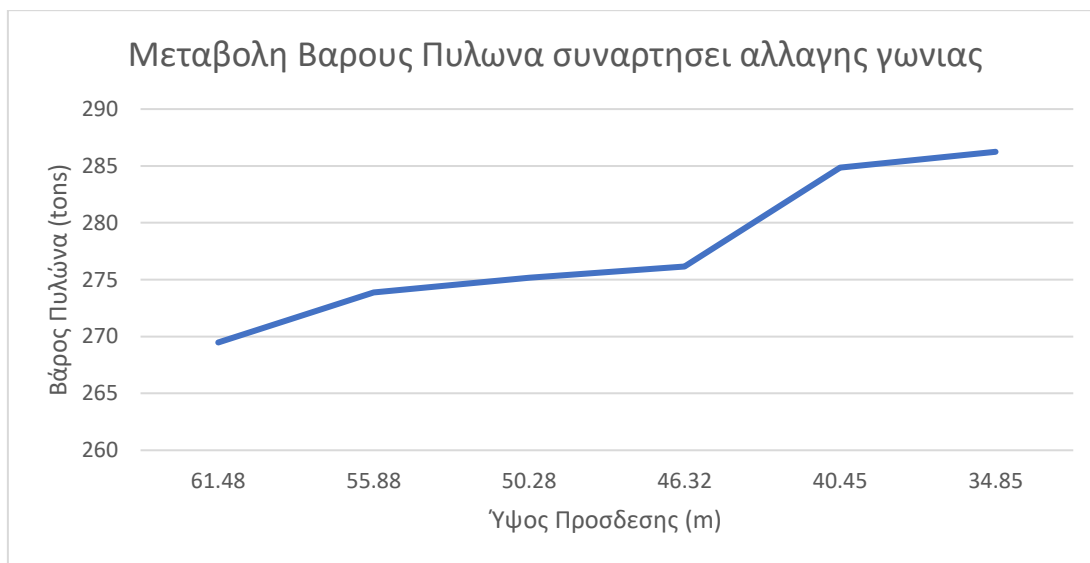
*Εικόνα 3-25 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης Θέσης 5 Αρχικού – Βέλτιστου*

Επετεύχθη η δημιουργία μοντέλων όπου περνάνε επιτυχώς τον έλεγχο αστοχιών, ενώ όπως φαίνεται και στην Εικ. 3-25 οι βαθμοί αξιοποίησης ταυτίζονται στα 55.88 m , για τα παραμετρικά της θέσης 5, σημείο 21 μέτρα ψηλότερα από το σημείο πρόσδεσης.

#### 3.2.4.1 Παραμετρικά Διαγράμματα

Πλην των ακραίων περιπτώσεων ,παρουσιάζονται με τη μορφή παραμετρικών διαγραμμάτων οι επιπτώσεις της μεταβολής της θέσης πρόσδεσης στον καλωδιωτό πυλώνα. Καθίσταται σαφές πως επιβάλλεται η συνεχής αύξηση του βάρους του πυλώνα για τον επανασχεδιασμό αλλά και η αύξηση μετακίνησης κορυφής στα βέλτιστα παραμετρικά μοντέλα.

Η συνεχής αύξηση του βάρους του πυλώνα λόγω επανασχεδιασμού, όπως φαίνεται στο Εικ. 3-26,

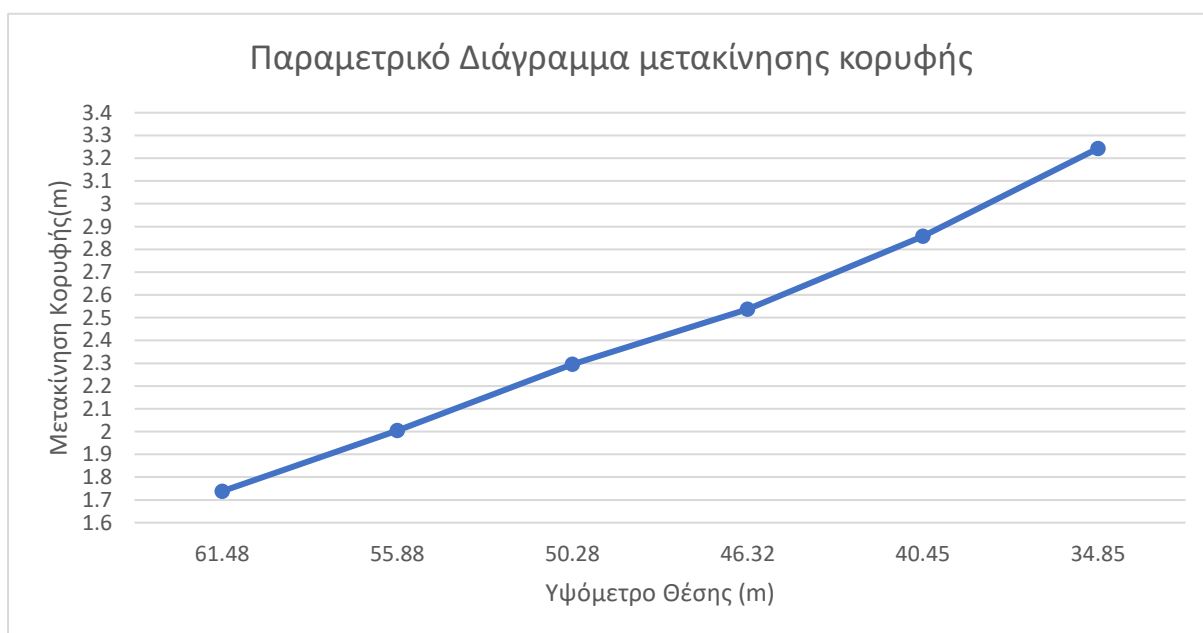


Εικόνα 3-26 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής βάρους πυλώνα

Το μεγαλύτερο και πιο δυσανάλογο άλμα στην απαίτηση επιπλέον δομικού υλικού με την αύξηση των διατομών γίνεται από τη Θέση 4 (40.40 m) στη Θέση 3 (40.45 m).

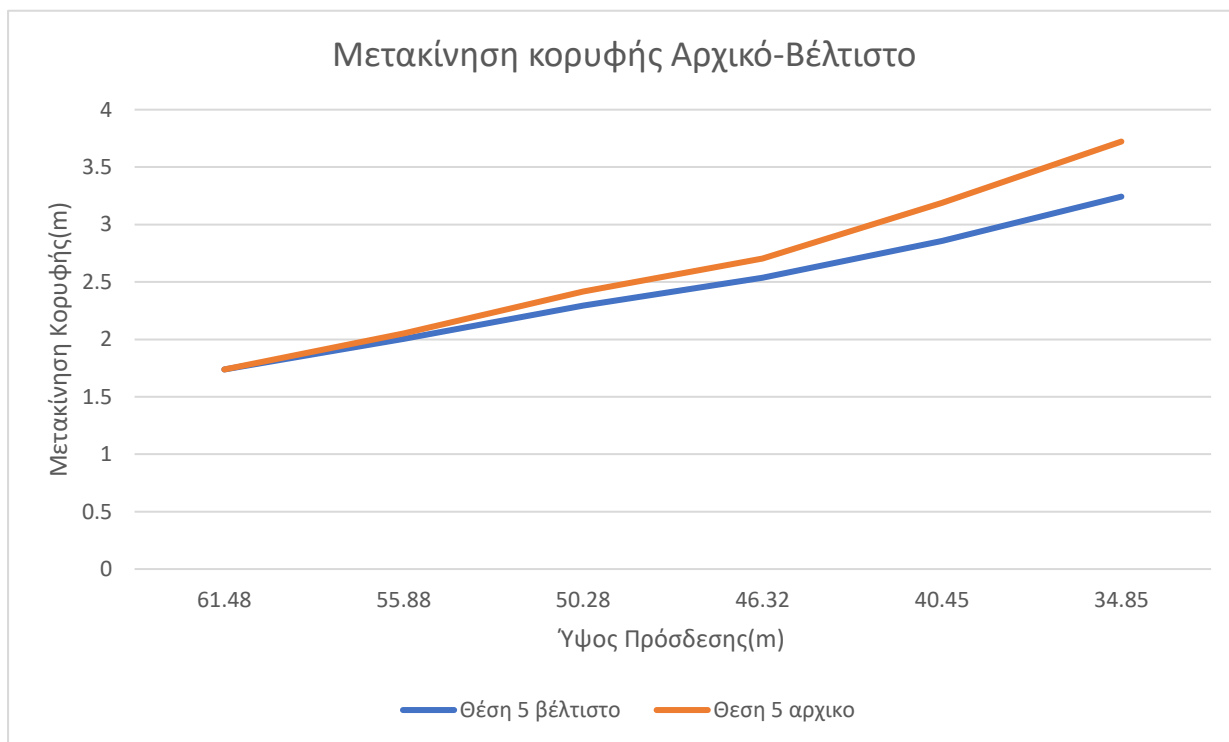
Παράλληλα, η μετακίνηση κορυφής ναι μεν έχει μια συνεχή αυξητική τάση, όμως με την αύξηση του βάρους του πυλώνα στα βέλτιστα επιτρεπτά όρια, μειώνει τη διαφορά μεταξύ των παραμετρικών και του αρχικού μοντέλου, δίνοντας ίσως λύση σε εναλλακτικές προτάσεις γεωμετρίας εφόσον το επιτρέπει ο έλεγχος λειτουργικότητας του μηχανισμού της ανεμογεννήτριας.

Στο Εικ. 3-27 διακρίνεται η μετακίνηση κορυφής του πυλώνα, για τα βέλτιστα παραμετρικά μοντέλα,



Εικόνα 3-27 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφής

Το γράφημα της μετακίνησης κορυφής όπως διαμορφώθηκε από τις παραμετρικές λύσεις, έχει μεγάλες μεταβολές άρα και μεγάλες κατά γενική ομολογία κλίσεις. Παρόλα αυτά η βελτιστοποίηση των παραμετρικών μοντέλων μείωσε τις διαφορές των τιμών, εξομαλύνοντας και το γράφημα, Εικ. 3-28



Εικόνα 3-28 : Συγκριτικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφής 'πριν και μετά' την βελτιστοποίηση

Οι προαναφερθείσες μεταβολές, όπως φαίνονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες Πίν. 3-11 και Πίν. 3-12 για τα χαρακτηριστικά σημεία πρόσδεσης,

Πίνακας 3-11 : Μεταβολή βάρους πυλώνα ανα θέση πρόσδεσης

Υψόμετρο θέσης πρόσδεσης (m)	Βάρος Πυλώνα (tons)
61.48	269.48
55.88	273.88
50.28	275.18
46.32	276.15
40.45	284.85
34.85	286.25

Πίνακας 3-12 : Μεταβολή μετακίνησης κορυφής πυλώνα ανά θέση πρόσδεσης

Θέση πρόσδεσης m	Μετακίνηση κορυφής (βέλτιστα) m	Μετακίνηση κορυφής (αρχικά) m
61.48	1.737939	1.737939
55.88	2.005	2.05177
50.28	2.295	2.416442
46.32	2.537	2.703825
40.45	2.858	3.187762
34.85	3.243	3.722512

Η απαίτηση δομικού υλικού συνεχώς αυξάνεται με βάση τη μείωση του υψομέτρου της θέσης πρόσδεσης. Παραδειγματικά, στην περίπτωση υλοποίησης του πυλώνα με τη γεωμετρία που προκύπτει από τη Θέση 1, απαιτούνται επιπλέον 4.4 tons χάλυβα, διατηρώντας φορέα που λειτουργεί όσο το δυνατόν εγγύτερα του ορίου, με τη μεταβολή του βάρους να είναι της τάξης του 1.6%.

Επιπροσθέτως, σε σύγκριση με το κατώτερο δυνατό όριο, η μεταβολή του βάρους του πυλώνα είναι της τάξης των 16.77 tons χάλυβα, δηλαδή μεταβολή 6.2%.

### 3.3 Διατομή Καλωδίων

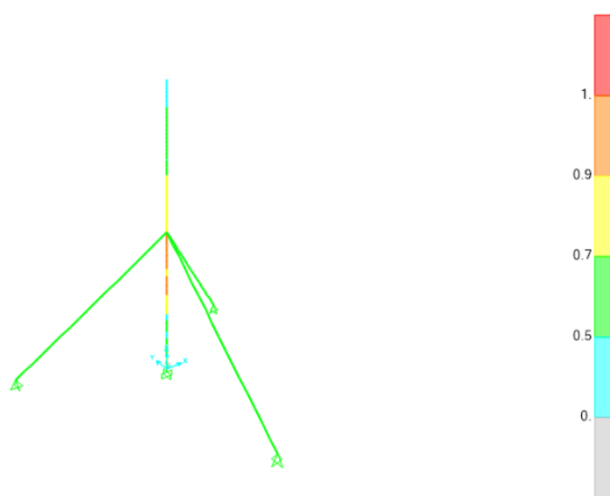
Στα πλαίσια της διερεύνησης της συμπεριφοράς του καλωδιωτού πυλώνα, καταλήγουμε σε συμπεράσματα, που είτε αφορούν μεγάλες είτε μικρές διαφορές. Η διατομή των καλωδίων αποτελεί παράμετρο που στα πλαίσια των παραμετρικών λύσεων, αποτελεί αλλαγή γεωμετρίας, που όπως αναλύεται παρακάτω δεν έχει την ίδια επίπτωση σε σχέση με διαφορετικές αλλαγές γεωμετρίας στο δομικό σύνολο. Όπως είναι λογικό, με τη διατομή να είναι το μόνο μέγεθος που αλλάζει, τόσο το υλικό όσο και η προένταση στα καλώδια παραμένουν αναλλοίωτα ως μεγέθη.

Στην προσπάθεια διαμόρφωσης του εύρους της μεταβολής του παραμετρικού μεγέθους, λαμβάνουμε υπόψιν πως με σταθερή προένταση στα 4500 kN, το κατώτερο παραμετρικό όριο πρέπει να προσδιορίζεται ως η διατομή καλωδίου με εφελκυστική αντοχή τέτοια που ξεπερνά την προένταση μαζί με την ένταση που αναπτύσσεται από τις φορτίσεις της κορυφής.

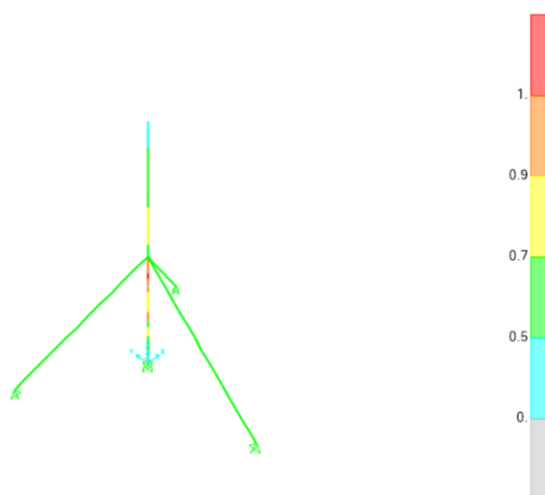
#### 3.3.1 Βαθμοί Αξιοποίησης

Εξαιρώντας τα παραμετρικά άκρα που έχουν κάποιες ειδοποιούς διαφορές σε σχέση με το βασικό μοντέλο, οι ενδιάμεσες καταστάσεις παρά το σταθερό βηματισμό δεν φέρουν το ίδιο αξιοσημείωτες διαφορές. Παρόλα αυτά οι μικρότεροι βαθμοί αξιοποίησης που διαμορφώνονται στο άνωθεν τμήμα του συνόλου, ειδικά στα τμήματα με διατομή μεγαλύτερη του βασικού μοντέλου, δίνει τη δυνατότητα εξοικονόμησης δομικού υλικού.

Ξεκινώντας από το παραμετρικό μοντέλο της μικρότερης διατομής των 0.08 m ή 8 cm, η προένταση των 4500 kN, αποτελεί το 70.4 % της αντοχής διαρροής ( $f_y$ ) που είναι στα 6390 kN. Οι βαθμοί αξιοποίησης όπως φαίνονται στα Εικ. 3-29, Εικ. 3-30



Εικόνα 3-29: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Διατομή 0.08 m



Εικόνα 3-30: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Διατομή 0.12 m

Η κατανομή αλλά και οι αστοχίες των μελών είναι διακριτά μέσω τις χρωματικής κλίμακας, ενώ μεγαλύτερη εποπτεία αποκτάται μέσω πινάκων, λόγω των μικρών διαφορών ανά βήμα μεταβολής.

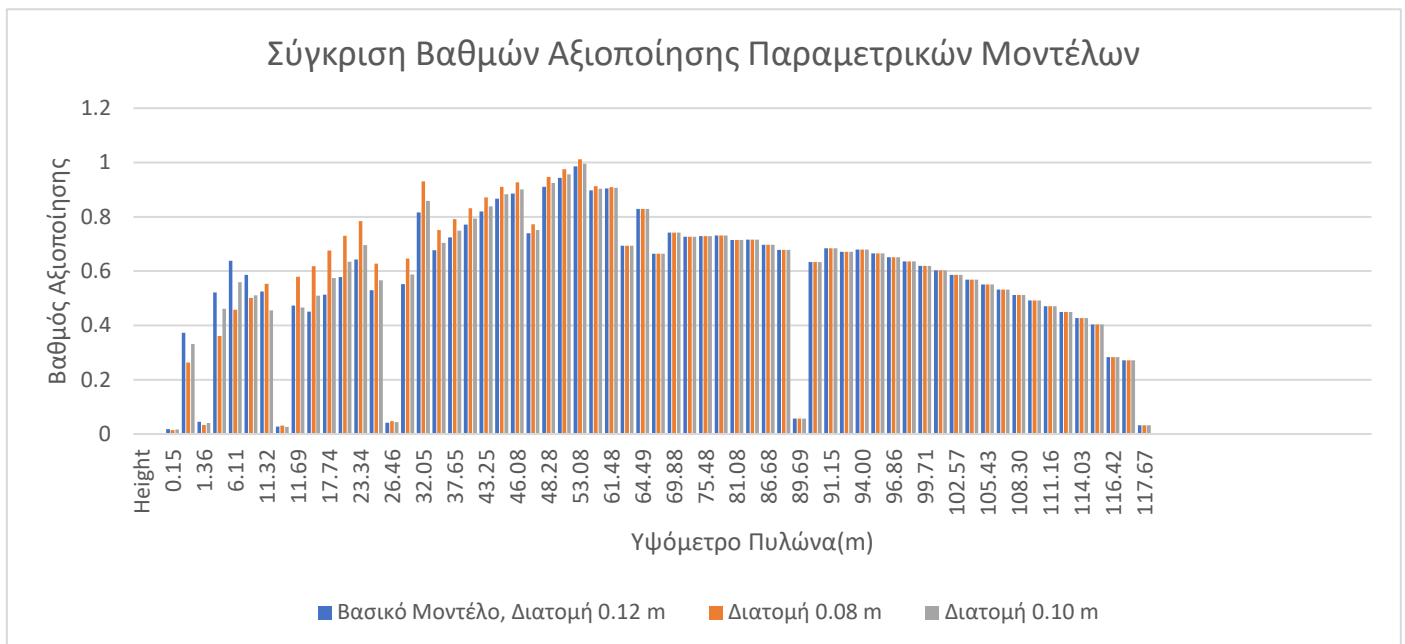
### 3.3.1.1 Παραμετρικά μοντέλα των μικρότερων διατομών

Για τα 3 πρώτα μοντέλα επελέγησαν καλώδια συγκεκριμένων διατομών, ίδιου υλικού και κατασκευής, από τον πίνακα Annex H1 της Pfeifer, τύπου PV, ειδικά σχεδιασμένα για ανάπτυξη μεγάλων εφελκυστικών τάσεων.

Η διατομή των 0.08 m, επελέγη το PV 640, με όριο διαρροής στα 6390 kN. Η διατομή των 0.10 m, επελέγη το PV 1010, με όριο διαρροής στα 10100 kN, ενώ για το βασικό μοντέλο όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, έχουμε το PV 1450, με όριο διαρροής στα 14500 kN.

Όπως στις παραπάνω περιπτώσεις, έχουμε διαχωρισμό μεταξύ των μοντέλων στην παρουσίαση των διαγραμμάτων, για όσο το δυνατόν ευκρινέστερο εντοπισμό των μικρών διαφορών που προκύπτουν.

Στο Εικ. 3-31 φαίνονται οι διαφοροποιήσεις του βασικού μοντέλου με αυτά που έχουν μικρότερες διατομές,



Εικόνα 3-31 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης, 3 πρώτες διατομές

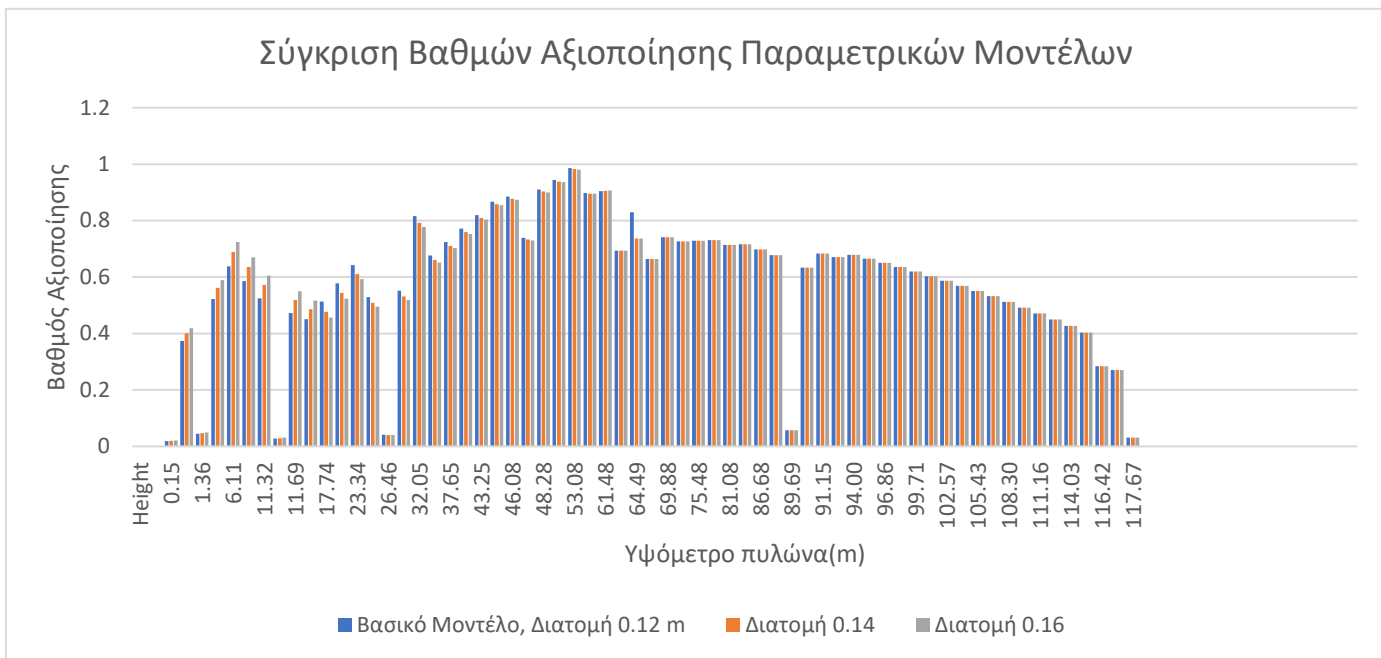
Η κατανομή των βαθμών αξιοποίησης είναι παρόμοια στα τρία μοντέλα, ενώ σε αυτά με τη μικρότερη διατομή είναι σταθερά μεγαλύτερος σε όλα τα μέλη ως και το σημείο πρόσδεσης που ξεκινάει η ταύτιση τους. Η διατομή των 0.08 m είναι φανερά η δυσμενέστερη με 2 της μέλη να αστοχούν κοντά στο σημείο πρόσδεσης (τιμές άνω του 0.95).

### 3.3.1.2 Παραμετρικά μοντέλα διατομών μεγαλύτερων του βασικού μοντέλου

Σε αυτή την περίπτωση διακρίνουμε τους σταθερά μειωμένους βαθμούς αξιοποίησης στο υψομετρικό φάσμα από τα 32.05 έως και τα 61.48 m. Ταυτόχρονα όμως συμβαίνει το αντίθετο στην περιοχή από τη βάση μέχρι και το πρώτο συνδετικό δαχτυλίδι (φλάντζα) στα 26.46 m.

Η παραπάνω εικόνα μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός του ότι μεγαλύτερη διατομή καλωδίων περιορίζει την κίνηση του κόμβου στο σημείο πρόσδεσης ανακουφίζοντας την γύρω περιοχή, ενώ το αυξημένο βάρος των καλωδίων να μην είναι ευεργετικό στην κάμψη, αλλά όχι τόσο ώστε να μην αυξηθούν οι βαθμοί αξιοποίησης, Εικ. 3-32

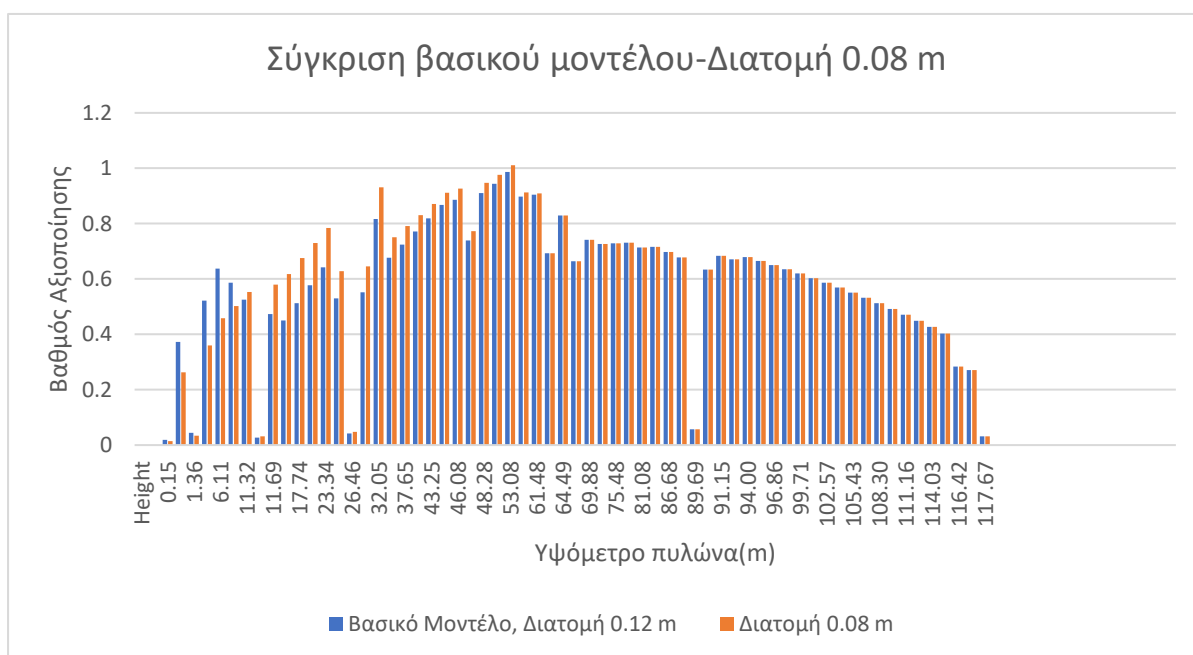




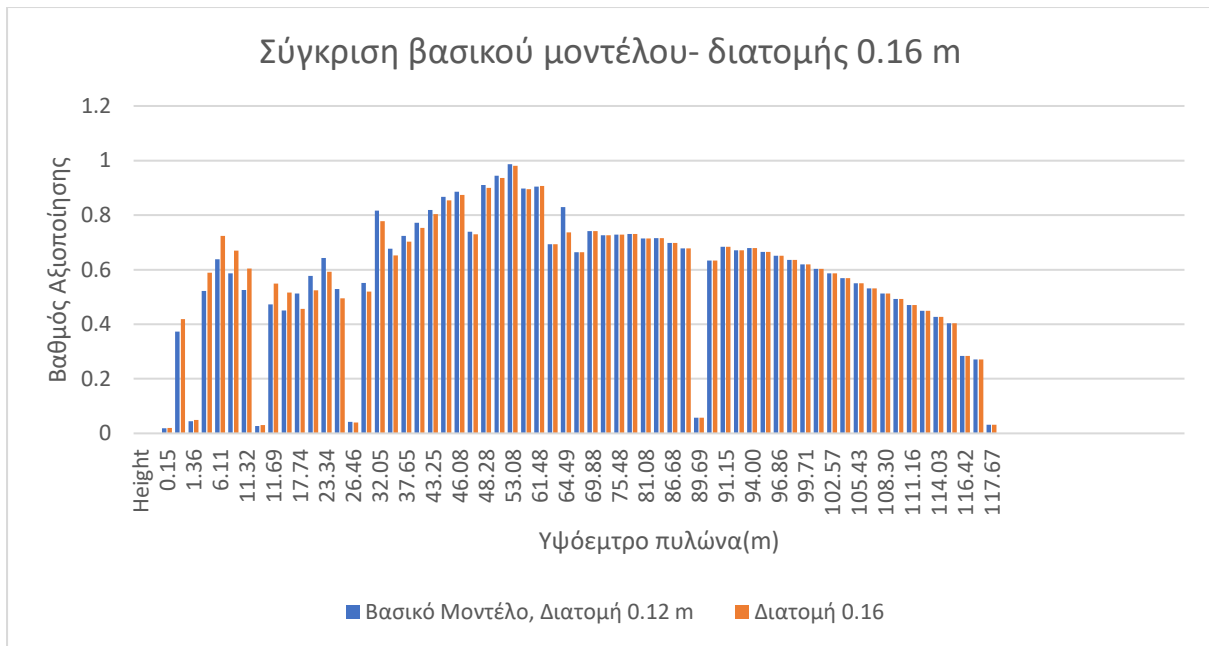
Εικόνα 3-32 : Βαθμοί αξιοποίησης μεγαλύτερων των 0.12m διατομών

3.3.1.3 Σύγκριση παραμετρικών άκρων

Η περίπτωση της μικρότερης διατομής φέρνει σε αστοχία 2 μέλη γύρω από την πρόσδεση, ενώ το μοντέλο της μεγαλύτερης διατομής λειτουργώντας ευμενώς ανακουφίζει κρίσιμα μέλη, προσφέροντας τη δυνατότητα για οικονομικότερο σχεδιασμό, Εικ. 3-33 και Εικ. 3-34,



Εικόνα 3-33 : Βαθμοί αξιοποίησης των 0.08m και 0.12m διατομών



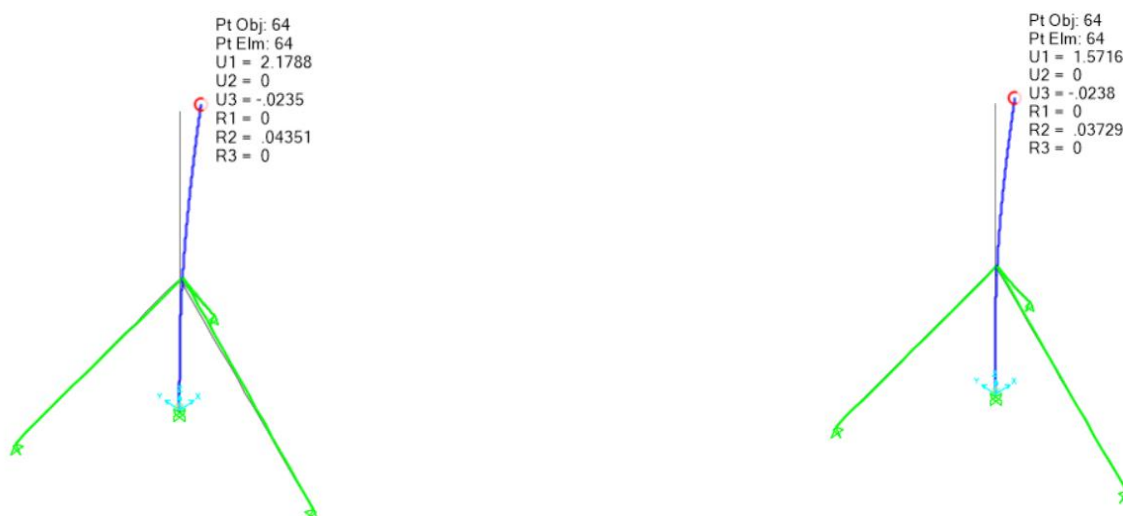
Εικόνα 3-34 : Βαθμοί αξιοποίησης των 0.12m και 0.16m διατομών

### 3.3.2 Μετακινήσεις

Η αλλαγή της διατομής δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην μετακίνηση κορυφής, τόσο με την αύξηση, όσο και με τη μείωση της. Το πλεονέκτημα αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι μπορούμε να μειώσουμε τη διατομή των καλωδίων για οικονομικότερο σχεδιασμό αλλά η αύξηση μετακίνησης κορυφής να μην επιδρά αρνητικά στη λειτουργία του μηχανισμού της κορυφής.

Επιπροσθέτως η αύξηση της διατομής, στην περίπτωση που κρατάει ανεπηρέαστη την ανεμογεννήτρια, μπορεί να είναι ωφέλιμη από την άποψη του ότι πιθανώς η διαφορά αύξησης υλικού των καλωδίων σε σχέση με τη μείωση των διατομών των μελών από τον οικονομικότερο σχεδιασμό να έχει θετικό πρόσημο.

Στα δύο άκρα του παραμετρικού φάσματος παρατηρούνται οι μετακινήσεις όπως διακρίνονται ως ποσότητα  $U_1$ , σε μέτρα.



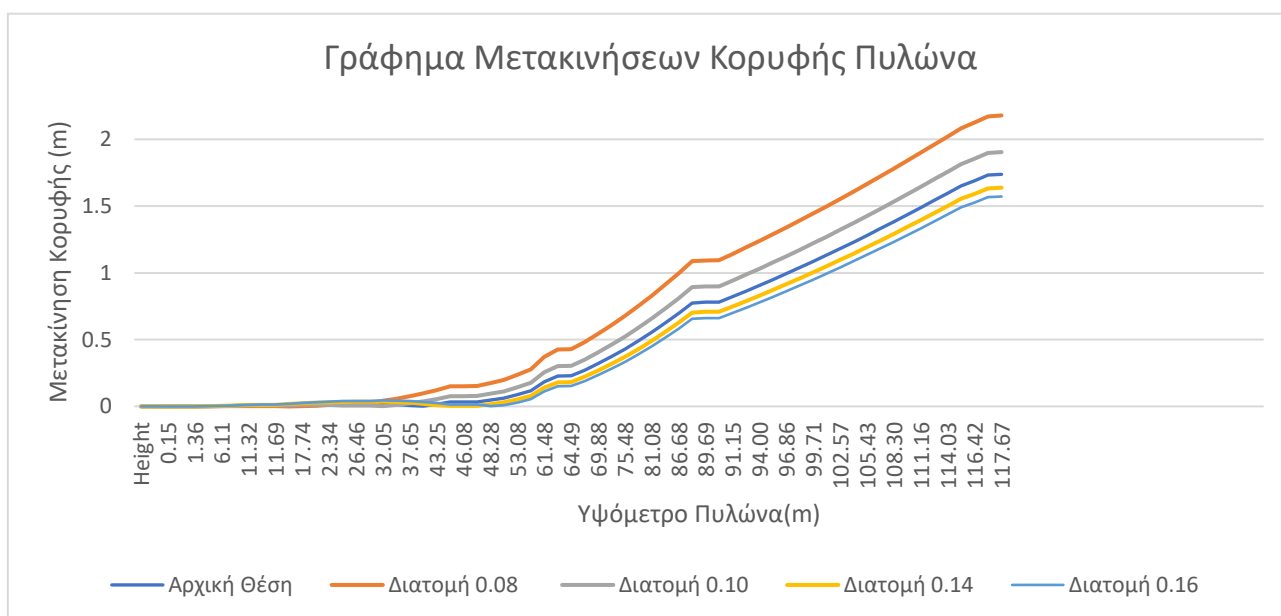
Εικόνα 3-35: Μετακίνηση κορυφής για τις περιπτώσεις των διατομής 0.08 m και διατομής 0.12 αντίστοιχα.

Αναφορικά με τα ενδιάμεσα μοντέλα, όπως φαίνονται στο παρακάτω πίνακα Πίν. 3-13,

Πίνακας 3-13 : Μετακίνηση κορυφής πυλώνα ανά διάμετρο διατομής

Διάμετρος Διατομής (m)	Διατομή 0.08 m	Διατομή 0.10 m	Διατομή 0.12 m	Διατομή 0.14 m	Διατομή 0.16 m
Μετακίνηση κορυφής (m)	2.17878	1.904464	1.737939	1.638034	1.571639

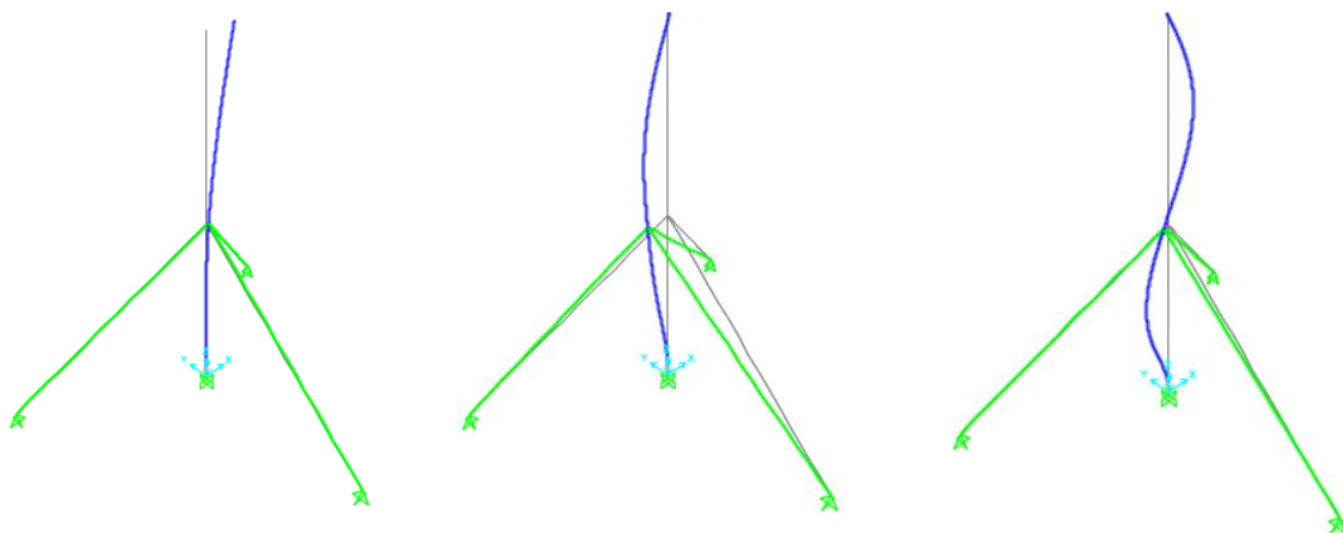
Επιπλέον, οι μετακινήσεις των κόμβων καθ' ύψος του πυλώνα ακολουθούν παρεμφερή μεταβολή, όπως αποτυπώνεται και στο συγκριτικό γράφημα, Εικ. 3-36



Εικόνα 3-36 : Μετακίνηση κορυφής για τις όλες περιπτώσεις

### 3.3.3 Ιδιοσυχνότητες – Ιδιομορφές

Με την ιδιομορφική ανάλυση, μέσω του load case MODAL, μας έδωσε τις εξής 3 πρώτες ιδιομορφές, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



1<sup>η</sup> T=4.2 sec, f=0.23 Hz

2<sup>η</sup> T=0.4 sec, f=2.44 Hz

3<sup>η</sup> T=0.24 sec, f=4.39 Hz

Εικόνα 3-37: Οι πρώτες 3 ιδιομορφές του μοντέλου διατομής 0.16 m

Οι ιδιοπερίοδοι για τις 12 πρώτες ιδιομορφές όπως φαίνονται στον πίνακα :

Πίνακας 3-14 : Ιδιοπερίοδοι ανά διατομή καλωδίων

Ιδιομορφές	Ιδιοπερίοδοι sec				
	Αρχικο	Διατομή 0.08 m	Διατομή 0.10 m	Διατομή 0.14 m	Διατομή 0.16 m
1	4.470	5.092768	4.715798	4.312314	4.199738
2	0.484	0.576811	0.523879	0.440181	0.408321
3	0.243	0.242833	0.239023	0.238728	0.238531
4	0.211	0.211806	0.211484	0.210562	0.210003
5	0.121	0.119358	0.120737	0.121945	0.122643
6	0.072	0.072267	0.071141	0.071141	0.071142
7	0.053	0.051124	0.051268	0.052331	0.052979
8	0.050	0.04917	0.049537	0.050279	0.050688
9	0.037	0.036902	0.036674	0.036693	0.036703

10	0.030	0.029127	0.029086	0.029459	0.029658
11	0.023	0.023268	0.023224	0.023329	0.023382
12	0.023	0.023095	0.023192	0.02323	0.023254

Αντίστοιχα οι ιδιοσυχνότητες,

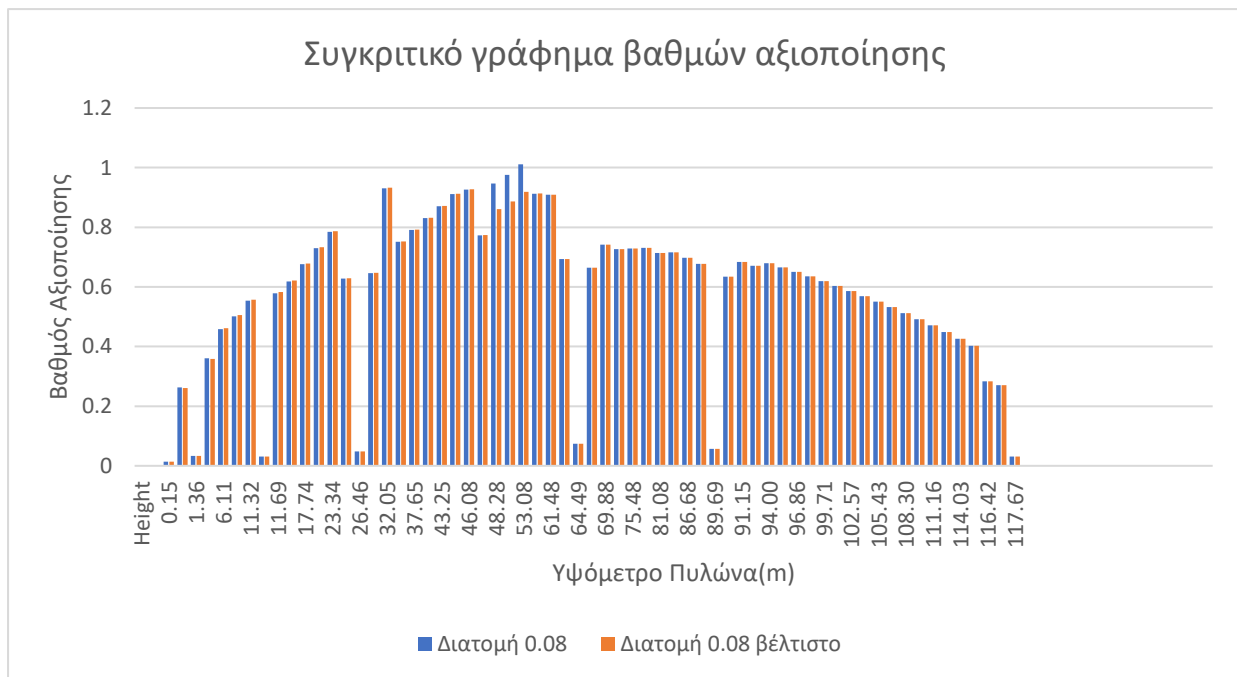
Πίνακας 3-15 : Ιδιοσυχνότητες ανά διατομή καλωδίων

Ιδιομορφές	Ιδιοσυχνότητες rad/sec			
	Διατομή 0.08 m	Διατομή 0.10 m	Διατομή 0.14 m	Διατομή 0.16 m
1	1.233746532	1.332369604	1.457033226	1.49608997
2	10.89297511	11.99359235	14.27410924	15.38785433
3	25.87453762	26.28700108	26.31938411	26.34118612
4	29.66476386	29.71000399	29.84004132	29.9195206
5	52.64158322	52.0403309	51.52467954	51.23134577
6	86.94356895	88.32038502	88.31962426	88.31919266
7	122.9013494	122.5549944	120.0653397	118.5983079
8	127.7845658	126.8395052	124.9663436	123.9578935
9	170.2668301	171.3237846	171.2372585	171.190448
10	215.7166088	216.0217839	213.2849997	211.8531949
11	270.0320175	270.5418925	269.3345993	268.716766
12	272.0555912	270.9169053	270.4718072	270.1984492

### 3.3.4 Βελτιστοποίηση παραμετρικών μοντέλων

Στη συγκεκριμένη παραμετρική ανάλυση, λόγω των μικρών επιπτώσεων που έχει η συγκεκριμένη αλλαγή στην απόκριση του συστήματος, οι αλλαγές στις διατομές προς οικονομικότερο σχεδιασμό, είναι περιορισμένες. Στην περίπτωση αύξησης διατομής των καλωδίων, η μείωση των βαθμών αξιοποίησης είναι τέτοια που επιτρέπει μια σημαντική μείωση δομικού υλικού σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση της μείωσης της διατομής, όπου ευμενώς δεν χρειάζεται μεγάλη αύξηση.

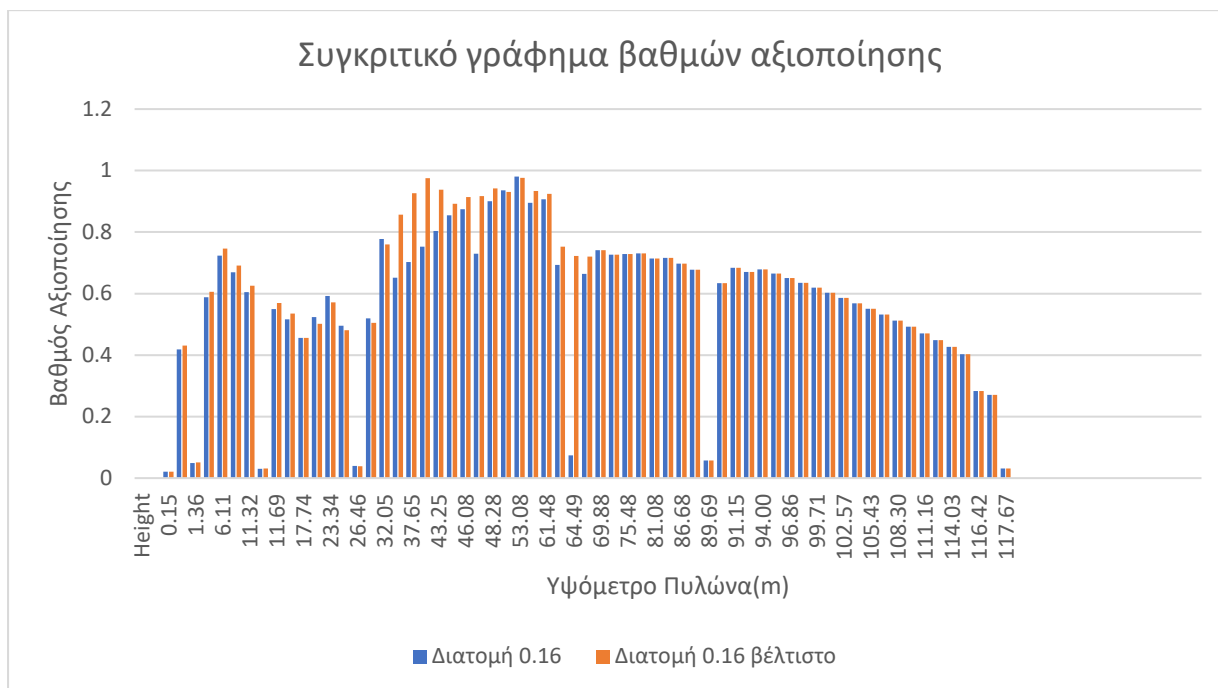
Οι βαθμοί αξιοποίησης μετά τη βελτιστοποίηση του πυλώνα για τις δύο ακραίες περιπτώσεις του παραμετρικού φάσματος Εικ. 3-38 και Εικ. 3-39,



Εικόνα 3-38 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης διατομής 0.08 m Αρχικού – Βέλτιστου

Είναι φανερό πως οι αλλαγές κρατήθηκαν στο χαμηλότερο δυνατό σημείο, απόφαση που προκύπτει από το ότι η διαφοροποίηση της διατομής φαίνεται να επιδρά σε ένα περιορισμένο υψομετρικό φάσμα του πυλώνα που βρίσκεται γύρω από το σημείο πρόσδεσης. Με την αλλαγή στο χαμηλότερο δυνατό 0.08 m διαμέτρου καλωδίου, για να εξυπηρετηθεί ταυτόχρονα και η σταθερή προένταση, έγινε αλλαγή διατομής στα τρία αστοχούντα μέλη, ενώ φαίνεται πως η αλλαγή δεν επηρεάζει αλλά σημεία κάτωθεν της πρόσδεσης, κάνοντας μη επιβεβλημένη την αύξηση των διατομών.

Ταυτόχρονα, η μεταβολή της διατομής στα 0.16 m διαμέτρου καλωδίου, έχει τα παρακάτω αποτελέσματα, Εικ.3-39



Εικόνα 3-39 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης διατομής 0.16 m Αρχικού – Βέλτιστου

Με την αύξηση της διατομής επήλθε μείωση σε περιοχή ευρύτερη γύρω από το σημείο πρόσδεσης, οπότε προέκυψε η δυνατότητα μείωσης των διατομών στα μέλη κάτω, αλλά και ελαφρώς πάνω από την πρόσδεση με απώτερο σκοπό να επαναφέρουμε τους βαθμούς αξιοποίησης σε σημείο πολύ κοντά αυτού του βασικού μοντέλου. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως έχουμε αύξηση σε σχέση με τον αρχικό ανακουφισμένο πυλώνα από τα παχύτερα καλώδια μέχρι και το υψόμετρο των 69.88 m.

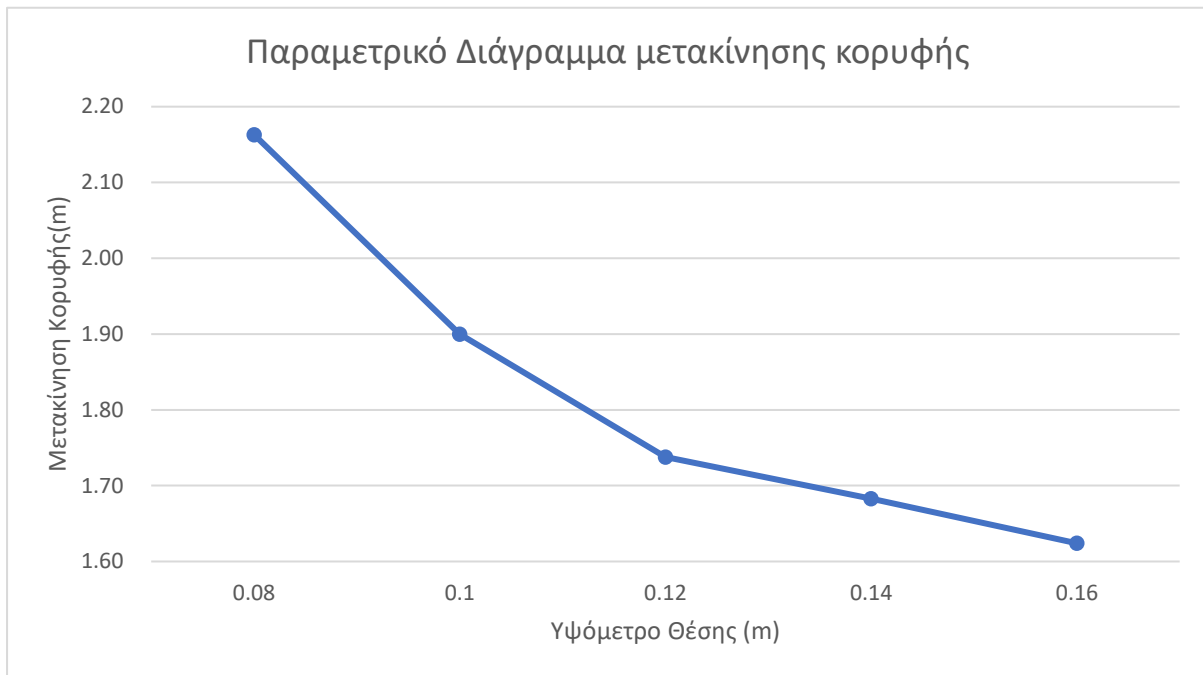
### 3.3.4.1 Παραμετρικά Διαγράμματα

Η αλλαγή γεωμετρίας, ανεξάρτητα από τις αλλαγές που επιφέρει, στα πλαίσια της διερεύνησης της συμπεριφοράς ενός δομικού συνόλου, μπορεί να δημιουργεί, ανάλογα με την εποχή και το οικονομικό τοπίο διαφορετικές επιλογές σχετικά με το πιο εξ' αυτών μπορεί να αποτελέσει τη βέλτιστη επιλογή.

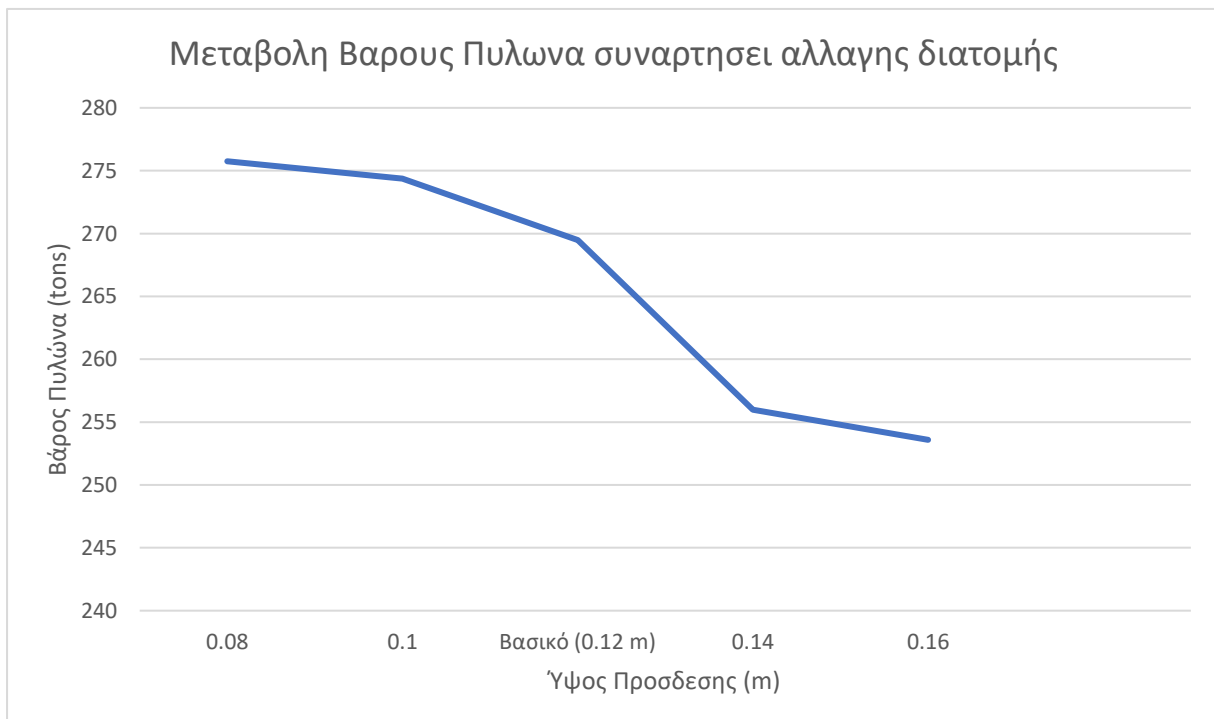
Αξίζει λοιπόν να διερευνηθεί η μεταβολή μιας παραμέτρου όπως η διατομή των καλωδίων, με διαφορετικό τρόπο κατασκευής και διαφορετικό υλικό από τον πυλώνα, μπορεί να φέρει θετικό ή αρνητικό πρόσημο μετά τη βελτιστοποίηση των μοντέλων από την αυξομείωση του υλικού.

Σε πρώτη φάση, διακρίνουμε τις μεταβολές βάρους του πυλώνα με βασική κατεύθυνση τον οικονομικότερο σχεδιασμό, καθώς και τη μεταβολή της μετακίνησης κορυφής βάσει της μεταβολής της παραμέτρου.

Τα παραμετρικά διαγράμματα, όπως διαμορφώθηκαν από τη βελτιστοποίηση, στα Εικ. 3-40 και 3-41,



Εικόνα 3-40 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφής



Εικόνα 3-41 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής βάρους πυλώνων



Τόσο η μεταβολή του βάρους όσο και η μετακίνηση κορυφής διαγράφουν μια σταθερά μειωτική συμπεριφορά με τη αύξηση της διατομής των καλωδίων. Το ζητούμενο είναι αν αυτές οι μεταβολές στο βάρος που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση δικαιολογούν ή όχι τη μεταβολή της διατομής.

Στους παρακάτω πίνακες, φαίνονται αναλυτικά τα προαναφερθέντα μεγέθη, Πίν. 3-16 και Πίν. 3-17,

*Πίνακας 3-16 : Μεταβολή βάρους πυλώνα ανά διατομή*

Διατομή (m)	Βάρος πυλώνα (tons)
0.08	275.75
0.1	274.37
Βασικό (0.12 m)	269.48
0.14	255.98
0.16	253.59

*Πίνακας 3-17 : Μετακίνηση κορυφής ανά διατομή*

Διατομή Καλωδίου (m)	Μετακίνηση κορυφής βελτιστα (m)	Μετακίνηση κορυφής στα αρχικά (m)
0.08	2.163	2.178
0.1	1.9	1.904464
0.12	1.7379	1.7379
0.14	1.683	1.638034
0.16	1.624	1.571639

Επιπροσθέτως, παρατίθεται και η αλλαγή του βάρους των καλωδίων ανά περίπτωση, ώστε να περάσουμε στις αναμενόμενες αντιπαραβολές, Πίν. 3-18,

*Πίνακας 3-18 : Μεταβολή βάρους καλωδίων ανά διατομή*

Διατομή (m)	Βάρος Καλωδίων (tons)
0.08	10.4
0.1	16.25
Βασικό (0.12 m)	23.4

0.14	31.85
0.16	41.6

Στην περίπτωση της μείωσης της διατομής στα 0.08 m, έχουμε πρόσθεση βάρους στον πυλώνα 11.27 (μεταβολή 4.18%) τόνους χάλυβα, εν αντιθέσει με τα καλώδια που εξοικονομείται δομικό υλικό της τάξης των 13 τόνων (μεταβολή 55.5%) σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες.

Αντίστοιχα, όταν αυξάνεται η διατομή των καλωδίων στα 0.16 m, λειτουργώντας ευμενώς ως προς τον πυλώνα, έχουμε μείωση βάρους στον πυλώνα 15.89 (μεταβολή 5.9%) τόνους χάλυβα, εν αντιθέσει με τα καλώδια που προστίθεται δομικό υλικό της τάξης των 18.2 τόνων (μεταβολή 77.7%).

### 3.4 Προένταση καλωδίων

Σημαντικό βήμα στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των καλωδίων αποτελεί η προένταση. Η διπτή φύση του δομικού συνόλου με τον πυλώνα ουσιαστικά να λειτουργεί ως πρόβολος όταν δεν υπάρχει κάποιος περιοριστικός μηχανισμός στις κινήσεις του, ενώ όταν παρουσιάζεται ο καλωδιωτός φορέας ως υποστηρικτικό σύνολο παρατηρείται άτυπος χωρισμός σε δύο τμήματα, άνωθεν και κάτωθεν της πρόσδεσης.

Η γωνία πρόσδεσης των καλωδίων ευθύνεται για την διαμόρφωση των συνιστωσών δυνάμεων, όπου στο σημείο πρόσδεσης διακρίνουμε με την ανάπτυξη της προένταση συνιστώσες δυνάμεις τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα (αξονικά). Η αύξηση της προέντασης δεν συνεπάγεται σε κάθε περίπτωση και ανάλογη αύξηση της αδρανειακής ευαισθησίας του δομικού συνόλου όπως θα φανεί και παρακάτω.

Το βασικό μοντέλο αποτελείται από καλώδια διατομής 0.12, τύπου PV 1450 της Pfeifer, με σταθερή προένταση στα 4500 kN, δηλαδή το 32% της αντοχής τους, ενώ το σταθερό βήμα κάθε φορά βρίσκεται στα 1500 kN. Το παραμετρικό φάσμα διαμορφώθηκε με κατώτερο όριο τα 1500 kN, ενώ το άνω φράγμα τέθηκε στα 7500 kN, όπου και αποτελεί το 51.7% της αντοχής των καλωδίων.

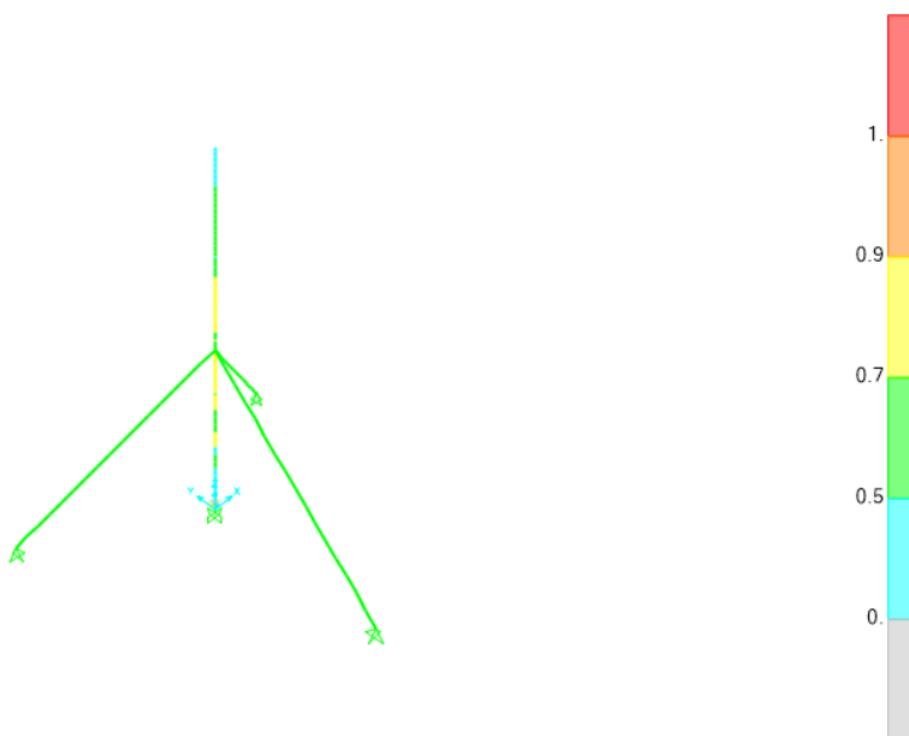
#### 3.4.1 Βαθμός Αξιοποίησης

Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη παραμετρική ανάλυση είναι ο τρόπος που αποκρίνεται το σύστημα στις βηματικές μεταβολές. Οι βαθμοί αξιοποίησης αποτελούν το μέγεθος με τη μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές της συγκεκριμένης παραμέτρου, ειδικότερα στα μέλη κάτω από το σημείο πρόσδεσης. Η απόκριση του συστήματος ανάλογα με τη μεταβολή της προέντασης παρουσιάζει ένα τρίπτυχο μεγεθών που αλληλεξαρτώνται.

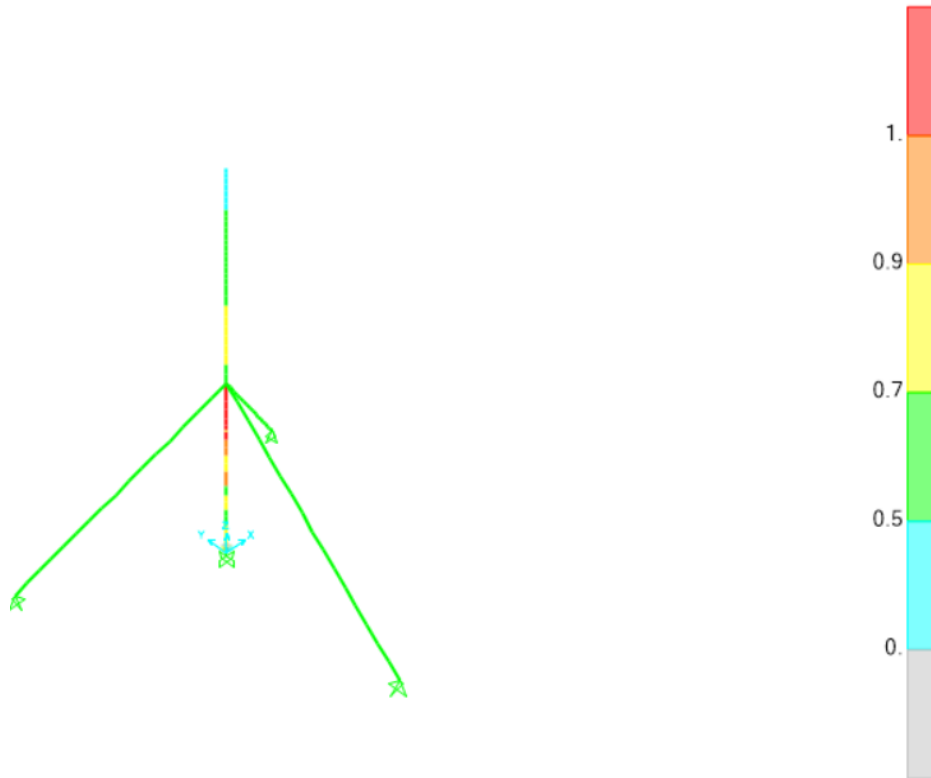
Η μείωση της προέντασης, όπως είναι λογικό θα προκαλέσει μείωση των βαθμών αξιοποίησης στα μέλη του πυλώνα λόγω μείωσης των αξονικών φορτίων που επιδρούν μόνιμα, με αποτέλεσμα να φαίνεται αρχικά ότι η μεταβολή λειτουργεί ευμενώς.

Ακολουθώντας όμως τη βασική νόρμα που επιβάλλει τον περιορισμό των μετακινήσεων κορυφής σε επίπεδα κοντά στο αρχικό, μεταβολή που αυξήθηκε με τη μείωση της προέντασης, καλεί το Μηχανικό να επιλέξει τα όρια ανοχής των μεταβολών και πως μπορεί να καταλήξει στη βέλτιστη λύση. Η αντιδιαμετρική λογική διαδικασία ακολουθείται και στην περίπτωση αύξησης της προέντασης.

Αρχικά, παρουσιάζονται σε χρωματική κλίμακα τόσο η κατώτερη περίπτωση των 1500 kN όσο και αυτή των 7500 kN , που αποτελούν και τα παραμετρικά όρια , Εικ. 3-42 και Εικ. 3-43,



Εικόνα 3-42: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Προένταση 1500 kN



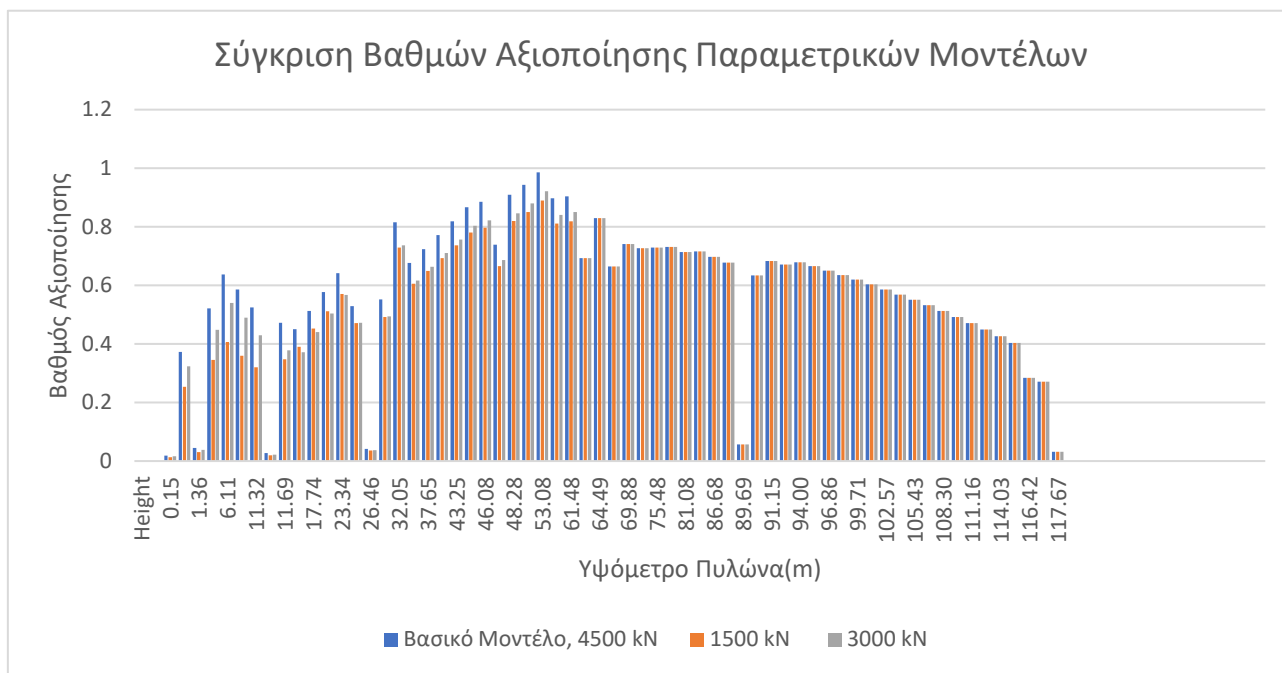
Εικόνα 3-43: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Προένταση 7500 kN

Διακρίνεται η έντονη διαφορά μεταξύ των μοντέλων των παραμετρικών άκρων, με την κατακόρυφη συνιστώσα της προέντασης να αυξάνεται προκαλώντας σε πολλαπλά μέλη αστοχία με την άνοδο της. Αντίθετα, παρουσιάζεται η πτώση των βαθμών αξιοποίησης όπου διαμορφώνονται πλέον στα επίπεδα  $0.75-0.85 < 1$  κάτω από την πρόσδεση.

#### 3.4.1.1 Παραμετρικά μοντέλα προέντασης μικρότερης της αρχικής

Το βασικό μοντέλο είναι διαμορφωμένο με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι κατατοπιστικός δείκτης αλλαγών. Δεν βελτιστοποιήθηκε ούτε με βάση το μικρότερο δυνατό πυλώνα με μεγάλες όμως μετακινήσεις κορυφής, ούτε με βάση τη μικρότερη δυνατή μετακίνηση κορυφής που θα σήμαινε αισθητά μεγαλύτερη χρήση δομικού υλικού. Αντιθέτως, αποτελεί μοντέλο που βρίσκεται μεταξύ των δύο αυτών αξιωματών, δίνοντας μια μέση λύση προς υλοποίηση, καθρεπτίζοντας μεγάλη αποδοτικότητα με στοχευμένους συμβιβασμούς. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα πολλαπλών και έντονων μεταβολών, αποτελώντας έτσι τη διερευνητική βάση.

Τα μοντέλα με μικρότερες προεντάσεις αναπτύσσουν και μικρότερους βαθμούς αξιοποίησης, όπως διακρίνεται παρακάτω, Εικ. 3-44



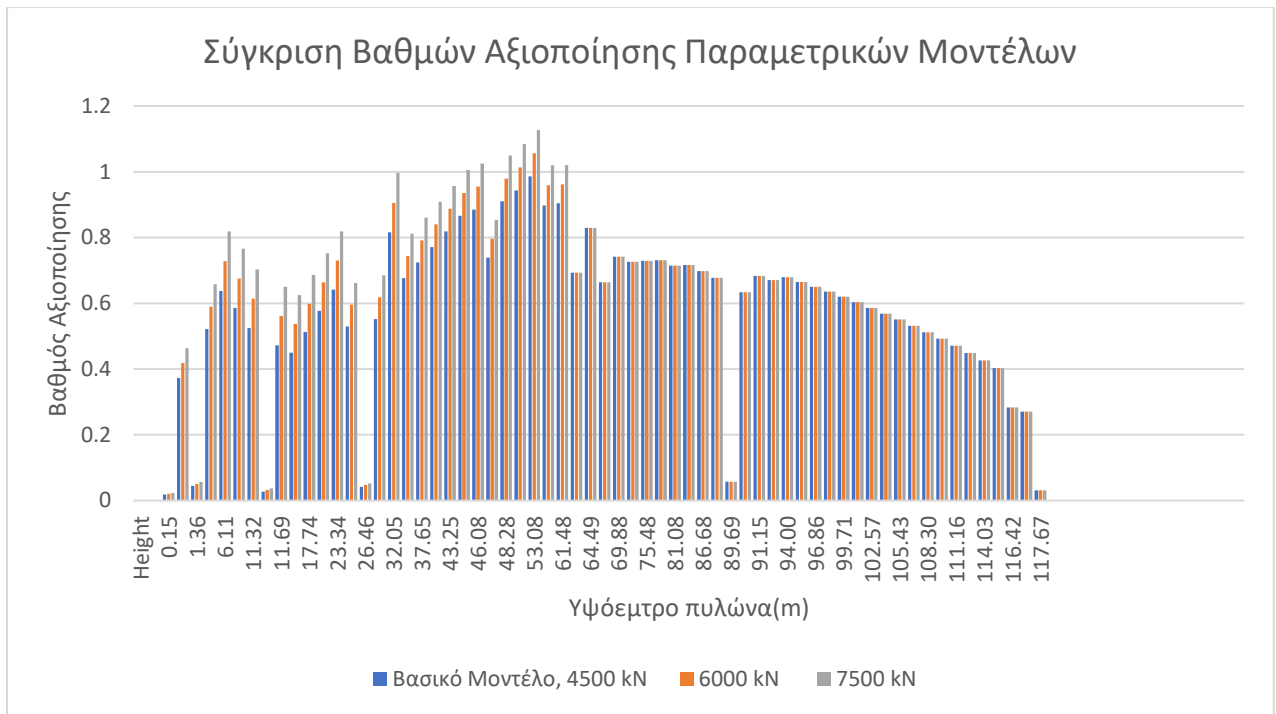
Εικόνα 3-44 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης προεντάσεων μικρότερων της αρχικής

Στο κάτω τμήμα οι διαφοροποιήσεις υπάρχουν σε όλο το υψομετρικό φάσμα, ενώ μετά της πρόσδεση οι βαθμοί αξιοποίησης και πάλι ταυτίζονται, ισχυρό δείγμα της απομόνωσης του άνωθεν τμήματος, το οποίο λειτουργεί ανεξάρτητα.

### 3.4.1.2 Παραμετρικά μοντέλα μεγαλύτερης προέντασης της αρχικής

Αυξάνοντας την προένταση στα καλώδια, με τον πυλώνα να λειτουργεί εξαρχής κοντά στο όριο σε αρκετές περιπτώσεις μελών, παρατηρούνται αρκετές αστοχίες που αυξάνονται με την άνοδο της αξονικής που μεταφέρεται στον πυλώνα.

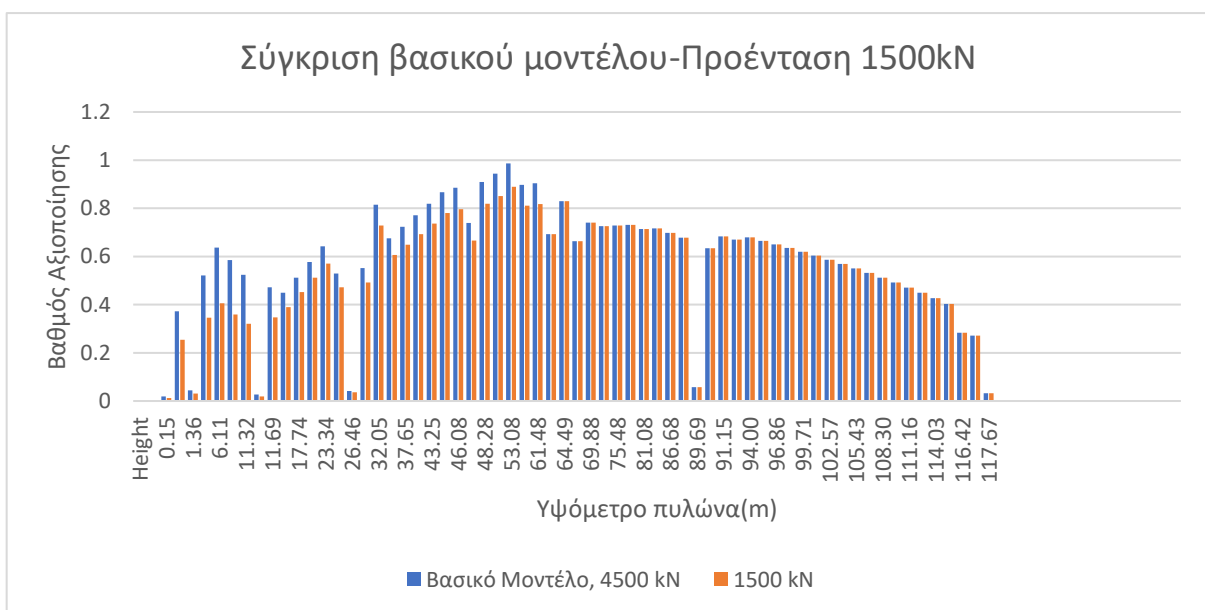
Τα μοντέλα με τις μεγαλύτερες προεντάσεις των 6000 kN και των 7500 kN, χρησιμοποιούν το 41.3% και το 51.7% της αντοχής των καλωδίων αντίστοιχα, με το συγκριτικό γράφημα των βαθών αξιοποίησης να διαμορφώνεται ως εξής, Εικ. 3-45,



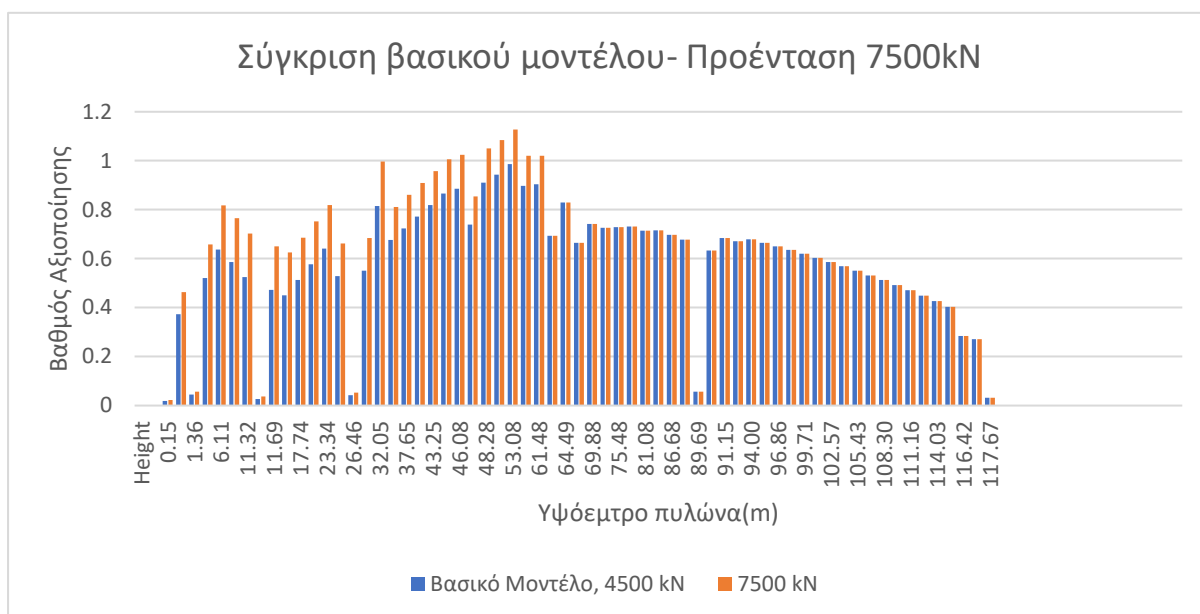
*Εικόνα 3-45 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης προεντάσεων μεγαλύτερων της αρχικής*

### 3.4.1.3 Παραμετρικά άκρα

Τα παραμετρικά άκρα, των 1500 kN και των 7500 kN προέντασης σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο, όπως φαίνεται στο Εικ. 3-46 και 3-47, όπου στο κάτω της πρόσδεσης τμήμα είναι είτε σταθερά μικρότεροι είτε σταθερά μεγαλύτεροι



*Εικόνα 3-46 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης αρχικής και μικρότερης προέντασης*



Εικόνα 3-47 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης αρχικής και μεγαλύτερης προέντασης

### 3.4.2 Μετακινήσεις

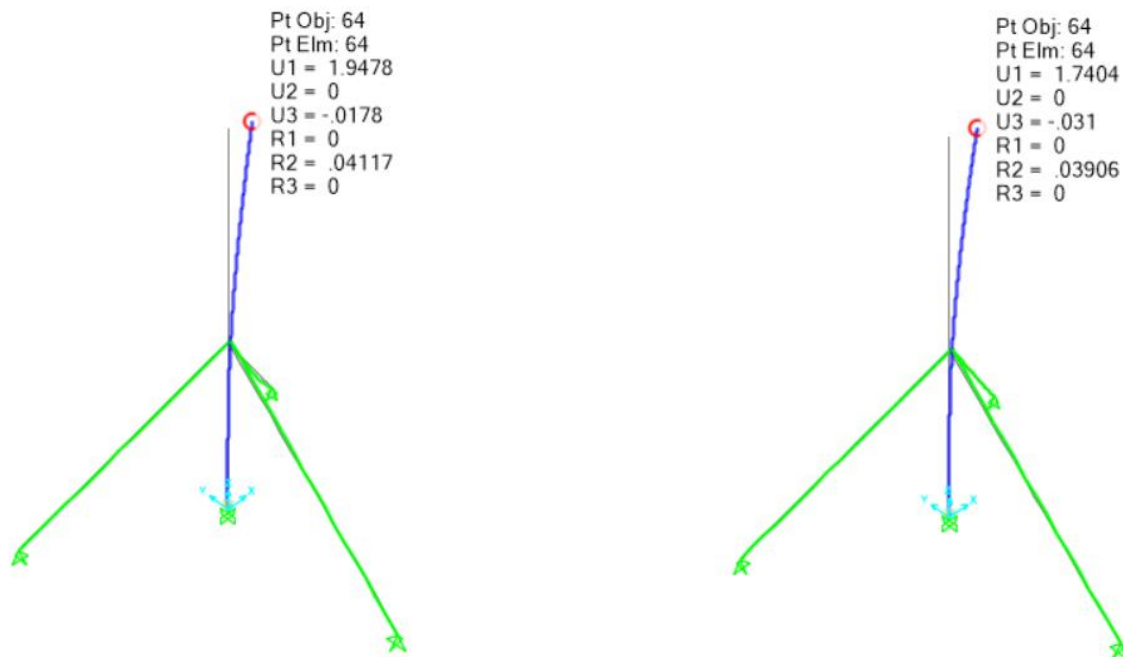
Η παραμετρικές αναλύσεις πέραν της συμπεριφοράς ενός δομικού συνόλου εξετάζουν και τις στοχευμένες κινήσεις ενός μελετητή να αποφασίσει αν αξίζει η όχι να προβεί σε αλλαγές τέτοιες που αφήνουν χώρο για ελιγμούς και ευελιξία σε άλλες πτυχές του σχεδιασμού, έχοντας ως απώτερο σκοπό πάντα τις περισσότερες συμφέρουσες προτάσεις.

Οι μετακινήσεις κορυφής του πυλώνα βάσει των αλλαγών της προέντασης επιβεβαιώνουν την παραπάνω διατύπωση, διότι οι αλλαγές τις παραμέτρου έχουν αρκετά δυσανάλογο αντίκτυπο στην απόκριση του συστήματος.

Η μείωση της προέντασης είτε στα 3000kN, είτε στα 1500 kN που πρόκειται για το κατώτερο όριο, δίνουν αποκλίσεις της τάξης των εκατοστών, ενώ η αντίθετη πορεία με την αύξηση της προέντασης, δίνει μείωση της μετακίνησης κορυφής σε επίπεδο χιλιοστών, μια τάξη μεγέθους διαφορά.

Φυσικά, τα παραπάνω υποδηλώνουν πως η αρχική προένταση των 4500 kN, είναι και το σημείο εκείνο όπου ο κόμβος που αποτελεί την πρόσδεση μετατρέπεται σε πλήρως διαχωριστικό σημείο, καθώς το πάνω τμήμα λειτουργεί παρά τις μεγάλες αυξήσεις, ανεξάρτητα.

Οι μετακινήσεις κορυφής, για τα δύο παραμετρικά άκρα, όπως παρουσιάζονται στο Εικ. 3-48,



Εικόνα 3-48: Μετακίνηση κορυφής για τις περιπτώσεις προέντασης 1500kN και 7500 kN αντίστοιχα.

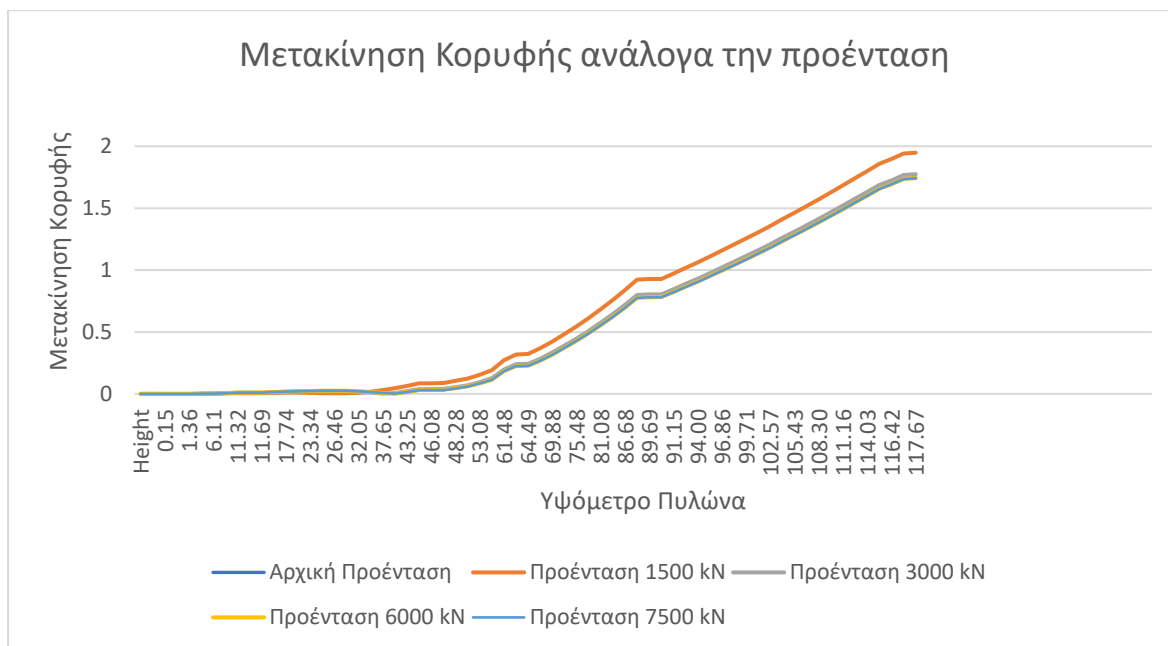
Για τα ενδιάμεσα μοντέλα, η μετακινήσεις κορυφής μεταβάλλονται όπως, Πίν. 3-19

Πίνακας 3-19 : Μετακίνηση κορυφής πυλών ανά προένταση καλωδίου

Θέση πρόσδεσης	Αρχική Προένταση	Προένταση 1500 kN	Προένταση 3000 kN	Προένταση 6000 kN	Προένταση 7500 kN
Μετακίνηση κορυφής (m)	1.7462	1.9478	1.7739	1.7423	1.7404

Με το γράφημα που αναπαριστά την πορεία των μεταβολών για κάθε μοντέλο να είναι Εικ. 3-49,



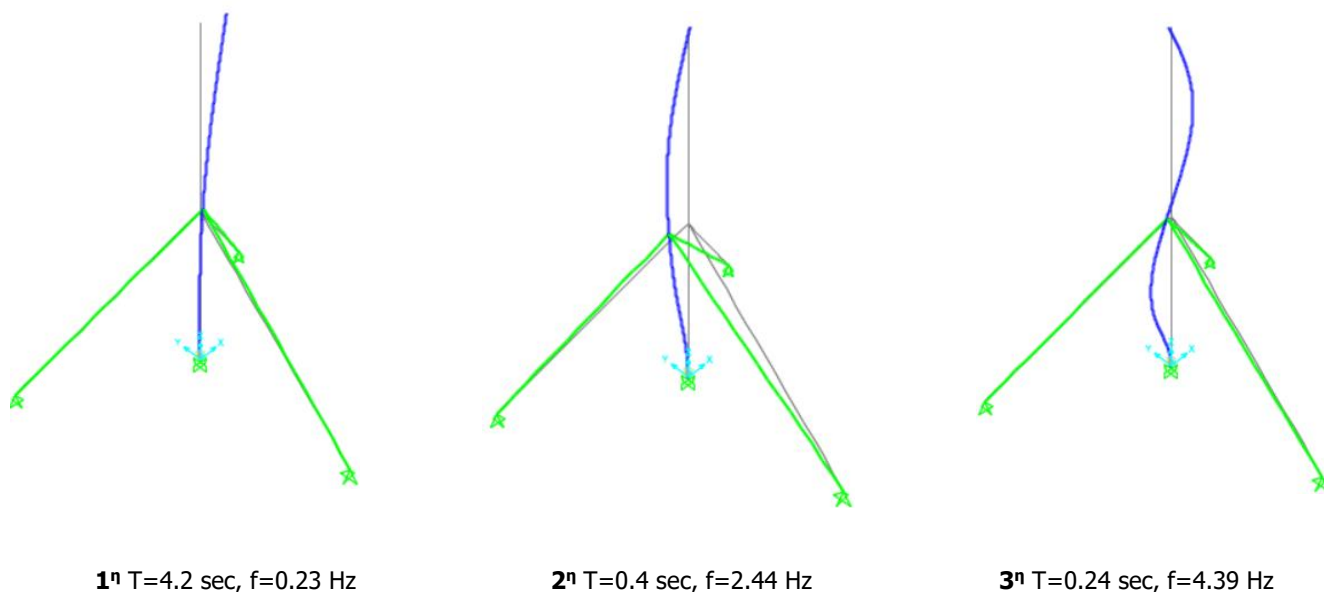


Εικόνα 3-49 : Μετακίνηση κορυφής για τις όλες περιπτώσεις

Πέραν της προέντασης των 1500 kN διακρίνουμε πόσο εγγύτερα βρίσκονται οι υπόλοιπες, ειδικά οι μετακινήσεις που προκύπτουν από τις αυξήσεις τις προέντασης.

### 3.4.3 Ιδιοσυχρότητες – Ιδιομορφές

Με την ιδιομορφική ανάλυση, μέσω του load case MODAL, μας έδωσε τις εξής 3 πρώτες ιδιομορφές, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



Εικόνα 3-50: Οι πρώτες 3 ιδιομορφές του μοντέλου προέντασης 1500 kN

Οι ιδιοπερίοδοι για τις 12 πρώτες ιδιομορφές όπως φαίνονται στον πίνακα :

Πίνακας 3-20 : Ιδιοπερίοδοι ανά προένταση καλωδίων

Ιδιομορφές	Ιδιοπερίοδοι sec				
	Αρχική Προένταση (kN)	Προένταση 1500 kN	Προένταση 3000 kN	Προένταση 6000 kN	Προένταση 7500 kN
1	4.470	4.484611	4.482575	4.478702	4.476792
2	0.484	0.474053	0.473543	0.472569	0.472087
3	0.243	0.238905	0.238902	0.238895	0.238891
4	0.211	0.210985	0.21098	0.210972	0.210968
5	0.121	0.120513	0.120504	0.120485	0.120476
6	0.072	0.071086	0.071086	0.071086	0.071086
7	0.053	0.05125	0.051248	0.051244	0.051241
8	0.050	0.049699	0.049698	0.049695	0.049693
9	0.037	0.036593	0.036593	0.036593	0.036593
10	0.030	0.029255	0.029254	0.029253	0.029252
11	0.023	0.0232	0.0232	0.0232	0.0232
12	0.023	0.023149	0.023149	0.023149	0.023149

Αντίστοιχα οι ιδιοσυχνότητες,

Πίνακας 3-21 : Ιδιοσυχνότητες ανά προένταση καλωδίων

Ιδιομορφες	Ιδιοσυχνότητες rad/sec			
	Προένταση 1500 kN	Προένταση 3000 kN	Προένταση 6000 kN	Προένταση 7500 kN
1	1.401054756	1.401691196	1.402903035	1.4035018
2	13.25419118	13.26847139	13.2958071	13.30938424
3	26.29990633	26.3003094	26.30108363	26.30146948
4	29.78031508	29.78092293	29.78208822	29.78266782
5	52.13693577	52.14106504	52.14898264	52.15292162
6	88.3886741	88.38867455	88.38867543	88.38867586
7	122.5982621	122.6037284	122.6141938	122.6193927
8	126.4239493	126.427794	126.4351573	126.4388164

9	171.7061013	171.7063003	171.7066813	171.7068706
10	214.7758419	214.7802038	214.7885549	214.7927034
11	270.8225795	270.8232181	270.8244401	270.8250468
12	271.4184007	271.4206395	271.4249256	271.4270547

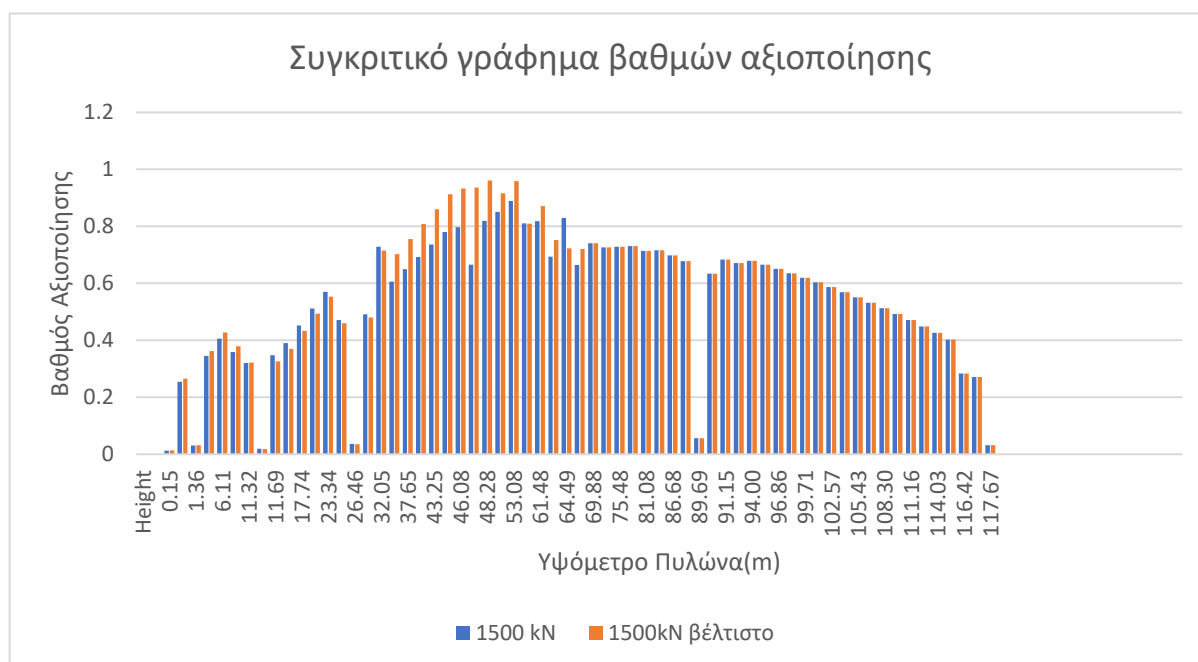
### 3.4.4 Βελτιστοποίηση παραμετρικών μοντέλων

Όπως προαναφέρθηκε, η αλληλένδετη σχέση μεταξύ μετακίνησης κορυφής, βαθμών αξιοποίησης και προέντασης καλωδίων επιφέρει από πλευράς του μελετητή την ανάγκη σχεδιασμού με συγκεκριμένο τρόπο στην προσπάθεια του να βρεθεί ισορροπία μεταξύ των μεγεθών.

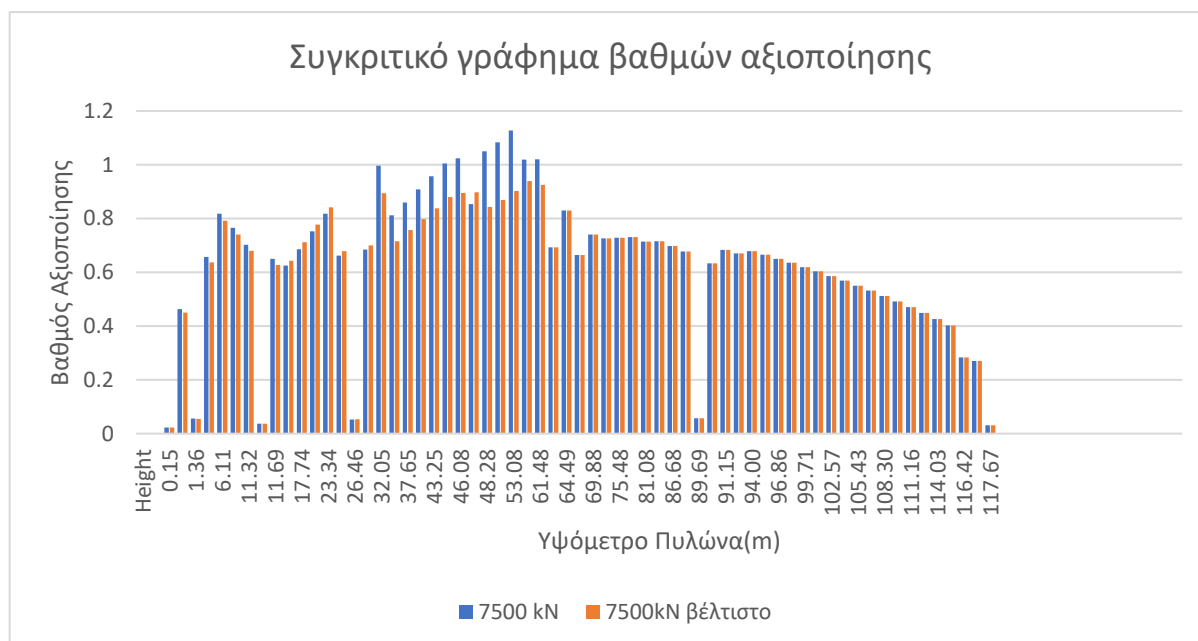
Η βελτιστοποίηση των παραμετρικών μοντέλων στην παρούσα μεταβολή γίνεται με κατευθυντήριο μοχλό αυτή την ισορροπία. Στην περίπτωση που οι βαθμοί αξιοποίησης μειώνονται, οι διατομές δεν επιλέγονται ώστε να λειτουργούν όσο πιο οριακά γίνεται, διότι αυτό επηρεάζει με τη σειρά του τη μετακίνηση της κορυφής. Επιπροσθέτως, όταν οι βαθμοί αξιοποίησης αυξάνονται, δεν γίνεται άκριτη αύξηση των διατομών για την όσο μικρότερη μετακίνηση κορυφής λόγω ανορθόδοξης κατασπατάλησης πόρων, εκτός φυσικά και αν επιβάλλεται από διαφορετικούς λόγους.

Ο οικονομικός σχεδιασμός, έτι μια φορά στοχεύει τη βελτιστοποίηση του κάτω της πρόσδεσης τμήματος, μιας και το άνω λειτουργεί με μηδαμινό επηρεασμό στις μεταβολές των βαθμών αξιοποίησης. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως, όσον αφορά τις μετακινήσεις των κόμβων καθ' ύψος του πυλώνα.

Ενδεικτικά, η βελτιστοποίηση των μοντέλων για τα παραμετρικά άκρα στα Εικ. 3-51 και Εικ. 3-52,



Εικόνα 3-51 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης προέντασης 1500 kN Αρχικού – Βέλτιστου



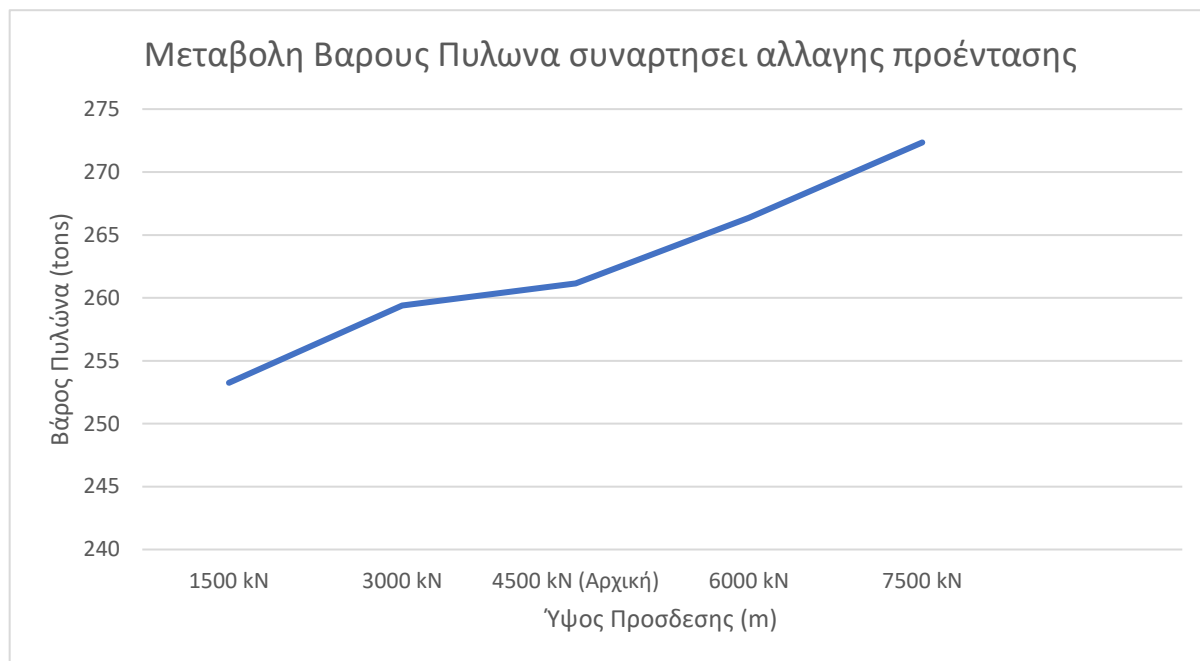
Εικόνα 3-52 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης προέντασης 7500 kN Αρχικού – Βέλτιστου

Οι διαφοροποιήσεις εντείνονται κυρίως στα μέλη κάτωθεν της πρόσδεσης, με τις διαφορές σε σχέση με το βασικό πυλώνα του μοντέλου, να είναι μεγαλύτερες από την αύξηση παρά με τη μείωση της προέντασης. Η αύξηση της προέντασης κατά 40% έφερε σε αστοχία 8 μέλη του πυλώνα.

#### 3.4.4.1 Παραμετρικά Διαγράμματα

Πέραν των προφανών αλλαγών των παραμετρικών άκρων, μέσω της διαδικασίας παρατηρήθηκαν βαθμηδόν αλλαγές στο σύνολο του φορέα είτε λόγω αύξησης είτε λόγω μείωσης της προέντασης. Οι διαφορές προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση των παραμετρικών μοντέλων, με το σχεδιασμό τους να κινείται γύρω από τη λογική διατήρησης των κρίσιμων μεγεθών όπως οι μετακινήσεις και το βάρος σε δόκιμα επίπεδα.

Η μεταβολή βάρους του πυλώνα, Εικ. 3-53



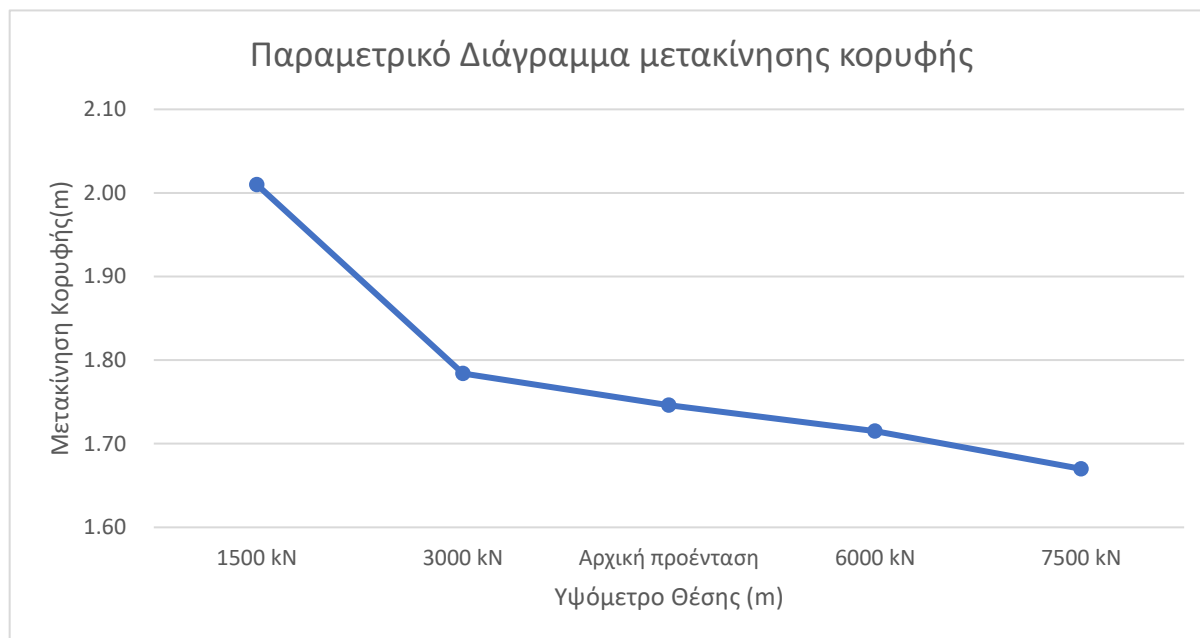
Εικόνα 3-53 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής βάρους πυλώνα

Όπου ο αντίστοιχος πίνακας Πίν. 3-22,

Πίνακας 3-22 : Μεταβολή βάρους βέλτιστου πυλώνα ανά προένταση

Βάρος (tons)	Προένταση
253.25	1500 kN
259.38	3000 kN
261.14	4500 kN (Αρχική)
266.36	6000 kN
272.35	7500 kN

Ενώ για την μεταβολή μετακίνησης κορυφής, Εικ. 3-54,



Εικόνα 3-54 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφής

Με τον αντίστοιχο πίνακα να είναι Πίν. 3-23,

Πίνακας 3-23 : Μεταβολή μετακίνησης κορυφής βέλτιστου πυλώνα ανά προένταση

Προένταση Καλωδίου (kN)	Μετακίνηση κορυφής βελτιστά (m)	Μετακίνηση κορυφής στα αρχικά (m)
1500 kN	2.01	1.9478
3000 kN	1.784	1.7739
Αρχική προένταση	1.7462	1.7462
6000 kN	1.715	1.7423
7500 kN	1.67	1.7404

Δειγματικά, η μείωση της προέντασης στα 1500 kN, επιφέρει αλλαγή βάρους πυλώνα κατά 7.89 tons (3% μεταβολή), με μετακίνηση κορυφής αυξημένη κατά 0.26m.

Αντίστοιχα, η αύξηση της προέντασης στα 7500 kN, επιφέρει αλλαγή βάρους πυλώνα κατά 11.21 tons (4.2% μεταβολή), με μετακίνηση κορυφής μειωμένη κατά 0.07m.

### 3.5 Προένταση ως ποσοστό ορίου αστοχίας

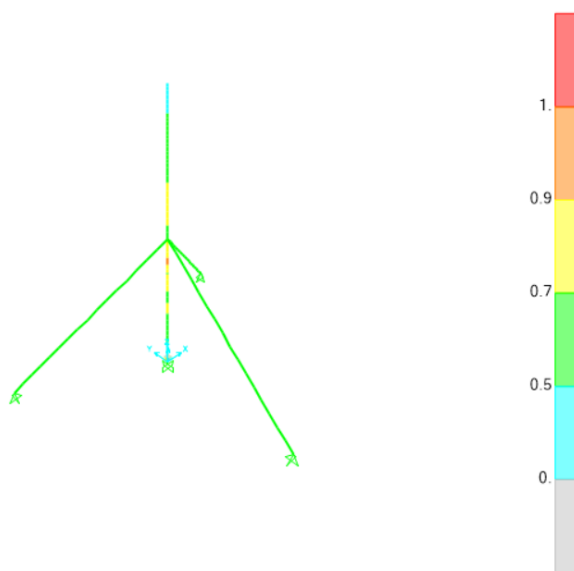
Σαν τελευταία παραμετρική, επελέγη ο συνδυασμός μεταβολής τόσο της διατομής όσο και της προέντασης των καλωδίων με απώτερο σκοπό να διατηρήσουμε το ίδιο ποσοστό συμμετοχής όπως με το αρχικό μοντέλο. Το ποσοστό συμμετοχής αυτό για το αρχικό καλώδιο των 12mm με προένταση στα 4500 kN, βρίσκεται στο 31%. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τις υπάρχουσες καλωδιωτές κατασκευές, το συγκεκριμένο ποσοστό κυμαίνεται στο φάσμα του 25-45%, με γνώμονα για τον ακριβή αριθμό προέντασης να επιλέγεται βάσει πολλών παραγόντων, όπως η μετακίνηση κορυφής, τα υλικά διατομής ή κάποια αναπόδραστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Η παραμετρική ανάλυση διαμορφώθηκε με τις χαρακτηριστικές διατομές που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί άνωθεν, με αυτές να κυμαίνονται στα 80mm, 100mm, 120mm, 140mm, 160mm.

#### 3.5.1 Βαθμός Αξιοποίησης

Οι γενικότερες παρατηρήσεις που μέχρι στιγμής έχουν διατυπωθεί αναφορικά με τη συμπεριφορά του καλωδιωτού πυλώνα, ακολουθούν παρεμφερή πορεία στη διπαραμετρική πλέον ανάλυση, με σταθερό λόγο προέντασης/αστοχίας όμως, με τον πρώτο προς ανάλυση τομέα να είναι οι βαθμοί αξιοποίησης και το πως επηρεάζονται από τη διττή μεταβολή.

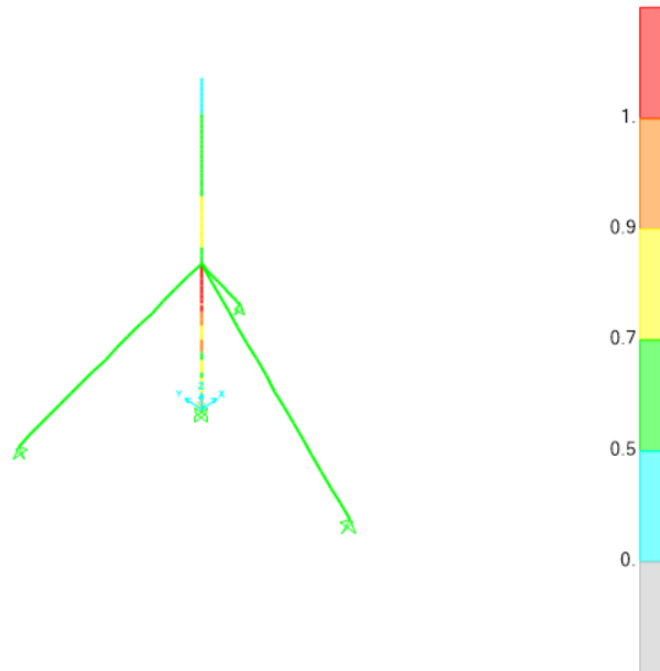
Παρατίθενται οι βαθμοί αξιοποίησης, όπως φαίνονται στα Εικ. 3-55, Εικ. 3-56, για τις δύο περιπτώσεις των παραμετρικών άκρων, το μοντέλο διατομής 80mm και 160mm.



Εικόνα 3-55: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Διατομή 0.08m, Προένταση 1981kN

Οι μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν έγινε βάσει των παραπάνω με τις κατηγορίες να διαμορφώνονται ως :

- i) Διατομή 0.8m (80mm) και προένταση 1981 kN
- ii) Διατομή 0.10m (100mm) και προένταση 3131 kN
- iii) Διατομή 0.12m (120mm) και προένταση 4500 kN
- iv) Διατομή 0.14m (140mm) και προένταση 6200 kN
- v) Διατομή 0.16m (160mm) και προένταση 8060 kN



Εικόνα 3-56: Χρωματική Απεικόνιση βαθμών Αξιοποίησης- Διατομή 0.16m, Προένταση 8060 kN

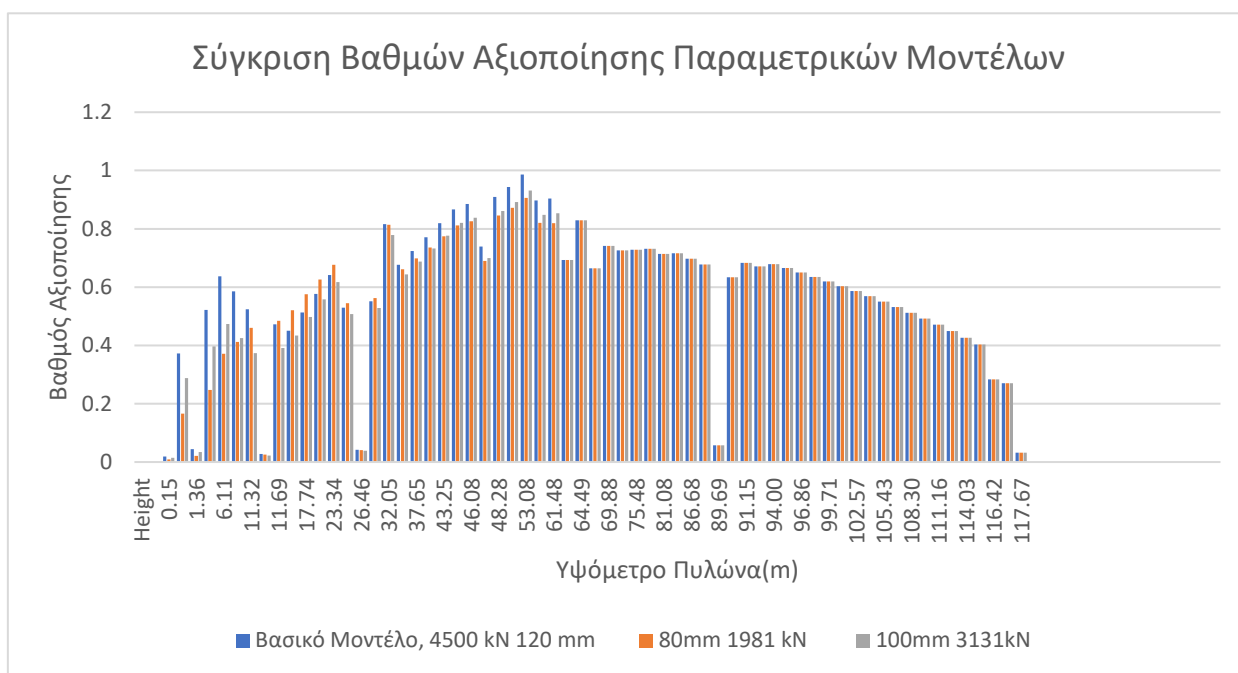
Το τμήμα κάτω της πρόσδεσης επηρεάζεται κατά κόρον, με τη μικρότερη διατομή και προένταση ανακουφίζει μεν τα μέλη, αυξάνει σημαντικά όμως τη μετακίνηση κορυφής, εν αντιθέσει το έτερο παραμετρικό άκρο να προκαλεί αστοχία σε αρκετά μέλη, μειώνοντας τη μετακίνηση κορυφής, αλλά και θέτοντας ανάγκη αύξησης διατομών.



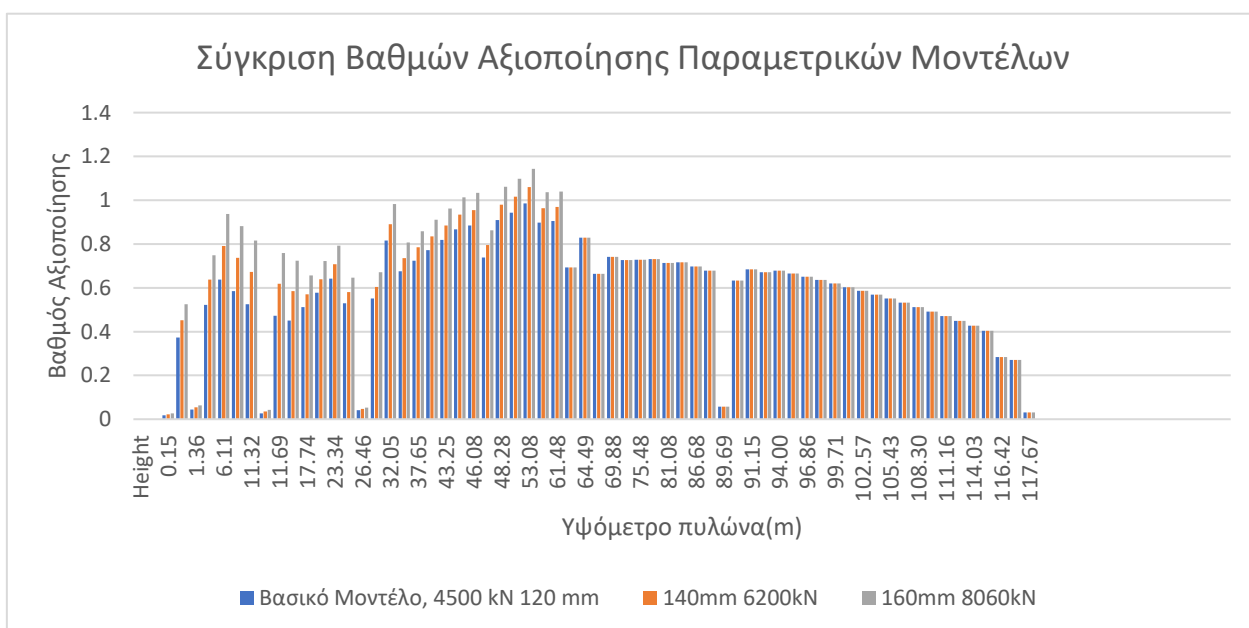
### 3.5.1.1 Σύγκριση βασικού μοντέλου με τα παραμετρικά

Με τη διπαραμετρική ανάλυση και το σταθερό ποσοστό στο 31%, οι διαφοροποιήσεις των βαθμών αξιοποίησης είναι πιο αισθητές σε σχέση τις πρότερες απομονωμένες μεταβολές.

Οι βαθμοί αξιοποίησης μεταβάλλονται ως φαίνεται στα Εικ. 3-57 και Εικ. 3-58,



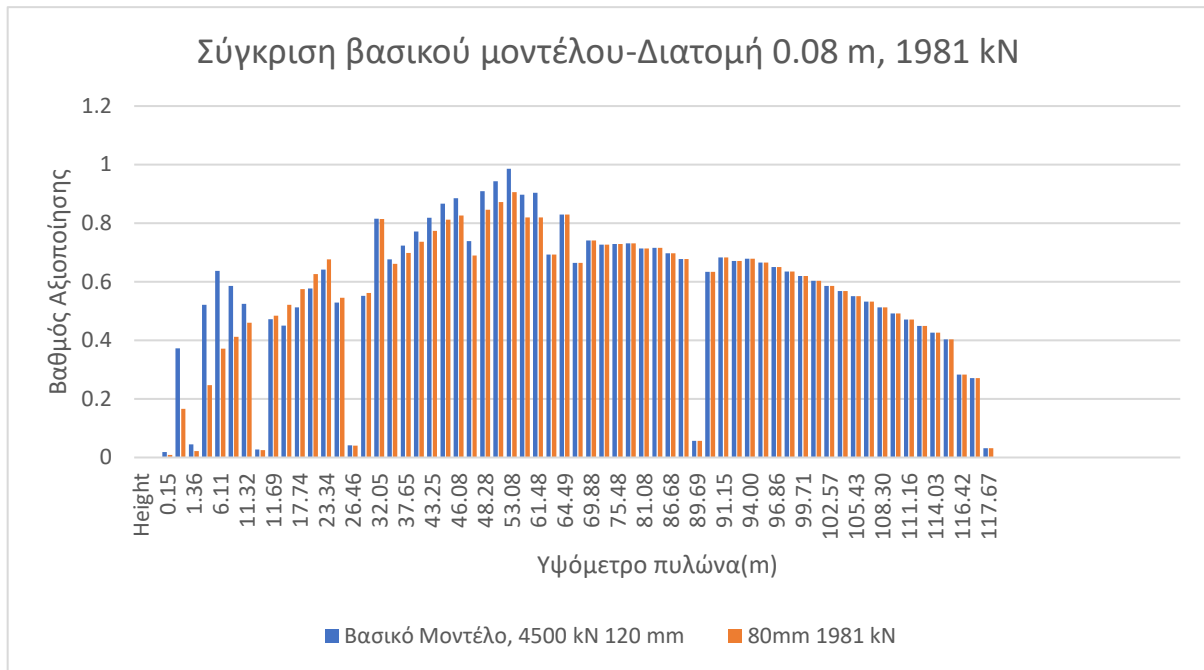
Εικόνα 3-57 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης βασικού μοντέλου με τις περιπτώσεις I, II



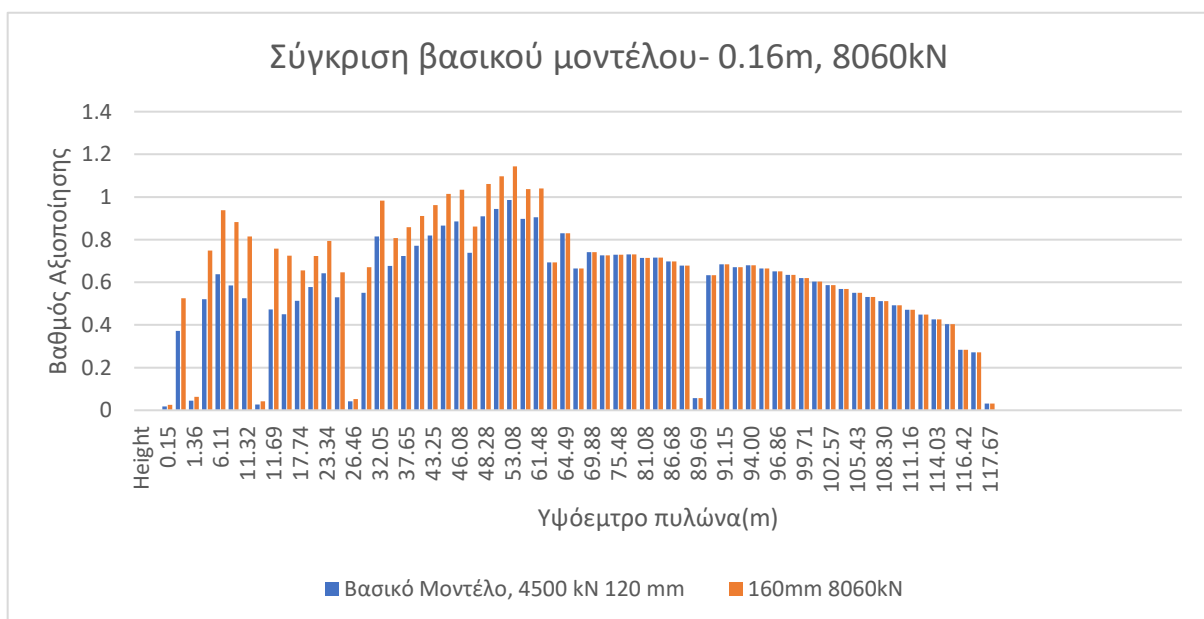
Εικόνα 3-58 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης βασικού μοντέλου με τις περιπτώσεις IV, V

Όπως αναμενόταν, οι βαθμοί αξιοποίησης στα ακραία παραμετρικά μοντέλα έχουν πιο αισθητή διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο βήμα συγκριτικά με όποια άλλη παράθεση. Ειδικότερα στην περίπτωση V, οι βαθμοί αξιοποίησης αυξάνονται και ξεπερνούν τη τιμή της μονάδας σε 7 περιπτώσεις.

Παρακάτω, για περισσότερο διακριτή αναπαράσταση, δημιουργούνται τα γραφήματα σύγκρισης του αρχικού με τα δύο μόνο άκρα, ώστε να δοθεί έμφαση στο φάσμα των αλλαγών, Εικ. 3-59, Εικ. 3-60,



Εικόνα 3-59 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης βασικού μοντέλου με την περίπτωση I

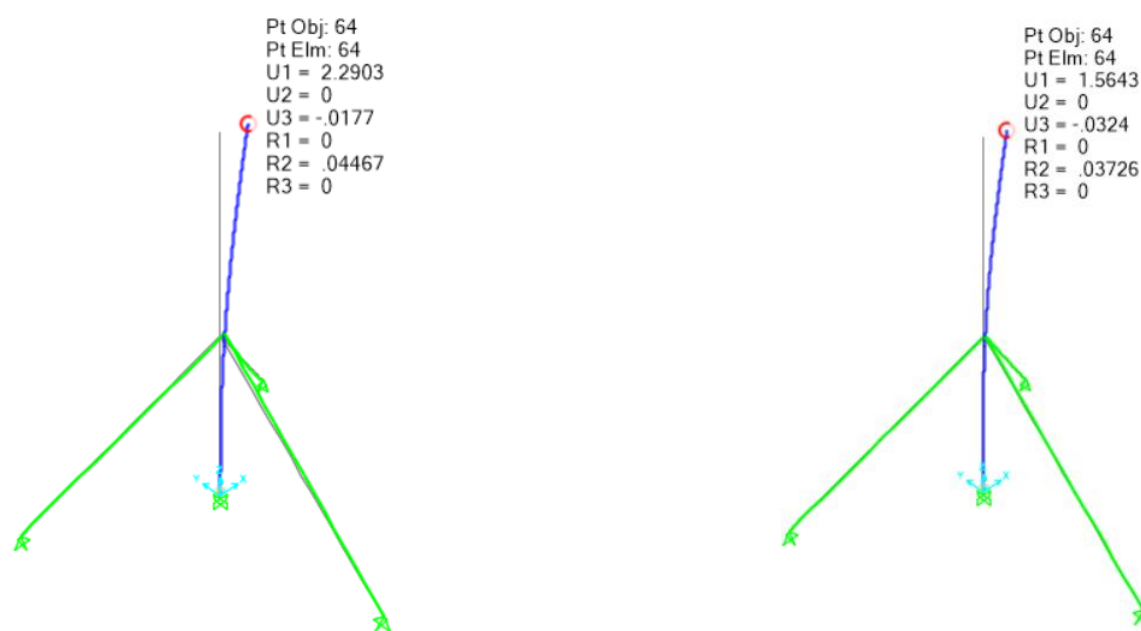


Εικόνα 3-60 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης βασικού μοντέλου με την περίπτωση V

### 3.5.2 Μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις κορυφής είναι μέρος του μεταβαλλόμενου συνόλου διατομές πυλώνων - διατομή καλωδίου – προένταση – μετακινήσεις, όπου στη διπαραμετρική μεταβολή οι διαφορές είναι αισθητές και μεταβάλλονται εκατέρωθεν της βασικής αποδεκτής μετακίνησης των 1.74 m.

Οι μετακινήσεις κορυφής, για τα δύο παραμετρικά άκρα, όπως παρουσιάζονται στο Εικ. 3-61,



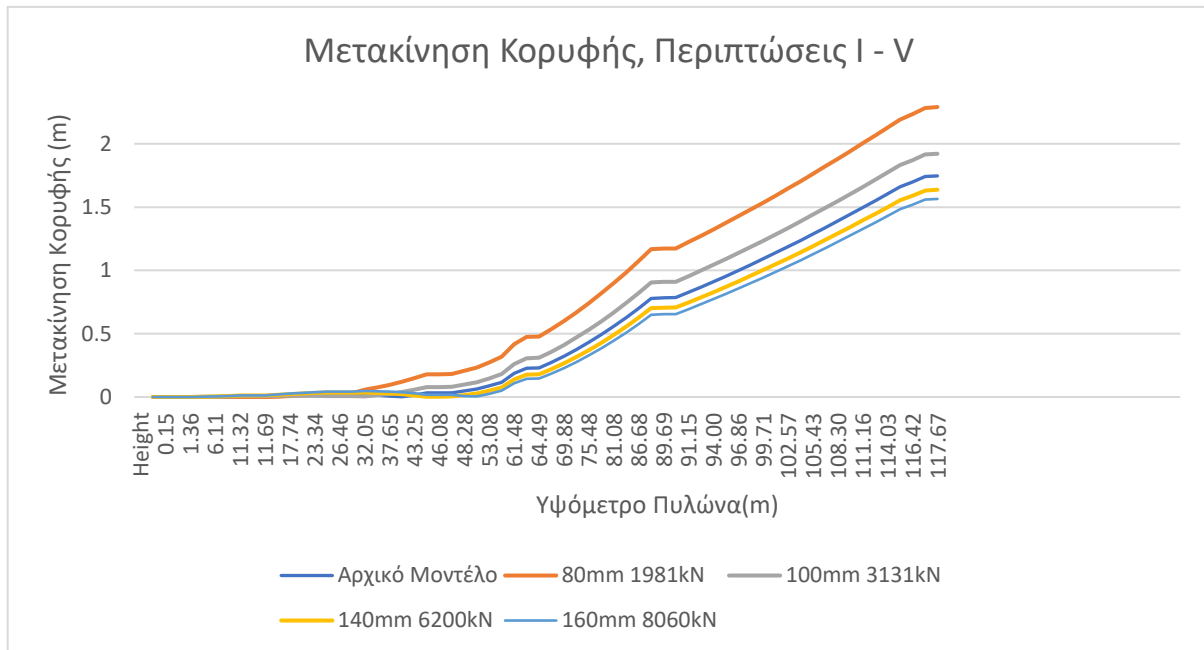
Εικόνα 3-61: Μετακίνηση κορυφής για τις περιπτώσεις προέντασης I και V αντίστοιχα.

Για τα ενδιάμεσα μοντέλα, η μετακινήσεις κορυφής μεταβάλλονται όπως, Πίν. 3-24,

Πίνακας 3-24 : Μετακίνηση κορυφής πυλώνων ανά περίπτωση

Πρόσδεση, Διατομή	Αρχική Θέση	80mm 1981 kN	100mm 3131kN	140mm 6200kN	160mm 8060kN
Μετακίνηση κορυφής (m)	1.7462	2.290267	1.921261	1.637199	1.564338

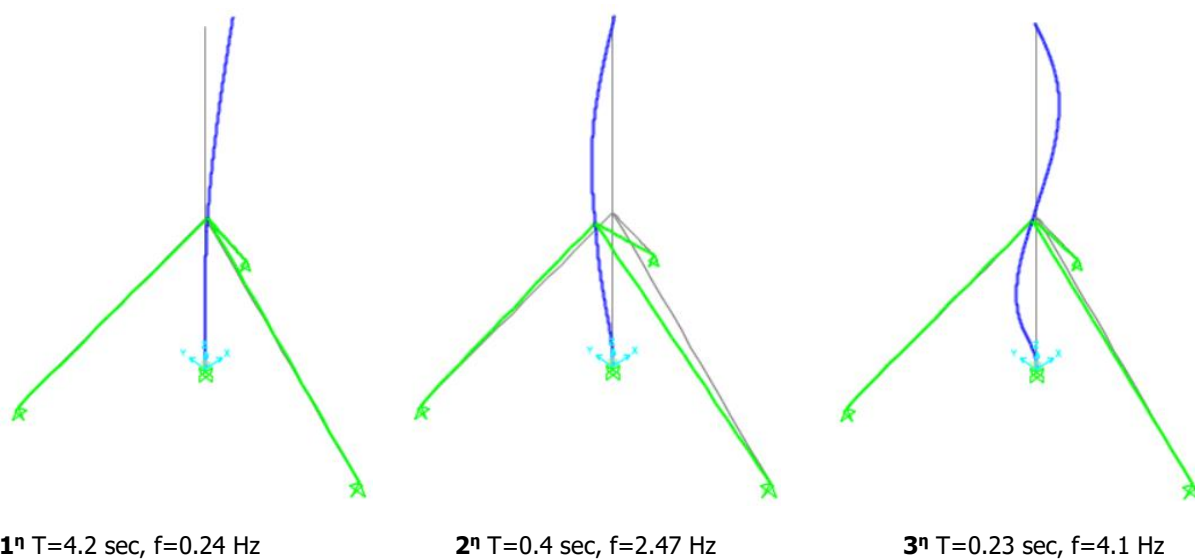
Με το γράφημα που αναπαριστά την πορεία των μεταβολών για κάθε μοντέλο να είναι Εικ. 3-62,



Εικόνα 3-62 : Μετακίνηση κορυφής για τις όλες περιπτώσεις

### 3.5.3 Ιδιοσυχνότητες – Ιδιομορφές

Με την ιδιομορφική ανάλυση, μέσω του load case MODAL, μας έδωσε τις εξής 3 πρώτες ιδιομορφές, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα :



Εικόνα 3-63: Οι πρώτες 3 ιδιομορφές της περίπτωσης I

Οι ιδιοπερίοδοι για τις 12 πρώτες ιδιομορφές όπως φαίνονται στον πίνακα :

Πίνακας 3-25 : Ιδιοπερίοδοι ανά προένταση καλωδίων

Ιδιομορφές	Αρχική Προένταση, Διατομή	Ιδιοπερίοδοι sec			
		80mm 1981kN	100mm 3131kN	140mm 6200kN	160mm 8060kN
1	4.470	5.108433	4.724951	4.317876	4.205172
2	0.484	0.571155	0.518396	0.435035	0.403498
3	0.243	0.239141	0.239034	0.238729	0.238524
4	0.211	0.21176	0.211404	0.210479	0.209917
5	0.121	0.11938	0.119894	0.121169	0.121904
6	0.072	0.071086	0.071086	0.071086	0.071086
7	0.053	0.050339	0.05075	0.051823	0.052477
8	0.050	0.048982	0.049315	0.050112	0.050549
9	0.037	0.036569	0.03658	0.036606	0.03662
10	0.030	0.028893	0.029062	0.029457	0.029666
11	0.023	0.023169	0.023183	0.023221	0.023285
12	0.023	0.023024	0.023084	0.023217	0.023244

Αντίστοιχα οι ιδιοσυχνότητες,

Πίνακας 3-26 : Ιδιοσυχνότητες ανά προένταση καλωδίων

Ιδιομορφές	Ιδιοσυχνότητες rad/sec			
	80mm 1981kN	100mm 3131kN	140mm 6200kN	160mm 8060kN
1	1.229963348	1.329788456	1.455156439	1.494156394
2	11.00083458	12.12042443	14.44292622	15.57180574
3	26.27393852	26.28572273	26.31928712	26.34196007
4	29.67123253	29.72118091	29.85185337	29.93169686
5	52.63174616	52.40633263	51.85491501	51.54224359

6	88.38882764	88.38875692	88.38858406	88.38848626
7	124.818502	123.8074928	121.2436919	119.7332944
8	128.2764489	127.4083703	125.3837415	124.2999329
9	171.8185607	171.765824	171.6427798	171.5766988
10	217.4675816	216.1957099	213.2991342	211.7987354
11	271.1938872	271.026685	270.5863827	269.8415026
12	272.894557	272.1908575	270.6288277	270.3155435

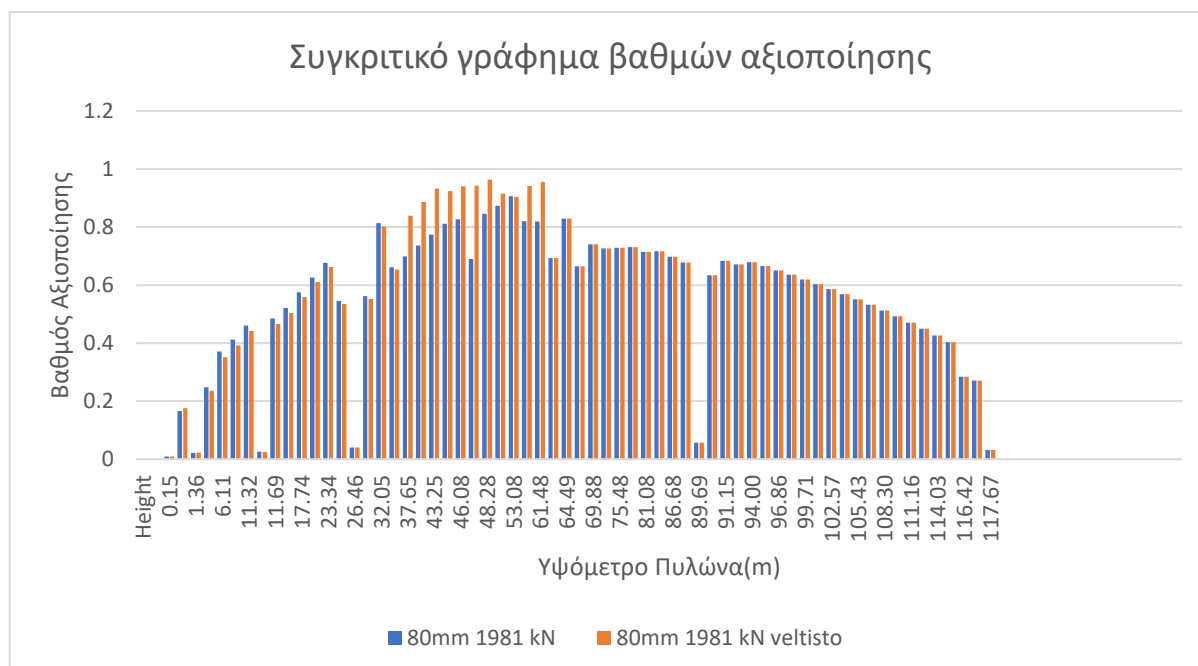
### 3.5.4 Βελτιστοποίηση Παραμετρικών Μοντέλων

Κατά τη βελτιστοποίηση των παραμετρικών μοντέλων, λόγω της διπλής μεταβολής, λαμβάνεται υπόψη η διαμόρφωση του τελικού βάρους του δομικού συνόλου πυλώνα και καλωδίων.

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς στην διπαραμετρική ανάλυση καταδεικνύει τις συμφέρουσες διαδρομές που μπορεί να πάθουν μέσα από τη σύγκριση, ανάλογα με το αντίκτυπο στη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

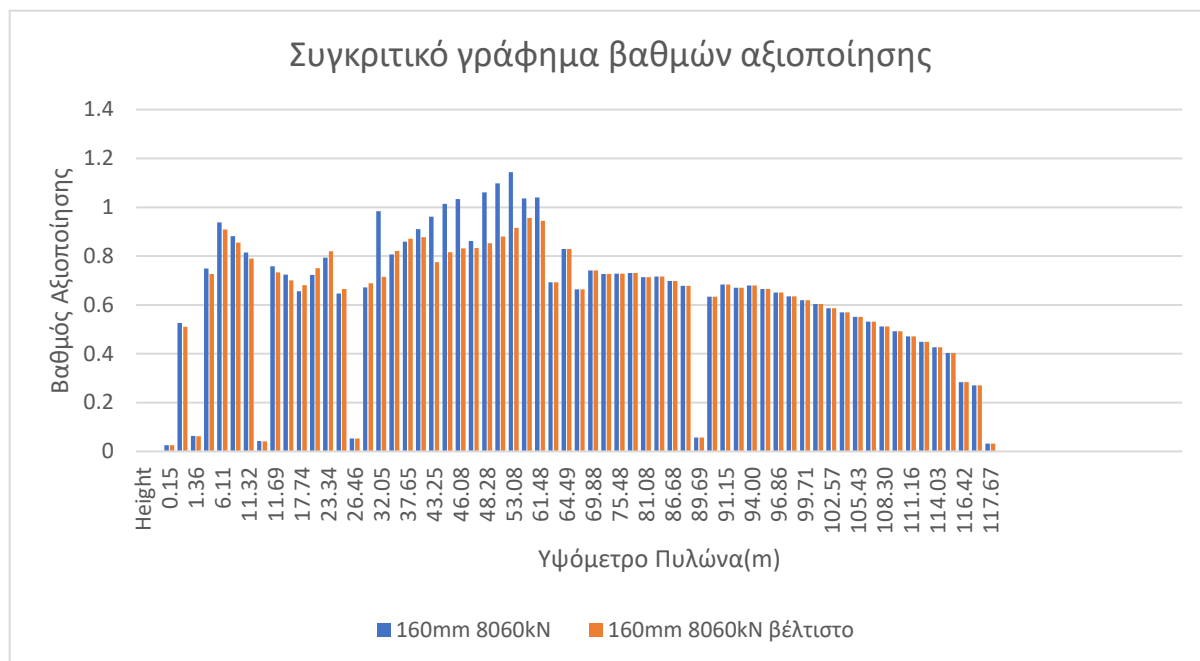
Οι όποιες αλλαγές λαμβάνουν χώρα στο κάτω της πρόσδεσης μέρος του πυλώνα λειτουργώντας στα αποδεκτά όρια, με σταθερό πρόσημο την οριοθέτηση της μετακίνησης κορυφής σε λογικό εύρος.

Ενδεικτικά, η βελτιστοποίηση των μοντέλων για τα παραμετρικά άκρα στα Εικ. 3-64 και Εικ. 3-65,



Εικόνα 3-64 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης Αρχικού I – Βέλτιστου I

Επιπλέον, για την περίπτωση του ανώτερου συνδυασμού διατομής – προέντασης,



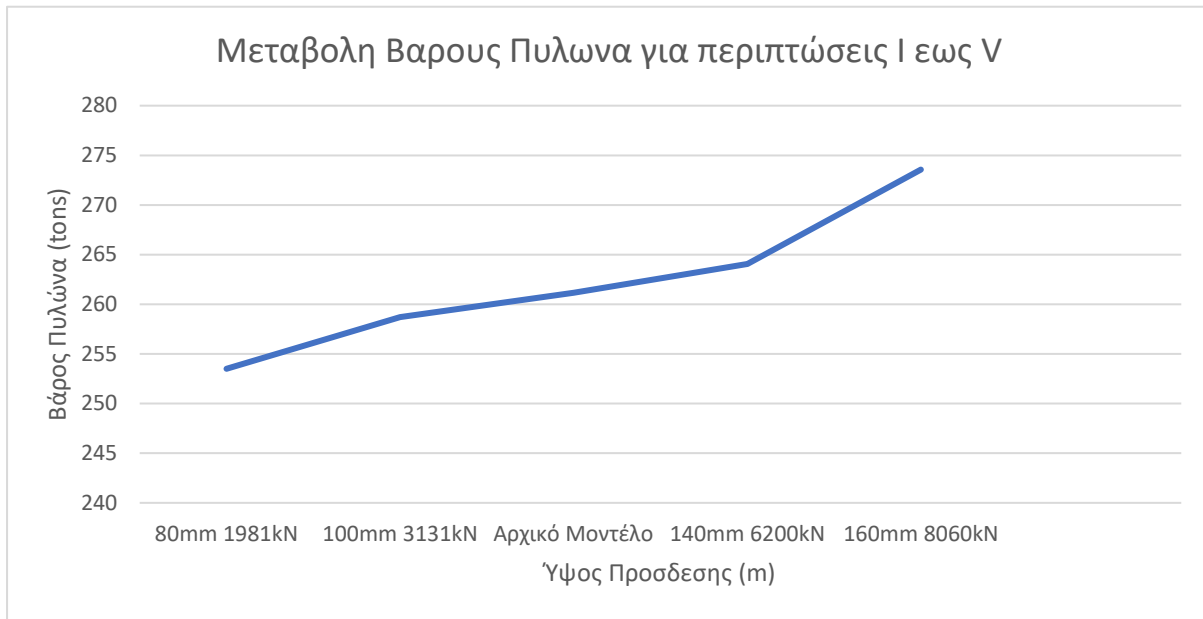
Εικόνα 3-65 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης Αρχικού V – Βέλτιστου V

### 3.5.4.1 Παραμετρικά διαγράμματα

Η μεταβολή βάρους του πυλώνα έχει αυξητική πρόοδο στις περιπτώσεις αστοχίας μελών και μειωτική όταν τα μέλη εμφανίζουν μικρότερους βαθμούς αξιοποίησης, όχι όμως στο μέγιστο βαθμό, προκειμένου να κρατηθούν οι μετακινήσεις κορυφής σε λειτουργικά όρια.

Επιπλέον, οι μεταβολές της μετατόπισης του ανώτερου σημείου, εμφανίζουν μετά τη βελτιστοποίηση ελαφρώς την ίδια αύξηση και μείωση αντίστοιχα.

Η μεταβολή βάρους του πυλώνα, Εικ. 3-66,



*Εικόνα 3-66 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής βάρους πυλώνα*

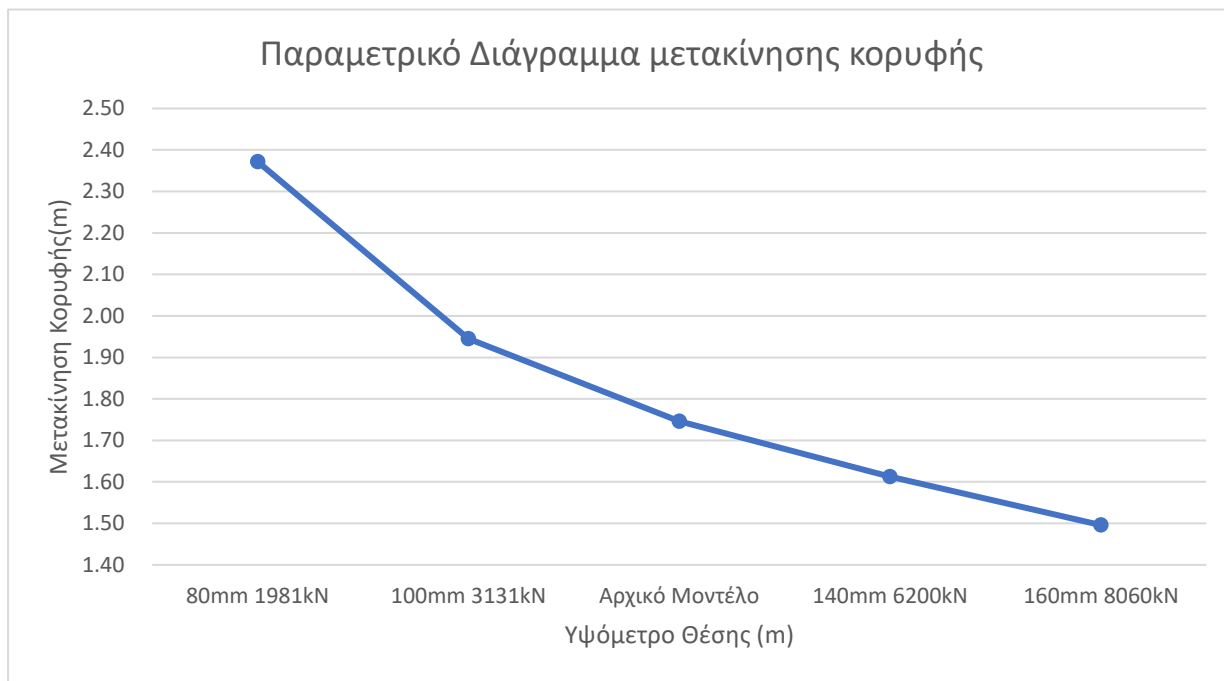
Ενώ ο αντίστοιχος πίνακας Πίν. 3-27,

*Πίνακας 3-27 : Μεταβολή βάρους βέλτιστου πυλώνα ανά συνδυασμό*

Προένταση, Διατομή	Βάρος (tons)
80mm 1981kN	253.5
100mm 3131kN	258.7
Αρχικό Μοντέλο	261.14
140mm 6200kN	264.055
160mm 8060kN	273.56



Ενώ για την μεταβολή μετακίνησης κορυφής, Εικ. 3-67,



Εικόνα 3-67 : Παραμετρικό γράφημα μεταβολής μετακίνησης κορυφής

Με τον αντίστοιχο πίνακα Πίν. 3-28,

Πίνακας 3-28 : Μεταβολή βάρους βέλτιστου πυλώνα ανά συνδυασμό

Προένταση, Διατομή	Μετακίνηση κορυφής βελτιστα (m)	Μετακίνηση κορυφής στα αρχικά (m)
80mm - 1981kN	2.3718	2.290267
100mm - 3131kN	1.9455	1.921261
Αρχικό Μοντέλο	1.7462	1.7462
140mm - 6200kN	1.613	1.637199
160mm - 8060kN	1.4959	1.564338

Αντίστοιχα η μεταβολή του βάρους των καλωδίων κυμαίνεται ως εξής, Πίν. 3-29,

*Πίνακας 3-29 : Μεταβολή βάρους καλωδίων ανά συνδυασμό*

Προένταση, Διατομή	Βάρος Καλωδίων (tons)
80mm 1981kN	10.4
100mm 3131kN	16.25
Αρχικό Μοντέλο	23.4
140mm 6200kN	31.85
160mm 8060kN	41.6

Δειγματικά, το κάτω παραμετρικό άκρο της περίπτωσης I μετά τη βελτιστοποίησης, επέφερε αλλαγή (μείωση) δομικού υλικού σε σχέση με το αρχικό κατά 7.64 tons υλικού δόμησης στον πυλώνα (αλλαγή της τάξης του 2.9%) και μείωση στο υλικό των καλωδίων κατά 13 tons (55.5%), με την αντίστοιχη αύξηση στη μετακίνηση κορυφής κατά 0.62 m (35.8%).

Επιπλέον, το άνω παραμετρικό άκρο της περίπτωσης V μετά τη βελτιστοποίησης, επέφερε αλλαγή (αύξηση) δομικού υλικού σε σχέση με το αρχικό κατά 12.42 tons υλικού δόμησης στον πυλώνα (αλλαγή της τάξης του 4.75%) και αύξηση στο υλικό των καλωδίων κατά 18.2 tons (77.7%), με την αντίστοιχη μείωση στη μετακίνηση κορυφής κατά 0.25 m (14.3%).

## 4 ΑΝΥΨΩΜΕΝΟΣ ΠΥΛΩΝΑΣ

### 4.1 Εισαγωγή

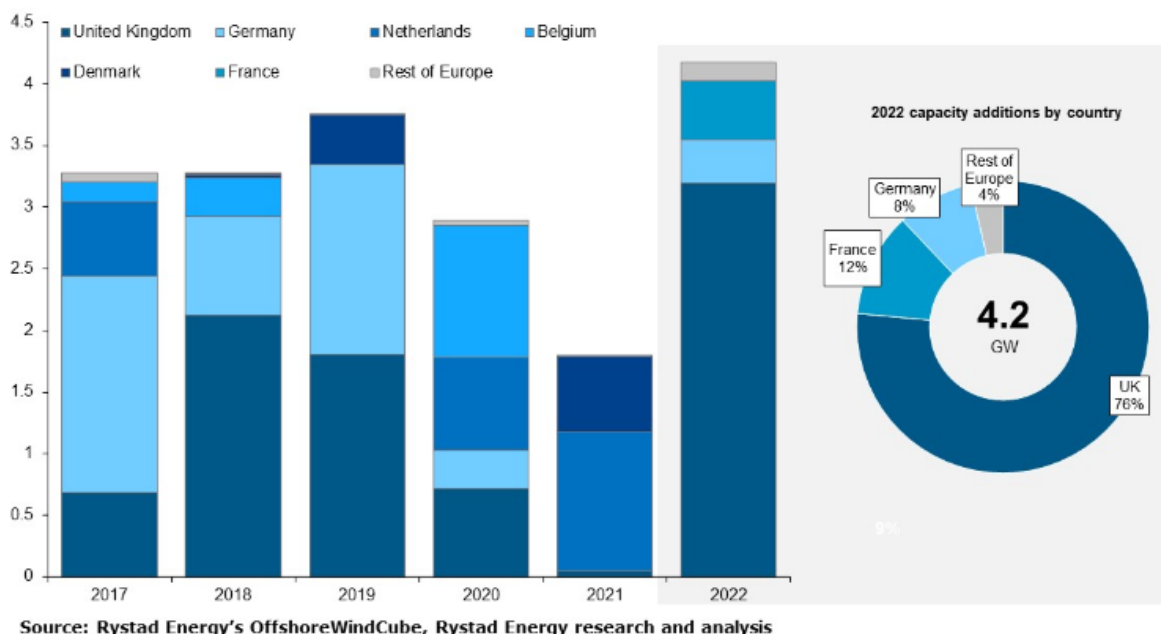
Με την πάροδο του χρόνου και τη ραγδαία αύξηση της τεχνολογίας οι ενεργειακές ανάγκες διογκώνονται σε βαθμό τέτοιο που είναι καταλυτικής σημασίας η ανεύρεση νέων τεχνολογιών και τρόπων για την παραγωγή της. Με τα ορυκτά καύσιμα και το φυσικό αέριο να είναι πεπερασμένα μεγέθη, σε συνδυασμό με τις μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τείνουν την επιστημονική κοινότητα εδώ και δεκαετίες να στρέφει το βλέμμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Με την εξέλιξη της μηχανικής και της πληθώρας των επιστημονικών μελετών, αναζητούμε τρόπους βελτιστοποίησης των υποδομών για την παραγωγή ενέργειας με την εκμετάλλευση φυσικών διεργασιών όπως ο άνεμος, ο κυματισμός της θάλασσας λόγω της βαρύτητας, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία αι πολλές άλλες περιπτώσεις.

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, αναπόδραστα επιφέρει και συνεχώς αυξανόμενη εξέλιξη. Η εξέλιξη αυτή μεταφράζεται είτε με βελτιστοποίηση των ήδη υπάρχοντων μηχανολογικών υποδομών με σκοπό τις μικρότερες απώλειες και το μεγαλύτερο όφελος, είτε – όπως στην προκειμένη περίπτωση- με τη διόγκωση των κατασκευών αυτών με σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας τους.

Όπως διαφαίνεται στο παρακάτω γράφημα, η Ευρώπη διερευνά τρόπους διεύρυνσης της παραγωγής αιολικής ενέργειας, στην προσπάθεια κάλυψης των αναγκών του συγχρόνου ανθρώπου, Εικ. 4-1,

**Annual offshore wind capacity additions in Europe by country**  
Gigawatts (GW)



Εικόνα 4-1: Έρευνα της Rystad της εξέλιξης χρήσης ανεμογεννητριών (Rystad, 2022)

Αποτελεί φυσική παραδοχή πλέον, υπό την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας των Παρισίων για την Κλιματική Αλλαγή, πώς οι περισσότερες χώρες του ευρωπαϊκού χώρου διευρύνουν την παραγωγή αιολικής ενέργειας, με τις χώρες του Βορρά να πρωτοστατούν όπως την Αγγλία ή τις Σκανδιναβικές χώρες, ενώ εξέλιξη παρατηρείται σε όλο το φάσμα των ευρωπαϊκών χωρών.

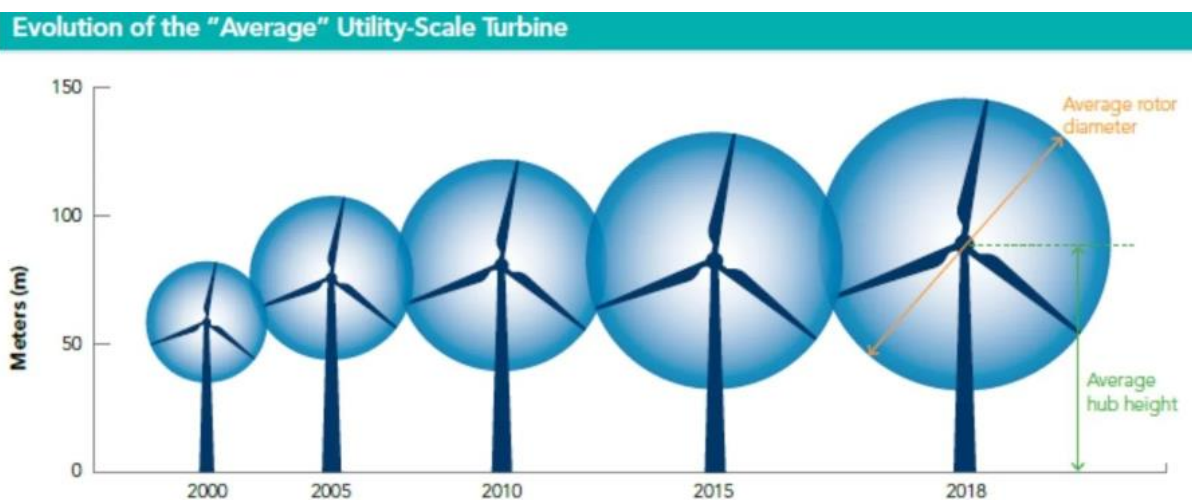
## 4.2 Εξέλιξη πυλώνων ανεμογεννητριών

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας, δεν θα μπορούσαν να αφήσουν εκτός δρωμένων την επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού η οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη, την οικονομία, τη βελτιστοποίηση και πλέον, όπως όλες οι Πολυτεχνικές Ειδικότητες, με πράσινο προσανατολισμό.

Ο μηχανικός λοιπόν σε αυτή την περίπτωση καλείται να διερευνήσει τα όρια, τη συμπεριφορά και το όφελος που μπορεί να έχει η αυξητική τάση ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας, αλλά και να προτείνει τις όποιες δυνατές λύσεις για την υποστήριξη ενός τέτοιου έργου.

Οι λόγοι της ανύψωσης ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας είναι το προφανές ενεργειακό όφελος και η αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Είτε για τις περιπτώσεις που τοποθετούνται σε παράκτιες περιοχές (offshore) είτε σε χερσαία τμήματα, το πρόταγμα είναι το ίδιο και έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Μέσα στα πολλαπλά οφέλη της ανύψωσης ενός πυλώνα, είναι η επίτευξη παρουσίας του ρότορα σε μεγαλύτερα ύψη (στο φάσμα των 175 έως και 200 μέτρων) όπου η ροή του αέρα είναι στρωτή λόγω απουσίας φυσικών εμποδίων όπως δέντρα κ.α. , ενώ ταυτόχρονα η μεγέθυνση των πτερυγίων σε ακτίνες που αγγίζουν τα 80-90 μέτρα, επεκτείνουν το εύρος επαφής τους με τον άνεμο διευρύνοντας τη λειτουργία τους σε ακόμα μεγαλύτερα φάσματα ανεμολογικών συνθηκών, όπως οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Στην παρακάτω εικόνα, διακρίνεται η συνεχής τάση των μηχανικών τις τελευταίες δεκαετίες να προσαυξάνουν το μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας, Εικ. 4-2,



Εικόνα 4-2: Αύξηση μεγέθους ανεμογεννητριών, πηγή : AWEA (Gerdes, 2019)

Παραστατικά, ένας πίνακας αύξησης των υψομέτρων των πυλώνων και των πτερυγίων, Πίν. 4-1,

*Πίνακας 4-1: Εξέλιξη γεωμετρικών χαρακτηριστικών ανεμογεννητριών*

Έτος	Μέσο ύψος πυλώνα (m)	Μέση Διάμετρος Ρότορα (m)
2000	58	48
2005	75	65
2010	80	84
2015	82	102
2018	88	116

Όπως ακριβώς διακρίνεται και στις παραμετρικές αναλύσεις, στην περίπτωση της μεταβολής θέσης της πρόσδεσης, ο λόγος ύψος πρόσδεσης / ύψος πυλώνα, λόγος που ουσιαστικά μεταφράζεται ως μήκος ακτίνας πτερυγίων / ύψος πυλώνα, ολοένα και αυξάνεται.

Χαρακτηριστικά, από το 2000 και για τις επόμενες δύο δεκαετίες, το μήκος των πτερυγίων (ακτίνα κύκλου) επεκτάθηκε από τα 24 μέτρα (41.3% του ύψους του πυλώνα), αισίως στα 58 μέτρα το 2018 (65.9% του ύψους του πυλώνα).

#### **4.2.1 Καλωδιωτός Φορέας προς Ανύψωση Πυλώνων**

Σε ένα σχετικά νεόδμητο χώρο, όπως οι καλωδιωτοί φορείς ως ενδεχόμενη στατική επίλυση για ανύψωση πυλώνων ανεμογεννήτριας. Εταιρείες όπως η Ramboll και η Vestas, εκπονούν σχέδια τέτοιων ανεμογεννητριών.

Ειδικότερα η Vestas, με το Viinamäki project στη δυτική Φινλανδία φιλοδοξεί να εισάγει τους καλωδιωτούς φορείς ως ένα βιώσιμο και ωφέλιμο πλάνο στην κατασκευή τέτοιων ανεμογεννητριών. Ο συγκεκριμένος, υπό μελέτη ακόμα πυλώνας, θα συνοδεύεται από τελευταίας τεχνολογίας μηχανολογικό εξοπλισμό, με τον ροτορα να είναι ο V150-4.2MW της Vestas, όπου αποτελεί και ένα εκ των πιο διακεκριμένων μοντέλων της.

Ο πυλώνας θα ανέρχεται στα 175m ύψος, ενώ το μήκος των πτερυγίων υπολογίζεται στα 70-75 m, με τις άκρες των πτερυγίων να αγγίζουν πλέον τα 240-250 m.

Απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία μιας αιολικής φάρμας (onshore) συνολικής παραγωγής 21 MW, όπου θα προσφέρει ικανοποιητικά ποσοστά κάλυψης των αναγκών των κατοίκων της σκανδιναβικής χώρας στο δρόμο προς την ενεργειακή αυτάρκεια μέσω ΑΠΕ.

Δειγματικά παρουσιάζεται φωτορεαλιστική απεικόνιση της καλωδιωτής ανεμογεννήτριας της Vestas στο πάρκο τοποθέτησης της, Εικ. 4-3,



*Εικόνα 4-3: Φωτορεαλιστική απεικόνιση καλωδιωτής ανεμογεννήτριας Vestas*

### **4.3 Μοντελοποίηση ανυψωμένου καλωδιωτού πυλώνα**

Σε συνέχεια της διερεύνησης της συμπεριφοράς του καλωδιωτού φορέα μέσω των παραμετρικών αναλύσεων, η φυσική συνέχεια είναι η ανύψωση του πυλώνα τις ανεμογεννήτριας και η αποτύπωση της συμπεριφοράς του νέου φορέα.

Έχοντας ως αφετηρία το βασικό βελτιστοποιημένο μοντέλο των 117.5 m, με γωνία πρόσδεσης των καλωδίων στις 45°, διατομή καλωδίου 0.12m και προένταση 4500 kN, ανυψώνεται ο φορέας έως και το ύψος των 180m με τη διαμόρφωση του φορέα και τον επανασχεδιασμό των καλωδίων να γίνεται ενόσω κρίνεται η συμπεριφορά των ενδιάμεσων μοντέλων που αποτελούν και καταλυτικό δείγμα απόκρισης του συνόλου.

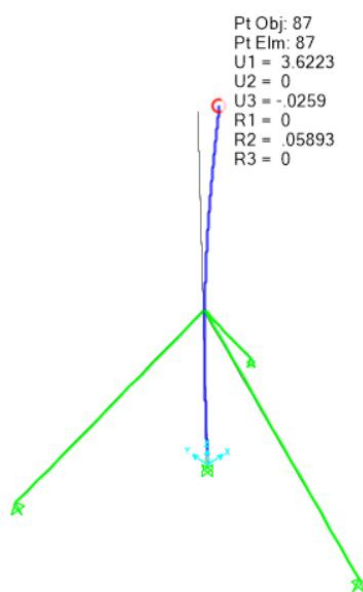
### 4.3.1 Πρώτη φάση σχεδιασμού

Η πρώτη φάση σχεδιασμού έρχεται με τη βασική κίνηση να αποκοπούν τα καλώδια από το αρχικό φορέα και να σχεδιαστεί το επιπλέον μέρος του φορέα ακολουθώντας τη λογική του μήκους των μελών να είναι στο φάσμα των 1-2m και τα δαχτυλίδια (φλάντζες) που αποτελούν συνδετικούς κρίκους μεταξύ των μελών να διατηρούν μεταξύ τους απόσταση στα 25m. Κύριος στόχος και βασική ένδειξη σχεδιασμού θα αποτελέσει η μετακίνηση κορυφής για την ομαλή λειτουργία του ρότορα. Μετά την ανύψωση του πυλώνα επελέγη το σημείο πρόσδεσης.

#### 4.3.1.1 Προένταση

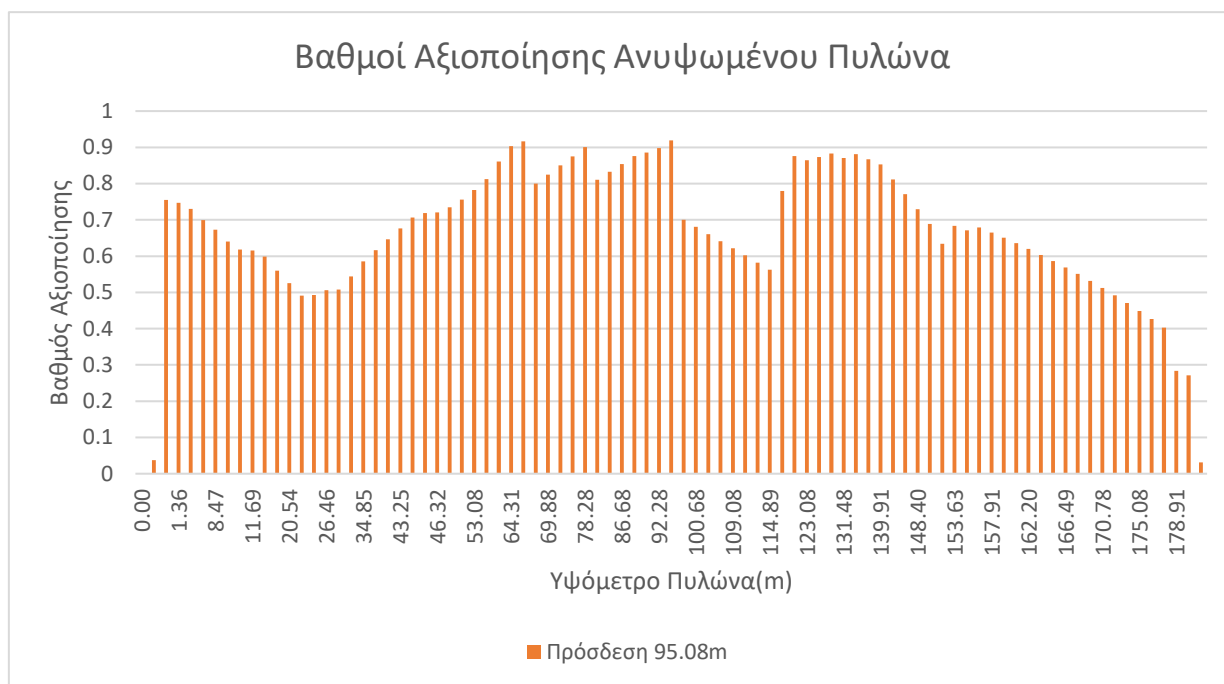
Βασική αρχή του σχεδιασμού των ανεμογεννητριών είναι η διαμόρφωση του μήκους των πτερυγίων, έτσι ώστε ακριβώς κάτω από τον περιγεγραμμένο κύκλο που σκιαγραφούν για τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα και μικρότερη μετακίνηση κορυφής υπό την άσκηση δυνάμεων. Η γενική αρχή που επικρατεί είναι το μήκος των πτερυγίων να είναι το 50% (άνω όριο) του συνολικού μήκους του πυλώνα. Το πρώτο σημείο πρόσδεσης τοποθετήθηκε στα 95.08 m, στο 52% του ύψους για μια πρώτη διερεύνηση. Τα καλώδια τοποθετήθηκαν σε γωνία πρόσδεσης 45° και ασκείται προένταση 4500 kN.

Μετά τη βελτιστοποίηση του πυλώνα ώστε να λειτουργεί οριακά και με ασφάλεια, βρίσκουμε τη μετακίνηση κορυφής στα 3.62m, Εικ. 4-4,



Εικόνα 4-4: Μετακίνηση κορυφής ανυψωμένου πυλώνα

Επιπλέον, οι βαθμοί αξιοποίησης του ανυψωμένου πυλώνα διαμορφώνονται ως εξής, Εικ. 4-5



Εικόνα 4-5 : Βαθμοί Αξιοποίησης Ανυψωμένου πυλώνα με πρόσδεση στα 95.08m

Η κατάσταση με τους βαθμούς αξιοποίησης είναι διαφορετική σε σχέση με το καλωδιωτό μοντέλο των παραμετρικών αναλύσεων. Οι βαθμοί αξιοποίησης έχουν μικρότερες διαφορές στην μεταβολή τους, κρατώντας υψηλές τιμές σε όλο το φάσμα του φορέα, αποτέλεσμα αναμενόμενο λόγω της διαφοράς του μεγέθους.

Ουσιαδής ομοιότητα, ενθαρρυντική για την ακρίβεια της συμπεριφοράς των μοντέλων είναι πως και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλότερες τιμές συγκεντρώνονται σε σημεία γύρω από την πρόσδεση. Η πρόσδεση στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε με γνώμονα τα μεγαλύτερα δυνατά πτερύγια, μήκους 85m. Παρόλα αυτά θα χρειαστεί να γίνει μείωση του μήκους τους όπως θα φανεί κα αργότερα, λόγω απαγορευτικών τιμών στις μετακινήσεις κορυφής.

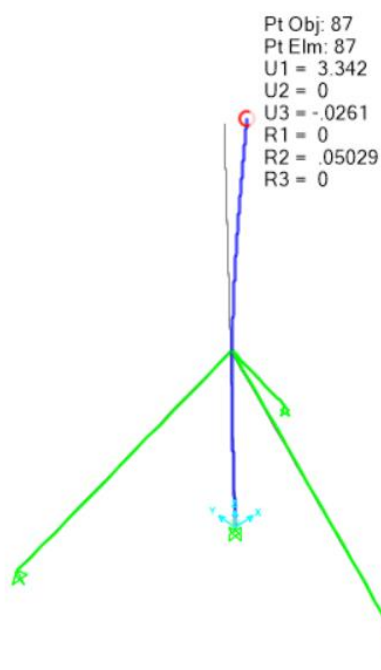
Η ανύψωση ενός τέτοιου πυλώνα είναι κατά παραδοχή μια δαπανηρή διαδικασία, με αποτέλεσμα οι στατικές επιλύσεις που προτείνονται να έχουν όσο το δυνατόν πιο ωφέλιμα αποτελέσματα, μια περίπτωση εκ των οποίων είναι και οι καλωδιωτοί φορείς. Η γενικότερη παραδοχή σχεδιασμού αποτελεί η γενική αρχή διατήρησης ενός λόγου μετακίνηση κορυφής / ύψος πυλώνα σε επίπεδα κοντά στο 1/80, με το φάσμα να είναι 0.01-0.015. Απώτερος σκοπός λοιπόν του εγχειρήματος αποτελεί η μετάπτωση της μετακίνησης κορυφής από τα 3.62m στα 2.63m, προκειμένου να διατηρηθεί ο παραπάνω λόγος.

Όπως θα φανεί στη διερεύνηση της συμπεριφοράς του νέου πυλώνα, το επιδραστικότερο στοιχείο αλλαγής είναι η θέση πρόσδεσης. Μπορεί να μειωθεί το μήκος των πτερυγίων, όμως η συνεχής εξέλιξη του αεροδυναμικού σχεδιασμού και της αποδοτικότητάς τους, ισοσταθμίζουν τις μειώσεις αυτές εξοικονομώντας δομικό υλικό και βελτιώνοντας τη συνολική εικόνα σχεδιασμού.



Η αρχή της προσπάθειας μείωσης της κορυφής γίνεται με την αύξηση της προέντασης στα καλώδια. Από τα 4500 kN αυξάνεται στα 6000 kN, με τη μεταβολή αυτή να έχει διπλό χαρακτήρα. Από τη μία, μειώνονται ακόμα περισσότερο οι μετακινήσεις του κόμβου πρόσδεσης, μετατρέποντάς τον σε μια μορφή εγγύτερα της πάκτωσης, ενώ ταυτόχρονα η αύξηση των αξονικών δυνάμεων προσαυξάνει την ένταση στα μέλη με αποτέλεσμα την αλλαγή των διατομών όπου χρειάζεται.

Με τον επανασχεδιασμό, η μετακίνηση κορυφής όπως φαίνεται στο Εικ. 4-6,



Εικόνα 4-6: Μετακίνηση κορυφής ανυψωμένου πυλώνα

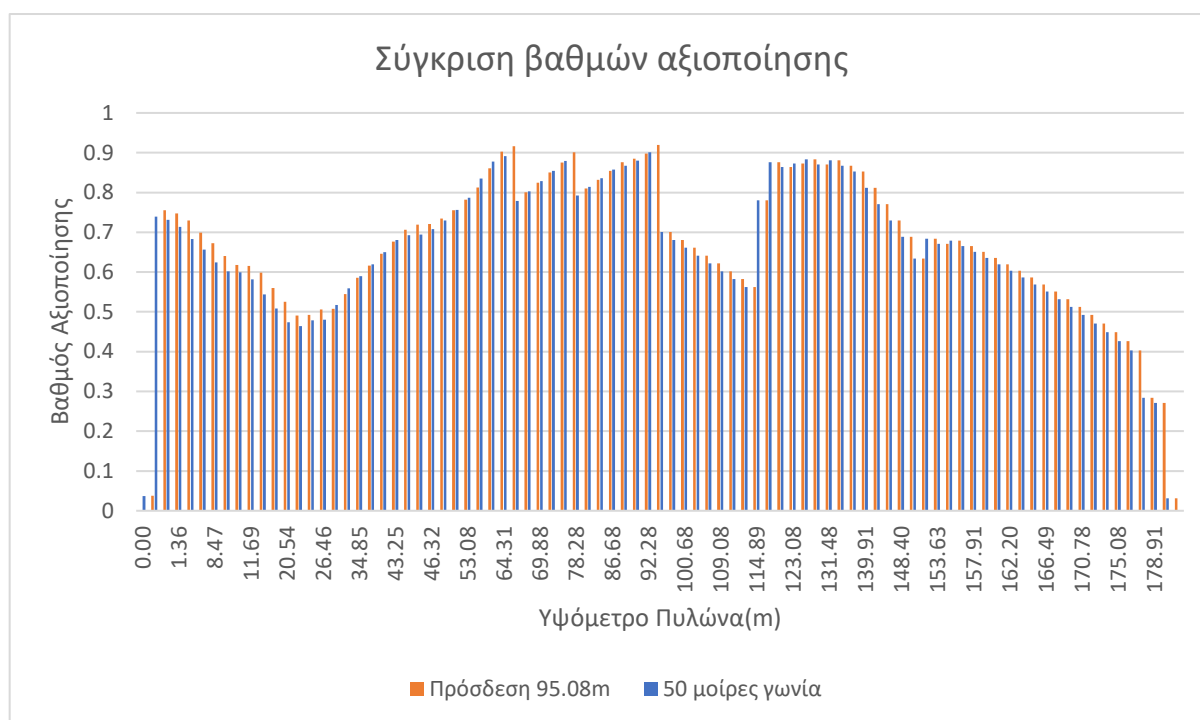
Τα αποτελέσματα δεν είναι ενθαρρυντικά, ειδικότερα αν ληφθεί υπόψιν ότι έχουμε μεταβολή του βάρους και αύξηση βάρους του πυλώνα 522.9 tons στην επόμενη φάση με 588.2 tons, αλλαγή της τάξης του 11.1% .

Δευτερογενώς , γίνονται αλλαγές στην γωνία πρόσδεσης και τη διατομή του καλωδίου. Τη θέση πρόσδεσης την αφήνουμε ως τελευταίο μέγεθος με την προοπτική να διατηρηθούν, αν καθίσταται εφικτό, τα πτερύγια στο μέγιστο μήκος τους.

#### 4.3.1.2 Γωνία Πρόσδεσης

Σχετικά με τη γωνία πρόσδεσης, με γνώμονα τη σκιαγράφιση της συμπεριφοράς του πυλώνα, αυξήθηκε από τις 45° στις 50°. Άλλα ισοδύναμο με αυτό του παραμετρικού βήματος, με σκοπό τη μείωση της της μετακίνησης κορυφής.

Η αλλαγή, δεδομένης της διατήρησης του αρχικού πυλώνα, με συνολικό βάρος στους 522.9 tons δίνει παρεμφερή αποτελέσματα, όπως διακρίνεται και στο συγκριτικό γράφημα, Εικ. 4-7,



Εικόνα 4-7 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης

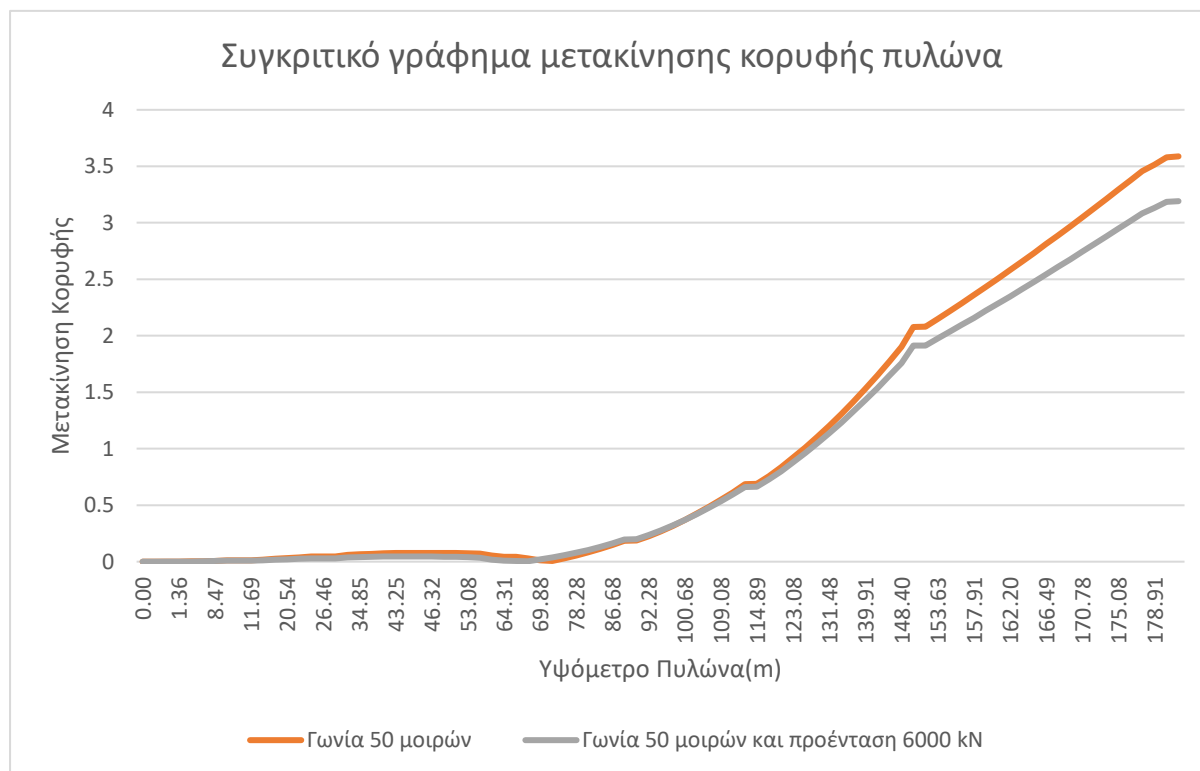
Εξαιρουμένων κάποιων αξιοσημείωτων διαφορών λόγω της αλλαγής γεωμετρίας, η γενική εικόνα δεν αφήνει πολλά περιθώρια βελτίωσης εφόσον σκοπός είναι να περιορισθεί η μετακίνηση κορυφής κατά ένα περίπου μέτρο και όχι κάποια εκατοστά.

Σε συνέχεια της διερεύνησης της απόκρισης της κατασκευής απέναντι στις αλλαγές, αυξάνεται η προένταση στο ήδη υπάρχον μοντέλο με την επαυξημένη γωνία πρόσδεσης, γίνεται άνοδος της προέντασης από τα 4500kN στα 6000kN. Όπως προαναφέρθηκε η μεγαλύτερη προένταση έχει διττή φύση. Από τη μία περιορίζει ακόμα περισσότερο την μετακίνησης του κόμβου πρόσδεσης, αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί απαίτηση μεγαλύτερων διατομών λόγω αστοχίας κάποιων μελών.

Το μοντέλο των 50° γωνίας πρόσδεσης και της νέας προέντασης, μετά τον ανασχεδιασμό έχει βάρος πυλώνα στους 639.2 tons, αυξημένο κατά 111.2 tons, μεταβολή της τάξης του 22.2%. Η νέα μετακίνηση

κορυφής ανέρχεται στα 3.19m, μικρότερη κατά 0.39m από το πρότερο μοντέλο και συνολικά 0.43m από το αρχικό.

Παρακάτω διακρίνεται το γράφημα μετακίνησης των δύο πυλώνων, πριν και μετά τον ανασχεδιασμό, με γωνία πρόσδεσης 50°, Εικ. 4-8,



Εικόνα 4-8 : Συγκριτικό γράφημα μετακίνησης κορυφής πυλώνων

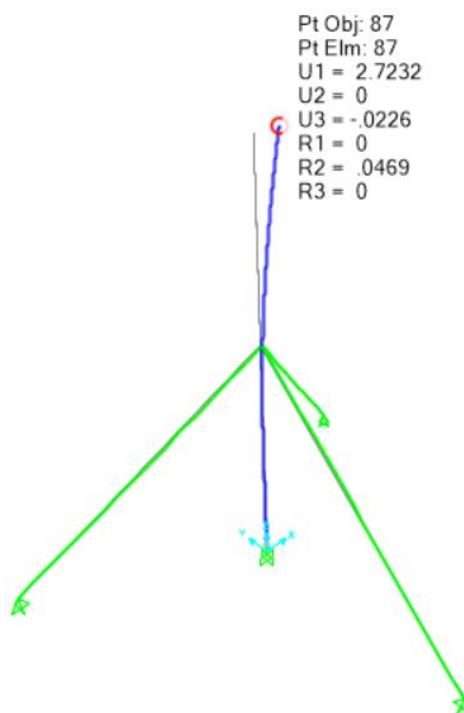
Η όλη απόκριση ενός αρκετά ψηλότερου πυλώνα, με επαυξημένο δομικό σύνολο και διαφορετικές απαιτήσεις, μένει ευκολότερα ανεπηρέαστος στις αλλαγές γεωμετρίας. Η επίτευξη του στόχου είναι ορατή με προφανή λύση την κατακόρυφη αύξηση δομικού υλικού σε συνδυασμό με κάποιες γεωμετρικές μεταβολές εντός ορίων κατασκευαστικής λογικής (π.χ. δεν είναι δόκιμο να φτάσουμε στις 65° γωνία ή στα 10000 kN προένταση). Εν κατακλείδι, μεταβάλλουμε τη θέση πρόσδεσης, το επιδραστικότερο σημείο αλλαγής στη συμπεριφορά της κατασκευής.

### 4.3.2 Τελική φάση σχεδιασμού

Σκιαγραφώντας τη συμπεριφορά του πυλώνα βάσει των παραπάνω αλλαγών, γίνεται αναγκαίο να παρθούν δραστικότερα μέτρα προκειμένου να επέλθει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η γωνία πρόσδεσης σε συνδυασμό με αλλαγές στη διατομή και την προένταση διαμορφώνουν ένα αποδεκτό τοπίο. Σύμφωνα με το τελευταίο project της Vestas, στον πυλώνα των 175m, πρόκειται να χρησιμοποιηθούν πτερύγια μήκους 75m, μήκος που αποτελεί το 42% του συνολικού ύψους του πυλώνα. Άλλωστε στις πλείστες των περιπτώσεων το σημείο πρόσδεσης κυμαίνεται σε υψόμετρο που ισοδυναμεί με το 40-50% του μήκους του πυλώνα, αφαιρούμενο από την κορυφή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ποσοστό αυτό βρίσκεται στο 42%.

Με την παραπάνω σχεδιαστική αρχή, επανατοποθετούμε το σημείο πρόσδεσης του πυλώνα στα 103m, 8 μέτρα ψηλότερα από το αρχικό σημείο πρόσδεσης.

Είναι τέτοια η επίδραση της παραμέτρου, όπου με αρχικές διατομές καλωδίων και προέντασης, αλλά επανασχεδιασμένο πυλώνα, υπάρχει μετακίνηση κορυφής στα 2.72m, Εικ. 4-9

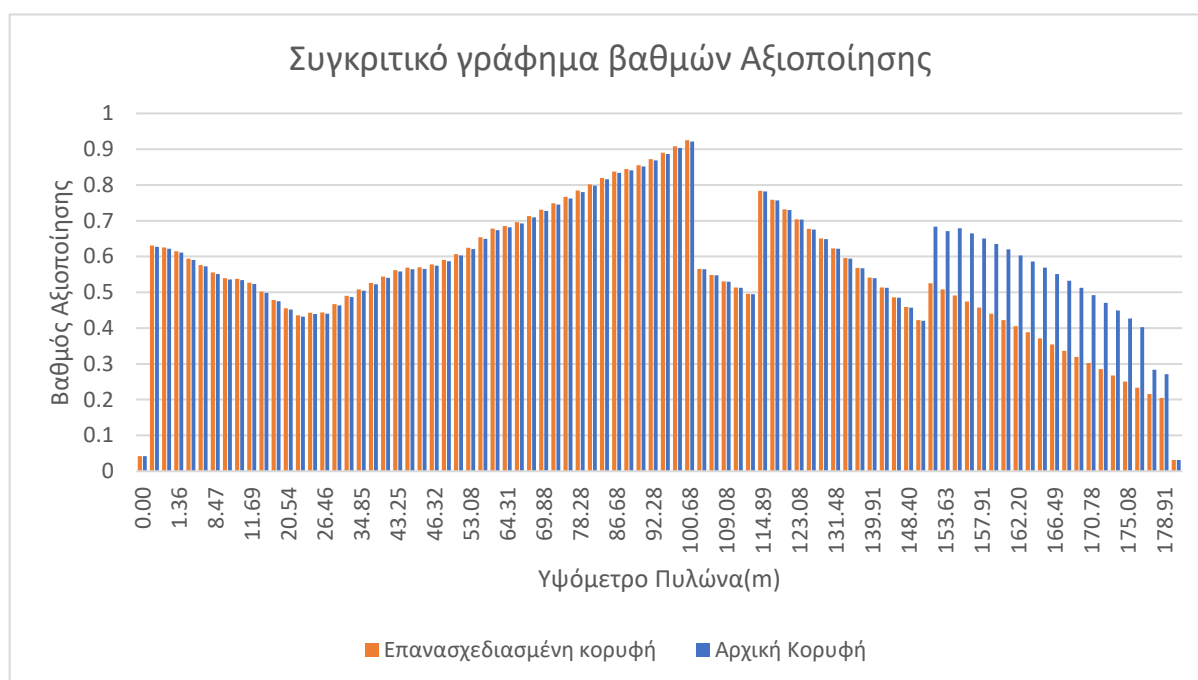


Εικόνα 4-9: Μετακίνηση κορυφής ανυψωμένου πυλώνα, τελική φάση σχεδιασμού

Η μετάπτωση πλέον, είναι στα 0.9m, από τα 3.62m στα 2.72m, κάθοδος τέτοια που πλέον χρειάζονται στοχευμένες πλέον μεταβολές προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Με τη μεταβολή της θέσης πρόσδεσης και τον επανασχεδιασμό του πυλώνα, το βάρος του πλέον ανέρχεται στους

632.9 tons, διαφορά 111.2 tons, πυλώνας που χρησιμοποιήθηκε και στο μοντέλο μεταβαλλόμενης γωνίας.

Εν συνεχεία, οδεύοντας στο τελικό στάδιο του σχεδιασμού, για την υπολειπόμενη διαφορά των 0.1m, αυξάνουμε ελαφρώς το δομικό υλικό του πυλώνα, που πλέον ανέρχεται στους 649.8 tons, 16.9 tons (μεταβολή 2.6%) περισσότεροι με αντίκτυπο μια μετακίνηση κορυφής στα 2.66m. Η έμφαση δόθηκε στο τελευταίο τμήμα του πυλώνα, πιο συγκεκριμένα στα τελευταία 30m, όπου και επιβαλλόταν η αλλαγή των διατομών στα πλαίσια του επανασχεδιασμού. Η διαφορά στα πάχη των διατομών είναι μικρή μεν, αλλάζει δε τους βαθμούς αξιοποίησης και επιφέρει την επιθυμητή αλλαγή 0.1m, Εικ. 4-10,



Εικόνα 4-10 : Συγκριτικό γράφημα βαθμών αξιοποίησης, επανασχεδιασμός κορυφής.

Πέραν των μικροδιαφορών στους βαθμούς αξιοποίησης καθ' όλο το υψόμετρο του πυλώνα, η

επανασχεδιασμένη κορυφή φέρνει τη μετακίνηση κορυφής στα 2.66m, όπου ο λόγος  $\frac{\text{Μετακίνηση κορυφής}}{\text{Υψόμετρο πυλώνα}} =$

$\frac{2.66 \text{ m}}{180 \text{ m}} = 0.01479$ , σε σύγκριση με τον αρχικό πυλώνα με λόγο  $\frac{\text{Μετακίνηση κορυφής}}{\text{Υψόμετρο πυλώνα}} = \frac{1.74 \text{ m}}{117.5 \text{ m}} = 0.0148$ , είναι πρακτικά ίδιοι.

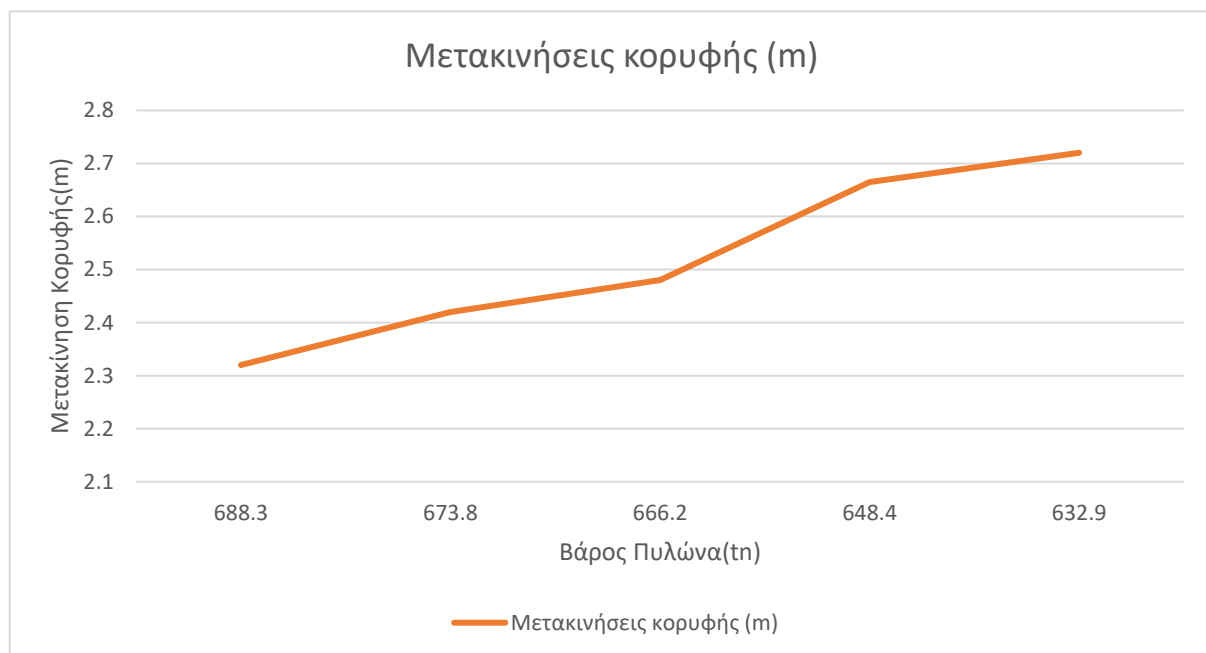
#### 4.3.2.1 Σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις

Εντέλει τίθεται το ερώτημα του κατά πόσο είναι δυνατόν να πετύχουμε ένα ακόμα οικονομικότερο από πλευράς υλικού αποτέλεσμα, στο ίδιο φάσμα αποδεκτών μετακινήσεων αλλάζοντας άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.

Η αύξηση και μόνο της προέντασης στο ήδη υπάρχον μοντέλο από τα 4500 kN στα 6000 kN, επιφέρει μεταβολή μετακίνηση κορυφής 2.663m → 2.6539m όπου πρόκειται για μια αμελητέα μεταβολή χιλιοστών.

Επ' αφορμή της ανεπαίσθητης μεταβολής του συστήματος, αυξάνεται η διατομή του καλωδίου στα 0.14m, ενώ η προένταση στα 9000 kN. Ο σκοπός είναι να διερευνηθεί αν η μείωση υλικού από το σύνολο του πυλώνα σε σχέση με την αύξηση αυτού στο σημείο κάτωθεν της πρόσδεσης, παράγει θετικό πρόσημο, ώστε να θεωρηθεί ωφέλιμο,

Μετά από μια σειρά αλλαγών στο σχεδιασμό, παράγονται αποτελέσματα, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα , Εικ. 4-11



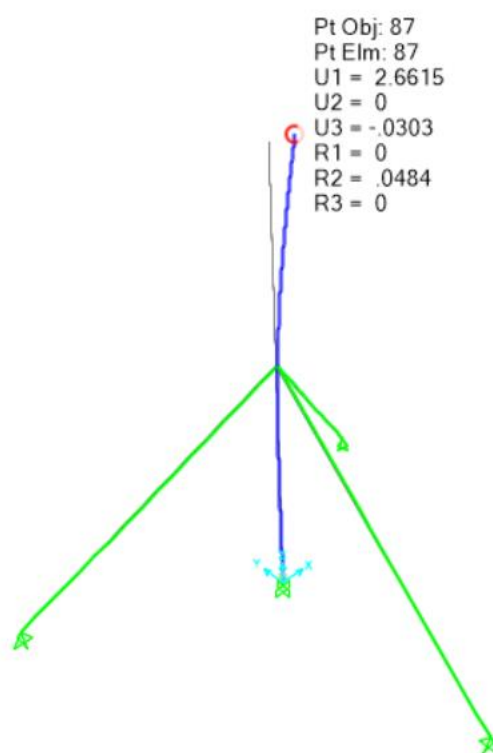
Εικόνα 4-11 : Συγκριτικό γράφημα μετακίνησης κορυφής πυλώνων συναρτήσει βάρους πυλώνα

Εν κατακλείδι, στα πλαίσια της διερεύνησης χρειάστηκε να σχεδιάσουμε τον πυλώνα προσεγγίζοντας μετατόπιση κορυφής όσο εγγύτερα γίνεται στο προηγούμενο μοντέλο, ενώ ταυτόχρονα να επιτευχθούν παρεμφερείς ιδιοσυχνότητες.

Αρχικό Μοντέλο → 648.31 tons χάλυβα στον πυλώνα και 39.2 tons χάλυβα καλωδίου

Εναλλακτικό Μοντέλο → 648.4 tons χάλυβα στον πυλώνα και 53.4 tons χάλυβα καλωδίου

Στο σχήμα παρακάτω διακρίνεται η μετακίνηση του κορυφαιού κόμβου, Εικ. 4-12,



Εικόνα 4-12: Μετακίνηση κορυφής ανυψωμένου πυλώνα, εναλλακτική περίπτωση

Επιπλέον , οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες των τελευταίων δύο μοντέλων στου παρακάτω πίνακες Πίν. 4-2 και Πίν. 4-3,

*Πίνακας 4-2: Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες τελικού μοντέλου*

Τελικό Μοντέλο		
Ιδιομορφές	Ιδιοπερίοδος	Ιδιοσυχνότητες
1	5.852082	1.073666689
2	0.973173	6.456390784
3	0.521333	12.05215451
4	0.257384	24.41175633
5	0.210596	29.83526539
6	0.154436	40.68479848
7	0.102294	61.42261014
8	0.074933	83.8501963
9	0.070916	88.60086098
10	0.056173	111.8541607
11	0.045057	139.4482283
12	0.036301	173.0851394

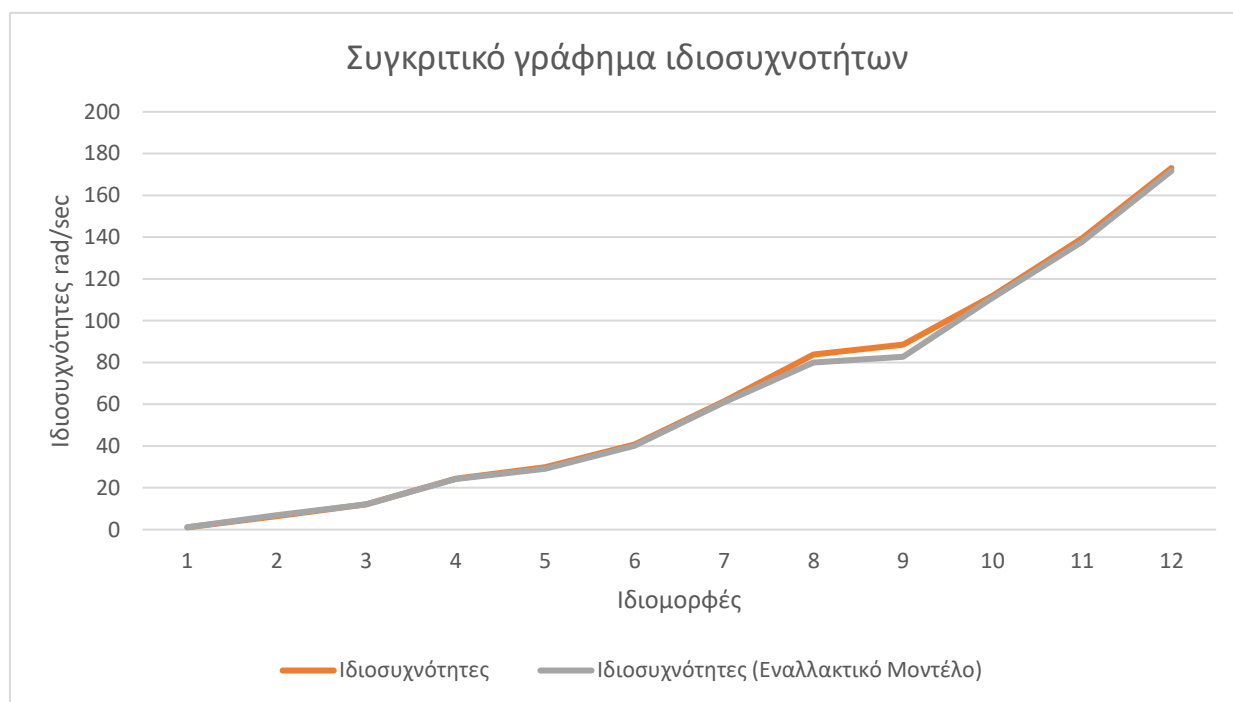
*Πίνακας 4-3: Ιδιομορφές και ιδιοσυχνότητες εναλλακτικού μοντέλου*

Εναλλακτικό Μοντέλο (Διατομή και προένταση)		
Ιδιομορφές	Ιδιοπερίοδος	Ιδιοσυχνότητες
1	5.694693	1.103340427
2	0.909628	6.907419298
3	0.519833	12.08694159
4	0.259618	24.20166366
5	0.215554	29.14900598
6	0.156484	40.15218872
7	0.103017	60.99155438
8	0.078629	79.90911762



9	0.075979	82.69606379
10	0.056616	110.9787791
11	0.045634	137.6854378
12	0.036595	171.6945911

Σε ένα συγκριτικό γράφημα των παραπάνω δύο έχουμε, Εικ. 4-13



Εικόνα 4-13 : Ιδιομορφές, αρχική και εναλλακτική περίπτωση

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση τόσο των παραμετρικών αναλύσεων όσο και της ανύψωσης του πυλώνα γίνεται αντιληπτό πως ο σκοπός ενός Μηχανικού σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο τεχνολογικό και επιστημονικό τοπίο είναι διττός.

Από τη μια θεωρείται εξέχουσας σημαντικότητας να γίνει αντιληπτή η αίσθηση των πεπερασμένων μεγεθών. Η επιφάνεια του πλανήτη είναι δεδομένη, άρα δεδομένο είναι και το ποσοστό αυτού του χώρου προς εξέλιξη, δόμηση και εξυπηρέτηση των ανθρώπων, καθιστώντας απαραίτητο πλέον να αποζητούμε βέλτιστες γεωμετρίες.

Από την άλλη τα υλικά είναι και αυτά πεπερασμένα. Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ενός κόσμου που εκθετικά εξελίσσεται και οδεύει προς αυτή την κατεύθυνση πιο έντονα από ποτέ, οι συμβιβασμοί, οι καλά υπολογισμένες μελέτες, οι οξυδερκείς και πρωτότυπες λύσεις αλλά και η βαθιά κατανόηση της συμπεριφοράς των δομημάτων που σχεδιάζονται έχουν ως κοινό παρονομαστή την αύξηση της παραγωγικότητας. Η παραγωγικότητα μπορεί να μεταφραστεί ως μαζικότερη και αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση π.χ. εξελιγμένα πολυεπίπεδα οδικά δίκτυα, αλλά και ως βελτίωση του μακράιωνου στην ιστορία της ανθρωπότητας λόγου «κατανάλωση ενέργειας / παραγωγή ενέργειας». Στα πλαίσια του τελευταίου αξιώματος η επιστήμη της Μηχανικής καλείται συχνά να βελτιώνει τη λειτουργία της παραγωγικής μονάδας. Πρόσφατη απόδειξη του τελευταίου αποτελεί η δημιουργία ενός εκ των αρτιότερα εξελιγμένων ανεμογεννητριών στο Rotterdam της Ολλανδίας με το όνομα Haliade X, όπου δύναται να εξυπηρετεί με τη λειτουργία του χιλιάδες ανθρώπων που μπορούν να αποτελούν κάλλιστα μια κωμόπολη

Οι καλωδιωτές κατασκευές, ειδικά στην πράσινη ενέργεια καλούνται να εξυπηρετήσουν ακριβώς αυτό το σκοπό. Στην πλειάδα τους οι λύσεις αύξησης του μεγέθους των ανεμογεννητριών σε επίπεδο πυλώνα άρα κατά προέκταση και σε επίπεδο πτερυγίων αποσκοπούν στην αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας. Ο καλωδιωτός φορέας έχει βασικά πλεονεκτήματα να καταδείξει με αιχμή του δόρατος να αποτελεί η ευελιξία του σε επίπεδο γεωμετρίας. Πρόκειται για στατικό φορέα όπου παρουσιάζει αποκλειστικά εφελκυστική αντοχή. Η έντονη παραμορφωσιμότητα τους επιδρά θετικά στον πυλώνα, όπου συγκριτικά με άλλες μεθόδους δεν επηρεάζει αισθητά τις ιδιομορφές της κατασκευής. Επιπλέον, σε περίπτωση μιας οποιαδήποτε κίνησης του πυλώνα ο καλωδιωτός φορέας δεν αντιστέκεται στην κίνηση, άρα δεν αναπτύσσονται εντάσεις από τίς μεταξύ τους αντίθετες κινήσεις. Η έντονη αυτή παραμορφωσιμότητα παρά την έμφυτη γεωμετρική μη γραμμικότητα δεν παρουσιάζουν προβλήματα λυγισμού σε σχέση με άκαμπτα χαλύβδινα μέλη.

Σε επίπεδο κατασκευαστικής λογικής τα καλώδια αποτελούν τα πλέον εύχρηστα μέλη. Η παραγωγή τους γίνονται εργοστασιακά όπου και προκατασκευάζονται, ενώ έχουν μικρό κόστος μεταφοράς και τοποθέτησης. Επίσης ανεγείρονται εύκολα και είναι δυνατό να τις διαχειρίζεται ένας λογικός αριθμός ανθρώπινου δυναμικού χωρίς να καταναλώνονται πολλές εργατοώρες. Επιπροσθέτως, η ευελιξία τους και η προσαρμοστικότητα που παρουσιάζουν σε σχεδιαστικό επίπεδο καθιστούν τους καλωδιωτούς φορείς ιδανικούς για ποικίλες αρχιτεκτονικές λύσεις, ακόμα και σε κάτι φαινομενικά τετριμμένο γεωμετρικά στο χώρο του βιομηχανικού σχεδιασμού (ανεμογεννήτριες).

Η διαδικασία των παραμετρικών λύσεων αποκαλύπτει τη συμπεριφορά του δομικού συνόλου αλλά και την συνέργεια μεταξύ καλωδίων και πυλώνα. Οι επιπτώσεις μπορεί να είναι είτε μικρές, όπως π.χ. μια αλλαγή προέντασης, είτε μεγάλες όπως η μεταβολή τοποθέτησης του σημείου πρόσδεσης. Ο πολυσχιδής χαρακτήρας των καλωδίων με ποικιλομορφία στα υλικά, στον τρόπο παραγωγής, στις

ποικίλες διατομές κ.α. δίνουν στο Μηχανικό τη δυνατότητα να αναλογιστεί εκτός τετριμμένων πλαισίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των παραπάνω αποτελεί ο Ελλαδικός χώρος. Η επικράτεια της χώρας απαρτίζεται από 6000 νησιά και βραχονησίδες εκ των οποίων κατοικούνται σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία τα 227.

Τα σημεία πρόσδεσης των ανεμογεννητριών σε συνδυασμό με τις 120° γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους, περιγράφουν ένα πλήρη κύκλο για να καλύψουν όλο το φάσμα των πιθανών κινήσεων του πυλώνα. Ο κύκλος αυτός, που ουσιαστικά αποτελεί δομικό χώρο μιας και δεν μπορεί τίποτα να παρεμβάλλεται που αποτελεί τροχοπέδη στη λειτουργία του. Η μεταβολή της ακτίνας του αποτελεί καταλύτη της διαμόρφωσης του περιβάλλοντος καθώς και παράγοντα προσαρμογής ανάλογα με το χώρο εγκατάστασης. Η εγκατάσταση καλωδιωτών ανεμογεννητριών πάνω σε ακατοίκητες βραχονησίδες που ταυτόχρονα δεν απειλούν την όποια ενδεχόμενη τοπική πανίδα εξαρτάται από το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει, με τον καλωδιωτό φορέα να προσαρμόζεται εύκολα στα δεδομένα. Ανεμογεννήτριες υψομέτρων που αγγίζουν τα 180m-200m αποτελούν το μέλλον, με την παραγωγικότητα τους να είναι αρκετά μεγαλύτερη όπου με την παρουσία μιας και μόνο μονάδας να αντικαθίσταται συστάδα τέτοιων δομών.

Επιπροσθέτως, η ευελιξία στη γεωμετρία του συνόλου, δύναται στη σύγχρονη εποχή να βοηθήσει στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων τέτοιας κλίμακας σε πολύ μικρότερες εμβαδικές μονάδες. Ο χώρος ολοένα και περισσότερο καταλαμβάνεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, μετατρέποντάς τον σε αυξανόμενα πολύτιμο αγαθό. Μικρές ακτίνες του περιγράφοντος κύκλου, φέρουν και πυκνότερες εγκαταστάσεις, όπου με βάση τα τεχνολογικά δεδομένα και τα μεγέθη του σήμερα δυνητικά μπορούν με χαρακτηριστική ευκολία να καλύψουν ικανοποιητικό μερίδιο του ενεργειακού χάρτη μιας χώρας.

Η κάλυψη της πανίδας και η εναρμόνιση με το περιβάλλον αποτελεί ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα. Ανεμογεννήτριες σε τέτοιο ύψος, πέραν της αυξημένης αποδοτικότητας λόγω απουσίας τυρβώδους ροής από τα φυσικά εμπόδια, έχουν ως σκοπό και την προστασία της πανίδας. Όχι μόνο με την προώθηση της εκμετάλλευσης δωρεάν ενεργειακών πόρων της φύσης, αλλά και με την παρουσία τους σαν σύνολο εντός του περιβάλλοντος. Η αύξηση του ύψους θα βοηθήσει τα πτηνά που ευδοκίμουν σε χαμηλά ύψη να ζουν απερίσπαστα, χωρίς κινδύνους από την ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως και άλλες μορφές ζωής, χερσαίας εκτός από εναέριας που αποτελούν τμήμα της φύσης.

Το μέλλον της αιολικής ενέργειας, μέσα από την έρευνα, το σεβασμό στον άνθρωπο και το περιβάλλον καθώς και η ευαισθησία διατήρησης της ισορροπίας για το παρόν και τις επόμενες γενεές φαίνεται να είναι εύκρατο. Με τις αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις και την περιβαλλοντική ευαισθησία να είναι πιο επίκαιρα από ποτέ ως θέματα της κοινωνίας, ο Μηχανικός μέσα από τον δικό του ρόλο προσφέρει καινοτόμες λύσεις για ένα καλύτερο αύριο. Η κλιματική αλλαγή είναι εδώ και καιρό παρούσα στην καθημερινότητα ενώ η επιστήμη καλείται να την αντιμετωπίσει πριν να είναι αργά. Το τοπίο των ανεμογεννητριών συνεχώς μεταβάλλεται προς το καλύτερο με την εξέλιξη των μηχανισμών και των τεχνικών – ιδεών δόμησης. Οι καλωδιωτές κατασκευές βρίσκονται ακόμα σε πρώιμη φάση διερεύνησης και εξέλιξης με το μέλλον τους να υποστηρίζεται ήδη από μεγάλες εταιρείες του χώρου, είτε από την Ευρώπη, τις Ηνωμένες Πολιτείες είτε την Κίνα, ατενίζοντας το μέλλον με μεγαλεπήβολα σχέδια όπως π.χ. το Viinamäki project στην Φινλανδία κ.α.

Το έδαφος έρευνας είναι εξαιρετικά πρόσφορο, με πολλά ακόμα σημεία που χρίζουν ενδελεχούς διερεύνησης. Τα υλικά των καλωδίων, οι τεχνικές πλέξης με αποκλειστικό σκοπό την καταπόνηση ανεμογεννητριών και η έμφαση στην παραγωγή κοίλων διατομών τέτοιας κλίμακας, είναι τα πρώτα ζήτσημα που ενδεχομένως έχουν χώρο εξέλιξης. Επίσης οι μηχανισμοί στα σημεία πρόσδεσης είναι

καταλυτικός παράγοντας μιας και είναι από τα κρισιμότερα σημεία του δομικού συνόλου δύναται να εξελιχθούν με νέες τεχνικές και γεωμετρίες, σύμφωνα με το πώς θέλει ο μελετητής να προσομοιώνει τους δεσμευτικούς κόμβους στις ελευθερίες κίνησης. Επιπλέον οι παραμετρικές αναλύσεις κατέδειξαν την πολυμορφικότητα ενός τέτοιου δομικού συνόλου, δίνοντας κίνητρο στην επιστημονική κοινότητα να δώσει έμφαση στην εκπόνηση αυτοματισμών, όπου θα προσφέρεται στον Μηχανικό η δυνατότητα να διακρίνει άμεσα την απόκριση του συνόλου σύμφωνα με τις σχεδιαστικές επιλογές του. Με αυτό τον τρόπο επαναπροσδιορίζεται ο τόπος δόμησης τέτοιων κατασκευών όπου εμπίπτει πλέον στα πλαίσια του οργανικού σχεδιασμού αλλά και στην διερεύνηση νέων χώρων με θετικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Άλλωστε το υπόβαθρο προβλέπεται να γίνεται όλο και πιο σταθερό με ακριβή αποτελέσματα, ειδικά με χρήση της τεχνολογίας, βοηθώντας τον επιστήμονα να δομήσει στο σήμερα τις συνθήκες ενός φωτεινότερου αύριο.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- CEN. (2005). *EN 1993-1-1 (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- CEN. (2006). *EN 1993-3-1 (2006) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 3-1 : Towers, Masts and Chimneys - Towers and Masts*.
- CEN. (2007). *EN 1993-1-6 (2007) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures*.
- Craig, B., Zhao, O., & Real, E. (2020). Cold-formed stainless steel CHS Beam-columns – testing, simulation and Design.
- CSI. *CSI Knowledge Base*. Ανάκτηση από Technical Knowledge Base: <https://wiki.csiamerica.com/>
- DNVGL. (2016, April). *Support structures for wind turbines*. Ανάκτηση από <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0126-support-structures-for-wind-turbines.html>
- Donatas, J., Zenonas, K., & Algirdas, J. (2010). Static behaviour analysis of masts with combined. *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Gantes, C. (1993). *Modeling, Loading, and preliminary design considerations for tall guyed towers*. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004579499390027B>
- Gantes, C. J. (2021). *Design of cable and membrane structures, Class Notes*. Athens.
- Gerdes, J. (2019). *Kissing the Sky: The Pros and Cons of Ultra-Tall Wind Turbine Towers*. Ανάκτηση από Greentechmedia: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-pros-and-cons-of-ultra-tall-wind-turbine-towers>
- I. Lavassas, G. N. (2003). *Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind*. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029603000592>
- Koulatsou, K. G., Kazakis, G., Gantes, C. J., & Lagaros, N. D. (2020). Resonance Investigation and its Effects on Weight Optimization of Tubular Steel Wind Turbine Towers.
- Pfeifer. (2022). *Pfeifer Products*. Ανάκτηση από PV Tension Members: [https://www.pfeifer.info/en/products-services/products/lightweight-architecture/cable-and-rod-systems/pv-tension-members.html?force\\_sid=u02d3r02aj40qgd9cf11lidcem](https://www.pfeifer.info/en/products-services/products/lightweight-architecture/cable-and-rod-systems/pv-tension-members.html?force_sid=u02d3r02aj40qgd9cf11lidcem)
- RAE. (2022). Ανάκτηση από Γεωπληροφοριακός Χάρτης Ελλάδος: <https://geo.rae.gr/>
- Ramboll. (2019, April 5). *Ramboll.com*. Ανάκτηση από Innovative concept for tall onshore wind turbine towers: <https://ramboll.com/media/rgr/innovative-concept-for-tall-onshore-wind-turbine-towers>
- Rystad. (2022). Ανάκτηση από Rystad Energy Research and analysis: <https://www.airswift.com/blog/offshore-wind-energy-projects-uk-2022>
- Wikipedia. (2022). *Wind Turbine*. Ανάκτηση από [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine)